

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

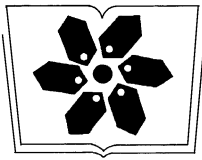
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第18期 Vol.31 No.18 **2011**

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



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 18 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

高寒矮嵩草草甸冬季 CO ₂ 释放特征	吴 琴, 胡启武, 曹广民, 等 (5107)
开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响	黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等 (5113)
施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响	祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等 (5121)
浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析	祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (5130)
大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响	常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等 (5138)
樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析	商志远, 王 建, 崔明星, 等 (5148)
内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算	柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等 (5159)
杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响	史 绮, 焦 锋, 陈 莹, 等 (5171)
火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响	于丽丽, 牟长城, 顾 韩, 等 (5180)
黄河中游连伯滩湿地景观格局变化	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (5192)
黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响	李 婷, 赵世伟, 张 扬, 等 (5199)
我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性	祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等 (5207)
黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子	高会议, 郭胜利, 刘文兆 (5217)
宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性	安韶山, 李国辉, 陈利顶 (5225)
岩溶山区和石漠化区表土孢粉组合的差异性——以重庆市南川区为例	郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友 (5235)
夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值	金则新, 李钧敏, 马金娥 (5246)
苏柳 172 和垂柳对 Cu ²⁺ 的吸收特性及有机酸影响	陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等 (5255)
导入 <i>TaNHX2</i> 基因提高了转基因普那菊苣的耐盐性	张丽君, 程林梅, 杜建中, 等 (5264)
空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响	郭彦军, 倪 郁, 郭芸江, 等 (5273)
黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响	邓振镛, 张 强, 王 强, 等 (5281)
咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化	赵景波, 周 旗, 陈宝群, 等 (5291)
苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布	张小波, 周 涛, 郭兰萍, 等 (5299)
环境因子对小球藻生长的影响及高产油培养条件的优化	丁彦聪, 高 群, 刘家尧, 等 (5307)
不同基质对北草蜥和中国石龙子运动表现的影响	林植华, 樊晓丽, 雷焕宗, 等 (5316)
安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构	陈锦云, 周立志 (5323)
黑胸散白蚁肠道共生锐滴虫目鞭毛虫的多样性分析与原位杂交鉴定	陈 文, 石 玉, 彭建新, 等 (5332)
基于熵权的珠江三角洲自然保护区综合评价	张林英, 徐颂军 (5341)
专论与综述	
中小尺度生态用地规划方法	荣冰凌, 李 栋, 谢映霞 (5351)
土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	陈 朝, 吕昌河, 范 兰, 等 (5358)
海洋浮游植物与生物碳汇	孙 军 (5372)
多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展	孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等 (5379)
生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响	张林海, 曾从盛, 仝 川 (5387)
生态网络分析方法研究综述	李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等 (5396)
研究简报	
不同群落中米氏冰草和羊草的年龄结构动态	金晓明, 艾 琳, 刘及东, 等 (5406)
主题分辨率对 NDVI 空间格局的影响	黄彩霞, 李小梅, 沙晋明 (5414)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-09



封面图说: 在树上嬉戏的大熊猫——大熊猫是中国的国宝, 自然分布狭窄, 数量极少, 世界上仅分布在中国的四川、陕西、甘肃三省的部分地区, 属第四纪冰川孑遗物种, 异常珍贵。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。瞧, 够得上“功夫熊猫”吧。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.

Li Z C, Xu J Y, Wu C Y, Zhang Y. A review of studies using ecological network analysis. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5396-5405.

生态网络分析方法研究综述

李中才*, 徐俊艳, 吴昌友, 张 漪

(山东工商学院管理科学与工程学院, 烟台 264005)

摘要:生态网络分析方法是分析生态系统作用关系、辨识系统内在、整体属性的一种有效的系统分析方法。总结了生态网络分析方法的主要研究成果:网络结构特性、网络稳定性、网络上升性、网络效能等;介绍了构建生态网络模型过程和群落构建规则;以德国西部城市诺伊斯河口氮循环为例,介绍 David K 是如何运用生态网络分析方法来揭示网络中的微动力流循环规律。生态网络分析方法的主要贡献:(1)对人们凭经验感知的生态系统分室间的关联关系,采用了严密的数学模型和推导进行了描述和证明;(2)为生态系统的微动力流循环的研究提供了方法,对生态系统中物质流的间接循环作用进行了科学论证;(3)不仅为分析生态系统提供了一种科学的数学方法,而且,它为探索生态系统提供了不同与牛顿世界观的崭新的认识论。总结与回顾生态网络分析方法,有益于该方法的运用和进一步完善。

关键词:生态网络分析;系统分析;微动力流循环流

A review of studies using ecological network analysis

LI Zhongcai*, Xu Junyan, WU Changyou, ZHANG Yi

College of Management and Science, Shandong Institute of Business and Technology, Shandong, Yantai 264005, China

Abstract: Ecosystems are complicated and macroscopic living systems with self-organization properties. Ecosystem components are interconnected, interrelated, and form a network. The structure of ecosystem networks determines the makeup of adjacent (direct) and non-adjacent (indirect) pathways over which energy, matter, and information flow. Ecological network analysis (ENA) is a system-oriented methodology used to analyze within-system interactions, which helps researchers identify holistic properties that are otherwise not evident from empirical observations. ENA is introduced in the paper as a promising approach for studying ecosystems. We outline some of the main achievements of ENA, which include network structure, network stability, network ascendancy, network utility and so on. We introduce the steps for one approach in constructing network models and in giving rules for modeling a community. The first step in ENA is to identify the system of interest and place boundaries around it. The second step is to make a list of the major or functional groups in the ecosystem. Third, a unit of currency for the network is selected. Fourth, the adjacency matrix is constructed to document any possible flow interactions. Fifth, field data are obtained related to inputs, outputs and throughflows. Sixth, ENA is applied to the network. Seventh, a sensitivity analysis is conducted. We also provide a brief overview of the algorithmic methods used to construct ecological network typologies. We chose a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River Estuary, United States, as an example to explain how D. K. Gattie developed insight into the essence of microdynamic environ flows in an ecological network. The ENA method contributed three significant achievements related to ecosystem study. First, ENA uses a mathematical model and derivations to study the interconnective relationships between different compartments within ecosystem. Second, ENA is a promising method for analyzing microdynamic environ flows in

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70973069);教育部人文社会科学规划基金(10YJA630091,09YJA630086);山东省社科规划研究项目(09CJGZ24,10CJGJ48)

收稿日期:2010-11-29; **修订日期:**2011-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Lzc2004620@sohu.com

an ecological network. This method indicates indirect effects from non-adjacent network relationships are very important for an ecosystem, and allows exploration of the indirect mechanisms that maintain an ecological network in a steady-state. Third, ENA not only is a system-oriented methodology used to analyze within-system interactions and used to identify holistic properties, but also provides a scientific method different than that built on Newton's principle. Although ENA has evident advantages useful in analyzing ecosystem properties, difficulties remain in constructing ecosystem networks. First, ENA often requires a substantial amount of data and sometimes the data are not available. Second, it is generally difficult to establish the steady-state of a real system based solely on field data. Third, no standard method exists for delimiting an ecosystem, which leads to errors during network analysis. The method has an inherent level of difficulty because ecosystems are intangible by nature since they have no actual boundaries. Our goals are to help other researchers who are considering the construction of network models as well as assist them in further refining the ENA method.

Key Words: ecological network analysis; ecosystem analysis; microdynamic environ flows

生态系统是一个具有很强的自组织、自发展的复杂网络系统。网络分析方法已经成为研究生态系统结构、内部变化规律的有效工具。生态网络是模拟生物间相互作用关系的网络,描述生态系统中不同分室间物质、能量流动的结构,其基本单元分为分室和路径。分室是指生态系统中特定的功能单位,路径是分室间物质、能量传递的通道。1973 年 Hannon^[1]将 Leontief^[2-3]所开发的输入-输出模型应用于分析生态系统中物质、能量的流动,标志着生态网络分析(Ecological Network Analysis, ENA)思想的形成。1975 年,IBP 科学负责人 Worthington 阐述了系统分析方法是探索生态系统规律性的有效方法^[4]。1975 年至今,生态网络分析方法成为研究生态系统的主流方法。自 1976 年 Patten^[5]首次发表了生态网络分析方法的论文以来,该方法得到了生态学家、产业生态学家的关注,已有大量的研究报道^[6-9]。

ENA 方法是分析生态系统组成要素间作用关系、从整体上辨识系统内在属性的一种分析方法,突出整体性、系统性,注重系统的结构与功能关系研究^[10-19]。ENA 方法在生态系统分析、设计中占有重要地位,成为认知、探索这一复杂系统的行之有效的方法与工具。从研究进展来看,ENA 方法已经成为国外研究生态系统的—一个重要方法。与国外研究相比,国内学者对生态网络分析方法在经济系统^[20]、城市代谢系统^[21]、产业生态模式^[22]、景观生态^[23]等领域的应用研究较多,原创性的方法偏少。因此,对国内外生态网络研究方法加以系统地归纳与回顾,借鉴并及时总结经验,具有方法论意义,有利于更加科学地研究生态网络系统。

1 生态网络分析方法的产生与发展

1.1 生态网络分析方法的产生

早在 1941—1942 年 R. L. Lindenman 和 G. E. Hutchinson^[24]创立了有关生态系统的营养动力学理论,提出食物循环概念,并对美国明尼苏达州的 Cedar Bog 湖泊进行了实证分析。1973 年 Zaret 和 Paine^[25]研究了生态系统中分室间接作用,进一步扩展了营养动力学理论。同年, Hannon^[1]首次使用经济学中的输入-输出模型提出生态网络分析方法,1976 年 Patten^[26]发表了生态网络分析方法的论文,标志着该方法的形成。

自从 Finn 和 Patten 发表有关生态网络分析方法的论文以来,生态网络分析方法的研究取得重大进展^[27-55],已经成为分析生态系统结构与功能的重要方法,广泛应用到自然生态系统的研究、设计中。

1.2 生态网络分析方法的发展

1.2.1 生态网络结构

Cohen^[56]、Martines^[57]、Bersier^[58]和 Margalef^[59]等人定义了生态网络连接度(C)的概念。其中,网络节点数定义为 n ,节点间存在关联边的数目为 L , $C = L/n^2$; Hannon、Patten 和 Margalef 采用可达矩阵来描述生态网络节点之间的关系^[60](图 1)。图中节点代表生态系统中的成员要素,节点之间的弧代表两个成员要素之间具有物质或能量的交换关系,若第 i 节点到第 j 节点有一条弧,则可达矩阵的第 i 列第 j 行的元素为 1,否则为 0。

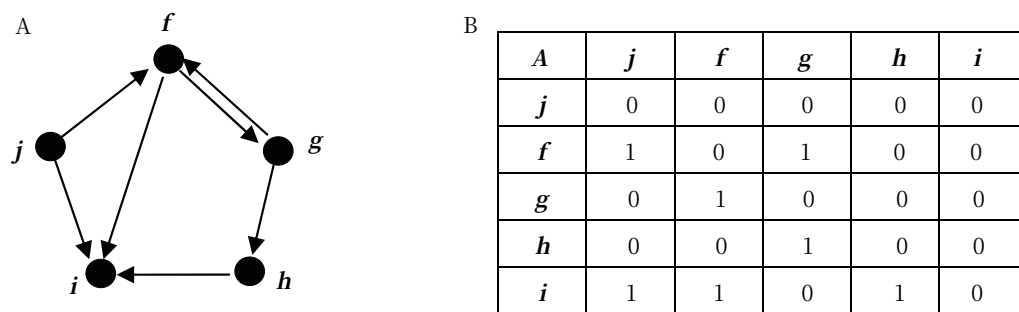


图1 网络举例,两个网络同构体代表节点数为 $n=5$, 联接度 $C=0.28$ 的网络

Fig.1 Example network. Two isomorphic representations of an example network with $n=5$ and $C=0.28$

A: 网络的有向图; B: 网络的可达矩阵,代表了网络有向图中节点的联接方式

Harary 和 Hill^[61]给出了求解从网络节点 j 到节点 i 的长度为 k 的路径数目 (P_k) 的公式: $P_k = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (a_{ij})^k$, a_{ij} 为可达矩阵的元素。Wright^[62]认为生态网络中的路径长度与路径数量关系是生态网络结构研究的重要内容。因为,当不断增加间接路径数量,物质传递的机会也不断得到增加,并伴随物质非零累积现象的发生;Fath 和 Patten 认为:在一个连接性能良好的网络中,随着路径的长度增加,路径的数量不会受到任何约束,并不断增加;Borrett 和 Fath^[63]研究了网络路径的增长率问题;Stuart R^[64]等研究了系统大小、联接度、联接方式对路径长度与路径数量关系的影响。由 Fath、Finn 和 Patten 等阐述了网络中直接、间接路径对系统的作用^[40,65],Finn 建立了评价生态系统物质流的 3 个重要指标:系统总流量 TST (the Total System Through-flow)、流入路径的平均长度 APL (the Average Path Length of an Inflow) 和循环指数 CI (Cycling Index)^[26]。生态网络结构的研究对于深入探讨物质、能量传递机制具有重要意义。

1.2.2 生态网络稳定性

Reza, Jelinek, Ulanowicz 和 Norden^[66-68]等人受到 Gallager 和 Shannon^[69-70]的信息理论的启发,定义了生态网络的平均交互信息 (Average mutual information, AMI) 的概念,即 $AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}}$, 式中, T_{ij} 表示由节点 j 流至节点 i 的流量、 $T_{i.}$ 表示流至节点 i 的总流量、 $T_{.j}$ 表示由节点 j 流出的总流量、 $T_{..}$ 表示网络通量。Rutledge^[71]等人认为,随着生态系统的物质、能量交换的网络越完善, AMI 指标值也随之降低,因此,可以用来衡量网络的稳定性。不难看出,网络的稳定性与其多样性是密切相关的。由此, Ulanowicz 和 Norden^[72]进一步给出了评价生态网络稳定性的公式: $H_R = - \sum_{j=0}^n \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij}}{T_{..}}$ 、 $D_R = H_R - AMI$ 。在网络不断发展的过程中, AMI 指标值在逐渐减少, D_R 值在逐渐增大。

1.2.3 生态网络上升性 (Ascendancy, A)

Ulanowicz 和 Norden^[68]提出定量判断生态系统上升性测算方法。用公式 $A = \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n T_{ij} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}}$ 来描述生态系统的发展程度。他们又提出了反映系统的发展能力 (Development capacity, C) 指数,认为发展能力指数 C 是上升指数 A 的上界, $C = - \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n T_{ij} \log_2 \frac{T_{ij}}{T_{..}}$, 公式 $\varphi = C - A$ 描述上升指数与发展能力指数之间的差值。在 1990 年, Ulanowicz 和 Norden 将上述评价指数分别运用在生态系统的输入、输出、内部、耗散 4 个过程中,有下面关系成立 (表 2)。

1.2.4 生态网络效能

早在 1991 年 Patten 提出了生态网络效能的概念,研究了用数量方法确定生态网络中分室间的关系类别,

表 2 Ulanowicz 评价指标
Table 2 Ulanowicz assessment indexes

上升指数 Ascendancy, A		差值 Overhead, φ		发展能力指数 Development capacity, C
A_0	+	φ_0	=	C_0
+		+		+
A_I	+	φ_I	=	C_I
+		+		+
A_E	+	φ_E	=	C_E
+		+		+
A_S	+	φ_S	=	C_S
A		φ		C

Ulanowicz 评价指标分解为输入(下标用 0 表示)、内部(下标用 I 表示)、输出(下标用 E 表示)、耗散(下标用 S 表示)

如共生、共栖、竞争、中立关系等。1998 年 Fath 和 Patten^[73]对网络效能的有关属性进一步研究表明:一般来说,实际生态网络的正效能要大于负效能。以包含 2 个分室的网络为例(图 2),说明生态网络效能分析过程。

以 f_{ij} 代表第 j 节点传递给第 i 节点的流量,网络 i 点的通量 $T_i = \sum_{j=0}^n f_{ij}$,下标 0 代表外环境流入网络中第 i 节点的流量,网络直接效能矩阵 D 的元素定义为 $d_{ij} = (f_{ij} - f_{ji})/T_i$,有:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{f_{11} - f_{11}}{T_1} & \frac{f_{12} - f_{21}}{T_1} \\ \frac{f_{21} - f_{12}}{T_2} & \frac{f_{22} - f_{22}}{T_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -g_{21} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

式中, $g_{21} = f_{21}/T_1$,则效能符号矩阵 $\text{sgn}(D) = \begin{bmatrix} 0 & - \\ + & 0 \end{bmatrix}$,可以看出分室 1 与分室 2 的直接关系为 $(sd_{21}, sd_{12}) = (+, -)$,即分室 2 开发利用分室 1 的物质。但是,全面考虑分室 1 与分室 2 的直接作用和间接作用关系,Fath 等研究人员推导出完整效能矩阵 U ,有如下表达式:

$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + g_{21}} & \frac{-g_{21}}{1 + g_{21}} \\ \frac{1}{1 + g_{21}} & \frac{1}{1 + g_{21}} \end{bmatrix}$$

则效能符号矩阵 $\text{sgn}(D) = \begin{bmatrix} + & - \\ + & + \end{bmatrix}$,可以看出分室 1 与分室 2 除了具有关系 $(sd_{21}, sd_{12}) = (+, -)$ 外,

由于对角线符号均为“+”号,还说明分室 1 与分室 2 在网络物质传递的过程中都获得了自发展能力。Fath 和 Patten 等^[74-75]研究人员针对这一现象,对不同结构的网络进行了深入研究,取得了较多创新性的成果。

1.2.5 生态网络的随机性

生态网络的随机性是指网络中物质、能量流动的随机属性,1978 年 Barber 首先开展了该领域的研究工作^[76]。Barber 建立了描述生态系统中物质、能量转移行为的 Markov 模型,研究了物质、能量微循环特征,并分析了生态网络综合指数 CI 的随机特性。Barber 所建立的 Markov 模型可表述为: $V_k = V_0 P^{k-1}$,式中, P 为物

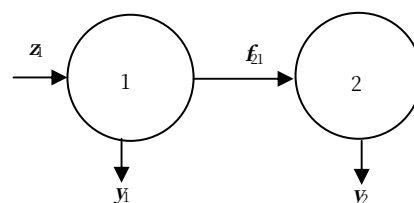


图 2 包含 2 个分室、单一交换、具有耗散损失的网络

Fig.2 Network with two compartments with dissipative losses coupled by single transaction

质或能量转移概率矩阵, V_0 为 t_0 时刻物质或能量向量, V_k 为经过 $k \cdot \Delta t$ 时间后, 物质或能量在生态网络中的分布向量, 该模型运用了转移概率矩阵, 分析了物质或能量在生态网络中的分布行为。1985 年 Patten 利用 Markov 模型, 研究了物质“存储”对生态网络中物质、能量流动行为的影响, 推进了物质“再循环”机制的研究^[77]。1995 年韩博平运用 Markov 理论, 定义了物质、能量流动的时间链概念^[78], 并给出了一般的分析方法。Delphine Leguerrier 使用 Markov 链研究了物质、能量在生态网络中的滞留时间 (Residence time) 和循环指数等^[79]。面对这一研究领域, 完整地阐述生态网络中随机过程的概念和分析方法是深入研究的关键。

1.2.6 其它方面的成果

Guy Woodward^[80] 分析了生物个体大小对生物食物网络的稳定性、能量流动方式以及抗扰能力的影响; Robert Poulin^[81] 运用网络分析法研究宿主-寄生虫关系; Patten 和 Masahiko^[75] 等研究了具有物质存储行为的生态网络的属性, 并以美国卡罗莱纳州 (Carolina) 的牡蛎暗礁生物群落作为研究对象, 进行了实证分析; 我国学者 Li Y.^[82] 运用 ENA 方法对黄河流域水资源利用情况进行了研究; David K. 和 Gattie^[83] 对德国诺伊斯河口 (Neuse River Estuary) 生态系统的氮循环进行了研究; 美国芝加哥大学的 Caner kazanci^[84] 开发了模拟与分析生态网络特性的 EcoNet 软件; Brian D. 使用 Matlab 语言开发了生态网络分析软件^[85]。另外, 有关生态网络分析软件还有 Ecopath、Wand^[86]; 美国卡罗莱纳州的 Robert R. 等研究人员应用 ENA 对水域生态系统的功能进行了评价^[6]; 我国学者张妍等使用 ENA 分析了中国北京、上海、天津、重庆 4 个城市能源代谢系统和系统结构特征^[21]; 生态网络分析方法在产业生态领域也获得了较多应用和研究: 如 Nandan U 和 Ukidwe^[87] 采用网络分析方法研究了化学工业的生态产业问题; Liang Chen、Rusong Wang 和 Jianxin Yang 等研究了生态产业系统的结构复杂性问题^[88]; Ariana Bain^[89] 等使用生态网络分析方法对产业共生关系以及水资源恢复进行了研究; Nguyen 研究了 Giang 地区的渔业产业面临的问题、物质流方式, 指出生态产业网络对渔业产生的积极作用^[52]; Xin Tong^[90] 利用网络分析方法研究了全球铜的流动方式。

2 生态网络模型构建过程

生态网络模型实质为食物、能量传递网络, 即包括种群之间传递, 也包括生命体与环境之间的传递关系。建立生态网络模型的第 1 步, 需要确定系统的边界, 明确约束系统的影响因素。确定网络的边界非常重要, 凡是经过网络边界的输入、输出物质流都是研究的对象, 而没有经过网络边界的系统以外的物质流就不能成为研究的对象。第 2 步, 对于已经明确边界的生态系统, 按照功能对系统中的生物划分为几个主要物种群, 最聚集的划分可以包括 3 个分室: 生产者、分解者和消费者。如降低聚集程度, 可分为 6 个分室: 生产者、草食动物、肉食动物、杂食动物、分解者、食碎屑者^[15]。划分的聚集程度不同, 一个物种可能属于不同的分室。根据目前文献, 将生态网络的分室数目划分为 6—60 的较多, 对于网络分室数目还缺少统一划分规则。第 3 步, 确定网络中物质流、能量流的度量单位。可以使用质量和能量单位, 如单位时间单位面积的物质流量、能量流量, 质量单位可以选择碳、磷、氮元素的质量来表示^[18], 能量单位选择焦耳或千焦耳。第 4 步, 建立表达分室间物质传递关系的可达矩阵。可达矩阵的元素 $a_{ij} = 1$ 代表 j 分室传递给 i 分室物质, $a_{ij} = 0$ 代表 j 分室与 i 分室没有物质传递关系。通过建立可达矩阵, 能够描述网络中分室物质传递关系, 探析网络中存在的多重反馈关系。第 5 步, 收集网络分析所需要的数据。测算每个分室的数目和生理指标, 如消费量 (Consumption, C)、生产量 (Production, P)、呼吸消耗 (Respiration, R)、排泄量 (Egestion, E), 必要时, 可以将呼吸、排泄量合为一个输出量。根据物质守恒定律和热力学定律, 有公式 $C = P + R + E$ 。目前, 有 2 种给输入、输出流进行赋值的方法。一种是 MATBLD 法, 即根据捕食者的需要量与可提供食物的数量比例来确定物质流的大小; 另一种是 MATLOD 法, 即开始时, 以较少的物质按照既定的传递关系输送给各个分室, 当分室的物质需求得到满足或资源耗尽为止, 来确定物质流量。第六步, 灵敏度分析。由于一些现场数据、文献来源数据无法提供完整、准确的网络分析所需要的数据时, 需要进行灵敏度分析, 分析数据的偏差对结果的影响程度。

3 群落构建规则

构建群落可依据 2 个规则:

(1)以人口生态学为基础,按照捕食关系构建网络结构,包括初级生产者、草食动物、肉食动物,但是,缺少分解者和食碎屑者。因此,网络不具有物质循环功能。按照这一规则建立的典型生态网络模型有层叠模型^[91]和生境模型^[19]。

(2)以生态系统生态学为基础,按照系统中的能量流动关系构建网络结构,包括所有的功能群体。因此,网络具有物质、能量的循环功能。按照这一规则建立的典型生态网络模型有电脑化生态系统模型。2004 年, Fath 使用这一模型构建了一个包含 6 个分室的生态群落,并计算出可达矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 2.62$ ^[60],该特征值的大小能够指示网络循环特性。Hill 对规则 2 进行了简化,采用 Hill 矩阵^[61]来构建生态系统群落。

Hill 将生态系统的分室概括为生产者、消费者和分解者。Hill 矩阵为: $A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$,它代表生态系统分室

间最简单的作用关系,这个最简单网络的循环结构最大特征值 $\lambda_{\max} = 1.32$ 。Hill 矩阵为研究生态网络的复杂路径结构奠定了基础。

4 应用实例

以德国西部城市诺伊斯河口氮循环为例,介绍 David K^[92]等研究者是如何运用生态网络分析方法来揭示氮循环特性,图 3 是 David K 等研究者建立的诺伊斯河口氮循环网络图。

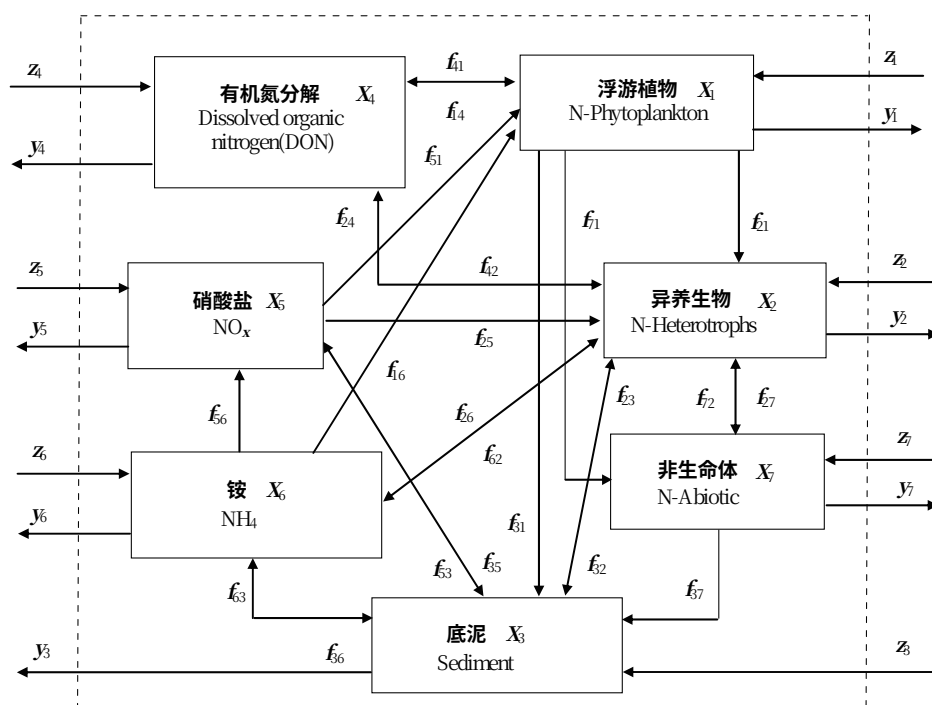


图 3 诺伊斯河口氮循环网络图

Fig. 3 Network digraph of nitrogen flow in the Neuse River Estuary

研究人员分别给出了夏季和冬季诺伊斯河口氮循环的基础数据,利用网络分析方法研究了间接循环对氮循环所发挥的作用。研究表明,该系统的氮流通量的 43.5% (夏季)、45.9% (冬季)是由于网络中氮间接循环过程产生的。利用网络分析方法,David K 等研究者对生态系统的微动态流也进行了深入研究。

5 存在的问题和研究展望

生态网络分析方法是坦斯勒提出的生态系统思想的实现工具,是过去 35 a 来生态学家对研究成果和方法的反思和探索的产物,其核心是通过量化方法探讨生态系统内部各组分之间联系方式、作用关系,揭示生态系统的整体性和复杂性。生态网络分析作为生态学的一个新的分支,已经取得了许多研究成果,但还存在一

些需要进一步解决的问题。(1)确定生态系统的边界问题。选取不同的系统边界,对分析结果可能产生很大的影响。目前,缺少系统边界划分的统一规则,多数研究人员根据需要或经验来划分系统边界;(2)对非稳态网络,目前还缺乏合理的处理方法。生态网络分析方法所涉及的系统“稳态”是一种理想状态,现实中的生态系统的稳定状态是“稳态”的一种近似;(3)收集和测算生态系统中各种物质流流量,需要大量数据,是分析生态网络的一个难点;(4)生态系统各组分的物质存量是一个重要的状态变量,而生态系统结构特征指标中却没有包含状态变量,只以流量为基础,如何采用流量和状态变量来描述结构特征,是值得深入研究的问题;(5)描述生态系统网络特征的符号、公式还缺乏统一的表达形式,需要该领域的研究者进行规范和约定;(6)我国对生态网络分析方法的研究,缺乏较稳定的研究团队。以韩搏平、欧阳志云为代表的学者率先开展了这方面的研究工作,取得了重要的研究成果^[78,93-97]。现国内缺少一个稳定的研究队伍,开创性的研究成果偏少。

生态网络分析方法是一种系统、科学、有效的分析方法,未来研究的重点可能涉及:生态网络结构的拓扑特性、网络的结构与功能关系、网络的优化算法与控制方法、分析软件功能的不断完善等。

6 结语

生态系统是一个具有自组织能力的复杂系统,网络分析方法是分析这一复杂系统中的各分室间作用关系的有效工具。运用这一研究手段,已经揭示出许多生态系统的内在的、微观的系统特性。虽然,生态网络分析方法还存在一些需要深入研究的问题,但是,它已经成为研究者所关注的一种方法,并且在实践中也得到了成功应用。

References:

- [1] Hannon B. The structure of ecosystems. *Journal Theoretical Biology*, 1973, 41(3): 535-546.
- [2] Leontief W W. The structure of the American economy. *Science American*, 1965, 212(4): 25-35.
- [3] Leontief W W. *Input-Output Economics*. New York: Oxford University Press, 1966.
- [4] Worthington E B. *The Evolution of IBP*. New York: Cambridge University Press, 1975.
- [5] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, Cale W G. Propagation of cause in ecosystems//Patten B C, ed. *Systems Analysis and Systems Simulation in Ecology*. New York: Academic Press, 1976.
- [6] Korhonen J. Four ecosystem principles for an industrial ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 2001, 9(3): 253-259.
- [7] Roberts B H. The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: an Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8/10): 997-1010.
- [8] Nielsen S N. What has modern ecosystem theory to offer to cleaner production, industrial ecology and society? The views of an ecologist. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1639-1653.
- [9] Chertow M R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and Environment*, 2000, 25(1): 313-337.
- [10] Korhonen J, Wihersaari M, Savolainen I. Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system. *Ecological Economics*, 2001, 39(1): 145-161.
- [11] Sagar A D, Frosch R A. A perspective on industrial ecology and its application to a metals-industry ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 1997, 5(1/2): 39-45.
- [12] Carr A J P. Choctaw eco-industrial park: an ecological approach to industrial land-use planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42(2/4): 239-257.
- [13] Bailey R, Bras B, Allen J K. Applying ecological input-output flow analysis to material flows in industrial system; part I: tracing flows. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(1/2): 45-68.
- [14] Fath B D, Patten B C. Review of the foundations of network environ analysis. *Ecosystems*, 1999, 2(2): 167-179.
- [15] Fath B D. Network analysis applied to large-scale cyber-ecosystems. *Ecological Modelling*, 2004, 171(4): 329-337.
- [16] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, 2004, 28(5/6): 321-339.
- [17] Ulanowicz R E, Kemp W M. Toward canonical trophic aggregations. *The American Naturalist*, 1979, 114(6): 871-883.
- [18] Ulanowicz R E, Baird D. Nutrient controls on ecosystem dynamics: the chesapeake mesohaline community. *Journal of Marine Systems*, 1999, 19(1/3): 159-172.
- [19] Williams R J, Martinez N D. Simple rules yield complex food webs. *Nature*, 2000(404): 180-183.

- [20] Huang J L, Xu Z M. Quantifying the trend of economic sustainability: take Beijing as a case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 7038-7044.
- [21] Zhang Y, Yang Z F, Yu X Y. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems: model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, 2009, 220(11): 1431-1442.
- [22] Yuan Z W, Bi J. Progress and perspectives of industrial ecology: a critical review. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2709-2715.
- [23] Teng M J, Zhou Z X, Wang P C. Landscape centrality and its applications in ecological network planning and management. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 863-872.
- [24] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23(4): 399-417.
- [25] Zaret T M, Paine R T. Species introduction in a tropical lake. *Science*, 1973(182): 449-455.
- [26] Finn J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. *Journal of Theoretical Biology*, 1976, 56(2): 363-380.
- [27] Ulanowicz R E. Identifying the structure of cycling in ecosystems. *Mathematical Biosciences*, 1983, 65(2): 219-237.
- [28] Patten B C. Network integration of ecological extremal principles: exergy, emergy, power, ascendancy, and indirect effects. *Ecological Modelling*, 1995, 79(1/3): 75-84.
- [29] Levine S H. Several measures of trophic structure applicable to complex food webs. *Journal of Theoretical Biology*, 1980, 83(2): 195-207.
- [30] Levine S H. A dynamic formulation for input-output modeling of exploited ecosystems. *Ecological Modelling*, 1988, 44(1/2): 143-151.
- [31] Patten B C. Environs: relativistic elementary particles for ecology. *The American Naturalist*, 1982, 119(2): 179-219.
- [32] Barber M C. A Markovian model for ecosystem flow analysis. *Ecological Modelling*, 1978, 5(3): 193-206.
- [33] Borrett S R, Fath B D, Patten B C. Functional integration of ecological networks through pathway proliferation. *Journal of Theoretical Biology*, 2007, 245(1): 98-111.
- [34] Allesina S, Ulanowicz R E. Cycling in ecological networks: finn's index revisited. *Computational Biology and Chemistry*, 2004, 28(3): 227-233.
- [35] Jørgensen S E, Fath B D. Examination of ecological networks. *Ecological Modelling*, 2006, 196(3/4): 283-288.
- [36] Gattie D K, Schramski J R, Bata S A. Analysis of microdynamic environ flows in an ecological network. *Ecological Modelling*, 2006, 28(3): 187-204.
- [37] Dame J K, Christian R R. Evaluation of ecological network analysis: validation of output. *Ecological Modelling*, 2008, 210(3): 327-338.
- [38] Heymans J J, Baird D. Network analysis of the northern Benguela ecosystem by means of NETWRK and ECOPATH. *Ecological Modelling*, 2000, 131(2/3): 97-119.
- [39] Allesina S, Bondavalli C. Steady state of ecosystem flow networks: a comparison between balancing procedures. *Ecological Modelling*, 2003, 165(2/3): 221-229.
- [40] Higashi M, Patten B C. Dominance of indirect causality in ecosystems. *The American Naturalist*, 1989, 133(2): 288-302.
- [41] Spieles D J, Mitsch W J. A model of macroinvertebrate trophic structure and oxygen demand in freshwater wetlands. *Ecological Modelling*, 2003, 161(3): 183-194.
- [42] Salles P, Bredeweg B. Modeling population and community dynamics with qualitative reasoning. *Ecological Modelling*, 2006, 195(1/2): 114-128.
- [43] Ulanowicz R E. Life after Newton: an ecological metaphysic. *Biosystems*, 1999, 50(2): 127-142.
- [44] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [45] Jørgensen S E, Mejer H. A holistic approach to ecological modeling. *Ecological Modelling*, 1979, 7(3): 169-189.
- [46] Higashi M, Patten B C. Further aspects of the analysis of indirect effects in ecosystems. *Ecological Modelling*, 1986, 31(1/4): 69-77.
- [47] Higashi M, Burns T P. *Theoretical Studies of Ecosystems: The Network Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [48] Higashi M, Patten B C, Burns T P. Network trophic dynamics: the modes of energy utilization in ecosystems. *Ecological Modelling*, 1993, 66(1/2): 1-42.
- [49] Zorach A C, Ulanowicz R E. Quantifying the complexity of flow networks: how many roles are there?. *Complexity*, 2003, 8(3): 68-76.
- [50] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, 2004, 28(5/6): 321-339.
- [51] Lenzen M. Structural path analysis of ecosystem networks. *Ecological Modelling*, 2007, 200(3/4): 334-342.
- [52] Suh S. Theory of materials and energy flow analysis in ecology and economics. *Ecological Modelling*, 2005, 189(3/4): 251-269.
- [53] Latham L G. Network flow analysis algorithms. *Ecological Modelling*, 2006, 192(3/4): 586-600.
- [54] Latham L G, Scully E P. Quantifying constraint to assess development in ecological networks. *Ecological Modelling*, 2002, 154(1/2): 25-44.
- [55] Aoki I. Flow-indices characterizing eutrophication in lake-ecosystems. *Ecological Modelling*, 1995, 82(3): 225-232.
- [56] Cohen J E, Briand F, Newman C M. *Community Food Webs: Data and Theory*. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1990.

- [57] Martinez N D. Scale-dependent constraints on food-web structure. *The American Naturalist*, 1994, 144(6): 935-953.
- [58] Bersier L F, Dixon P, Sugihara G. Scale-invariant or scale-dependent behavior of the link density property in food webs: a matter of sampling effort? *The American Naturalist*, 1999, 153: 676-682.
- [59] Margalef R. On certain unifying principles in ecology. *The American Naturalist*, 1963, 97: 357-374.
- [60] Fath B D, Scharler U M, Ulanowicz R E, Hannon B. Ecological network analysis: network construction. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 49-55.
- [61] Hill J. *Influence: A Theory of the Structural Organization of Systems*. Athens, Georgia, USA: University of Georgia, 1981.
- [62] Wright R. *Nonzero: The Logic of human destiny*. New York: Pantheon, 2000.
- [63] Borrett S R. Sources of system complexity in the Lake Lanier ecosystem, GA, USA. Paper presented at Ecological Society of America 86th Annual Meeting. Madison, 2001.
- [64] Borrett S R, Patten B C. Structure of pathways in ecological networks: relationships between length and number. *Ecological Modelling*, 2003, 170(2/3): 175-184.
- [65] Gattie D K, Schramski J R, Borrett S R, Patten B C, Bata S A, Whipple S J. Indirect effects and distributed control in ecosystems: network environ analysis of a seven-compartment model of nitrogen flow in the Neuse River Estuary, USA—Steady-state analysis. *Ecological Modelling*, 2006, 194(1/3): 162-177.
- [66] Reza F M. *An Introduction to Information Theory*. New York: McGraw-Hill, 1961: 96-108.
- [67] Jelinek F. *Probabilistic Information Theory: Discrete and Memoryless Models*. New York: McGraw-Hill, 1968: 148-155.
- [68] Ulanowicz R E. *Ecology, The Ascendant Perspective (Complexity in Ecological Systems Series)*. New York: Columbia University Press, 1997.
- [69] Gallager R G. *Information Theory and Reliable Communication*. New York: Wiley, 1968.
- [70] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technology Journal*, 1948, 27: 379-423.
- [71] Rutledge R W, Basore B L, Mulholland R J. Ecological stability: an information theory viewpoint. *Journal of Theoretical Biology*, 1976, 57(2): 355-371.
- [72] Ulanowicz R E, Norden J S. Symmetrical overhead in flow networks. *International Journal System Science*, 1990, 21(2): 429-437.
- [73] Fath B D, Patten B C. Network synergism: emergence of positive relations in ecological systems. *Ecological Modelling*, 1998, 107(2/3): 127-143.
- [74] Fath B D. Network mutualism: positive community-level relations in ecosystems. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 56-67.
- [75] Patten B C, Higashi M, Burns T P. Trophic dynamics in ecosystem networks: significance of cycles and storage. *Ecological Modelling*, 1990, 51(1/2): 1-28.
- [76] Barber M C. A retrospective markovian model for ecosystem resource flow. *Ecological Modelling*, 1978, 5(2): 125-135.
- [77] Patten B C. Energy cycling in the ecosystem. *Ecological Modelling*, 1985, 28(1/2): 1-71.
- [78] Han B P. The time chain analysis of matter and energy flow in econetworks. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(2): 163-168.
- [79] Leguerrier D, Bacher C, Benoit E, Niquil N. A probabilistic approach of flow-balanced network based on markov chains. *Ecological Modelling*, 2006, 193(3/4): 295-314.
- [80] Woodward G, Ebenman B, Emmerson M C, Montoya J M, Olesen J E, Valido A, Warren P H. Body size determinants of the structure and dynamics of ecological networks: scaling from the individual to the ecosystem//de Ruiter P C, Wolters V, Moore J C, eds. *Dynamic Food Web: Multispecies Assemblages, Ecosystem Development, and Environmental Change*. 2006: 179-197.
- [81] Poullin R. Network analysis shining light on parasite ecology and diversity. *Trends in Parasitology*, 2010, 26(10): 492-498.
- [82] Li Y, Chen B, Yang Z F. Ecological network analysis for water use systems — a case study of the Yellow River Basin. *Ecological Modelling*, 2009, 220(22): 3163-3173.
- [83] Gattie D K, Kellam N N, Turk H J. Informing ecological engineering through ecological network analysis, ecological modeling, and concepts of systems and engineering ecology. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 25-40.
- [84] Kazaci C. Econet: a new software for ecological modeling, simulation and network analysis. *Ecological Modeling*, 2007, 208(1): 3-8.
- [85] Fath B D, Borrett S R. A MATLAB® function for Network Environ Analysis. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21(3): 375-405.
- [86] Allesina S, Bondavalli C. WAND: an ecological network analysis user-friendly tool. *Environmental Modeling and Software*, 2004, 19(4): 337-340.
- [87] Ukidwe N R, Bakshi B R. Resource intensities of chemical industry sectors in the United States via input-output network models. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32(9): 2050-2064.
- [88] Chen L, Wang R S, Yang J X, Shi Y L. Structural complexity analysis for industrial ecosystems: a case study on LuBei industrial ecosystem in China. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 179-187.

- [89] Bain A, Shenoy M, Ashton W, Chertow M. Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(12): 1278-1287.
- [90] Tong X, Lifset R. International copper flow network; a blockmodel analysis. *Ecological Economics*, 2007, 61(2/3): 345-354.
- [91] Cohen J E, Newman C M. A stochastic theory of community food webs I. models and aggregated data. *Proceeding of the Royal Society of London Series B (Biological Sciences)*, 1985, 224(1237): 421-448.
- [92] Gattie D K, Schramski J R, Bata S A. Analysis of microdynamic environ flows in an ecological network. *Ecological Engineering*, 2006, 28(3): 187-204.
- [93] Han B P. Cycling index of matter flow in ecological network and its sensitivity analysis. *System Engineering-Theory Methodology Applications*, 1993, 2(4): 71-77.
- [94] Han B P. Information indexes of energy and material flow in econetworks and their sensitivity analysis. *Systems Enging-Theory Methodology Application*, 1995, 4(1): 24-29.
- [95] Han B P, Lin P. The methodology and its application of information analysis in econetworks. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1996, 35(4): 648-651.
- [96] Han B P, Ouyang Z Y, Hu P. The residence time of matter-energy in econetworks and the analytical formulation of its sensitivity. *Journal of Biomathematics*, 1996, 11(5): 105-109.
- [97] Han B P. The measures of flow path diversity in ecosystems. *Chinese Biodiversity*, 1996, 4(2): 114-118.

参考文献:

- [20] 黄茹莉, 徐中民. 从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势. *生态学报*, 2010, 30(24): 7038-7044.
- [22] 袁增伟, 毕军. 产业生态学最新研究进展及趋势展望. *生态学报*, 2006, 26(8): 2709-2715.
- [23] 滕明君, 周志翔, 王鹏程, 徐永荣, 吴昌广. 景观中心度及其在生态网络规划与管理中的应用. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 863-872.
- [78] 韩博平. 生态网络中物质、能量流动的时间链分析. *生态学报*, 1995, 15(2): 163-168.
- [93] 韩博平. 生态网络中物质流动的再循环指数及其灵敏度分析. *系统工程理论方法应用*, 1993, 2(4): 71-77.
- [94] 韩博平. 生态网络中物质、能量流动的信息指标及其灵敏度分析. *系统工程理论方法应用*, 1995, 4(1): 24-29.
- [95] 韩博平, 林鹏. 生态网络中信息分析的方法与应用. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1996, 35(4): 648-651.
- [96] 韩博平, 欧阳志云, 胡聘. 物质、能量在生态网络中的滞留时间及其灵敏度的解析表达. *生物数学学报*, 1996, 11(5): 105-109.
- [97] 韩博平. 生态系统中流动路径多样性的测度. *生物多样性*, 1996, 4(2): 114-118.

CONTENTS

CO ₂ emission from an alpine <i>Kobresia humilis</i> meadow in winters	WU Qin, HU Qiwu, CAO Guangmin, et al (5107)
Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield	HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (5113)
Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels	QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al (5121)
Small-scale spatial patterns of genetic structure in <i>Castanopsis eyrei</i> populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province	QI Caihong, JIN Zexin, LI Junmin (5130)
Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, YU Shaopeng, et al (5138)
Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	SHANG Zhiyuan, WANG Jian, CUI Mingxing, et al (5148)
Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data	LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al (5159)
Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	SHI Qi, JIAO Feng, CHEN Ying, et al (5171)
Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China	YU Lili, MU Changcheng, GU Han, et al (5180)
Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River	GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (5192)
Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau	LI Ting, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al (5199)
Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China	ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al (5207)
Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau	GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao (5217)
Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non- rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia	AN Shaoshan, LI Guohui, CHEN Liding (5225)
Differences in the surface palynomorph assemblages on a karst mountain and rocky desertification areas: a case in Nanchuan District, Chongqing	HAO Xiudong, OUYANG Xuhong, XIE Shiyu (5235)
Ash content and caloric value in the leaves of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> and its accompanying species	JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu ²⁺ by <i>Salix jiangsuensis</i> CL J-172 and <i>Salix babylonica</i> Linn and the influence of organic acids	CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcai, et al (5255)
Introduction of <i>TaNHX2</i> gene enhanced salt tolerance of transgenic puna chicory plants	ZHANG Lijun, CHENG Linmei, DU Jianzhong, et al (5264)
Effects of air humidity and soil water deficit on characteristics of leaf cuticular waxes in alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	GUO Yanjun, NI Yu, GUO Yunjiang, et al (5273)
Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau	DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al (5281)
Research of dynamic variation of moisture in apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years	ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, CHEN Baoqun, et al (5291)
Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb <i>Fructus Cinnamomi</i>	ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of <i>Chlorella</i> sp. and optimization of culture conditions for high oil production	DING Yancong, GAO Qun, LIU Jiayao, et al (5307)
The effects of substrates on locomotor performance of two sympatric lizards, <i>Takydromus septentrionalis</i> and <i>Plestiodon chinensis</i>	LIN Zhihua, FAN Xiaoli, LEI Huanzong, et al (5316)
Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China	CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi (5323)
Phylogenetic diversity analysis and <i>in situ</i> hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of <i>Reticulitermes chinensis</i> Snyder	CHEN Wen, SHI Yu, PENG Jianxin, et al (5332)
An entropy weight approach on the comprehensive evaluation of the Pearl River Delta Nature Reserve	ZHANG Linying, XU Songjun (5341)
Review and Monograph	
On planning method of mesoscale and microscale ecological land	RONG Bingling, LI Dong, XIE Yingxia (5351)
Effects of land use change on soil organic carbon: a review	CHEN Zhao, LÜ Changhe, FAN Lan, et al (5358)
Marine phytoplankton and biological carbon sink	SUN Jun (5372)
Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review	SUN Xiaoxin, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al (5379)
A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization	ZHANG Linhai, ZENG Congsheng, TONG Chuan (5387)
A review of studies using ecological network analysis	LI Zhongcai, Xu Junyan, WU Changyou, et al (5396)
Scientific Note	
Dynamics of age structures on <i>Agropyron michnoi</i> and <i>Leymus chinensis</i> in different communities	JIN Xiaoming, AI Lin, LIU Jidong, et al (5406)
The impact of thematic resolution on NDVI spatial pattern	HUANG Caixia, LI Xiaomei, SHA Jinming (5414)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 18 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 18 2011

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:100717	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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.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