

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

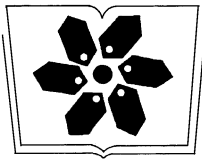
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....	华 尔, 李 佳, 董 洁, 等 (3975)
植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系	黎 磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)
基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....	李继峰, 李仁杰 (3998)
基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....	杨 谨, 陈 彬, 刘耕源 (4007)
内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....	颜 亮, 周广胜, 张 峰, 等 (4017)
典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....	裴 厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025)
长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....	巫 涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034)
厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性	姜 攀, 王明元 (4043)
Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系	贾 夏, 董岁明, 周春娟 (4052)
凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构	赵 丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062)
盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....	卢鑫萍, 杜 茜, 闫永利, 等 (4071)
菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响.....	张 林, 丁效东, 王 菲, 等 (4079)
闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....	王维奇, 王 纯, 曾从盛, 等 (4087)
高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....	武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094)
模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响	吴 林, 苏延桂, 张元明 (4103)
铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化	濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114)
不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....	周 玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123)
基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....	张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132)
黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....	李 志 (4139)
莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....	邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146)
不同蚯蚓采样方法对比研究.....	范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154)
亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....	涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160)
黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....	赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166)
苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....	骆 颖, 凌 冰, 谢杰峰, 等 (4173)
长江口中国花鲈食性分析.....	洪巧巧, 庄 平, 杨 刚, 等 (4181)
基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....	苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191)
镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理	曹 慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)
北方草地牛粪中金龟子的多样性.....	樊三龙, 方 红, 高传部, 等 (4207)
合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....	杨 林, 郭 骅, 毕守东, 等 (4215)
植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....	张 跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228)
基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....	杨丽花, 佟连军 (4236)
基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....	齐 静, 陈 彬, 戴 婧, 等 (4246)
专论与综述	
水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述	章光新 (4254)
松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展	马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261)
一种新的景观扩张指数的定义与实现	武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)
研究简报	
华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....	李 倩, 王 明, 王雯雯, 等 (4278)
美丽海绵提取物防污损作用.....	曹文浩, 严 涛, 刘永宏, 等 (4285)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-07



封面图说: 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106140792

杨丽花, 佟连军. 基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究. 生态学报, 2012, 32(13): 4236-4245.

Yang L H, Tong L J. Research of typical EIPs based on the social network analysis. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4236-4245.

基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究

杨丽花^{1,2}, 佟连军^{1,*}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以丹麦卡伦堡和广西贵港生态工业园为例,应用社会网络分析法分析典型生态工业园的组织结构和网络结构。用簇系数、平均最短距离、传递性以及核心-边缘结构来衡量其稳定性,分析其不同结构特征。卡伦堡生态工业园的簇系数为 0.715,远高于贵港生态工业园的 0.246,说明其聚合性较好;从最短距离长度来看,卡伦堡和贵港分别为 2.110 和 2.236,复杂性弱;从传递性来看,两者传递性皆低于 25%,节点之间联系性不够强;从核心-边缘结构来看,卡伦堡各节点之间的异质性(0.057)高于贵港(0.005),可见贵港参与主体的中心性较为均衡,而卡伦堡差异性较大。两者都以一个产业或者企业集团为网络核心;网络内其他节点联系不够紧密,长链条联结较少;网络复杂性弱。

关键词:社会网络分析法;生态工业园;产业生态化;产业共生

Research of typical EIPs based on the social network analysis

YANG Lihua^{1,2}, TONG Lianjun^{1,*}

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The eco-industrial park (EIP) is a new industrial organization form. It is the best choice to develop the EIP for the development of circular economy and energy conservation. Since the 1970s, the EIP has become a highlight in the field of development of the world's industrial park. Some developed countries, such as Denmark, the United States, Canada, Australia, Japan and so on, started to plan the construction of ecological industrial demonstration zone in the early 1970s, while developing countries actively constructed the EIPs in the late 1970s, the number of which increased rapidly.

For an EIP, the key to effectively reduce waste emissions and energy conservation in the circular economy is the structure of the enterprises network in the park. This article employed the social network analysis (Social Network Analysis, SNA) to analyze the structure of the enterprises network. SNA was derived as a set of mathematical analysis from the mathematics of graph theory by sociologists Harison White, and his successor Boorman, Director, Brieger and Freeman in the 1960s. It is an important method, which can not only depict the network morphology, properties and network structure and but also effectively evaluate the network structure. SNA is a structural analysis method. It involved in the data analysis, the network structure determining and the experience summarizing, whose object can be individuals, businesses, independent organizations or groups. The linkage or contact of the relationship of the objects is the flow channel to send resources (material or non material), and to build the relations link is seen as a "structure" of the network. So it is effective to analyze the organizational structure and network structure of the eco-industrial park.

Based on social network analysis, this article examines the organizational structure and network structure of typical EIPs taking cases of Kalunbdorg and Guigang EIPs. An index system including clustering coefficient, average shortest

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41071086)

收稿日期:2011-05-14; 修订日期:2012-02-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tonglj@neigae.ac.cn

distance, transitivity and core-periphery structure is established to measure their stability and analyzes the different structural features. The results show that Kalunbdorg EIP's clustering coefficient (0.715) and heterogeneity of all nodes (0.057) are both higher than those of Guigang EIP (0.246 and 0.005, respectively), implying a better agglomeration and a more balanced centrality in Kalunbdorg EIP. Whereas little difference exists between Guigang EIP (2.236) and Kalunbdorg EIP (2.210) in term of shortest distance, and the complexity of them is weak. Furthermore, the transitivity is less than 25% in both EIPs, which indicates a weak link between nodes. From the core-periphery structure, the heterogeneity between the nodes of the Kalundborg (0.057) is higher than Guigang (0.005). The centrality of Guigang participates in the main body is more balanced, while Kalundborg's difference is large.

It can be observed from the results that the two EIPs are both industrial symbiosis modes with one industry or enterprise group as the network core, resulting in a weak connection among other nodes in the network. In addition, a deficiency exists in the shortage of long chain links and network complexity in both EIPs.

This article studies the social network and the organizational structure of the EIP from the perspective of the industrial chain, and analyzes the relationship and their status of the various nodes in the network organization. Furthermore, the structural features of the overall network are summed up, and the main problems in the development of the EIP are analyzed. By these analysis, we can provide a technical reference for the construction and development of EIP in China, in order to avoid China's current eco-industrial park construction blindly and repeatedly, which is of great significance for the different parts of the EIP construction as well as regional economic development.

Key Words: social network analysis; eco-industrial park; industrial ecology; industrial symbiosis

生态工业园(EIP)是一种新型的产业组织形态,是发展循环经济、节约能源的最佳选择。20世纪70年代以来,生态工业园区开始成为世界产业园区发展领域的主题,一些发达国家如丹麦、美国、加拿大、澳大利亚、日本等很早就开始规划建设生态产业示范园区,发展中国家也在积极兴建生态工业园区,工业园区的数量迅速增加。

学者们开始对生态工业园进行研究。1995年Cote和Hall提出生态工业园是保持自然与自然资源,减少生产、材料、能源、保险与治理费用和负债,提高操作效率、质量、工人健康和公众形象,提供来自废料利用及其规模的收益机会的工业系统^[1]。此后很多学者对生态工业园区又给出了多种定义^[2-4]。生态工业园是产业集群中相互依赖性很强的企业、知识生产机构、中介结构和客户通过增值链以复杂的耦合方式相互联系形成的网络。网络中的这些企业、大学、科研机构、政府、中介服务机构、风险投资机构以“节点”的形式存在,他们之间发生的关系则为“边”,包括经济交易、技术交流、知识传播、人员流动、资本投入等。这些网络中的“边”也可以称为产业生态链,它们通过类似于自然界中食物链关系相互依存、相互制约^[5]。生态工业园区的实质是通过模拟自然系统,建立产业系统中“生产者—消费者—分解者”的循环途径,实现物质闭路循环和能量多级利用而形成的工业共生体^[1],从而达到经济与环境“双赢”的目的。生态工业园大致分为三类:全新规划型,现有改造型和虚拟EIP。

学者们从不同的角度对生态工业园进行了研究。①模式研究:我国学者佟连军、石磊、高迎春、李波等从不同的角度对国外生态工业园的模式进行分析,如实体型、虚拟型、虚实结合型模式;零排放生态工业园、生态发展工业园等,以此为我国生态工业园的建设提供模式借鉴^[6-10]。②评价研究:学者主要采取主成分分析法、生态效率理论与方法、以物质流及层次分析法对生态工业园进行评价研究,如刘宁等运用主成分分析法对产业共生体生态效率进行评价^[11];吴小庆、彭涛、商华等运用生态效率的理论与方法对生态产业园进行评价研究^[12-13];石焱等从物质流角度对生态工业园区物质代谢进行分析,并构建了物质流模型与指标体系^[14]。③建设研究:刘辉等从生态工业园建设的角度提出应考虑企业年龄因素与环境污染的关系^[15]。④结构研究:王政等运用结构洞理论对生态群落(生态工业园)进行关联度赋值研究^[16];刘宁等从环境经济学的角度运用非

线性经济学构建模型,探讨了生态产业共生系统节点稳定性^[17]。⑤功能研究:有学者针对生态工业园区功能的定义,生态工业园功能及其建设的必要性和重要性进行研究。虽然学者们对生态工业园进行了大量研究,但从产业组织空间结构的角度对生态工业园研究还比较少见。

本文基于此,从工业链的角度运用社会网络分析法研究生态工业园的组织结构和网络结构,分析各个节点之间存在的关系,它们在整个网络组织中所处地位,以及整个网络组织的特征,得出生态工业园整体结构特征及存在的主要问题,从而为生态工业园的研究开拓新的研究视角,为我国生态工业园区的建设和发展提供技术借鉴,避免中国当前生态工业园建设的盲目性和重复性,这对于不同地区的生态工业园建设乃至区域经济的发展都具有重要意义。

1 数据资料与研究方法

1.1 数据资料

本文以国内外学者以丹麦卡伦堡生态工业园区(以下简称“卡伦堡生态工业园”)、我国广西贵港生态工业园(制糖)园区(以下简称“贵港生态工业园”)的研究为基础,选择国内外权威文献中工业园的链网结构图及相关数据作为数据资料来源,分析其网络、组织结构特征。丹麦卡伦堡生态园自 20 世纪 70 年代开始建立,经过多年的稳定发展,已成为世界生态工业园建设的典范,成为国内外学者研究的重点和热点,同时也成为世界上其他生态产业园区可供借鉴的范本。贵港生态工业园 2001 年成为国家环境保护总局正式确认的 15 个国家生态工业示范区之一,它以贵糖(集团)股份有限公司为核心,通过产业生态学原理设计整合对贵港市其它制糖及相关企业进行工业生态化重构,形成横向耦合,纵向闭合的企业集团型生态工业园区^[18-19]。

卡伦堡生态工业园和贵港生态工业园在中小尺度的生态工业园中具有典型性。本文拟分析生态工业园各个节点之间的关系,以及各节点的紧凑度,节点之间的集中度。大尺度的生态工业园和虚拟性生态工业园由于网络内节点较多,且它们之间联系过于复杂,难以表现工业园区结构特征,因此选择小尺度的生态工业园较能体现其网络特征,且现有生态工业园中小尺度的实体生态工业园居多。卡伦堡生态工业园是以工业为核心的生态工业园区,且发展较为成熟,成为各个国家建立生态工业园参考的典范,也成为学者研究的热点。贵港生态工业园是以农业为核心的生态工业园,但其也包含了工业和农业之间的相互联系,即节点之间的联系,是我国生态工业园建设的成功案例。因此无论是从方法论的角度还是从工业园本身的特征出发,两者都具有代表性。

1.2 方法及指标选取

1.2.1 社会网络分析法

社会网络分析法(Social Network Analysis, SNA)是 20 世纪 60 年代以来社会学大师怀特(Harison White)及其后继者伯曼(Boorman)、布里格(Brieger)和弗里曼(Freeman)等人由数学中图论理论推导出来的一套数学分析方法,可以有效地对网络结构进行测量^[20-21]。

社会网络分析法是刻画网络形态、特性和网络结构的一种重要分析方法^[22],可以有效地对网络结构进行测量和评价。从数据分析,确定网络结构,到归纳总结经验,其主体可以是个体、企业、独立组织或各种团体,而行为主体之间的关系纽带或联系是资源(可以是物质的,也可以是非物质的)传送或流动的通道,构建网络的关系纽带被看作是网络的“结构”,因此 SNA 是一种结构分析方法^[21]。目前主要用于产业集群^[23]、城市群等社会研究的各个领域。

1.2.2 网络结构测度指标选择

(1) 簇系数

网络簇系数 C 表征网络的局部聚集水平。设节点 i 有 k_i 个邻接节点,这些邻接节点之间实际存在的关系数为 E_i ,节点簇系数 C_i 为 E_i 与由邻接节点组成的完全图的边数之比^[24],即:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (1)$$

C_i 与节点 i 的局部聚集水平正相关,取值区间均为 $[0,1]$ 。簇系数主要反映网络的局部性质,与网络的局部聚集水平正相关^[7],表征生态工业园内局部聚集水平的高低。

(2) 平均最短距离

平均最短距离用 L 表示,其为网络上要素传递的便捷水平。 L 是指遍历所有节点对之间距离的平均值^[25]。当节点数为 n 时, L 可以表示为:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}n(n+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad (2)$$

式中, L 主要反映网络的全局特性,与网络上要素传递的便捷水平负相关。

具有小世界的结构特征的网络,具有短的平均最短路径以及高的簇系数^[26],簇系数与平均最短距离这两个静态几何量用来反映网络是否具有小世界的结构特征。

(3) 传递性

在无向网络中,具有三条边的三元组为传递型三元组^[27],是刻画网络特征的重要指标。在有向网络中,传递型三元组是指若结点 A 指向结点 B(有向边),B 指向 C,则 A 指向 C^[21]。传递型三元组显示了良好的平衡能力,因此选择它作为联系有效性的衡量指标,而结构洞是网络联系中出现问题的焦点,也是改进网络的重点方向。网络传递性通常采用以下公式进行计算:

$$T = M(AB, BC, AC) / M(AB, BC) \quad (3)$$

其中分子是传递型三元组的个数,分母是至少包括边 AB 和 BC 的三元组的个数。用传递性来表征网络结构联结的有效性,为完善网络结构提供借鉴。

(4) 核心-边缘结构

核心-边缘(Core-periphery)结构是由若干元素相互联系构成的一种中心紧密相连、外围稀疏分散的特殊结构^[28],处于核心区域的节点将不能被继续划分为独立的凝聚子群,边缘节点仅与各自相对的某些核心节点保持紧密关系,外围节点彼此联系稀疏并呈现散射状边缘分布。用 UCINET6 进行核心边缘结构的拟合优度测度分析。核心-边缘结构是最有绩效和最易持续发展的结构,具有很强的鲁棒性和稳定性^[29]。进行核心-边缘结构分析的目的是分析生态工业园中节点的性质,即处于核心地位还是边缘地位。

(5) 结构洞

Burt 用结构洞来表示冗余的联系,他认为“非冗余的联系人被结构洞所连接,一个结构洞是两个行动者之间的非冗余的联系^[30]”,指标的选取应主要考虑四个方面的因素:有效规模;效率;限制度;等级度。等级度的计算公式为:

$$H = \frac{\sum_j \left(\frac{C_{ij}}{C/N} \right) \ln \left(\frac{C_{ij}}{C/N} \right)}{N \ln(N)} \quad (4)$$

式中, N 是节点 i 的个体网规模, C/N 是各个节点的限制度的均值,分母代表最大可能的总和值。当一个行动者的每个联络人的限制度都一样时,该测度达到最小值 0。反之,当所有的限制都集中于一个行动者时,该值就达到最大值 1。

2 案例分析

2.1 组织结构

在卡伦堡工业共生体系中主要有五家企业、单位:阿斯耐斯瓦尔盖(Asnaesvaerket)发电厂、斯塔朵尔(Statoil)炼油厂、挪伏挪尔迪斯克(NovoNordisk)公司、吉普洛克(Gyproc)石膏材料公司、卡伦堡市政府。此外,园内还有硫酸厂、水泥厂、农场等企业参与到了工业共生体系中。根据徐大伟等的分析,1995 年卡伦堡工业共生体系的产业构成如图 1。

在贵港生态工业园主要围绕制糖厂展开产业链连结,有发电厂、养鱼场、纸浆厂、化肥厂和酿酒厂(图 2)。

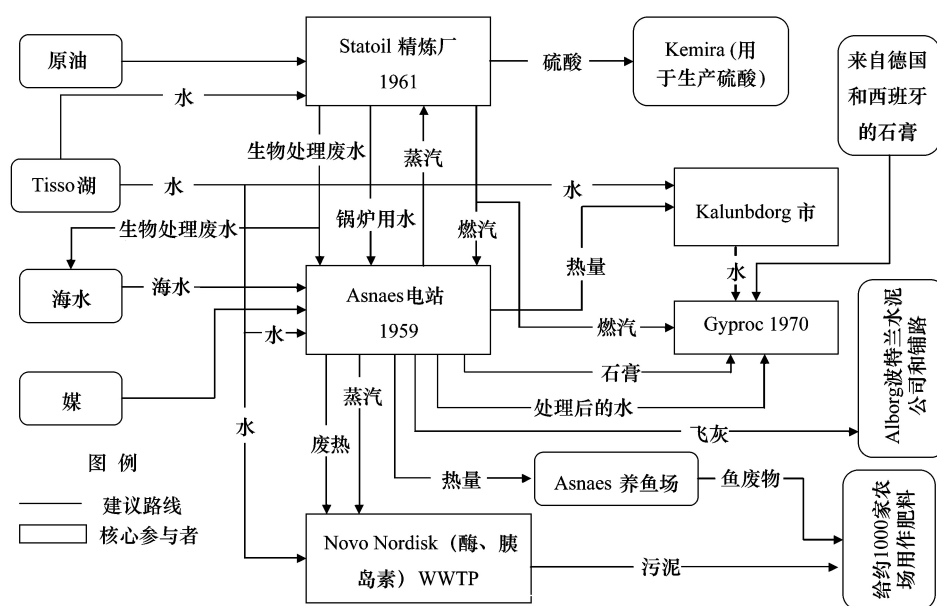
图 1 卡伦堡生态工业园产业链图^[5,25]

Fig. 1 Industrial components of Kalundborg EIP

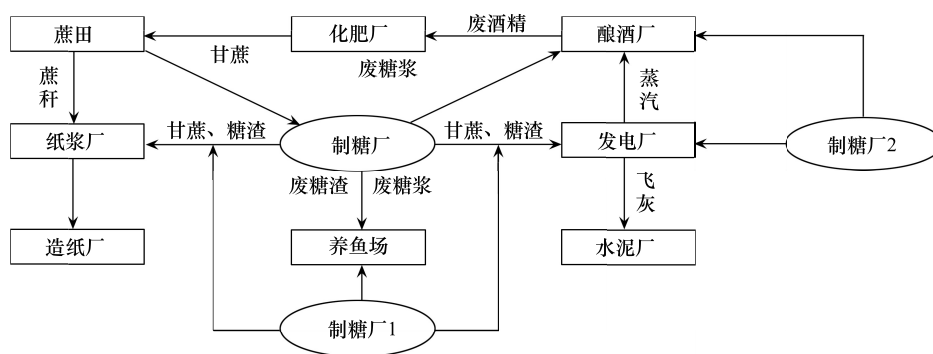
图 2 贵港生态工业园产业链图^[6-7]

Fig. 2 Industrial components of Guigang EIP

2.2 网络结构

按照 UCINET 6 进行网络结构分析的要求,建立组织内部不同行为主体之间的关系,根据案例中主体之间的物质流向,构建两个生态工业园的网络结构图(图 3 和图 4),图中用边和箭头表征物质能量以及废弃物流向的有向网络图。

2.3 卡伦堡生态工业园网络结构特征

用全面聚类系数和加权全面聚类系数来衡量生态工业网络结构中节点之间的联系性,其值越大说明系数内部各节点之间联系性越强。

全面聚类系数是网络内所有成员之间的聚类系数的平均值。加权全面聚类系数是根据成员对外联系系数的大小加权后计算的全面聚类系数。卡伦堡生态工业园的全面聚类系数为 0.715,加权后的全面聚类系数为 0.375,内部平均各个主体之间的联系较好,聚合性较好。

从表 1 可以得出,长度为 2 的联结对共出现 88 次,频度最高,占总数的 48.4%,长度为 3 的出现了 48 次,长度为 1 的出现了 40 次,比例分别为 26.4% 和 22.0%,长度为 4 的联结对最少,仅占全部连接对数的 3.3%,可见在系统内部长链条很少。在相互联结的主体之间的平均最短距离为 2.110,紧凑度为 0.558,宽度为 0.442,紧凑度稍大于宽度,说明生态工业园内不同参与主体聚合性一般,主要通过链状关系联结。

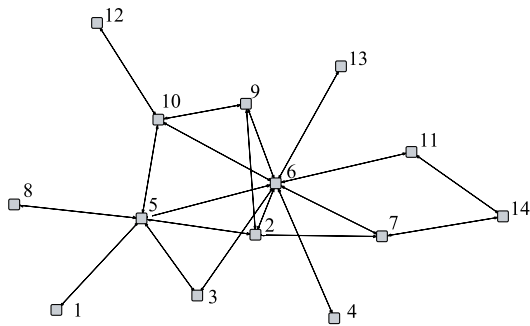


图3 卡伦堡生态工业园网络结构

Fig.3 Network structure of Kalunbdorg EIP

1. 原油; 2. Tisso 湖; 3. 海水; 4. 煤; 5. Statoil 精炼厂; 6. Asnaes 电站; 7. Novo Nordisk; 8. Kemira; 9. Kalunbdorg 市; 10. Gyproc; 11. Asnaes 养鱼场; 12. 石膏; 13. 水泥公司和铺路; 14. 农用肥料

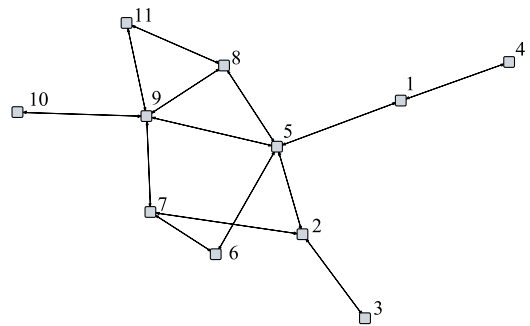


图4 贵港生态工业园网络结构

Fig.4 Network structure of Guigang EIP

1. 蔗田; 2. 纸浆厂; 3. 造纸厂; 4. 化肥厂; 5. 制糖厂; 6. 养鱼场; 7. 制糖厂 1; 8. 酿酒厂; 9. 发电厂; 10. 水泥厂; 11. 制糖厂 2

由于生态工业园内节点之间的联系纽带主要为能量、废弃物和水循环利用等,而且受废弃物等供给数量方面的影响,往往只有一个再利用主体,即通过产“废”主体联结的主体较少,也使得产业共生体的联系主要通过链条联结,而聚合性往往不高。因此说明,本文选择卡伦堡生态工业园具有较强的代表性。

传递性分析结果显示,卡伦堡生态工业园中共存在不同类别的三元组结构数为 2184 个,具有两条边的三元组结构数为 360 个,簇型三元组结构数为 36 个,仅占总数的 1.65%,占具有两条边三元组数的 10%,而结构洞型三元组结构数比例为 25.0%,网络相对具有较高的可达性潜力,但是传递性指数较低,也说明产业共生体中的循环链条比例较少,有效联系数量有限,网络联系稳定性较差。

表 1 卡伦堡生态工业园区不同网络距离频率表

Table 1 Frequencies of Geodesic Distance in Kalunbdorg EIP

序号 Number	频率 Frequency	比例 Proportion
长度为 1	40.000	0.220
长度为 2	88.000	0.484
长度为 3	48.000	0.264
长度为 4	6.000	0.033

从表2分析可知节点1、4、8、12、13属于第一等级,这五个节点的等级度最高。节点6属于第9等级,其

表 2 卡伦堡生态工业园区结构洞指标衡量指数表

Table 2 Kalunbdor EIP's Structural holes index table

序号 Number	等级 Degree	有效规模 Effsize	效率 Efficie	限制度 Constr	等级度 Hierarc	个体网连接度 Egobet	间接密度 Indirect	密度 Density
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	4.000	2.500	0.625	0.684	0.168	3.000	0.563	0.500
3	2.000	1.000	0.500	1.125	0.000	0.000	0.500	1.000
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.0000
5	6.000	5.000	0.833	0.359	0.156	21.000	0.375	0.200
6	9.000	7.667	0.852	0.245	0.071	53.333	0.426	0.167
7	3.000	2.333	0.778	0.611	0.052	4.000	0.333	0.333
8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
9	3.000	1.667	0.556	0.840	0.074	1.000	0.556	0.667
10	4.000	3.000	0.750	0.535	0.092	7.000	0.417	0.333
11	2.000	2.000	1.000	0.500	0.000	2.000	0.000	0.000
12	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
13	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
14	2.000	2.000	1.000	0.500	0.000	2.000	0.000	0.000

1. 原油; 2. Tisso 湖; 3. 海水; 4. 煤; 5. Statoil 精炼厂; 6. Asnaes 电站; 7. Novo Nordisk; 8. Kemira; 9. Kalunbdorg 市; 10. Gyproc; 11. Asnaes 养鱼场; 12. 石膏; 13. 水泥公司和铺路; 14. 农用肥料

有效规模为 7.667,效率为 0.852,限制度为 0.245,在网络中受点之间的受限制度最低,可见其他节点对此节点的限制度较小,等级度为 0.071。节点 8 是卡伦堡市政府,节点 8 属于第一等级的节点,与其他节点联系密切,可见政府在生态工业园中起到了一定的作用。

基尼系数在 0.2 以下表示收入分配绝对平均,在 0.2—0.3 之间表示比较平均,在 0.3—0.4 之间表示比较合理,在 0.4—0.5 之间表示差距过大,0.5 以上表示高度不平均。核心边缘结构分析显示,卡伦堡产业共生体中基尼系数为 0.406,表明在卡伦堡生态工业园中节点之间的联系性不均衡,存在差异性。相关性为 0.638,异质性为 0.057,推荐核心成员数为 1,而中心势达到了 0.874。可见卡伦堡生态工业园参与成员之间的中心性存在高度的不均衡性,中心势向一个成员高度集中,网络核心边缘结构较为突出。虽然核心边缘结构有利于产业共生体内不同参与者的联系,有利于提高网络的运行效率。但是过多的联系集中于少数几个节点也大大增强了网络的脆弱性,一旦这几个节点运行不畅将会导致系统崩溃。因此网络系统过度依赖少数几个节点,不利于生态工业园区的持续高效发展。

2.4 贵港生态工业园区网络结构特征

贵港生态工业园区内网络分析中全面聚类系数为 0.246,加权聚类系数为 0.188,网络中成员联系密度较小,中介联系仍占较大比例,影响了网络系统的稳定性。

从路径长度来看,距离为 2 的联结对出现 40 次,频度最高,占总数的 36.4%,距离为 3 的联结对出现 30 次,比例为 27.3%,距离为 1 的联结对为 28 次,占 25.5%,距离为 4 的联结对出现 12 次,占到了 10.9%,链状联系相对来说比较均衡。在相互联结的节点之间平均最短距离为 2.236,说明生态产业园区内部参与主体之间直接联系相对较少。但是,从紧凑度来看,分值为 0.555,而宽度为 0.445,紧凑度和宽度较为相近,说明系统内主要为链状联系,不同参与主体聚合性相对较好(表 3、表 4)。

表 3 贵港生态工业园区不同网络距离频率表
Table 3 Frequencies of Geodesic Distance in Guigang EIP

序号 Number	频率 Frequency	比例 Proportion
长度为 1	28.000	0.255
长度为 2	40.000	0.364
长度为 3	30.000	0.273
长度为 4	12.000	0.109

表 4 贵港生态工业园区结构洞指标衡量指数分析表

Table 4 Guigang EIP's Structural holes Index table

序号 Number	等级 Degree	有效规模 Effsize	效率 Efficie	限制度 Constra	等级度 Hierarc	个体网连接度 Egobet	间接度 Indirect	密度 Density
1	2.000	2.000	1.000	0.500	0.000	2.000	0.000	0.000
2	3.000	3.000	1.000	0.333	0.000	6.000	0.000	0.000
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
5	5.000	4.600	0.920	0.300	0.050	18.000	0.200	0.100
6	2.000	2.000	1.000	0.500	0.000	2.000	0.000	0.000
7	3.000	3.000	1.000	0.333	0.000	6.000	0.000	0.000
8	3.000	1.667	0.556	0.840	0.074	1.000	0.556	0.667
9	5.000	4.200	0.840	0.382	0.091	15.000	0.333	0.200
10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
11	2.000	1.000	0.500	1.125	0.000	0.000	0.500	1.000

1. 蔗田; 2. 纸浆厂; 3. 造纸厂; 4. 化肥厂; 5. 制糖厂; 6. 养鱼场; 7. 制糖厂 1; 8. 酿酒厂; 9. 发电厂; 10. 水泥厂; 11. 制糖厂 2

传递性分析结果显示,研究案例中共出现不同类别三元组结构数 990 个,其中具有两条边的三元组结构数 168 个,而簇型三元组结构数为 12 个,占总数的 1.21%,传递指数为 18.75%。簇型三元组结构数相对较小,传递性指数不高,主要是由于网络成员中直接联系数较少,也说明增加成员之间的直接联系有利于增强网络联系的稳定性。

从核心边缘结构分析结果来看,经计算贵港生态工业园区的基尼系数为 0.131,异质性为 0.005,推荐核心成员数为 4,中心势为 0.884,说明产业集群内部成员之间中心性差异较小,相对较为均衡,3 个成员(共 11 个参与者)组成网络结构核心,核心边缘结构并不明显,局部的联系堵塞也不会影响到整体网络的运行。

从表中分析可知节点 3、4、10 属于第一等级,这三个节点的等级度最高,有效规模最小,均为 1。节点 5、9 属于第 5 等级,其有效规模都在 4.00 之上,效率大于 0.840,限制度为 0.30—0.39 之间,在网络中该点受限制程度最低,可见其他节点对该节点的限制度较小。

从限制度来看,节点 11 受其相联结节点的限制度最高,为 1.125,节点 5 由于和较多节点相联结,因此受其中某一节点的限制度较低,为 0.300。其余节点介于两者之间。

2.5 特征对比分析

卡伦堡生态工业园和贵港生态工业园都属于工业共生体,两者既存在共性,也存在差异性。按照反映工业园区网络结构特征的衡量指标角度分析。

(1)从全面聚类系数来看:卡伦堡生态工业园区聚类系数远远大于贵港生态工业园区,说明卡伦堡生态产业园区各节点之间联系较松散,直接连接少。

(2)从最短距离长度来看:两者相差很少;从传递性来看,两者各节点参与主体间的联系不够稳定;从核心边缘结构来看,卡伦堡生态工业园各节点之间的异质性高于贵港生态工业园,可见贵港参与主体的中心性较为均衡,而卡伦堡差异程度较大。

(3)从网络复杂性来看(表 5):网络复杂性是指网络个体单元不具有、必须通过网络整体涌现、介于完全规则(有序)和完全随机(无序)之间的一类性质。复杂网络有着三个基本的统计特征:小世界性、无标度性和集聚性。如何度量网络复杂性,即要对规则网络和随机网络予以定义。Watts 等曾给出完全规则网络的定义,用 n 和 k 分别代表网络的节点数和节点平均度数,理论分析给出:当 p 趋于 0 时,网络涌现出高簇系数、高特征路径长度的正规特征, $C_{reg} \approx 3/4, L_{reg} \approx n/2k$;当 p 趋于 1 时,网络涌现出低簇系数、低特征路径长度的随机特征, $C_{ran} \approx k/n, L_{ran} \approx \ln n / \ln k$;将真实网络的 C 值和 L 值表示为 C_{real} 和 L_{real} ,若 $C_{ran} < C_{real} < C_{reg}$,且 $L_{ran} < L_{real} < L_{reg}$,可判定真实网络具有复杂性;若 $C_{real} / C_{ran} > L_{real} / L_{ran}$,可判定网络具有小世界性^[1,17]。小世界网络通常呈现局部高度聚集和整体高度连通。对卡伦堡生态工业园和贵港生态工业园的对比分析,发现二者都不具有复杂性与小世界性网络特征。

(4)稳定性对于维持生态工业园区系统良好运转并获得成功至关重要^[22]。生态工业园区的稳定性是指外部扰动引起系统内部失调时,随时间的推移,系统能否通过自身的调节功能恢复供需平衡状态。复杂性除了包括系统中各个尺度的多样性以外,还包括这些多样的组分之间的联结和作用,描述了系统相互关系和相互作用的动态过程。

表 5 不同生态工业园区网络结构特征
Table 5 Network Characters of Different EIP

园区 EIP	节点数 Node	平均度	簇系数			最短距离长度			小世界性 Small world	复杂性 Complexity
			Clustering coefficient			Lenth of shortest distance				
			随机系数 C_{ran}	实际系数 C_{real}	高系数 C_{reg}	随机长度 L_{ran}	实际长度 L_{real}	高长度 L_{reg}		
卡伦堡 Kalunbdorg	14	2.86	0.204	0.146	0.75	2.51	2.110	2.45	无	无
贵港 Guigang	11	2.55	0.232	0.188	0.75	2.56	2.236	2.16	无	无

两个研究样本的生态网络的规模小,节点数少,节点之间关联非常密切,这些因素抑制了其复杂性特征的涌现^[12]。节点数目的增加对于网络组织的稳定性具有一定的增强作用,特别是处于核心地位的节点数目的增加会使得网络更加稳定。而边缘节点的增加也会对其所直接连接的节点数目起到影响作用。

3 结论与讨论

3.1 结论

运用软件 UCINET 6 对两个典型生态工业园区的网络、组织结构特征的分析,得出以下结论:

(1)生态产业园多以某一企业集团作为生态工业园区共生网络的核心节点,样本中卡伦堡生态工业园区以电站,贵港生态工业园区以制糖厂为核心节点,以此为中心展开产业链条的衍生和强化。核心节点与网络中的其他节点联系较多,有效规模大,效率高,对其他节点的影响较大,其他节点对其的限制度低,在园区网络中居于核心地位。其余节点大都与核心节点联结,但相互之间联结少,方式比较单一,整体比较松散。网络中,长链条联结对数量少,多为短距离联结,并且节点之间的横向连接少,网状联系薄弱。

(2)研究样本由于节点数量少,网络复杂性弱,簇系数低且无小世界性,整体网络并没有表现出复杂性。尤其整个网络都围绕核心节点展开,一旦核心节点受到外界干扰,势必对整个网络产生巨大影响,因此整个网络的稳定性弱,对抗园区外部的抵抗力差。

(3)政府在园区中作为一个节点,起到了积极的推动作用。卡伦堡市政府是整个生态工业园的一个节点,连接了网络中的其他节点,增强了网络连接的复杂性。政府在贵港生态工业园的建设、审批以及管理中都起到了积极的指导作用。因此政府应统筹根据各个企业的产排污情况,实施奖励政策鼓励企业进入生态工业园,以一个或多个企业为核心形成多产业链条的生态网络,对生态工业园的建设在政策、资金等方面采取倾斜,并作以一个节点的形式存在于生态网络中。

3.2 讨论

由于研究资料和数据搜集的困难,本文只选取了国外最典型的卡伦堡生态工业园和国内最典型的贵港生态工业园,虽然在一定程度上代表了典型生态工业园的基本特征,但并不能代表所有生态工业园的特征,因此在以后的研究中应该广泛收集资料,尽可能多的搜集国内外典型的生态工业园,对生态工业园的产业组织结构进行深入研究。

References:

- [1] Côté R P, Hall J J. Industrial parks as ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 1995, 3(1/2): 41-46.
- [2] President's Council on Sustainable Development Eco-industrial Park Workshop Proceedings. Washington, DC:1996.
- [3] Ernest A. Lowe. EIPs, EINs, and BPXs. Clarifying Terms in Eco-Industrial Development. Indigo Development Working Paper 12. RPP International, Indigo Development Center, 2001.
- [4] Korhonen J, Snakin J P. Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. *Ecological Economics*, 2005, 52(2): 169-186.
- [5] Xu D W, Wang Z Y, Xie C X. Industrial symbiotic link between business analysis and comparison- to Denmark Kalundborg industrial symbiosis for example. *Industrial Technology and Economy*, 2005, 24(1): 63-66.
- [6] Han L, Song T, Tong L J. Models of typical eco-industrial parks and references to China. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(2): 237-243.
- [7] Guo L. Reaearch of Industrial Symbiosis Evolution and Technology Motive [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [8] Song Y M, Shi L. Complexity measurements for Kalundborg and Gongyi industrial symbiosis networks. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2008, 48(9): 1441-1444.
- [9] Gao Y C. Research on Regional Industrial Ecological Transition and its Spatial Organization. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, 2010.
- [10] Li B. The Study of Ecological Industrial Park on the Second Thermal Power Plant in Chang Chun. Changchun: Northeast Normal University, 2007.
- [11] Liu N, Wu X Q, Wang Z F, Wang Y, Lu G F, Wen J F. Using main-component to analyze the eco-efficiency of eco-industry symbiosis system. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(6): 831-838.
- [12] Peng T, Li L J, Lu H F. The eco-efficiency of industrial park: example of Jiufa Eco-industrial Park. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1611-1616.
- [13] Shang H, Wu C Y. Assessment of eco-industrial parks based on eco-efficiency. *Journal of Dalian University of Technology: Social Sciences*, 2007, 28(2): 25-29.
- [14] Shi Y, Yang J X, Liu J R, Chen B, Wang R S. The exploration of material metabolism based on MFA for Eco-Industrial Parks. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 228-237.
- [15] Liu H, Liang M Y, Liu W M. The relevance research of corporation age in industrial park and environmental pollution. *Ecological Economy*, 2011, (1): 37-40.

- [16] Wang Z, Shi L, Jia X P. Weighted connectance for industrial communities based on structural holes theory. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 810-814.
- [17] Liu N, Yang L, Wu X Q, Wen J F, Lu G F. Research on nodal stability of an eco-industry symbiosis system. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3828-3834.
- [18] Yuan J L, Liu Z. Ecologically restructuring sugar-making industry in China. *China Population, Resources and Environment*, 2002, 12(4): 118-121.
- [19] Duan N, Sun Q H, Fu Z Q, Yuan J L. An analysis for eco-industry model of China's canesugar industry and its application. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(4): 29-32.
- [20] Luo J D. *Social Network Analysis*. Beijing: Social Science Academic Press, 2005: 1-5.
- [21] Wasserman S, Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 5-20.
- [22] Li E L, Li X J. Social network analysis approach in the industrial cluster studies-the case study of the steel measuring tape cluster in Nanzhuang village, Yucheng County, Henan Province. *Human Geography*, 2007, 22(6): 10-15, 128-128.
- [23] Han Y G, Jiao H F, Li J F. Mechanism and network characteristics of industrial cluster in provincial border regions of China: a case study of wear-resisting casting industrial cluster in Ningguo of Anhui Province. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 814-826.
- [24] Watts D J. Networks, dynamics, and the small-world phenomenon. *American Journal of Sociology*, 1999, 105(2): 493-527.
- [25] Ehrenfeld J, Gertler N. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, 1997, 1(1): 67-79.
- [26] Amaral L A N, Barrat A, Barabási A L, Caldarelli G, de los Rios P, Erzan A, Kahng B, Mantegna R, Mendes J F F, Pastor-Satorras R, Vespignani A. Virtual Round Table on ten leading questions for network research. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2004, 38(2): 143-145.
- [27] Yang B. *Research on Characterizing and Modeling the Structure of Complex Social Networks* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [28] Borgatti S P, Everett M G. Models of core/periphery structures. *Social Networks*, 1999, 21(4): 375-395.
- [29] Krebs V, Holley J. *Building Smart Communities through Network Weaving*. <http://www.orgnet.com/BuildingNetworks.pdf>. 2008.
- [30] Burt R S. *Structural Holes: the Social Structure of Competition*. Cambridge: Harvard University Press, 1992.

参考文献:

- [5] 徐大伟, 王子彦, 谢彩霞. 工业共生体的企业链接关系的分析比较——以丹麦卡伦堡工业共生体为例. *工业技术经济*, 2005, 24(1): 63-66.
- [6] 韩良, 宋涛, 佟连军. 典型生态产业园区发展模式及其借鉴. *地理科学*, 2006, 26(2): 237-243.
- [7] 郭莉. 工业共生进化及其技术动因研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [8] 宋雨萌, 石磊. 工业共生网络的复杂性度量及案例分析. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48(9): 1441-1444.
- [9] 高迎春. 区域产业生态化及其空间组织研究. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2010.
- [10] 李波. 长春热电二厂生态工业园建设模式研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2007.
- [11] 刘宁, 吴小庆, 王志凤, 王远, 陆根法, 温剑锋. 基于主成分分析法的产业共生系统生态效率评价研究. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(6): 831-838.
- [12] 彭涛, 李林军, 陆宏芳. 产业园生态效率评价——以九发生态产业园为例. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1611-1616.
- [13] 商华, 武春友. 基于生态效率的生态工业园评价方法研究. *大连理工大学学报: 社会科学版*, 2007, 28(2): 25-29.
- [14] 石磊, 杨建新, 刘晶茹, 陈波, 王如松. 基于 MFA 的生态工业园区物质代谢研究方法探析. *生态学报*, 2010, 30(1): 228-237.
- [15] 刘辉, 梁明易, 刘伟明. 工业园内企业年龄构建与环境污染相关性研究. *生态经济*, 2011, (1): 37-40.
- [16] 王政, 石磊, 贾小平. 基于结构洞理论的产业生态群落关联度赋值方法. *生态学报*, 2009, 29(2): 810-814.
- [17] 刘宁, 杨莉, 吴小庆, 温剑锋, 陆根法. 生态产业共生系统节点稳定性. *生态学报*, 2009, 29(7): 3828-3834.
- [18] 元炯亮, 刘忠. 制糖工业生态化重构——以贵糖集团为例. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(4): 118-121.
- [19] 段宁, 孙启宏, 傅泽强, 元炯亮. 我国制糖(甘蔗)生态工业模式及典型案例分析. *环境科学研究*, 2004, 17(4): 29-32.
- [20] 罗家德. *社会网分析讲义*. 北京: 社会科学文献出版社, 2005: 1-5.
- [22] 李二玲, 李小建. 基于社会网络分析方法的产业集群研究——以河南省虞城县南庄村钢卷尺产业集群为例. *人文地理*, 2007, 22(6): 10-15, 128-128.
- [23] 韩玉刚, 焦华富, 李俊峰. 中国省际边缘区产业集群的网络特征和形成机理——以安徽省宁国市耐磨铸件产业集群为例. *地理研究*, 2011, 30(5): 814-826.
- [27] 杨波. 复杂社会网络的结构测度与模型研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

DOI: 10.5846/stxb201106120776

齐静,陈彬,戴婧,张洁茹,陈绍晴,杨谨. 基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例. 生态学报, 2012, 32(13): 4246-4253.

Qi J, Chen B, Dai J, Zhang J R, Chen S Q, Yang J. Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4246-4253.

基于生命周期的户用沼气系统可用能核算 ——以广西恭城瑶族自治县为例

齐 静, 陈 彬*, 戴 婧, 张洁茹, 陈绍晴, 杨 谨

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 发展沼气生态农业可以实现资源的综合利用, 带来经济效益与生态效益, 同时解决我国农村地区能源短缺和环境污染问题。明确沼气系统内部的物质能量转化利用情况, 可为沼气农业系统优化和效益提升提供科学依据。提出基于生命周期的户用沼气系统可用能核算方法, 并以全国生态农业示范县——广西恭城瑶族自治县为例, 核算了该县典型户用沼气系统建设、运行和利用单元投入产出的可用能流, 分析了整个系统的可用能转化与利用效率。结果表明: 系统的可用能投入为 (1.06×10^8) kJ/a, 可用能产出为 (5.00×10^7) kJ/a, 主要产出形式为沼渣; 可用能转化率为 48.82%, 利用率为 21.60%, 其中沼气利用效率最高; 系统产生的环境排放为 (3.42×10^5) kJ/a, 主要形式为系统利用单元沼气燃烧产生的 CO_2 。由此可见, 沼气生态农业可通过增加转化环节实现农业废弃物的再利用, 系统可用能效率具备极大的提升空间, 系统可持续性有待加强。可以考虑从改进工艺技术和改善发酵环境两方面提高户用沼气系统能量转化的能力, 通过沼渣沼液综合利用技术方面的创新提高户用沼气系统的可用能利用效率。生命周期可用能核算方法可以更全面的反映系统的能量利用效率, 便于诊断薄弱环节, 为系统优化提供依据。

关键词: 户用沼气系统; 生命周期分析; 可用能

Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi

QI Jing, CHEN Bin*, DAI Jing, ZHANG Jieru, CHEN Shaoqing, YANG Jin

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Biogas-linked agro-ecosystem can bring in economic and environmental benefits via integrated resource utilization, which provides an energy consuming pattern that has prominent advantages in relieving energy shortage and reducing environmental pollution. It is important to make clear how materials and energy convert in the agro-ecosystem, because the facts could suggest us how to improve the performance of the agro-ecosystem and get more benefits. Exergy of a system in a certain environment is defined as the amount of work that can be extracted from the system, which can be regarded as a uniform measure for different forms of energy and different states of matter. This paper presents an exergy-based life cycle accounting method for household biogas system. The proposed method is applied to a case study of Gongcheng as a “National Eco-agriculture Demonstration County” due to its demonstration status of biogas-linked agro-ecosystem in China. It has a high popularization rate of household biogas system. The typical household biogas system of Gongcheng is supposed to have three stages, i. e., construction, operation and utilization. We calculate the exergy input -

基金项目: 世界银行贷款中国新农村生态家园富民工程项目; 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(2009AA06A419); 教育部新世纪优秀人才(NCET-09-0226)

收稿日期: 2011-06-12; 修订日期: 2011-10-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

output of each subsystem and hereby analyze the exergy efficiency of the whole agro-ecosystem. The results show that, the exergy input of the system is $1.06 \times 10^8 \text{ kJ/a}$ while the exergy output (mainly in the form of biogas residue) is $5.00 \times 10^7 \text{ kJ/a}$, with the exergy conversion rate being 48.82%. The exergy utilization rate is 21.60%, and biogas contributes more than biogas residue and biogas slurry. The exergy of system emission reaches $3.42 \times 10^5 \text{ kJ/a}$, which mainly comes from the biogas combustion. Major conclusions are as follows: (1) Compared with the traditional agro-ecosystem, biogas-linked agro-ecosystem has a longer utilization chain for agricultural wastes, which takes in nonrenewable resources and outputs renewable resources. Therefore, household biogas system is an effective measure in relieving energy shortage and reducing environmental pollution in rural area and realizing the sustainable development. (2) The exergy efficiency of the household biogas system is at a low level, and still needs to be promoted. Improving the process technology and optimizing the fermentation condition may be a choice to increase the exergy conversion rate. Meanwhile, technological innovation in the multi-purpose use of biogas residue and biogas slurry can increase the exergy utilization rate. (3) The exergy-based life cycle accounting method of household biogas system in this paper extends the application of exergy accounting, and fills in the gap of household biogas research field. The method may help us understand the household biogas system more clearly and directly in energy conversion and utilization mode. As a result, it is convenient to find out the weak points of the agro-ecosystem that waste more energy and seek for optimal solutions accordingly.

Key Words: household biogas system; life cycle analysis; exergy

20 世纪 80 年代以来,户用沼气系统由于具有缓解能源紧张、减少环境污染、保护生态环境等优点,在我国农村地区得到了一定程度的推广^[1]。目前,我国已建立了多种沼气生态农业模式,如北方的“四位一体”、南方的“猪-沼-果”和西北的“五配套”等。这些模式以户用沼气池为纽带,将农村清洁能源建设与农业生产有机结合,实现沼气、沼液、沼渣的综合利用,节约了农村地区常规燃料能源,同时减少农药化肥使用和禽畜粪便污染,带来了良好的经济效益和生态效益^[2]。

近年来,针对沼气生态农业模式和户用沼气系统的研究主要集中在经济效益分析^[3-6]、减排效益分析^[7-10]、能源替代效益分析^[11-13]等方面。这些研究通常采用全生命周期分析和清单分析的方法,旨在评价单个沼气工程或某种沼气生态农业模式对所在区域的经济或生态环境产生的影响。而户用沼气系统作为沼气生态农业的核心,其物质能量转化过程和利用效率直接影响到沼气生态农业整体经济效益和生态效益。因此对户用沼气系统进行基于生命周期的能量核算有助于明确生态农业系统物质能量转化利用情况,为系统优化和效益提升提供科学依据。

可用能的概念由 Z. Rant 提出,主要用于测度系统在与参考环境达到平衡的过程中所能做的最大功^[14]。可用能为不同物质形式的能量提供了统一的衡量标准,而且能够度量不同物质形式的能量在质上的差异,因此在各种化学物理过程研究、自然资源核算、农业工业生态系统分析和环境影响评价等方面都得到了应用^[15]。在农业生态系统方面,B. Chen 和 G. Q. Chen 从可用能的角度核算了 1980—2002 年间中国社会的农副产品投入量,并结合核算结果讨论了农业相关政策的演变及影响^[16-17],此后又按照农林牧渔的部门分类对中国农业系统多年的可更新投入、不可更新投入以及产出、环境排放进行可用能核算,并通过一系列生态经济学指标评价农业系统的转换效率和环境压力^[18]。Hoang 将可用能与环境效率分析方法相结合,提出了可持续效率模型,并应用于 OECD 组织 29 个国家的农业系统进行实证分析^[19]。在生物能源方面,Banerjee 和 Tierney 从可用能的角度对沼气灶等 10 种在发展中国家农村地区广泛应用的能源设备进行了全生命周期环境影响评价及比较^[20]。Yang 等对中国玉米生物乙醇生产过程的可用能消耗进行了核算,并提出修正指标来反映该生产过程的环境成本^[21]。但对户用沼气系统可用能核算的研究仍然较少。

本文提出基于生命周期的户用沼气系统可用能核算方法,并选取广西恭城瑶族自治县典型户用沼气系统为案例,核算了该系统建设、运行和利用单元投入产出的可用能流,分析了整个系统的可用能转化与利用

效率。

1 研究方法

1.1 核算框架

通过对户用沼气系统投入产出全生命过程的分析,将典型户用沼气系统划分为建设、运行和利用3个单元,其整体核算框架如图1。

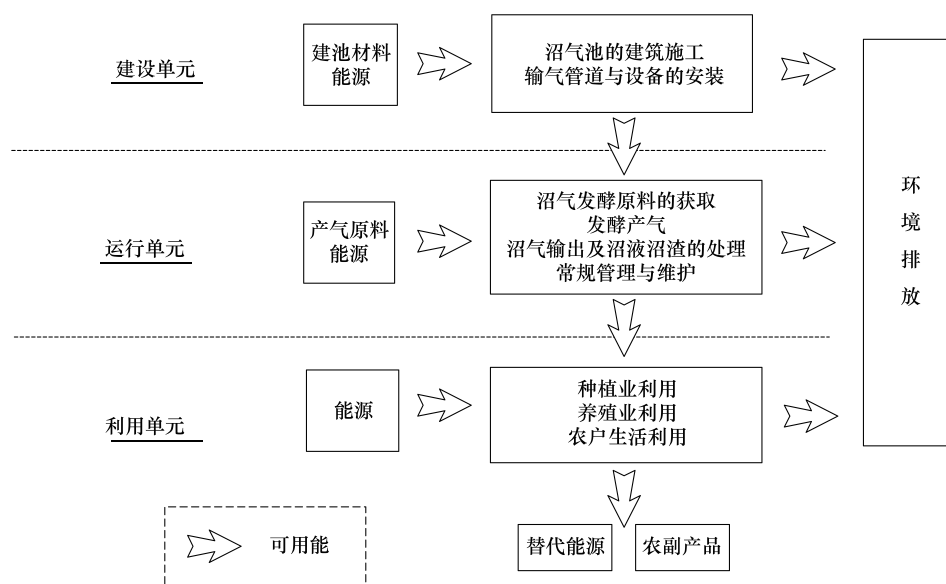


图1 户用沼气系统可用能核算框架

Fig. 1 Accounting framework for household biogas system

系统建设单元包括沼气池的建筑施工和输气管道与设备的安装,可用能投入的主要形式是物质材料和能源。沼气池建设一般需要投入的有建筑材料(如水泥、砖、沙子、卵石、钢筋、塑料薄膜等)、输气管道、管道配件、其他常见沼气设备(如沼气灯、沼气灶等)。能源则考虑物质材料运输过程的能耗以及建筑过程中使用机械设备的能耗。在系统建设单元,物质材料运输过程的能源消耗会产生尾气,施工过程主要会产生粉尘等环境排放。

系统运行单元包括沼气发酵原料的获取、发酵产气、沼气输出及沼液沼渣的处理,以及沼气池的常规管理和维护。这一单元的可用能投入包括发酵原料和能源。自然界中沼气发酵原料十分广泛,几乎所有的有机物都可以作为沼气发酵原料,例如农作物秸秆、人、畜和家禽粪便、生活污水、工业和生活有机废物等。我国农村户用沼气系统的发酵原料主要是人畜粪便。部分地区由于禽畜养殖由家庭经营向大规模集约化发展造成户用发酵原料不足,同时也出于产气效率的考虑,会在发酵原料中加入秸秆、树叶、杂草等。为保证沼气池产气正常而持久,需要不断地补充新鲜的发酵原料、更换部分旧料,每年还会进行1—2次的大换料。系统运行单元发酵原料的获取及沼液沼渣的运输可能存在能源消耗。在系统运行单元,环境排放主要包括发酵原料的获取和沼液沼渣运输过程产生的尾气,以及发酵产气过程的气体逸散。

系统利用单元是可用能产出利用的主要环节,系统内部发酵的产物沼气、沼液和沼渣都可以在农业系统中发挥其效用,其中沼液沼渣可以通过在种植业和养殖业多种途径的利用帮助农户实现增收增产,沼气则可以满足农户日常生活用能。该单元的可用能投入主要是沼气、沼液和沼渣利用过程中的辅助设施能源投入,环境排放主要存在于辅助设施能源消耗、沼气燃烧、沼液沼渣挥发等过程。

1.2 可用能核算

可用能代表着蕴含在各种载体中真正可以被利用的那部分能量。由于不同形式能量之间的转换受到热力学第二定律的限制,能量的可用能可以理解为该种形式的能量转化为其他形式能量的能力。物质的可用能

包括物理可用能和化学可用能,物理可用能是由物质的物理状态(如温度、压力、速度和高程等)与环境存在差异而产生,化学可用能是由于物质本身与环境存在化学组成上的差异所产生。可用能转换系数指单位物质或能量所蕴含的可用能,反映了不同形式的能量在质量上的差异。户用沼气系统各单元都存在着物质与能量的投入与输出,可用能由于为全生命周期分析中不同形式的能量、不同状态的物质提供了统一的标尺,所以满足对整个系统投入产出进行加和与比较的评价要求。

本文进行可用能核算的具体方法为:(1)明确核算框架中每个单元各环节的物质与能量投入或产出量,将每一项物质与能量的投入或产出量乘以相对应的可用能转换系数,得到各自蕴含的可用能。本文采用的可用能转换系数来源于文献^[22-25];(2)分别加和各单元投入产出可用能,得出户用沼气系统内部可用能流动情况;(3)从整个生命过程的角度分析系统的可用能转化与利用效率。其中,系统产出的沼气、沼渣和沼液的可用能总量与系统投入的可用能总量的比值为可用能转化率,主要表征了沼气系统在运行单元进行能量转化的能力。沼气、沼渣和沼液可用能得到利用的比例为可用能利用率,表征了沼气系统在利用单元可用能利用的充分程度。系统可用能转化率与系统可用能利用率的乘积为系统可用能效率,显示了沼气系统整个生命过程对可用能的利用效率,可作为系统可持续性的衡量指标。

2 案例分析

2.1 案例对象

恭城瑶族自治县(简称恭城县),位于广西壮族自治区东北部,面积 2049 km²,人口 29 万人。该县自 1984 年起将沼气池建设与扶贫攻坚相结合,持续实施“沼气扶贫”工程。20 世纪 90 年代中后期以来,恭城县构建了“养殖-沼气-种植”三位一体模式,以沼气为纽带,以养殖业为龙头,以种植业为重点,大力发展生态农业。截至 2009 年底,该县境内农村户用沼气池总量 6.36 万座,普及率达 91.6%。

研究选取恭城县境内广泛使用的 8 m³ 户用沼气池,平均使用寿命 15 a,按照最佳使用期限,本文仅对前 10a 的使用情况进行核算。当地年平均气温高于沼气常温发酵区的最低温度 10℃,全年均能产气,扣除大出料的时间,年产气时间按 300 d 计,每口沼气池年产气量按 450 m³ 计,排出沼渣沼液按 25 t 计。

图 2 为恭城县典型户用沼气系统示意图。

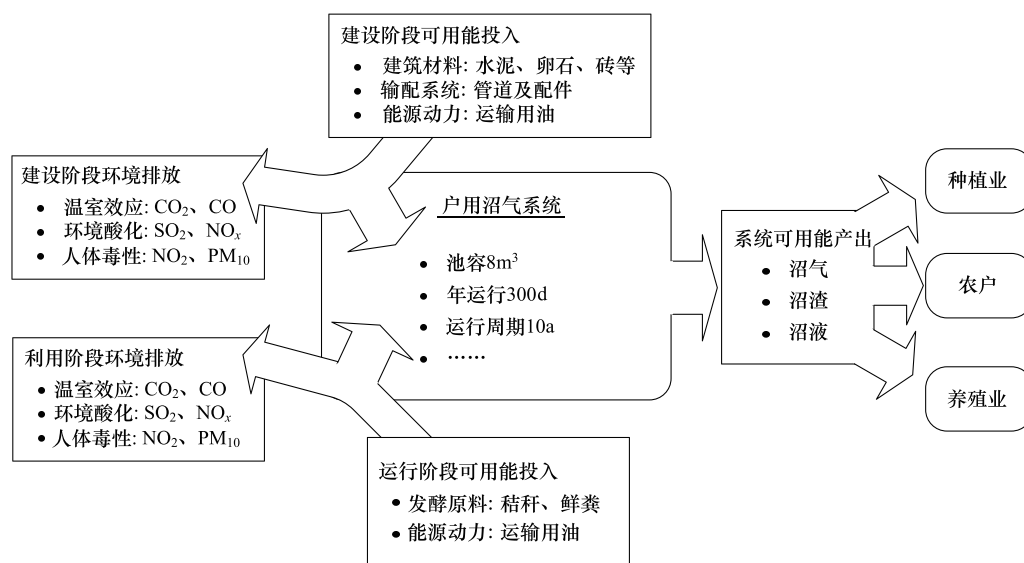


图 2 恭城县典型户用沼气系统示意图

Fig. 2 Diagram of household biogas system in Gongcheng

各单元物质与能量的投入产出原始数据为恭城县的平均值,其中系统建设单元数据为建设阶段的一次性投入,进行分析比较时需要除以 10a。

2.2 恭城县户用沼气系统可用能核算

2.2.1 系统建设单元核算

恭城县户用沼气系统实行“三结合”布局,即沼气池、猪圈、厕所连通建造,以便粪便自流入池。池旁建猪舍和厕所,人和禽畜粪便在沼气池发酵,产生的沼气作为家庭燃料,沼液和沼渣则作为果树、蔬菜等的肥料。当地推行“一池三改”模式,即进行农村户用沼气建设之外进行厨房、厕所和猪圈的同步改造。所以本案例的系统建设单元不仅指沼气池的建设,还包括厨房、厕所的改建、猪圈和果园的配套设计与建设等。核算中,按黏土砖尺寸 0.24 m×0.115 m×0.053 m、密度 1700 kg/m³ 计算黏土砖质量^[26];按年平均运输距离 100 km,耗油量 0.1 L/km 计算汽油消耗量。系统建设单元可用能总投入如表 1。

表 1 户用沼气系统建设单元可用能总投入

Table 1 Exergy input of household biogas system construction unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient /(kJ/unit)	可用能 Exergy /kJ
黏土砖 Clay brick	800 块	2.49×10^3	1.99×10^6
卵石 Grait	2200kg	3.30×10^1	7.26×10^4
粗砂 Grit	2000kg	3.30×10^1	6.60×10^4
细沙 Sand	1300kg	3.30×10^1	4.29×10^4
水泥 Cement	1000kg	1.50×10^3	1.50×10^6
钢筋 Rebar	10kg	6.80×10^3	6.80×10^4
水 Water	500kg	5.00	2.50×10^3
塑料薄膜 Plastic Film	32m ²	6.09×10^2	1.95×10^4
塑料管 Plastic Pipe	20m	2.03×10^3	4.06×10^4
汽油 Petrol	10L	3.47×10^4	3.47×10^5
总计 Total			4.15×10^6

2.2.2 系统运行单元核算

恭城县户用沼气系统的发酵原料中由于含有秸秆,日常进料换料之外每年还要进行 2 次大换料。恭城县采用“三结合”布局,粪便自流入池,因此案例分析中不考虑获取发酵原料环节的可用能投入。沼气池运行期间,日常沼液沼渣换料清理不需要机动车运输,能源投入仅考虑每年大换料时沼液沼渣的运输。核算中,按年平均运输距离 10 km,耗油量 0.1 L/km 计算汽油消耗量;按每户年产沼渣、沼液 25 t,沼渣沼液质量比为 1.15 : 7.79 计算二者的产生量。系统运行单元的可用能投入如表 2,可用能产出如表 3。

表 2 户用沼气系统运行单元可用能投入

Table 2 Exergy input of household biogas system operation unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient/(kJ/unit)	可用能 Exergy/(kJ/a)
鲜粪 Fresh Dung	5700kg/a	1.25×10^4	7.15×10^7
秸秆 Straw	3000kg/a	1.02×10^4	0.06×10^7
汽油 Petrol	1L/a	4.69×10^4	3.47×10^4
总计 Total			1.02×10^8

表 3 户用沼气系统运行单元可用能产出

Table 3 Exergy output of household biogas system operation unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient/(kJ/unit)	可用能 Exergy/(kJ/a)
沼气 Biogas	450m ³ /a	4.13×10^4	1.8×10^7
沼渣 Biogas residue	3216kg/a	9.28×10^3	2.98×10^7
沼液 Biogas slurry	21784kg/a	7.70×10^1	1.68×10^6
总计 Total			5.00×10^7

2.2.3 系统利用单元核算

恭城县户用沼气系统产生的沼气主要用于农户日常生活的炊事和照明用能,基本可以满足一个3—5人农户80%以上的生活燃料及家用生活照明的需求。沼渣沼液用作果园和稻田的有机肥料以及猪饲料。根据调查,恭城县户用沼气系统利用单元的可用能投入可以忽略。核算中,按沼气热值20930 kJ/m³,沼气灶热效率60%计算农户炊事利用的可用能;按平均每户有两盏15 W照明灯由沼气供电,每天平均使用4 h计算农户照明利用的可用能。典型户用沼气系统的可用能利用情况如表4。

表4 户用沼气系统利用单元可用能利用
Table 4 Exergy utilization of household biogas system utilization unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient/(kJ/unit)	可用能 Exergy/(kJ/a)
炊事能耗 Energy consumption for cooking	9.42×10 ⁶ kJ/a	6.00×10 ⁻¹	5.65×10 ⁶
照明能耗 Energy consumption for lighting	45 kWh/a	3.60×10 ³	1.62×10 ⁵
稻谷增产 Increased crops	200 kg/a	1.58×10 ⁴	3.16×10 ⁶
水果增产 Increased fruits	900 kg/a	1.90×10 ³	1.71×10 ⁶
牲畜增产 Increased livestock	24 kg/a	4.50×10 ³	1.08×10 ⁵
总计 Total			1.08×10 ⁷

2.2.4 户用沼气系统环境排放核算

对于恭城县典型户用沼气系统的环境排放数据,本文参考了王明新等进行农村户用沼气工程生命周期节能减排效益研究所采用的清单分析方法^[7],并结合恭城县户用沼气系统建设、运行与利用过程的实际情况进行估算,结果如表5。

表5 恭城县户用沼气系统环境排放
Table 5 Emission of household biogas system in Gongcheng

项目 Item	可用能转换系数 Exergy coefficient /(kJ/kg)	建设单元 Construction unit		运行单元 Operation unit		利用单元 Utilization unit	
		数据 Data	可用能 Exergy	数据 Data	可用能 Exergy	数据 Data	可用能 Exergy
		/(kg/a)	/(kJ/a)	/(kg/a)	/(kJ/a)	/(kg/a)	/(kJ/a)
CO ₂	4.50×10 ²	89.5	4.03×10 ⁴	9.91	4.46×10 ³	530	2.39×10 ⁵
CO	9.80×10 ³	0.10	9.80×10 ²	0.01	9.80×10 ¹	0.16	1.57×10 ³
SO ₂	4.90×10 ³	8.34	4.09×10 ⁴	0.83	4.07×10 ³	0.83	4.07×10 ³
NO _x	3.60×10 ³	0.46	1.66×10 ³	0.05	1.80×10 ²	0.12	4.32×10 ²
NO ₂	1.21×10 ³	0.35	4.23×10 ¹	0.04	4.83×10 ¹	0.09	1.09×10 ²
PM10	1.50×10 ³	2.65	3.98×10 ³	—	—	—	—
总计 Total			8.82×10 ⁴		8.85×10 ³		2.45×10 ⁵

2.3 核算结果分析

2.3.1 系统可用能投入产出分析

恭城县户用沼气系统整个生命过程的可用能转化与利用情况如图3。可以看出,系统可用能转化率为48.82%,可用能利用率为21.60%,整个户用沼气系统的可用能效率为10.52%。系统运行一年产生的环境影响以可用能表示为3.42×10⁵ kJ。

恭城县户用沼气系统的可用能产出与利用比例如图4所示。沼渣中蕴含的可用能最多,占整个系统可用能产出的69.39%,其次为沼气,占整个系统可用能产出的26.71%。但系统中真正被人类利用的可用能一多半来自于沼气。通过计算,系统产生沼气的可用能利用率为50.6%,沼渣沼液的可用能利用率仅为15.8%。

2.3.2 系统环境排放分析

从可用能的角度来看,恭城县户用沼气系统的环境排放主要发生在系统利用单元。该单元的主要排放物

为沼气燃烧产生的 CO_2 , 达到单元总排放的 97.55%。系统建设单元的主要排放物为材料运输过程汽油燃烧产生的 CO_2 和 SO_2 , 分别占单元总排放的 45.69% 和 46.37%。

3 结论

(1) 从全过程的可用能流动来看, 蕴含在发酵原料中的可用能, 经过沼气池发酵, 转化为沼气、沼液和沼渣中的可用能, 最终在农户、种植业和养殖业得到不同形式的利用。与传统农业模式相比, 沼气农业系统通过增加转化利用环节延长了秸秆、粪便等农业废弃物的利用链条, 减少了对非可再生资源的耗竭性使用的同时也减少了环境污染和对生态的破坏, 实现了农业生态系统的可持续发展。

(2) 从可用能的转化与利用来看, 可用能转化主要发生在沼气池的发酵过程, 该过程可用能损失了 51.18%, 可以考虑从改进工艺技术和改善发酵环境两方面提高户用沼气系统能量转化的能力; 转化后的可用能有 73.29% 蕴含在沼液和沼渣中, 但这一部分可用能没有得到充分的利用, 系统可用能利用率仅为 21.60%, 亟须在沼渣沼液综合利用技术方面进行创新; 而系统可用能效率仅为 10.52%, 具备极大的提升空间, 系统可持续性有待加强。

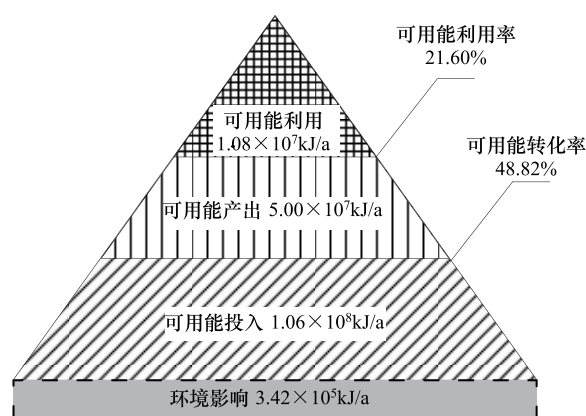


图3 恭城县户用沼气系统可用能转化与利用

Fig. 3 Exergy conversion and utilization of household biogas system in Gongcheng

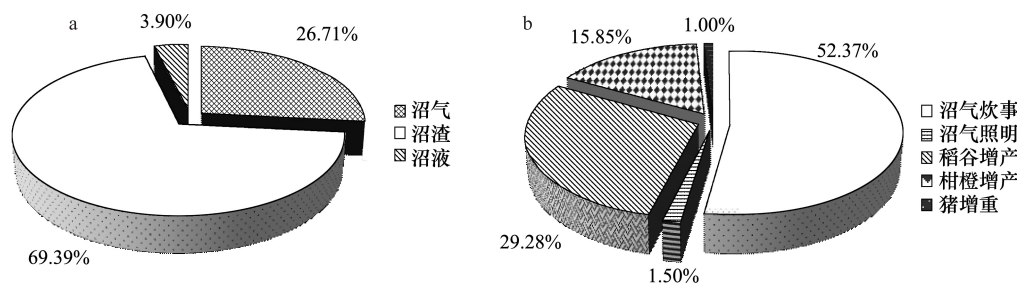


图4 户用沼气系统可用能产出比例(a)和可用能利用比例(b)

Fig. 4 Exergy output (a) and Exergy utilization (b) of household biogas system

(3) 本文综合考虑了户用沼气系统建设、运行与利用的整个生命过程, 采用可用能作为统一的度量来表示各环节物质与能量的投入产出。一方面可以更为全面地反映户用沼气系统各单元的能量利用效率, 便于诊断出能量转化利用的薄弱环节, 为系统优化提供依据; 另一方面核算结果建立在可用能为共同标准的基础上, 与其他系统具有可比性。

References:

- [1] Zhou M J, Zhang R L, Lin J Y. The Practical Technology of Biogas. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 2-3.
- [2] Liu D S. A Methodological Study of EIA on the Rural Renewable Energy Projects and Case Study [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [3] Zhang P D, Yang Y L, Li X R. Present situation and potentiality of biogas comprehensive utilization in China. China Biogas, 2007, 25(5): 32-34, 37-37.
- [4] Li S J, Hu H L. Economic evaluation of biogas comprehensive utilization in Gongcheng. China Biogas, 1997, 15(2): 42-44.
- [5] Berglund M, Börjesson P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3): 254-266.
- [6] Tsagarakis K P, Papadogiannis C. Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio municipality, Greece. Energy Conversion and Management, 2006, 47(7/8): 844-57.

- [7] Wang M X, Xia X F, Chai Y H, Liu J G. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 245-250.
- [8] Liu Y Z. Environmental benefits evaluation of energy greenhouse gas emission reduction of using household biogas. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2009, 6(1): 81-84.
- [9] Liu Y, Kuang Y Q, Huang N S. Rural biogas development and greenhouse gas emission mitigation. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(3): 48-53.
- [10] Yin Z M, Liu L H, Cao A H, Jin P L. Utility and development countermeasures of biogas technology in the energy saving and emission reduction of new rural construction. *Agro-Environment & Development*, 2007, 24(6): 74-76.
- [11] Yan W W. Study on the Influence of Biogas Project Based Household on Rural Ecosystem [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [12] Liu L N, Wang X H. Life cycle assessment of biogas eco-agricultural mode. *China Biogas*, 2008, 26(2): 17-20, 24-24.
- [13] Chen J L. Life Cycle Assessment of Large and Medium Scale Biogas Plant [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [14] Rant Z. Exergie, ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1956, 22(1): 36-37.
- [15] Sciubba E, Wall G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics*, 2007, 10(1): 1-26.
- [16] Chen B, Chen G Q. Resource analysis of the Chinese society 1980—2002 based on exergy-Part 3: Agricultural products. *Energy Policy*, 2007, 35(4): 2065-2078.
- [17] Chen B, Chen G Q. Resource analysis of the Chinese society 1980—2002 based on exergy-Part 4: Fishery and rangeland. *Energy Policy*, 2007, 35(4): 2079-2086.
- [18] Chen G Q, Jiang M M, Yang Z F, Chen B, Ji X, Zhou J B. Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture. *Ecological Modelling*, 2009, 220(3): 397-410.
- [19] Hoang V N, Rao D S P. Measuring and decomposing sustainable efficiency in agricultural production: a cumulative exergy balance approach. *Ecological Economics*, 2010, 69(9): 1765-1776.
- [20] Banerjee A, Tierney M. Comparison of five exergoenvironmental methods applied to candidate energy systems for rural villages in developing countries. *Energy*, 2011, 36(5): 2650-2661.
- [21] Yang Q, Chen B, Ji X, He Y F, Chen G Q. Exergetic evaluation of corn-ethanol production in China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(5): 2450-2461.
- [22] Renaldi, Kellens K, Dewulf W, Duflou J R. Exergy efficiency definitions for manufacturing processes. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2011: 329-334.
- [23] Chen B, Chen G Q. Exergy analysis for resource conversion of the Chinese society 1993 under the material product system. *Energy*, 2006, 31(8/9): 1115-1150.
- [24] Chen G Q, Qi Z H. Systems account of societal exergy utilization: China 2003. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2/4): 102-118.
- [25] Liu M, Li B Z, Yao R M. A generic model of exergy assessment for the environmental impact of building lifecycle. *Energy and Buildings*, 2010, 42(9): 1482-1490.
- [26] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ). GB13545—2003 Fired hollow bricks and blocks. Beijing: Standards Press of China, 2004.

参考文献:

- [1] 周孟津, 张榕林, 蒯金印. 沼气实用技术 (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2009: 2-3.
- [2] 刘东生. 农村可再生能源建设项目环境影响评价方法及案例研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [3] 张培栋, 杨艳丽, 李新荣. 中国沼气综合利用潜力. *中国沼气*, 2007, 25(5): 32-34, 37-37.
- [4] 李书军, 胡海良. 恭城县开展“三沼”综合利用的经济评价. *中国沼气*, 1997, 15(2): 42-44.
- [7] 王明新, 夏训峰, 柴育红, 刘建国. 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 245-250.
- [8] 刘叶志. 户用沼气能源温室气体减排的环境效益评价. *长江大学学报: 自然科学版*, 2009, 6(1): 81-84.
- [9] 刘宇, 匡耀求, 黄宇生. 农村沼气开发与温室气体减排. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 48-53.
- [10] 殷志明, 刘涟淮, 曹安辉, 金佩兰. 沼气技术在新农村节能减排中的效用和发展对策. *农业环境与发展*, 2007, 24(6): 74-76.
- [11] 颜卫卫. 户用沼气工程对农村生态系统的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [12] 刘黎娜, 王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价. *中国沼气*, 2008, 26(2): 17-20, 24-24.
- [13] 陈佳澜. 大中型沼气综合利用系统生命周期评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB13545—2003 烧结空心砖和空心砌块. 北京: 中国标准出版社, 2004.

DOI: 10.5846/stxb201106140791

章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述. 生态学报, 2012, 32(13): 4254-4260.

Zhang G X. The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4254-4260.

水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述

章光新 *

(中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 湿地植被是湿地生态系统的重要组成部分。水文情势与盐分变化直接影响到湿地植被的分布与演替。目前, 全球气候变化和人类活动导致的水文情势改变与盐分聚集已造成大面积的湿地退化和盐渍化, 已严重威胁全球淡水湿地生态系统的稳定和健康。系统总结了水文情势与盐分变化单一环境变量及其交互作用对湿地植物生理生态、物种多样性、群落结构与演替和植被动态等诸多方面的影响研究进展, 并探讨了湿地水文动态-盐分变化-植被响应的综合模型研究现状, 认为发展湿地综合模型预测未来水文情势与盐分变化情景下湿地演变, 是应对气候变化湿地水盐管理和生态保护的重要工具, 最后指出今后亟需加强的研究方向。

关键词: 水文情势; 盐分; 植被; 综合模型; 湿地

The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review

ZHANG Guangxin *

Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract: Vegetation is an important component of wetland ecosystem. Changes in hydrological regimes and salinity can directly affect the distribution and succession of wetland vegetation. Globally, the changes in hydrological regimes and salinity (due to climate change and/or human activities) have caused general degradation and salinization of natural wetlands, making a serious threat to the ecological health of freshwater wetlands. This paper firstly summarizes the current progress of studies on hydrological regimes, salinity, and the interactive effect of hydrological regimes and salinity on wetland plant physiological ecology, diversity of species, structure and succession of communities and vegetation dynamics. Secondly, discussions are made on the efficacy of an integrated model for evaluating wetland hydrology, hydrodynamics, and salinity change and vegetation response. The integrated model is found to be a valuable tool to predict the development and evolution wetland ecosystems, provide an indicator about how to manage and control water and salinity to protect the ecosystem and cope with future climate change. Finally, important knowledge gaps are indentified, and future research directions relative to wetland hydrology and plant ecology are recommended.

Key Words: hydrological regimes; salinity; vegetation; integrated model; wetland

湿地是发育于水陆环境过渡地带的生态系统, 对全球变化与人类活动的影响具有高度敏感性和脆弱性。据估计自 1900 年以来, 全球 80% 的湿地发生退化、50% 的湿地丧失, 已成为全球遭受破坏最为严重的生态系

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428404); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q06-2)

收稿日期: 2011-06-14; **修订日期:** 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhgx@neigae.ac.cn

统一,已引起国际社会政府的高度关注并付诸行动,因此 21 世纪也被喻为湿地恢复的世纪^[1-3]。目前,全球气候变化和人类活动导致的水文情势改变与盐分聚集已造成大面积的湿地退化和盐渍化,并严重威胁全球淡水湿地生态系统的稳定和健康^[4-6]。湿地盐渍化直接导致生物多样性的丧失和生态服务功能的下降,影响到人类生存环境的质量和经济社会的发展,如何防止湿地盐渍化的发生发展和恢复改善退化的盐碱湿地,保障区域水-湿地生态-经济社会系统的协调可持续发展,是当前国际社会急需解决的关键问题和面临的紧迫任务。

湿地植被与水文、土壤是湿地生态系统的重要组成部分,同时也是极好的湿地生境质量指标。湿地植被的结构、功能和生态特征能综合反映湿地生态环境的基本特点和功能特性^[7]。水文条件与水环境质量是影响湿地植物物种多样性和植被演替的关键因子。因此,针对全球湿地盐渍化的实现问题及其存在的潜在风险,开展水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究,认识和理解湿地植被退化的过程与机制,为湿地水文管理、盐分调控和植被恢复提供科学依据与决策支持,保证湿地生态系统良性循环和功能效益正常发挥,已成为当前国际湿地科学领域研究的热点问题之一。

1 水文情势与盐分单一环境变量对湿地植被的影响

水文情势和盐分是影响湿地植被分布与演替的主控环境因子。水文情势是指湿地水体各水文要素随时间的变化情况,主要表征指标有流量水位的高低、淹水历时、范围与频率和水文周期等。水文情势变化主要通过改变湿地的理化环境(例如营养物质和氧的可获取性、土壤和水体含盐量、pH 值和沉积物特性等)来影响湿地植被的组成、结构和功能^[3,8-9]。国内外学者就水文情势变化如何影响湿地植物生理生态、物种丰富度、群落结构与演替和植被动态等方面进行了大量研究。Raulings 等人在澳大利亚 Dowd Morass 湿地建立了植物物种丰富度和功能群(PFGs)与以干旱和水深为表征指标的不同水文情势显著相关关系,模拟了水文情势变化对湿地植被的影响^[10]。Hudon 等人模拟了安大略湖-圣劳伦斯河流域湿地植物群聚与水位的定量关系,评估不同水位控制条件下湿地植物群落响应效果,从而制定适应性管理对策与措施,确保湿地可持续性^[11]。Milzow 等人调查了非洲 Okavango 三角洲湿地植被类型分布与水文状况的关系,发现地下水埋深与植被分布有很好的相关性,运用基于 Modflow 2000 平台开发的水文模型预测未来气候变化和水管理方案下水位动态,并转化成相应的湿地植被分布图,为湿地植被多样性保护提供适宜的水文条件^[12]。Todd 等在美国佛罗里达州大沼泽国家公园利用水文和植被数据库建立了洪水泛滥事件的频率、持续时间和水深与湿地植被分布的关系,并依据水文格局出现的概率评估气候变化对湿地植被群落结构和分布的潜在影响^[13]。了解本土和引进物种的水文需求是维持受到干扰的湿地本土植物群落的关键,Magee 等人研究了美国波特兰市郊湿地植物种对水文条件的响应,发现本土最丰富的物种群聚出现在中间水文条件,相等的牧草优势群聚出现在低水位变化较干的环境,隔草(*Phalaris arundinacea* L)群聚出现在较高平均水位和波动,研究结果表明平均水位较小的变化(约 10 cm)或波动(地表水位平均绝对差 ± 2 cm)将促进本土湿地植物优势群聚向侵略性的或外来的分类群转变^[14]。Barrett 等人调查了澳大利亚东南部 Murray 河附近的 21 块洪泛平原湿地植物群落结构,分析湿地类型与过去 25a 水文情势的关系,利用植物丰富度和覆盖度作为评估指标,发现植物群落结构在不同的“湿”、“干”和“介于湿干之间”水文情势历史阶段具有明显的差异性^[15]。我国学者也开展了不同水文情势下湿地典型植物生理生态响应试验研究^[16-19],水文情势变化对湿地植被影响机理及其与湿地植被空间格局分布关系研究^[20-23]。

在水土盐渍环境条件下,高浓度盐分主要通过离子毒效应和渗透胁迫等途径来抑制植物的发育生长^[24]。当水体盐度达到 1000 mg/L 将会对淡水生态系统带来负面影响,降低淡水高等植物生长速率和根叶发育,通过大量野外调查证实水体盐度达到 4000 mg/L 淡水湿地通常分布的水生高等植物将会消失^[25-27]。澳大利亚几乎所有湿地都遭受不同方式和程度的水文改变,从疏干、洪水到农业和生活供水开采导致干湿状况微小的变化或流域水文的变化,伴随水文变化的最大威胁之一就是湿地盐渍化。据估计在澳大利亚 80 块重要湿地已受到次生盐渍化的影响,到 2050 年这个数字或将增加到 130 块^[28]。因此,澳大利亚许多学者研究和探讨

了水体盐度升高对湿地、河流等淡水生态系统生物个体不同生长发育阶段、物种耐盐阈值及机理、生物多样性和群落结构与功能、食物网结构乃至整体水生生态系统的结构和功能等方面的影响机制,为淡水生态系统保护和水盐管理提供科学依据和决策支持^[27, 29-30]。Goodman 等人开展咸水脉冲对水生植物生长和生存的影响实验,采用海水稀释水盐度分别为<1000, 4000 和 8000 mg/L 对 4 种淡水高等植物进行为期 3 周或 6 周脉冲,之后利用<1000 mg/L 淡水进行恢复,研究表明 4 种植物种能够幸存和短期忍耐暴露在咸水条件下,恢复期结束后物种具有 $0.01-0.06 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 相对生长速率(RGR),为合理利用地下咸水提供了灵活性对策^[31]。松嫩平原是我国最重要的商品粮基地,也是世界上内陆盐碱湿地发育的典型地区之一,平原西部盐碱湿地面积约 57.8 万 hm^2 ,并且以每年 1%—3% 的惊人速度在增加^[32]。全球气候变化和人类活动双重影响下水文过程改变和水体盐碱化是松嫩平原内陆盐碱湿地发生发展的主要驱动力。我国学者对松嫩平原湖沼湿地水化学特征及成因进行了全面系统研究,并着重分析了湿地盐碱化发展趋势及盐沼湿地水环境盐碱化成分的变异特征^[33-35]。此外,一些学者也初步开展湿地植被对水文情势或盐碱单一环境要素的响应研究和探讨,田迅等人研究结果表明:扎龙湿地和向海湿地生境旱生化时羊草为优势种群,湿生化时芦苇为优势种群,芦苇沼泽群落和羊草草甸群落随生境“干—湿”交替过程相互演替^[36-38]。

2 水文情势与盐分变化交互作用下湿地植被响应

上述可见,水文情势或盐分单一环境变量对湿地植被影响研究工作较多,但对水文情势与盐分变化综合作用下的湿地生态响应研究甚少^[39-40],已引起众多学者的关注并开展了一些研究工作。澳大利亚东部和南部湿地 *M. ericifolia* 树种的生存受到了盐分升高和不适应的水情威胁,Salter 等人调查研究了 5 个月 *M. ericifolia* 幼苗树种对 3 个水深梯度(暴露,渍水和淹水)在 3 个盐分梯度(2, 49, 60 dS/m)下的响应,试验结果表明:最低盐度水深增加不影响生存,但强烈抑制幼苗生长;暴露环境下植物生物总量最高、叶面积和根长最大,渍水环境介于中间,淹水环境最低;高盐度幼苗不能忍耐渍水和淹水环境。研究表明盐度将限制水生植物对水深忍耐的范围^[41]。Brock 等人采用澳大利亚东南部 7 块内陆湿地沉积物利用水生植物种发芽(5 个盐度和 2 个水位)和浮游动物孵卵(5 个盐度),盐分梯度为<300、1000、2000、3000、5000 mg/L,水文情势为潮湿(渍水)和淹水,开展盐度和水文情势对生物的影响实验工作,揭示湿地盐分与水文相互作用及盐分如何影响生物多样性的机理^[40]。Watt 等人研究了位于地中海湿地关键环境变量水位和盐度对植物种群的影响,利用国际通用植被数量分析软件 CANOCO 4.0 中典范对应分析(CCA)和去趋势对应分析(DCA)综合分析了不同年、夏季和秋季平均水位和土壤盐度与湿地植被分布的关系^[42]。我国学者在黄河三角洲主要开展水盐环境梯度下湿地植物种(芦苇、翅碱蓬等)响应特征、水位和盐分生态阈值以及湿地植被空间分异规律研究,为湿地水文条件和植被恢复提供科学依据,并提出水盐交互作用以及更为深入的植物生理生态响应试验是今后研究的方向^[43-45]。吴大千利用遥感和 GIS 技术较为系统地研究了黄河三角洲植被的空间格局、动态监测和模拟,结果表明:土壤水分和盐分的交互作用是黄河三角洲植被环境关系的决定性要素,植被空间格局在大尺度上存在基于地形要素的水分再分配调控作用^[46]。宫兆宁等研究了北京野鸭湖湿地在水盐环境梯度下植物群落特征,探索了湿地植物群落演替模式:水生沉水、浮水、漂浮植物群落→水生挺水植物群落→沼生、湿生植物群落→盐生、中生植物群落→中旱生植物群落演替规律,为湿地水域生态条件改善和植物物种的选择提供了可借鉴的方案^[47]。邓春暖开展了不同水文情势(干旱、淹水梯度和淹水周期)与盐碱胁迫交互作用下,以及营养物质 N、P 与盐碱共同作用下莫莫格湿地芦苇生理生态响应研究,研究结果为湿地芦苇植被的恢复和田间排水的利用提供了科学依据^[48]。

3 湿地水文动态-盐分变化-植被响应的综合模型

目前,开展气候变化-水文动态-湿地植被响应的研究及模型研发工作方兴未艾,已成为国际湿地生态水文学研究的重点领域和热点问题。Storh 等人研究美国卡罗莱纳州海湾湿地气候波动对长期植被动态的影响,结果表明干旱期水文周期缩短和水位下降导致旱生植物种覆盖增加,重点区域在浅水湿地的周边;相反,洪水重新泛滥和较长的水文周期导致水生和挺水植物种的扩展^[49]。北美大草原湿地水禽的生境质量受植被

覆盖和水域面积比例控制,一些学者曾先后研究了湿地水文-生态过程及其耦合关系,研发并运用湿地模拟模型探索气候变化-湿地水位-湿地植被动态之间的关系,模拟预测未来气候变化情景下湿地水面面积和植被盖度等环境要素的变化,为应对气候变化湿地保护和恢复提供生态水文学依据^[50-52]。

水是盐分运动的载体,“盐随水来,盐随水去”。未来气候变化将导致湿地水文过程的显著变化,进而改变盐分迁移过程及规律,因此对湿地植被乃至整个生态系统的影响后果存在潜在风险和极大不确定性,如何应对变化,维持湿地生态系统健康、良性发展,已成湿地生态水文学界关注的焦点。因此,在湿地水文生态模型构建的理论和方法基础上发展湿地集水文动态、盐分变化和植被响应的综合模型,预测未来水文情势与盐分变化对湿地植被多样性和生态演替的影响后果,提出规避风险的对策和措施已势在必行。Jin 阐述生态系统水平上理解盐分和水文对淡水湿地生物多样性影响的理论基础,并介绍了湿地多样性非线性动态模型,并运用该模型探讨了盐度和季节性水文变化对湿地物种丰富度的影响机制^[5]。Huckelbridgea 等人建立了湿地水文、混合过程、盐分动态和植被相互作用的综合模型(图1)^[6],由蒸散发模块、水平衡模块、混合模块和植被模块组成,可从季节和年时间尺度预测湿地演变,并成功应用到美国加利福尼亚海湾 Ciénega 微咸水湿地,模拟结果表明湿地生态系统对盐分浓度比对流量变化更为敏感,盐分增加及流量减少将导致植被覆盖度显著下降,减少湿地动物群可利用生境面积,进而降低湿地的生态价值^[6]。中国鄂尔多斯遗鸥自然保护区是保护遗鸥国际重要湿地,维护遗鸥种群稳定数量首先保证它的食物链和繁殖生境,根据盐碱对食物的限制和湖泊盐度与水位的关系,建立了生态水文模型,确定了湖泊合适面积为 9.01 km²,最小面积为 4.88 km²^[53]。

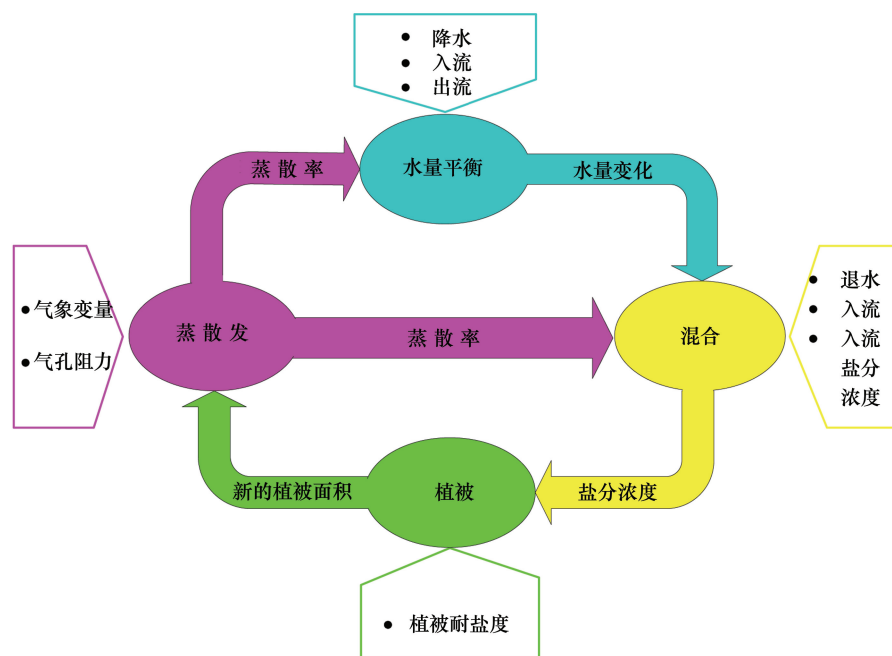


图1 湿地综合模型^[6]

Fig.1 Wetland integrated model^[6]

4 结论与展望

全球气候变化和人类活动共同作用下水文过程变化及水资源的时空再分配,以及在此基础上叠加的盐分聚集生态效应是全球淡水湿地生态系统面临的主要威胁和严峻挑战。湿地植被作为湿地生态系统的重要组成部分,认识和理解水文情势与盐分变化及其交互作用对湿地植被的影响过程与机制,构建相应的湿地生态水文模型预测未来水文情势与盐分变化情景下湿地演变,为湿地水盐管理和植被生态恢复提供科学依据与决策支持,将是湿地生态水文学家在该领域所关注的核心科学问题之一。基于对国内外同行研究的总结,认为以下几个方面将是今后研究的重点。

(1) 深入系统开展水文情势与盐分变化交互作用下湿地植物生理生态响应机理微观实验研究, 确定湿地植物在不同生育阶段适宜的生态水位与盐碱生态阈值, 为考虑水质条件湿地适宜生态需水量的计算和恢复的适宜水文条件提供理论依据。

(2) 采用多种现代高科技信息技术手段全方位加强湿地水文过程、盐分变化和植被动态的立体监测, 揭示多时空尺度上湿地水盐变化过程-植被动态响应的耦合机制, 并将湿地植物生理生态响应的微观机理研究与植被演替驱动力宏观机制研究紧密结合, 建立适用性强、精度高的湿地水文动态-盐分变化-植被响应的综合模型, 预测气候变化和人为干扰下湿地演变, 提出湿地水盐管理与生态恢复重建的对策和措施。

(3) 亟需加强全球气候变化背景下水文情势与盐分变化对湿地生物多样性、生态系统结构和功能的影响, 以及与其它环境因子如农田排水中 N、P 等营养物质的交互作用对湿地生态系统整体性的影响研究, 确定湿地生态系统耐盐碱阈值和纳污承载能力, 为湿地生态系统的健康和盐碱湿地的恢复提供水安全保障。

References:

- [1] Lei G C. Six directions of wetland sciences development. China Ecological Forum, 2006.
- [2] Yang Z F, Cui B S, Huang G H, Bai J H, Sun T, Li X W, Liu X H. Hydro-ecological processes, water-environmental effects and integrated control of ecological security for wetlands in Huang-Huai-Hai Region of China. Advances in Earth Science, 2006, 21(11): 1119-1126.
- [3] Zhang G X, Yin X R, Feng X Q. Review of the issues related to wetland hydrology research. Wetland Science, 2008, 6(2): 105-115.
- [4] Mitsch, W J, Gosselink J G. Wetlands. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [5] Jin C H. Biodiversity dynamics of freshwater wetland ecosystems affected by secondary salinisation and seasonal hydrology variation: a model-based study. Hydrobiologia, 2008, 598: 257-270.
- [6] Huckelbridge K H, Stacey M T, Glenn E P, Dracup J A. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland. Ecological Engineering, 2010, 36: 850-861.
- [7] Chen Y Y. China wetlands research. Changchun: Jilin Press, 1995.
- [8] Lu J J, He W S, Tong C F, Wang W. Wetland ecology. Beijing: Higher Education Press, 2006: 75-103.
- [9] Cui B S, Yang Z F. Wetlands. Beijing Normal University Press, 2006: 39-62.
- [10] Raulings E J, Morris K, Roache M C, Boon P I. The importance of water regimes operating at small spatial scales for the diversity and structure of wetland vegetation. Freshwater Biology, 2010, 55: 701-715.
- [11] Hudon C, Wilcox D, Ingram J. Modeling wetland plant community response to assess water-level regulation scenarios in the Lake Ontario-St. Lawrence River Basin. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 113: 303-328.
- [12] Milzow C, Burg V, Kinzelbach W. Estimating future ecoregion distributions within the Okavango Delta Wetlands based on hydrological simulations and future climate and development scenarios. Journal of Hydrology, 2010, 381: 89-100.
- [13] Todd M J, Muneeppeerakul R, Pumo D, Azale S, Miralles-Wilhelm F, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I. Hydrological drivers of wetland vegetation community distribution within Everglades National Park, Florida. Advances in Water Resources, 2010, 33: 1279-1289.
- [14] Magee T K, Kentula M E. Response of wetland species to hydrologic condition. Wetlands Ecology and Management, 2005, (13): 163-181.
- [15] Barrett R, Nielsen D L, Croomea R. Associations between the plant communities of floodplain wetlands, water regime and wetland type. River Research and Applications, 2010, 26: 866-876.
- [16] Bu D F, Hu J M, Zhou D M, Zhao K Y. Calamagrostis angustifolia population density at different water levels. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(9): 1009-1013.
- [17] Luan J H, Lu X G, Zou Y C, Zhang Y W. Ecological response of plant height and stem diameter of *Carex pseudocuraica* ramets to water content gradient in Sanjiang Plain. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 28(3): 256-260.
- [18] Wang L, Song C C, Hu J M, Liao Y J. Responses of *Carex lasiocarpa* clonal reproduction to water regimes at different growth stages. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2231-2238.
- [19] Yang T, Gong H L, Hu J M, Wang L. Influences of long term water stress on typical plant populations in the Sanjiang Plain wetlands. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin, 2010, 30(9): 1887-1894.
- [20] Wu C D, Meng X M, Chu J Y, Fu W G, He H J, Meng X J. Correlation between hydrological situation and vegetation in Mount Beigu wetland. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2005, 26(4): 331-335.
- [21] Liu Y, Guo H C, Zhou F, Wang Z, Huang K. Role of water level fluctuation on aquatic vegetation in lakes. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 3117-3126.
- [22] Cui B S, Zhao X S, Yang Z F, Tang N, Tan X J. The response of reed community to the environment gradient of water depth in the Yellow River. Delta. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1532-1541.

- [23] Guo X L, Lu X G, Dai G H. Aboveground biomass dynamics within wetlands along a water level gradient in the Sanjiang Plain. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 1739-1742.
- [24] Li Ya, Zhang Y P, Sun M, Gao B M. Research Advance in the effects of salt stress on plant and the mechanism of plant resistance. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 258-265.
- [25] Brock M A. The ecology of halophytes in the south-east of South Australia. *Hydrobiologia*, 1981, 81(3): 23-32.
- [26] Hart B T, Bailey P, Edwards R, Hortle K, James K, McMahon A, Meredith C, Kerrie S. A review of the salt sensitivity of the Australian freshwater biota. *Hydrobiologia*, 1991, 210: 105-144.
- [27] Nielsen D L, Brock M A, Rees G N. Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51: 655-665.
- [28] National Land and Water Resources Audit, 2001. Australian dryland salinity assessment 2000: Extent, impacts, processes, monitoring and management options. Commonwealth of Australia: The Natural Heritage Trust, Canberra.
- [29] Davis J A, McGuire M, Halse S A, Hamilton D, Horwitz P, McComb A J, Froend R H, Lyons M, Sim L. What happens when you add salt: predicting impacts of secondary salinisation on shallow aquatic ecosystems by using an alternative-states model. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51: 715-724.
- [30] James K R, Cant B, Ryan T. Responses of freshwater biota to rising salinity levels and implications for saline water management: a review. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51: 703-713.
- [31] Goodman A M, Ganf G G, Dandy G C, Maier H R, Gibbs M S. The response of freshwater plants to salinity pulses. *Aquatic Botany*, 2010, 93: 59-67.
- [32] Sun G Y, Yi F K, Luo X Z. The distribution law, formative mechanism and utilization of inland saline-alkaline wetland in Songnen plain//He Y, Song Y X. Research of agricultural comprehensive development in Northeast China. Beijing: Science Press, 2001: 62-68.
- [33] Deng W, He Y, Song X S, Yan B X. Chemical characteristics of water environment of saline mire in the west of Songnen Plain. *Geographical Research*, 2000, 19(2): 113-119.
- [34] Song X S, Deng W, Y, Yan B X. Variation characteristic of salinization components in water environment of Songnen Plain West. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 2002, 20(9): 45-46.
- [35] Yao S C, Xue B, Lu X G, Xiao H F. The hydrochemical characteristic of lakes in Songnen Plain. *Wetland Science*, 2010, 8(2): 169-175.
- [36] Tian S, Bu Z J, Yang R F, Lan H Q. Response of the wetland vegetation to dry-wet alternating habitat in the Songnen Plain of China. *Wetland Science*, 2004, 2(2): 122-127.
- [37] Wang X H, Tong S Z, Lu X G. The ecological characteristics dynamic of *phragmites australis* community in wetland of semi-arid areas—a case of Momoge wetland. *Wetland Science*, 2008, 6(3): 386-391.
- [38] Yang F, Zhang G X, Yin X R, Gu B, Sun G Y. Spatial variability of soil salinity and sodicity and its correlation with the succession of *Phragmites Australis* community in degraded salt marsh. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5291-5298.
- [39] Strehlow K, Davis J, Sim L, Chambers J, Halse S, Hamilton D, Horwitz P, McComb A, Froend R. Temporal changes between ecological regimes in a range of primary and secondary salinised wetlands. *Hydrobiologia*, 2005, 552: 17-31.
- [40] Brock M A, Nielsen D L, Crossle K. Changes in biotic communities developing from freshwater wetland sediments under experimental salinity and water regimes. *Freshwater Biology*, 2005, 50: 1376-1390.
- [41] Salter J, Morris K, Bailey P C E, Boon P I. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuca ericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings. *Aquatic Botany*, 2007, 86: 213-222.
- [42] Watt S. C. L, García-Berthou E, Vilar L. The influence of water level and salinity on plant assemblages of a seasonally flooded Mediterranean wetland. *Plant Ecology*, 2007, 189: 71-85.
- [43] He Q, Cui B S, Zhao X S, Fu H L, Xiong X, Feng G H. Vegetation distribution patterns to the gradients of water depth and soil salinity in wetlands of Yellow River Delta, China. *Wetland Science*, 2007, (3): 208-214.
- [44] He Q, Cui B S, Zhao X S, Fu H L, Liao X L. Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 676-687.
- [45] Cui B S, He Q, Zhao X S. Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1408-1418.
- [46] Wu D Q. Spatial pattern, dynamic monitoring and simulation of the vegetation in the Yellow River Delta[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010.
- [47] Gong Z N, Zhao W J, Hu D. The characteristic and ecological succession model of plant community to the environmental gradients of water depth and soil salinity in Yeya Lake wetland. *Natural Science Progress*, 2009, 19(11): 1272-1280.
- [48] Deng C N. Study on eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water regime and water quality condition in Momoge wetland [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, 2011.
- [49] Stroh C L, Steven D D, Guntenspergen G R. Effect of climate fluctuations on long-term vegetation dynamics in carolina bay wetlands. *Wetlands*, 2008, 28(1): 17-27.

- [50] Poiani K A, Johnson W C. A spatial model of hydrology and vegetation dynamics in semi-permanent prairie wetlands. *Ecological Application*, 1993, 3(2): 279-293.
- [51] Poiani K A, Johnson W C, Swanson G A, Winter T C. Climate change and northern prairie wetlands: Simulations of long-term dynamics. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(5): 871-881.
- [52] Johnson W C, Bruce V M, Tagir Gilmanov, Voldseth R A, Guntenspergen G R, Naugle D E. Vulnerability of northern prairie wetlands to climate change. *BioScience*, 2005, 55(10): 863-872.
- [53] Wang F, Liang L L, Zhang Y S, Gao R H. Eco-hydrological model and critical conditions of hydrology of the wetland of Erdos Larus Relictus Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29: 307-313.

参考文献:

- [1] 雷光春. 谈湿地科学发展的六大方向领域. 中国生态大讲堂, 2006.
- [2] 杨志峰, 崔保山, 黄国和, 白军红, 孙涛, 李晓文, 刘新会. 黄淮海地区湿地水生态过程、水环境效应及生态安全调控. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1119-1126.
- [3] 章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题. 湿地科学, 2008, 6(2): 105-115.
- [7] 陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春: 吉林出版社, 1995.
- [8] 陆健健, 何文珊, 童春富, 王伟. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 75-103.
- [9] 崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 39-62.
- [16] 布东方, 胡金明, 周德民, 赵魁义. 不同水位梯度下的小叶章种群密度. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1009-1013.
- [17] 栾金花, 吕宪国, 邹元春, 张玉微. 三江平原湿地漂筏苔草的株高和茎粗对水分梯度的生态响应. 吉林农业大学学报, 2008, 28(3): 256-260.
- [18] 王丽, 宋长春, 胡金明, 廖玉静. 不同生长阶段毛苔草 (*Carex lasiocarpa*) 克隆繁殖对水文情势的响应. 生态学报, 2009, 29(5): 2231-2238.
- [19] 杨涛, 宫辉力, 胡金明, 王丽. 水分胁迫对三江平原典型湿地植物种群高度与密度的影响. 西北植物学报, 2010, 30(9): 1887-1894.
- [20] 吴春笃, 孟宪民, 储金字, 付为国, 何海舰, 孟祥君. 北固山湿地水文情势与湿地植被的关系. 江苏大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 331-335.
- [21] 刘永, 郭怀成, 周丰, 王真, 黄凯. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法. 生态学报, 2006, 26(9): 3117-3126.
- [22] 崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 唐娜, 谭学界. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应. 生态学报, 2006, 26(5): 1532-1541.
- [23] 郭雪莲, 吕宪国, 戴国华. 三江平原不同水位梯度湿地地上生物量动态特征. 生态环境, 2008, 17(5): 1739-1742.
- [24] 李彦, 张英鹏, 孙明, 高弼模. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展. 中国农学通报, 2008, 24(1): 258-265.
- [32] 孙广友, 易富科, 罗新正. 内陆盐碱湿地的分布规律与形成机制及整治利用——以松嫩平原为例//何岩, 宋玉祥. 东北区域农业综合开发研究. 北京: 科学出版社, 2001: 62-68.
- [33] 邓伟, 何岩, 宋新山, 阎百兴. 松嫩平原西部盐沼湿地水环境化学特征. 地理研究, 2000, 19(2): 113-119.
- [34] 宋新山, 邓伟, 阎百兴. 松嫩平原西部水环境中各盐碱化成分的变异特征. 东北水利水电, 2002, 20(9): 45-46.
- [35] 姚书春, 薛滨, 吕宪国, 肖海丰. 松嫩平原湖泊水化学特征研究. 湿地科学, 2010, 8(2): 169-175.
- [36] 田迅, 卜兆君, 杨允菲, 郎惠卿. 松嫩平原湿地植被对生境干-湿交替的响应. 湿地科学, 2004, 2(2): 122-127.
- [37] 王雪宏, 佟守正, 吕宪国. 半干旱区湿地芦苇种群生态特征动态变化研究——以莫莫格湿地为例. 湿地科学, 2008, 6(3): 386-391.
- [38] 杨帆, 章光新, 尹雄锐, 顾斌, 孙广友. 退化盐沼湿地盐碱化空间变异与芦苇群落演变关系研究. 生态学报, 2009, 29(10): 5291-5298.
- [43] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 付华龄, 熊雄, 冯光海. 水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析. 湿地科学, 2007, (3): 208-214.
- [44] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 付华龄, 廖晓琳. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系. 生态学报, 2009, 29(2): 676-687.
- [45] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 的生态阈值. 生态学报, 2008, 28(4): 1408-1418.
- [46] 吴大千. 黄河三角洲植被的空间格局、动态监测与模拟[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [47] 宫兆宁, 赵文吉, 胡东. 水盐环境梯度下鸭湖湿地植物群落特征及其生态演替模式. 自然科学进展, 2009, 19(11): 1272-1280.
- [48] 邓春暖. 不同水文水质条件下莫莫格湿地芦苇生理生态响应研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2011.

DOI: 10.5846/stxb201106180833

马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 杨昊谕, 王淑红. 松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展. 生态学报, 2012, 32(13): 4261-4269.

Ma H Y, Liang Z W, Lü B S, Yang H Y, Wang S H. Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4261-4269.

松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展

马红媛^{1,2}, 梁正伟^{1,2,*}, 吕丙盛^{1,2}, 杨昊谕^{1,2}, 王淑红³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国大安碱地生态试验站, 吉林大安 131317;
3. 临邑县农业局, 山东临邑 251500)

摘要: 草地退化是全球干旱和半干旱草地生态系统的共同特征, 由于土壤种子库在植被恢复和生物多样性维持等方面的重要作用, 已成为研究热点。作为重要的脆弱生态系统, 松嫩碱化草甸在人类活动和全球变化影响下发生了明显退化。松嫩碱化草甸土壤种子库研究始于 20 世纪 90 年代, 主要集中在对虎尾草群落、星星草群落、碱蓬群落、羊草群落等不同演替阶段土壤种子库物种种类、密度、季节变化研究; 该地区土壤种子库的物种数目随着恢复演替由初级向高级阶段而呈现逐渐增加的趋势, 但物种数目均相对较少, 且多以 1 年生为主。另外对种子雨和某些物种种子散布动态也有零星报道, 主要是从群落水平进行的研究, 种子雨的空间异质性表现在其组成和大小因群落而异。今后需要加强对松嫩碱化草甸土壤种子库格局与关键生境要素的耦合特征、种子库分布格局的形成机制等研究, 研究方法上, 引入稳定同位素标记和分子遗传学等研究方法和手段, 开展持久种子库的长期定位监测研究, 为盐碱地植被恢复提供理论依据。

关键词: 土壤种子库; 休眠; 种子雨; 松嫩平原; 盐碱化; 温带草原

Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain

MA Hongyuan^{1,2}, LIANG Zhengwei^{1,2,*}, LÜ Bingsheng^{1,2}, YANG Haoyu^{1,2}, WANG Shuhong³

1 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130012, China

2 Da'an Sodic Land Experiment Station of China, Jilin Da'an 131317 China

3 Linyi Agricultural Bureau, Shandong Linyi 251500, China

Abstract: Grassland degradation is common in arid and semi-arid areas of the world. The soil seed bank plays a critical role in vegetation restoration and biodiversity maintenance and has become a hot research topic. Due to human activities and global climate change, the Songnen meadow is being degraded by salinization, and about 90% of the *Leymus chinensis* vegetation has been degraded. This perennial grass was a high quality and useful species in this area before the 1960s. With the increase in degradation, i. e. increase in soil saline-alkalinity, secondary succession in this grassland began. In light saline-alkali areas, the dominant species is still *L. chinensis*. However, bare-soil patches occur in the most severe saline-alkali areas with high soil pH, in some of these patches *Suaeda glauca* grows only in the rainy season. In some moderate saline alkali areas, *Chloris virgata*, *Puccinellia tenuiflora*, *Kochia sieversiana* communities have appeared. The soil seed bank in the Songnen saline-alkali meadow has been investigated since the 1990s, with a focus on the floristics, seed density and seasonal dynamics in the succession stages of the *Chloris virgata*, *Puccinellia tenuiflora*, *Kochia sieversiana*, and *Aeluropus sinensis* communities and on the bare-soil saline-alkali patches. Seed rain and seed dispersal also have been

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41001027); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-359-2); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-TZ-07-08); 吉林大学工程仿生教育部重点实验室开放基金 (K201007)

收稿日期: 2011-06-18; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liangzw@neigae.ac.cn

investigated in several species. This paper summarizes these reports and points out problems that still exist. Researches on the following aspects of the ecology of this grassland should be increased in the future. Firstly, the mechanisms in the pattern of soil seed bank formation and the relationship between the seed bank pattern and the critical ecological environment factors such as soil salinity, soil pH, soil moisture, wind and so on should be investigated. Secondly, long-term monitoring of the persistent soil seed bank should be undertaken. Thirdly, some new technologies and methods should be introduced to help obtain more accurate and detailed research results on the soil seed bank.

Key Words: soil seed bank; dormancy; seed rain; Songnen plain; salinization; temperate steppe

土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部活的种子,是植物对胁迫环境适应机制和植被恢复演替研究的关键内容^[1-2];作为退化植被动态的重要组成部分^[3-4],直接影响着生态系统的复原能力^[5-6]。利用当地土壤种子库恢复植被是不损坏遗传区域性前提下恢复遗传多样性最有效的方法^[7]。土壤种子库成为生物地理学和种子生态学的重要研究领域^[8]。

在人类活动影响下,生物个体、群落、生态系统发生了不同层次的改变^[9],由此引起的土壤种子库的变化已经在国内外森林^[10-11]、温带草原^[12-15]、高寒草甸^[16-17]、沙地^[18-20]和湿地^[21-22]等生态系统的研究中得到证实,表明生态系统演替是土壤种子库特征变化的重要影响因子^[23]。尤其在干旱和半干旱区草地生态系统,在自然和人类活动双重影响下,发生了显著的退化演替,优良牧草被杂草或木本物种所替代,甚至变成光斑地^[3, 24-25]。

松嫩平原位于大陆性季风气候区半干旱地带,是我国著名的生态脆弱带、气候和环境变化的敏感带、农牧交错带,以温带草甸草原景观为典型特征。羊草是该地区原始优势植被,具有耐寒、耐旱、耐盐碱等优良特性,同时营养价值高,被称为国之瑰宝。然而自 20 个世纪 60 年代后,在人类过度放牧等不合理利用和全球变化的双重影响下,70% 的草地发生了不同程度盐碱化,且仍呈现增加趋势,随着盐碱化程度加重,草地群落出现了次生演替群落。在轻度盐碱化草甸仍然以羊草群落为主,而在土壤 pH 高的碱斑上,只有雨季生长碱蓬、碱地肤等 1 年生盐碱植物,碱斑边缘经常环形生长星星草、朝鲜碱茅、野大麦、碱蒿、西伯利亚蓼等多年生耐盐碱植物^[26]。出现了典型的羊草草甸→羊草+虎尾草→羊草+碱蓬→碱蓬→碱斑等退化演替规律,生态环境现状日趋恶化。近年来学者对松嫩平原不同退化演替阶段的土壤种子库进行了初步研究,本文对这些报道进行了总结归纳,并对未来该地区的土壤种子库研究工作进行了展望。

1 松嫩碱化草甸不同演替群落土壤种子库的密度及季节动态

土壤种子库中的每个物种或种群的种子都有时间和空间尺度,在空间上具有水平及垂直分布格局,反应了种子向土壤中的初始分布和以后的运动状况^[27],在时间上具有季节动态和年际变化,自然条件下种子库的时间动态受诸多生态因子的影响,包括植物生殖物候特性、成熟种子的散布、被捕食情况、土壤中的保存、萌发以及在适宜条件下长成幼苗等因素。对松嫩碱化草地土壤种子库研究始于 20 世纪 90 年代初,集中在对不同群落土壤种子库的组成和大小以及季节动态方面。

1.1 不同演替群落土壤种子库组成及密度

土壤种子库的组成和密度一直是该领域研究的基本内容,不同演替阶段土壤种子库的组成和密度存在差异,主要是因为土壤种子库是种子雨和种子小时之间的平衡,在演替初期,具有较高的种子密度主要是因为先锋物种种子输入量大且损失少^[23]。如在半自然草地或草甸群落中演替表现为物种的数目和种子库大小在初始演替阶段增加^[28],在沙丘土壤种子库密度大小顺序为:固定沙丘>固定沙丘丘间低地>流动沙丘丘间低地>流动沙丘^[29]。土壤种子库的组成和密度也会对地上植被有一定的影响,二者存在相似性和不相似性两种关系,主要与不同群落类型以及演替阶段等影响因子有关^[27]。

对松嫩碱化草甸不同单优盐生植物群落土壤种子库研究表明,松嫩平原碱化草甸星星草+羊草群落和星

星草群落物种数为 10—12 个,且均以星星草为主^[13]。对 6 个单优盐碱植物群落研究表明种子库数目:虎尾草群落>星星草群落>翅碱蓬群落>角碱蓬群落>漳毛群落>羊草群落,除了羊草群落外,其它 5 种群落优势种的种子数量均占有最大比率,一般又以 1 年生植物群落的为更大^[30]。对虎尾草群落、角碱蓬群落、翅碱蓬群落和碱地肤群落的土壤种子库的组成及其空间结构研究表明,种子库存量都很大 15480—63730/m²,但是物种数目很少,每个群落仅为 3—4 种^[31]。

在松嫩碱化草甸,土壤种子库研究结果表明,在演替初期种子库与地上植被存在较高的相似性;随着演替进程的增加,二者相似性降低。对虎尾草群落(演替初期)、星星草群落(演替中期)、星星草+羊草群落(演替后期)、羊草群落(演替顶级)四个恢复演替系列群落土壤种子库组成和密度研究表明,随着恢复演替进程增加,群落物种组成呈增加趋势,群落优势种在土壤种子库中所占比例呈现不同幅度的降低^[14],在演替顶级羊草群落中,土壤种子库物种数目最多为 11 种,但没有羊草种子^[32]。

松嫩碱化草甸不同演替群落土壤种子库组成及密度研究相对较多,研究均以不同群落作为演替的进程,缺乏对关键生境因素的考虑。因为不同群落的形成可能与微地形、盐碱程度等生境因子有关。

1.2 不同演替群落土壤种子库时间动态

土壤种子库时间动态研究对于了解土壤和植被动态、预测种子寿命和种子库类型划分具有重要意义。土壤种子库的组成和大小随时间呈现有规律的变化,尤其是其物种组成和数量具有季节动态^[27]。较多物种的种子散布后,在土壤中存留较短的时间就萌发,而另外一些物种的种子除有一部分萌发外,另有一部分仍留存在土壤中,处于休眠状态^[33]。在生长季开始前的种子库密度和物种丰富度总体上小于生长季结束前^[19-20]。不同种类植物的土壤种子库由于植物本身的生物学特性、传播方式和所处环境的影响而表现出不同的时间动态特征。除了季节变化,土壤种子库还有年际变化,主要受气候因子变化、植被演替以及结实周期性变化控制^[34]。

对松嫩平原碱化草甸土壤种子库的时间动态研究相对较少,且集中在季节变化方面。研究表明,星星草+羊草群落和星星草群落土壤种子库组成,在 4—9 月份,2 个群落的土壤种子库均以多年生草本植物为主,星星草+羊草群落共出现 12 种,而星星草群落为 10 种,并均以星星草占最大比例,分别为 66.8%—92.9% 和 75.3%—97.7%,种子库相似性系数在 6 月最大。星星草+羊草群落种子库密度在 7 月份最大,星星草群落在 8 月最大;而 2 个群落的物种多样性指数和均匀度指数则分别在 7 月和 8 月最小^[13]。在温带草原,4、5、9 月是土壤种子库的稳定时期,大多数种子散布基本完成,下一个萌发季节还没有来临。6、7、8 月则是种子库活动时期,种子输出与输入正在进行,可见在种子库活动时期二者的种类组成相似性较大,其差异主要体现在休眠种子库^[13-14, 35]。以上研究看出对该区域土壤种子库年际变化研究少,缺乏长期定位研究。

2 土壤种子库的输入和输出动态

土壤种子库的动态主要取决于种子输入和输出两方面因素。种子输入主要来源于种子雨、外来种子的散布;输出主要包括种子萌发、二次扩散、被动物取食、生理死亡、微生物的侵蚀等。大量研究表明,新的种子作物由于疾病、衰老以及作为饲料等原因大部分被损失,只有小部分能够形成活的种子库种群^[36]。在种子成熟季节,种子脱落并散布在地上,并在植物周围形成散落图,在干旱地区,此过程受风、捕食、地上植被以及微地形的影响,这些因子在互作形成了物种时间和空间种子库格局^[5]。

2.1 种子雨组成和动态研究

种子雨是植物生命史动态过程中一个不可缺少的环节,与种子库关系密切,是土壤种子库的主要来源,决定着土壤种子库的物种组成和大小^[37-38]。由于生态系统之间和生态系统内部地上植被组成和地形、土壤养分等环境条件的差异,会引起种子雨组成和大小在空间分布上的不均一性;这种差异性将进一步引起种子库组成和格局的改变^[39]。但由于种子雨存在时间短暂性,与种子库研究相比对其研究相对较少。目前,研究内容主要集中在种子雨的物种组成、时间和空间动态、扩散距离和环境条件的影响等方面^[40];而对于种子雨和土壤种子库的关系及其机理研究较少,且生态系统类型上主要集中在森林生态系统^[41],而对草甸生态系统研

究相对比较薄弱。

对松嫩平原大针茅群落种子雨连续 7a 定位观测的结果表明,植物种类为 48 种,优势种大针茅的种子雨密度仅占各年度种子雨密度的 0.3%—0.3%,其优势地位主要依靠营养繁殖来加以维持^[42]。羊草群落的研究结果与之相似,为 340 粒/m²,占种子雨密度的 4.8%,种子与产量较低,主要与它们在自然界中以营养繁殖有关^[43]。何念鹏等^[44]和 Wu 等^[24]对该区次生盐碱斑种子流及其对生态恢复的意义进行了初步研究,表明在盐碱斑存在一定的种子流,但很难形成种子库。总体上对松嫩碱化草甸种子雨的研究大多集中于对单个种群、单个季节以及较短距离内,而较少考虑种子散落的生境条件、年季差异和种群内部以及种群之间的相互作用。长期定位研究碱化草甸不同演替阶段种子雨特征与土壤种子库的关系及其机制,有利于深入揭示种子雨与系统演替、种子雨与种子库格局关系及其机制研究。

2.2 种子的休眠和萌发特征

埋藏在土壤中的休眠种子是土壤种子库研究中最受关注的内容,因为这部分种子组成的土壤长久种子库,对植被的长效恢复更加重要^[27,45],也是植物对胁迫环境适应机制研究的关键内容^[46-48]。休眠和对环境的响应对种子库动态的影响至关重要^[49]。Baskin 和 Baskin^[46]对世界 15 植被区域类型 7351 个物种的休眠和非休眠种子的生物地理分布表明,休眠种子占 70.1%。种子萌发是土壤种子库输出的主要方式之一,受温度、土壤水分、光照、盐分等生态因子的影响,种子休眠与生态因子互作,产生低风险萌发策略,促进土壤种子库的形成^[49]。在盐碱胁迫生境下,盐分是种子萌发的决定性因子^[23, 50-51],随着土壤盐度增加,种子萌发数量减少,许多种子由于高盐及其低水势而进入休眠状态,甚至死亡^[52-54]。因此,理解种子休眠和萌发对环境条件的响应,对于揭示和预测物种的生态适应性非常重要^[2, 55]。

松嫩平原天然草地主要是羊草草地,但羊草种子具有深度的休眠特征。研究表明羊草种子休眠属于生理休眠,休眠的关键部位为胚乳和稃^[56],休眠时间长达 4—8a,可能会形成持久种子库。但目前虽然对松嫩草甸种子研究集中在羊草种子对盐碱胁迫、高 pH 胁迫、埋藏深度、光照、温度等生态因子的响应;对虎尾草、马唐、苜蓿、碱蓬、碱地肤等物种也有一定的研究。但以上研究还未直接与种子库的动态和组成直接相联系,需要加强地上种子生产、组成与种子库种子组成及动态间的关系研究。

2.3 土壤种子库格局和动态的影响因素

土壤种子库格局和动态受诸多因子的影响。首先是受地上植被的影响,Whipple 将土壤种子库与地上植被的关系分为:有种子,有植株;有种子,无植株;无种子,有植株;无植株,无种子 4 种情况,土壤种子库格局和动态与地上植被的关系因不同演替阶段而存在显著的差异^[57]。此外,种子产量与种子库格局直接相关,但种子通过水、风或动物的传播打破了这种格局^[58]。放牧、刈割和火烧等人为干扰也是引起土壤种子库变化的重要因子。因此,地上植被的结实特性、种子个体大小、种子的休眠和萌发特性、种子传播方式及传播到的土壤环境(微地形、温度、水分、盐分、pH 值等)。此外,人类干扰也是土壤种子库分布格局与动态的重要控制因素^[22]。

前人对松嫩碱化草甸土壤种子库动态研究除了对不同群落和不同演替阶段的土壤种子库物种组成和密度的时间变化动态之外,还对朝鲜碱茅、星星草、野大麦等 3 种优良盐生牧草种子的散布格局及其散布因子等进行了研究,表明散布格局主要受风向、风速、坡向和坡度等因子的影响^[59],但对盐碱等松嫩碱化草甸典型的生态因子的影响还未系统开展。

3 土壤种子库对松嫩碱化草甸植被恢复的潜力

尽管地下土壤种子库与地上植被并非总有较高的相关性,但土壤种子库仍是植被恢复和植物就地保护重要手段和有效措施^[3, 60-61]。例如,在中国浑善达克沙地,通过自然土壤种子库进行植被恢复效果比空播方法更为安全和有效,多数退化的沙地能够在 3—5a 内得到恢复,这种“自然力恢复论”已经逐步成为国家生态治理的主流模式^[6]。而在一些干旱和半干旱草地或许在围栏多年之后也不能够得到恢复^[61],种子库对植被的恢复作用取决于近 10 年放牧的程度及干旱的时间,在降雨相对较少的地区,利用种子库快速恢复植被是不

可能的^[62]。对于盐碱退化区的植被恢复,植物物种的演替依赖于其种子在高盐碱度土壤中的持留时间和在盐碱胁迫减弱时的萌发能力。研究表明几乎所有盐生植物种子的萌发都对土壤盐碱程度极度的敏感,最大萌发率都出现在没有盐碱胁迫的环境下。盐碱度的增加能够减少种子的萌发率,推迟种子萌发的起始时间,导致种子萌发进程的整体延迟,过剩的盐能够降低幼苗从土壤中吸收水分的能力,导致幼苗的萎蔫和最终死亡^[62-63],从而影响通过种子库恢复植被的进程。

由于过度利用,松嫩草地退化和盐渍化加重,次生光碱斑已广泛分布,已经有 1/3 的草地碱斑大面积连片,沦为弃地^[59]。围栏封育是对退化草地恢复的简单易行的措施,经过长期围栏禁牧可恢复其土壤种子库物种组成和种子库规模^[15]。在次生盐碱光斑地区,通过扦插玉米秸秆截留植物种子,提高了土壤种子库,为植被恢复提供了必需的种源,使被截留的植物种子得以顺利定居、生长^[44]。通过打破羊草种子休眠进行育苗,成苗后进行羊草移栽技术,使羊草植被在重度盐碱地得以建植和恢复,实现无需经过碱蓬、虎尾草等恢复演替阶段,直接实现了跨越式恢复顶级植被的目的,也是利用人工埋藏种子库进行植被恢复的效果和典型案例^[64]。但总体而言,对于松嫩碱化草甸退化对土壤种子库植被恢复以及这一敏感生态系统的复原力研究尚需深入系统进行。

3 存在的问题及研究展望

对松嫩碱化草甸地区土壤种子库的研究还处于起步阶段,主要以土壤种子库种子物种组成和密度(或大小)的调查为主,且研究时间相对较短。对不同演替阶段土壤种子库的时空格局与动态、原始优势建群物种羊草种子休眠和萌发对盐碱程度与胁迫时间的响应、土壤种子库演替与环境因子的定量关系以及种子库对群落未来演替方向和恢复潜力评价等研究还未开展,需要在以下 3 个方面进行加强研究。

3.1 加强种子库形成格局机制及与环境要素耦合关系研究

土壤种子库规模、格局、影响因素和对环境的适应进化研究已成为我国陆地表层系统植被生态学和生物地理研究的重要内容。我国对松嫩碱化草甸土壤种子库研究有一定的积累,但多集中在种子库组成和密度等调查研究上,而对其形成格局与关键生境要素间的耦合关系研究较少;格局的形成机制研究中,缺少大尺度的生态-地理过程与微观生物机制的结合。

3.2 深入开展持久种子库的长期定位研究

埋藏在土壤中的休眠种子是土壤种子库研究中最受关注的内容,因为这部分种子组成的土壤长久种子库,对被干扰或被破坏的植被恢复可提供潜在的种源^[27,45],也是植物对胁迫环境适应机制研究的关键内容^[46-48]。种子持久性是植物生物学研究的基本问题之一,在植物群落保育和恢复中起着重要的作用,同时也是物种对土地利用和气候变化具有重要的潜在响应。而松嫩草甸草原哪些特别的植物种群在土壤中具有长久土壤种子库这一问题还未见报道,需要今后着重加强。这就需要改变以往短期的、间断的调查样地的研究方法,采用长期定位观测的研究方法。

3.3 强化种子散布、萌发和休眠特性的研究,深入揭示土壤种子库格局形成机制

种子休眠及其对环境的响应对于种子库动态至关重要,种子休眠与光照、温度等生态因子互作,产生低风险萌发策略,促进土壤种子库的形成^[49]。种子萌发是土壤种子库输出的主要方式之一,除受所处生境的温度、土壤水分、光照等影响,盐分是种子萌发的决定性因子^[23, 50-51],随着土壤盐度增加,种子萌发数量减少,许多种子由于高盐及其低水势而进入休眠状态,甚至死亡^[52-54]。因此,理解种子休眠和萌发对环境条件的响应,对于揭示和预测物种的生态适应性非常重要^[2, 55]。

生态系统中的关键种对整个生态系统起着控制作用,代表了群落恢复的潜力和趋势。应重视关键种或建群种的种子动态。松嫩平原植物种子结实、散布、休眠和萌发等方面研究集中在羊草^[56, 65-66]、野大麦^[67]、寸苔草^[68]、虎尾草^[69]等物种,缺乏对更多物种种子休眠及萌发特性与实际环境因子相关性研究。并且目前多数研究都是基于室内的控制模拟,缺少系统的野外长期实地控制研究,阻碍了研究成果的野外普适性和应用的推广性。

CONTENTS

Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments	HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)
Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for <i>Fagopyrum esculentum</i> populations	LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)
Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity	LI Jifeng, LI Renjie (3998)
Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem: a case study of Gongcheng county	YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)
Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia	YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)
Soil conservation value flow processes of two typical grasslands	PEI Sha, XIE Gadi, LI Shimei, et al (4025)
Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old <i>Pinus massoniana</i> forest ecosystem in Changsha City, China	WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)
Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen	JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)
Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity	JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)
The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve	ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)
Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils	LU Xiping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)
The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria <i>Bacillus megaterium</i> C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake	ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)
Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of <i>Phragmites australis</i> wetlands in different reaches in Minjiang River estuary	WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)
Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region	WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)
Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China	WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)
Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of <i>Dendrobium candidum</i> tissue culture seedlings during transplantation	PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)
Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland	ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)
Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model	ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)
Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009	LI Zhi (4139)
Eco-physiological responses of <i>Phragmites australis</i> to different water-salt conditions in Momoge Wetland	DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146)
Comparative study of different earthworm sampling methods	FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)
Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, <i>Ostrinia furnacalis</i> Guenée (Lepidoptera: Crambidae)	TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinwen, et al (4160)
Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe	ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)
Inhibition effects of ethyl acetate extracts of <i>Momordica charantia</i> leaves on the experimental population of <i>Spodoptera litura</i>	LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)
Feeding habits of <i>Lateolabrax maculatus</i> in Yangtze River estuary	HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)
Genetic structure of <i>Gymnodontichus pachycheilus</i> from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region	SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)
Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog <i>Rana nigromaculata</i>	CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)
The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China	FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)
Spatial relationships among <i>Empoasca vitis</i> (Gothé) and <i>Toxoptera aurantii</i> (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban	YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)
Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve	ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)
Research of typical EIPs based on the social network analysis	YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)
Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi	QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)
Review and Monograph	
The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review	ZHANG Guangxin (4254)
Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain	MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261)
A new landscape expansion index: definition and quantification	WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)
Scientific Note	
Response of photosynthetic characteristics of <i>Psathyrostachys huashanica</i> Keng to drought stress	LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)
The antifouling activities of <i>Callyspongia</i> sponge extracts	CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 13 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 13 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@csbg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@csbg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元