

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会  
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 33 卷 第 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

## 目次

### 前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 ..... 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 ..... 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 ..... 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

### 个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 ..... 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 ..... 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 ..... 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 ..... 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

### 种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 ..... 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 ..... 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 ..... 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 ..... 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 ..... 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 ..... 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 ..... 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 ..... 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 ..... 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 ..... 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

### 景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 ..... 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 ..... 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 ..... 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

### 资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 ..... 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 ..... 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 ..... 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

**城乡与社会生态**

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 ..... 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 ..... 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 ..... 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 ..... 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 ..... 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 ..... 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

**研究简报**

海州湾生态系统服务价值评估 ..... 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 ..... 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 ..... 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 352 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 38 \* 2013-01



**封面图说:** 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201111121721

赵荣钦, 黄贤金. 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架. 生态学报, 2013, 33(2): 0358-0366.

Zhao R Q, Huang X J. Carbon cycle of urban system: characteristics, mechanism and theoretical framework. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0358-0366.

## 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架

赵荣钦<sup>1,2</sup>, 黄贤金<sup>2,\*</sup>

(1. 华北水利水电学院资源与环境学院, 郑州 450011; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

**摘要:**城市是地表受人类活动影响最深刻的区域, 城市系统碳循环在全球和区域碳过程中具有重要的地位和作用。提出了城市“自然-社会”二元碳循环的概念, 探讨了城市系统碳循环的一般特征; 分析了城市系统碳循环的内部机理, 主要包括: 城市系统碳储量和碳输入/输出通量的主要过程和途径、城市系统碳储量、碳通量和碳流通的生命周期分析、城市系统碳输入和碳输出的类型划分等; 提出了基于系统层次划分和碳流通过程的城市系统碳循环的研究框架, 分析了城市自然系统和城市经济系统的主要碳流通过程和环节, 构建了城市系统碳循环研究的思路 and 理论框架; 最后提出了城市系统碳循环领域未来的研究重点。

**关键词:**碳循环; 碳储量; 碳通量; 二元碳循环; 生命周期; 城市系统

## Carbon cycle of urban system: characteristics, mechanism and theoretical framework

ZHAO Rongqin<sup>1,2</sup>, HUANG Xianjin<sup>2,\*</sup>

1 College of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China

2 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** Since 1990's, researches on carbon cycle were mostly focused on natural processes, such as farmland ecosystem, forest ecosystem and soil, but the anthropogenic carbon process in urban system was always ignored. Presently, under the pressure of climate change and international carbon emission reduction, how to coordinate the relationship between economic development and urban environmental protection, promote carbon emission reduction and develop low-carbon economy has been a hot multi-disciplinary topic. Urban system is an ecosystem that is profoundly impacted by human activities on the earth, in which land use and land cover changes drastically. With much human energy consumption and carbon emission, urban carbon cycle will inevitably have a profound impact on global carbon cycle and climate change. So, urban carbon cycle plays an important role in regional and global carbon cycle processes. Research on urban carbon cycle is not only the important basis for establishing low-carbon urban strategies, but also the theoretical reference for choosing low-carbon city pattern. Firstly, the concept of “natural-social dualistic carbon cycle” of urban system was put forward and analyzed, and the circulation process map of urban system was established. It shows that the carbon cycle process of urban system was quite different from that of natural ecosystem. Further, the main characteristics of urban carbon cycle were discussed in this paper. Generally, urban system is a complex system that includes natural and anthropogenic processes, horizontal and vertical processes, surface and underground processes, economic and social processes. Secondly, the mechanism of carbon cycle in urban system was discussed from several aspects, such as: the main processes of carbon storage and carbon input & output fluxes, life cycle of carbon storage, carbon fluxes and carbon circulation processes, carbon input & output types of

**基金项目:**国家社科基金重大项目(10ZD030); 中国清洁发展机制基金赠款子项目(国家可持续发展实验区应对气候变化能力建设研究与示范); 中国博士后科学基金面上项目(2012M511243); 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目(201164); 江苏省高校人文社会科学基金项目(2010ZDXM008); 江苏高校优势学科建设工程项目(南京大学地理学)

收稿日期: 2011-11-12; 修订日期: 2012-05-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hxj369@nju.edu.cn



urban system, etc. In this section, the processes of carbon storage and carbon fluxes of urban system were emphasized in details for better understanding the process of urban carbon cycle. The life cycle analysis of carbon storage, carbon flux and carbon circulation processes gave us a clear idea on how to control the important carbon emission reduction sections. Thirdly, the research framework of carbon cycle in urban system was established according to systematic division and carbon circulation process analysis. Based on the analysis of carbon processes in urban system, the urban system was divided into several social-economic subsystems (such as industrial, commercial, residential, transportation and office subsystems) and natural subsystems (such as water body, farmland, forest, pasture land and urban greenbelt, etc.). Furthermore, the carbon circulation processes between urban system and external system, and the carbon processes between urban natural ecosystems and social-economic systems were analyzed, and the theoretical framework of urban carbon cycle research was established. Finally, the future research trends of urban carbon cycle were put forward, such as: building systematic urban carbon cycle model, establishing urban carbon emission factor database and calculation criterion, promoting contrast studies on carbon cycle and circulation mode of cities under different developing levels, strengthening control and management of key processes in carbon cycle of urban system.

**Key Words:** carbon cycle; carbon storage; carbon flux; natural-social dualistic carbon cycle; life cycle; urban system

城市系统是地表受人类活动影响最深刻的区域,不仅土地利用/覆被变化强烈,也是能源消费和化石燃料燃烧的集中地<sup>[1]</sup>。随着城市化进程的加快、城市碳循环过程对全球和区域气候变化的影响日益增强。但一段时期以来,城市在全球碳循环中的作用并未受到充分的重视,大多学者侧重于对森林、农田、草地、土壤等自然碳循环过程的研究,而较少涉及城市碳循环领域<sup>[2]</sup>。正是在这种背景下,开展城市系统层面碳循环机理和模拟研究显得十分迫切和重要。从理论层面上来说,开展城市系统碳循环的定量研究,可以弥补过去研究仅关注自然碳循环的不足,为研究人为因素对碳循环的影响提供了新的思路,一方面有助于建立城市碳排放的清单核算标准,另一方面便于深入了解城市碳循环在区域碳过程中的地位和作用,为低碳城市策略的制定提供重要的理论基础和前提。从实践的角度来看,中国当前大规模城市化进程及其不同发展模式和阶段,为开展城市系统碳循环研究提供了较为广阔的空间和案例,并便于开展不同类型城市碳循环过程的对比研究。因此,构建城市系统碳循环研究的理论和方法不仅有助于指导城市碳收支核算和低碳经济发展策略的制定,并且为气候变化背景下世界广大发展中国家的城市发展模式的思考和再评估提供新的理论和方法。

基于以上研究背景,本文从城市系统“自然-社会”二元碳循环概念入手,探讨了城市碳循环的一般特征,从城市碳储量和碳通量的角度,分析了城市系统碳循环的内部机理,并提出了城市系统碳循环研究的思路 and 理论框架。

## 1 城市系统碳循环:“自然-社会”二元碳循环

作为“自然-经济-社会”复合系统,城市系统碳循环过程与自然生态系统明显不同,由于受人为活动的影响,城市系统具有明显的“自然-社会(经济)”二元碳循环特征(图1,其中“社会”碳循环部分实际上也包括了经济活动的碳过程),且具有较大的复杂性、不确定性和空间异质性。因此,需要从整体上来研究城市系统的自然和社会经济过程及其相互作用<sup>[3-4]</sup>,了解城市系统内部自然和社会过程碳循环的主要环节、方向和规模以及两者之间的耦合关系。总体而言,城市系统碳循环是一个包括自然和人工过程、水平和垂直过程、地表和地下过程、经济和社会过程在内的复杂系统,其主要特征如下<sup>[1-2]</sup>:

(1)城市系统碳循环过程是“自然-社会”二元碳循环,能源、原料和各种含碳产品的流通和消费带来的碳排放构成了城市系统碳循环的主体;(2)城市系统与外界有着巨大的碳交换,其空间范围主要取决于城市碳代谢通量的大小和交通运输方式;(3)城市系统碳循环包括水平和垂直碳通量两部分,水平碳通量以能源、含碳产品、废弃物和地下管网的溶解碳的输送为主,垂直碳通量既有人为过程(化石燃料燃烧等),也有自然过程(植物和土壤等的呼吸作用);(4)城市系统碳循环具有较大的空间异质性,城市碳通量的强度、范围和速率

取决于城市发展模式、城市功能、产业类型、经济结构、能源结构及其使用效率等;(5)移动源(交通)碳排放是城市系统人为碳排放的重要部分,主要表现为各种人流和物流等交通工具的碳排放;(6)部分碳过程存在于城市蔓延区与足迹区之间,且单向流动。如能源、食物、纤维、木材或其他含碳产品由足迹区输入蔓延区,而部分工业产品和垃圾则由城市蔓延区输出到足迹区;(7)城市系统具有一定的人为碳库,如植被、土壤、建筑物、家具和图书等的碳存储;(8)城市是一个动态扩展的系统,随着城市扩展及经济发展,城市系统碳循环的规模、强度和空间范围也将随之改变。

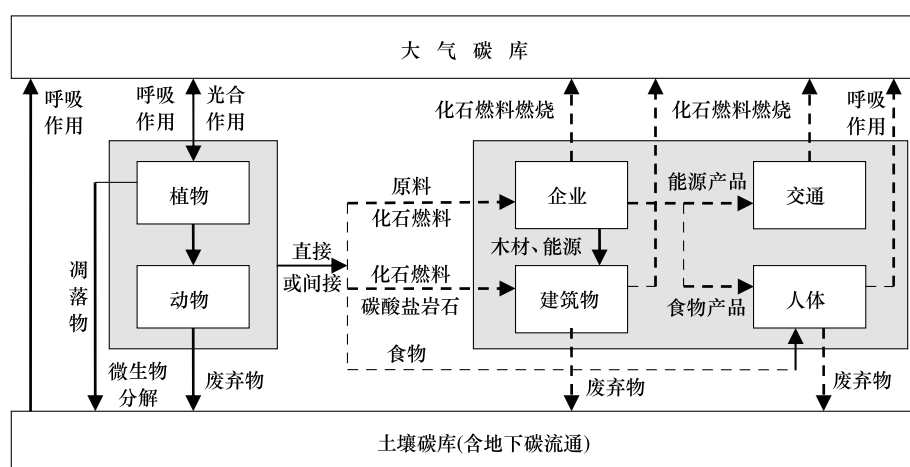


图1 “自然-社会”二元碳循环过程

Fig.1 Natural-social dualistic carbon cycle process

图中,实线代表自然碳循环过程,虚线代表社会(经济)碳循环过程

## 2 城市系统碳循环的机理分析

要探讨城市系统碳循环的机理和运行规律,首要的问题是了解城市系统碳储存和碳流通的主要途径和方式,区分城市系统碳储量和碳通量的自然和人为过程,并深入分析城市系统主要碳储存和碳流通过程的生命周期和类型,以便从整体上构建城市系统碳循环的机理模型。

### 2.1 城市系统碳储量

城市系统具有较强的碳蓄积能力,其主要碳库包括:(1)城市土壤碳库。是城市最大的有机碳库,总体而言,城市土壤碳库比较稳定,受人类影响不大;(2)城市植被碳库。主要包括城市森林、草地,以及城市建成区内部的公园、林木、行道树、草地等植被碳库。郊区以自然植被和农业植被为主,而市区以绿化植被为主;(3)建筑物碳库。建筑物碳库分有机碳和无机碳两种,有机碳主要是指存在于建筑物结构中的木质构件,无机碳是指碳酸盐石材及水泥等(主要成分为碳酸钙),即无机形态的碳;(4)家具和图书碳库。家具和图书(含报纸等)以木材和农作物秸秆为主要原料,经过工业加工之后,通过市场流通进入居民家庭或公共建筑,成为稳定的城市碳库;(5)人体和动物碳库。是指人体和动物体内的有机碳,其实质是来源于食物消费积累的有机碳,该碳库总量不大,但十分稳定;(6)城市水域碳库。一方面,城市水体自身会溶解一部分碳,另外,水体藻类和水生动物体内含有一定的有机碳,同时,水域底泥中也沉积了大量有机或无机碳;(7)城市垃圾碳库。城市垃圾作为人类工业和生活的废弃物,含有大量的有机和无机碳,其中一部分经过燃烧和分解之后重归到大气中,另一部分堆积在城区周围成为较为稳定的碳库。

总体而言,城市碳库可分为自然碳库和人为碳库。其中,人体、动物、建筑物、图书、家具、绿化植被和城市垃圾碳库属于人为碳库,其余属于自然碳库。

### 2.2 城市系统碳输入通量

城市系统碳通量是指在一定时间内(比如1年)城市系统的碳输入和输出量。碳通量包括碳输入通量和输出通量,两者又可以再分为水平通量和垂直通量。图2代表了城市系统(社区层面)的碳通量框架<sup>[5]</sup>,可以

看出,水平碳通量和垂直碳通量方向和载体不同,前者主要以碳水化合物形式进行流通的,后者则是以气态形式( $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ )进行流通的。

城市系统碳输入通量主要包括:(1)煤、石油和天然气等化石能源。这是目前城市的主要能量来源,也是最主要的城市输入碳通量;(2)工业及建筑木材。主要是指用于建筑过程及建筑构件的木材消耗和工业木质产品的生产;(3)建筑材料无机碳。如碳酸盐类岩石、水泥等建筑材料的输入,这部分碳一旦进入城市系统,大部分转化为建筑物碳库的一部分;(4)食物碳。包括各种食物及食物原料的输入,这部分碳较为活跃、循环速度快,通过消费会很快释放到大气中;(5)其他含碳产品的输入。如家具、图书、报纸、纤维、橡胶、衣物等含碳产品;(6)有机肥投入。主要包括用于城郊农业生产和城市绿地维护的人工肥料的投入,如绿肥或其他含碳

肥料等,这部分碳施用后,一部分分解变为  $\text{CO}_2$ ,另一部分转变为土壤碳库的一部分;(7)植物光合作用。城市中的林木、农田、草地、绿化植被等生育期内会吸收一定的碳;(8)水域碳吸收。主要包括水体光合作用、水体底泥有机物的沉积、降水的碳沉降等;(9)河流(或地下输水管网)的碳输入。该部分碳可以通过地表水的输送将溶解有机碳输入到城市系统内部,也可以通过地下输水管网系统输入到城市水厂及居民家庭,构成城市水平碳输入的重要方式。

可以看出,城市碳输入包括垂直碳输入和水平碳输入两种,垂直碳输入包括植被光合作用的碳吸收、水体的碳沉降(碳固定),其他过程均属于水平碳输入。

### 2.3 城市系统碳输出通量

城市系统碳输出通量主要是指各种途径的碳排放,同时也包括以工业产品、能源制成品和废弃物等为载体的碳输出。总结起来,主要有:(1)植物与土壤呼吸作用。这是自然过程的碳输出途径,碳输出强度主要取决于植被生产力的大小和土壤类型,同时也在一定程度上受人类活动干扰的影响;(2)人类(动物)呼吸作用。这部分碳来自于食物碳消费,最终以  $\text{CO}_2$  的形式排放到大气中;(3)化石燃料燃烧。作为化石燃料的集中地,城市工业、交通和生活消费中化石燃料燃烧带来的碳排放是城市最主要的垂直碳输出通量类型;(4)工业生产过程。如水泥、石灰、玻璃、钢铁等的生产过程会释放大量的碳;(5)农业过程碳释放。主要包括稻田甲烷释放、畜牧业反刍动物的甲烷释放、农业生物质能源消费和秸秆焚烧带来的碳释放等;(6)废弃物碳释放。包括粪便、生活垃圾、工业废弃物和废水等,其中一部分分解释放出  $\text{CO}_2$  或  $\text{CH}_4$ ,另一部分作为城市代谢的废物输出到系统之外;(7)含碳产品的输出。主要包括食物、家具、工业产品、能源制成品等一系列含碳产品的输出;(8)水域碳释放。主要是指水域(河流、湖泊)的挥发带来的碳输出;(9)植物凋落物碳输出。城市里大部分植被凋落物(如行道树的落叶)并没有增加土壤的碳含量,一部分就地燃烧,另外一部分以城市垃圾的形式输出到系统之外;(10)城市地下管网的碳输出。城市系统区别于自然生态系统的最大特点之一,是人工修筑了路网和地下水网,这促进了水平碳输出,在城市碳循环中占有重要地位。城市地下水网的存在使得城市系统地表物质被人为地引入地下,促使了地下水平碳交换,使大量的含碳物质(如可溶性有机碳等)随排水管网进行输送,这构成了城市水平碳通量的重要组成部分。

可以看出,城市系统碳输出通量也可以分为垂直和水平碳输出通量两种。垂直碳输出通量又可以分为两种:自然垂直碳输出(包括植被呼吸、土壤呼吸、人类和动物呼吸作用及水域碳挥发等)和人为垂直碳输出(包括化石燃料燃烧、工业生产、农业活动等的碳释放);水平碳输出以有机碳的流通为主,主要是指能源制品、含

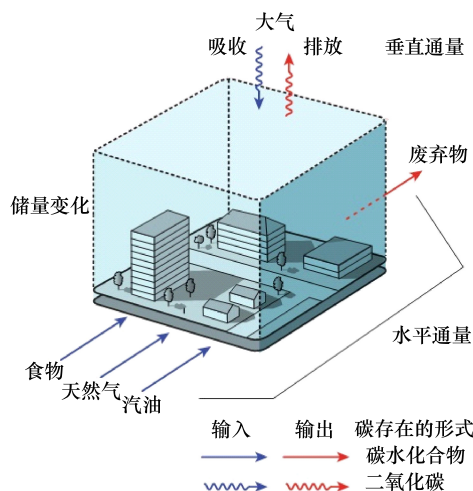


图2 城市碳通量的概念框架<sup>[5]</sup>

Fig.2 Conceptual framework of urban carbon flux



碳产品和废弃物的输出、地下排水管网的碳输出和运移等。

## 2.4 城市系统碳循环过程的生命周期分析

城市系统碳循环过程的不同环节具有不同的生命周期,主要归因于各种形式的碳在城市系统中流通、存储的时间和过程不同,这对于城市碳循环过程及其效率会产生不同的影响。

### 2.4.1 城市系统碳储量和碳通量的生命周期分析

各种碳储存方式的周期不同。储存周期最长的是水体的碳储存,比如藻类和水生生物死亡之后沉积进入底泥,会转变为非常稳定的碳库,只有经过漫长的地质时间或地壳变动才会被重新释放出来;土壤碳库一般也相对稳定,土壤呼吸作用会释放一部分碳,但地表的枯枝落叶也会不断补充土壤碳库,使其总体上保持在一定水平;相对而言,城市植被的碳储存周期一般为几十年,这跟林木的砍伐更新周期有关;建筑物木材的存储周期跟建筑物的使用寿命有关,一般也是几十年时间,甚至更短;家具和图书的碳储存周期则相对更短,主要取决于家具和图书的使用年限。人体碳库比较稳定,具有较长的存储时间,但动物体碳库存储时间较短,一般为几个月到几年不等,便会被消费重新释放出去。总体来说,城市人为碳库如建筑木材、图书和家具等在一定程度影响了城市尺度的碳循环过程(图3)。

各种途径碳通量的生命周期也不同,大体上可分为几类:(1)食物消费型。主要是指各种食物及食物原料,输入城市后很快被消费而重新释放出去,由于食物一般具有保鲜期,一般很难长时间存储,周转过程最快。(2)碳储存型。比如自然过程的垂直碳输入,如植被光合作用和水域碳吸收,这部分碳输入系统之后,便转化为自然碳库而固定下来;(3)工业生产型。主要是指用于工业生产的各种原料和能源,这部分碳存储时间较短,一般不超过1年,一部分直接用于生产、交通和生活能源消费,另一部分加工成能源产品输出到系统之外;(4)建筑材料型。主要指水泥、建筑木材等,输入城市之后,转变为建筑物碳库的一部分。(5)废弃物排放型。主要是以工业和生活垃圾、废水等形式以燃烧、交通工具输送或地下管网输送等方式输出到系统之外。综合以上分析,对城市碳管理而言,应结合各种碳通量的生命周期和周转速率来考虑,重点监测与控制碳存储时间较短、周转快的碳通量过程,比如工业生产型和食物消费型的碳排放等,以提高城市碳循环效率。同时尽可能促进自然及人为城市碳储存,在一定程度上增强城市应对全球变化的能力。

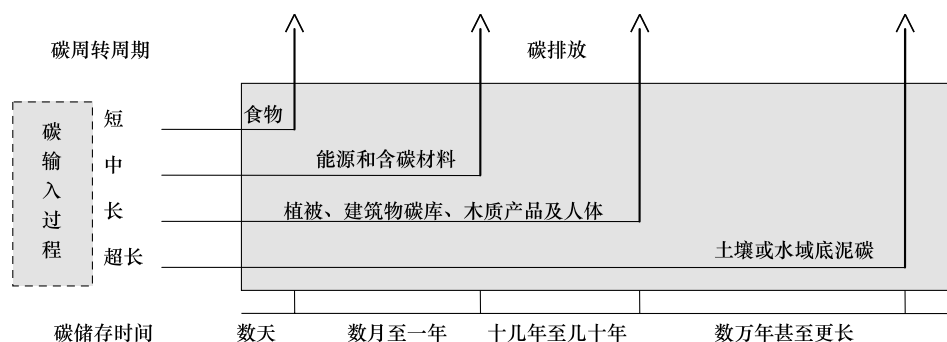


图3 城市系统碳储量和碳通量的生命周期分析

Fig.3 life cycle analysis of carbon pool and carbon flux of urban system

### 2.4.2 城市系统碳流通和碳代谢过程的生命周期分析

对城市系统而言,自然碳循环过程主要是指植被、土壤和水体的吸收和释放,这里不再赘述。而人为碳流通过程实质上是主要含碳产品从“原料—产品—废物”的代谢过程,主要包括能源、食物和木材等三类含碳产品(无机碳除外),这几类含碳产品的流通和代谢过程和周期明显不同。(1)能源类含碳产品。该类产品主要以化石能源、生物能源的形式输入到城市系统内部(也有部分来自于城市系统内部的开采或收获),大部分通过工业生产、生活消费和交通消费转变为 $\text{CO}_2$ 释放到大气中,也有一部分经过工业生产加工为能源制品输入到城市系统之外。(2)食物类含碳产品。这类产品以食物或食物原料的形式在农业生产系统和生活系统之间流通,也有一部分来自于城市外部系统的输入,最终通过食物消费以 $\text{CO}_2$ 的形式释放,或以废弃物的形式



燃烧分解、进入地下管网或输出到系统之外。(3)木材类含碳产品。木材类含碳产品来源于城市林木的砍伐以及外部木材产品的输入,最终经过工业生产转化为木制品(如家具等),或成为木质建筑材料,成为城市建筑物碳库的重要部分,最后经过建筑物的拆除和家具等的废弃分解或被重新利用。以上三类含碳产品中,食物的代谢速率最快,其次是能源类产品,而木材类产品的流通周期最长。除此之外,城市中还有其他含碳产品,但总体碳含量较少。

通过以上分析,得出如下结论:对于主要含碳产品(如木材、能源、食物等)和碳消耗过程(如工业加工、产品运输等),可以引入生命周期评价的方法开展全生命周期过程的碳排放分析。从各种产品的原材料开采、运输、加工、销售、存储和消费及废弃物处置等一系列过程开展碳排放的调查和分析,深入探讨和分析城市主要含碳物质产品“从摇篮到坟墓”的各个环节的碳储量、碳排放量和碳流通量,从而实现对含碳产品不同环节的碳排放和碳流通量的监测和精确核算。

## 2.5 城市系统碳输入/输出的类型划分

### 2.5.1 城市系统碳输出的类型划分

根据城市生产和消费的组合关系,可以将城市碳排放分为4种类型:直接碳排放、责任碳排放、间接碳排放和物流碳排放(图4)<sup>[6]</sup>。

直接碳排放是指在一个大都市区内生产并且消费而产生的碳排放,如家庭、商业和工业生产的大部分产品在本地生产同时在本地消费;责任碳排放是指在一个城市生产但在城市外消费带来的碳排放,如能源制品和各种工业产品在城市生产但是输出到城市之外消费;间接碳排放是指输入到城市内部的产品或商品的消费带来的间接的碳排放,比如电力生产,发电过程燃煤碳排放在城市外部,而电力消费是在城市内部,其他因城市消费引起的外部产品的输入也属于这种类型;物流碳排放

是指不在都市内生产和消费的货物和服务,但是由通过城市带来的碳排放。如过境的客货运服务会带来一定的碳排放,虽然在本地排放,但并不是本地消费引起的,只是过境交通引起的<sup>[7]</sup>。实质上,确定城市碳排放源的简单方法是想象有一个大的气泡置于城市周围,气泡内所有生产(工业产品和服务)和消费(电力、燃料和食物等)带来的碳排放都应该考虑在内<sup>[7]</sup>。

从以上分析来看,基于消费端来核算城市系统的碳排放最符合城市的实际情况,也可避免碳排放核算项目的重复或缺失。因此,城市碳排放测算主要应该包括3部分:(1)城市内部消费的直接碳排放。包括工业、交通和家庭能耗的碳排放等;(2)城市生产碳排放。主要包括工业生产过程中释放的碳,这里包括了输出到城市外部的产品生产所引起的碳排放;(3)间接碳排放。比如城市生产和生活电力消费带来的间接碳排放。

### 2.5.2 城市系统碳输入的类型划分

城市系统碳输入有两种划分方法:(1)根据是否受人类活动影响可分为自然碳输入和人为碳输入两种类型。自然碳输入主要是指植物光合作用的碳吸收和水体的碳沉降(碳固定);人为碳输入是指各种形式的能源、产品、原料、食物和木材等输入带来的碳。作为一个人工生态系统,城市的人为碳输入要远远大于自然碳输入<sup>[8]</sup>;(2)按照输入碳的周转性质可分为消费性碳输入和累积性碳输入两种类型<sup>[8]</sup>。对人为碳输入来说,化石能源和食物都属于消费性水平碳输入,也即碳输入系统之后通过消费会迅速释放到大气中,并不能直接增加城市的碳储量;而木材和建筑材料等含碳产品是累积性碳输入,能增加城市碳库,起到固碳效果。对自然碳输入而言,自然植被和城市绿地的碳吸收能够增加城市碳库,属于累积性垂直碳输入,而农作物光合作用形成的产品(粮食、蔬菜等)由于年内很快被消费(转变为CO<sub>2</sub>释放到大气中),则属于消费性垂直碳输入。

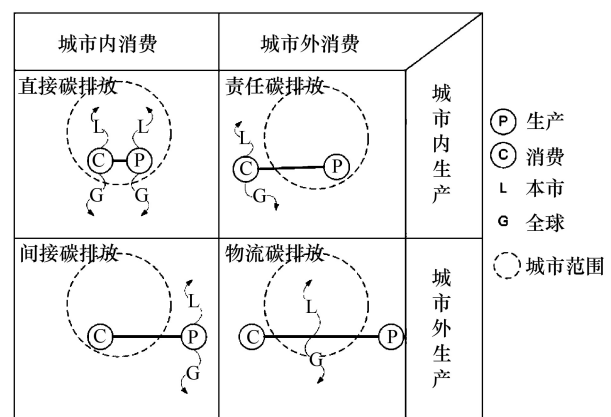


图4 城市碳排放类型划分<sup>[6]</sup>

Fig.4 Carbon emission types of urban system

### 3 城市系统碳循环的理论框架

结合城市系统碳储量和碳通量的主要途径和机制,这里从系统的层次性特征出发,可以将城市系统分为城市自然系统和城市经济系统两个子系统,两者的碳储量及碳通量的构成以及碳流通途径都存在明显的区别(图5)。

#### (1) 城市自然系统

该系统可以细分为水体、农田、林地、草地和城市绿地等子系统类型。其碳库主要包括植被、土壤和水体碳库3部分。对于城市来讲,由于地面硬化,因此土壤系统相对封闭,土壤碳库的稳定性较强。城市自然系统是城市运行的基础和前提,在未受人为干扰影响的前提下,城市自然系统具有自身的规律和运行机制,其碳循环过程主要服从自然界的生物地球化学循环的规律,其碳循环的特点主要受制于城市所在地的自然环境的特征。但在人为活动影响下,城市自然系统的碳循环过程会受到一定的干扰,各自然子系统除了生物地球化学循环之外,一方面接受到外部系统的能源的碳输入,另一方面也接受到来自工业生产系统的碳输入,同时也有来自经济系统的废弃物的碳输入。另外,城市自然系统的部分含碳产品如农产品、林业产品和水产品等也会输入到城市经济系统中。同时,城市自然系统也具有较大的垂直碳输入和输出通量,表现为城市植被、土壤、水域等的光合作用的碳吸收或呼吸作用的碳释放。

#### (2) 城市经济系统

其碳库包括城市建筑物、人体和动物、图书和家具等。可以分为工业生产系统、交通运输系统、居住系统、商业系统和办公系统等,一方面接受来自外部系统的大量的能源、食物、原料和木材等含碳物质的输入,另一方面接受来自自然系统含碳产品的输入,同时也有部分含碳产品输出到系统之外。另外,城市经济系统也具有较大的垂直碳输出,主要表现为各种途径的人为碳排放,但城市经济系统不存在人为垂直碳输入过程。其中,工业生产系统和交通运输系统主要承担城市系统内部消费产品和输出产品的生产。因此,主要的碳输入即能源和原材料,主要的碳输出为各种工业产品、废弃物和化石燃料燃烧。另外,有很大一部分碳输送到其他消费子系统,如食物、含碳产品等。该模块是城市系统内部物质流通规模最大的子系统,是城市系统碳循环过程的主导环节。商业、居住和办公子系统的主要功能是消费、居住等,碳输入是以生活能源、食物和含碳产品(如木材、家具和图书等)为主,碳输出以含碳产品、CO<sub>2</sub>排放、废弃物、地下排水系统的溶解碳的形式为主。该模块的碳输入中一部分来源于城市系统外部,如食物和部分能源的输入,另一部分来自于生产模块,如工业产品和能源制成品、家具等的输入。

根据该理论框架,可以对城市系统的不同层次和模块进行碳输入输出的分析,确定城市系统碳循环的研究范围和途径,并进而开展城市系统碳循环的模拟研究<sup>[8]</sup>。另外,对于不同子系统而言,也可以从用地的角度来分析城市系统的碳循环状况,将城市各子系统与城市用地对应起来,分析不同地类或生态系统类型的碳储量和碳通量状况(图5),这也是开展城市系统碳循环研究的思路之一。

### 4 研究展望

本文提出了城市“自然-社会”二元碳循环的概念,探讨了城市碳循环的一般特征,深入分析了城市碳循环的内部机理,并提出了城市系统碳循环研究的理论框架。但总体来讲,城市系统碳循环研究还处于起步阶段,未来应在以下方面进一步加强:

(1) 构建城市系统整体的碳循环模拟模型,深入分析城市碳循环和碳流通的机制。城市系统碳循环过程受城市规模、功能、产业结构、发展模式等的影响,具有较大的空间异质性和不确定性。因此,应从系统整体性和层次性出发,建立城市系统碳循环模拟模型,重点从社会碳循环入手,分析碳循环的过程、机理和流通效率。

(2) 建立城市碳排放核算标准和碳排放因子数据库。结合我国城市产业结构特征、经济发展水平、生产过程特点、能源结构及技术经济水平等元素,以我国城市统计调查体系为基础,构建符合我国城市特色的碳排放核算体系和因子数据库。

(3) 开展对不同类型和发展水平下城市碳流通和碳代谢模式的对比研究。不同功能、发展阶段和模式的

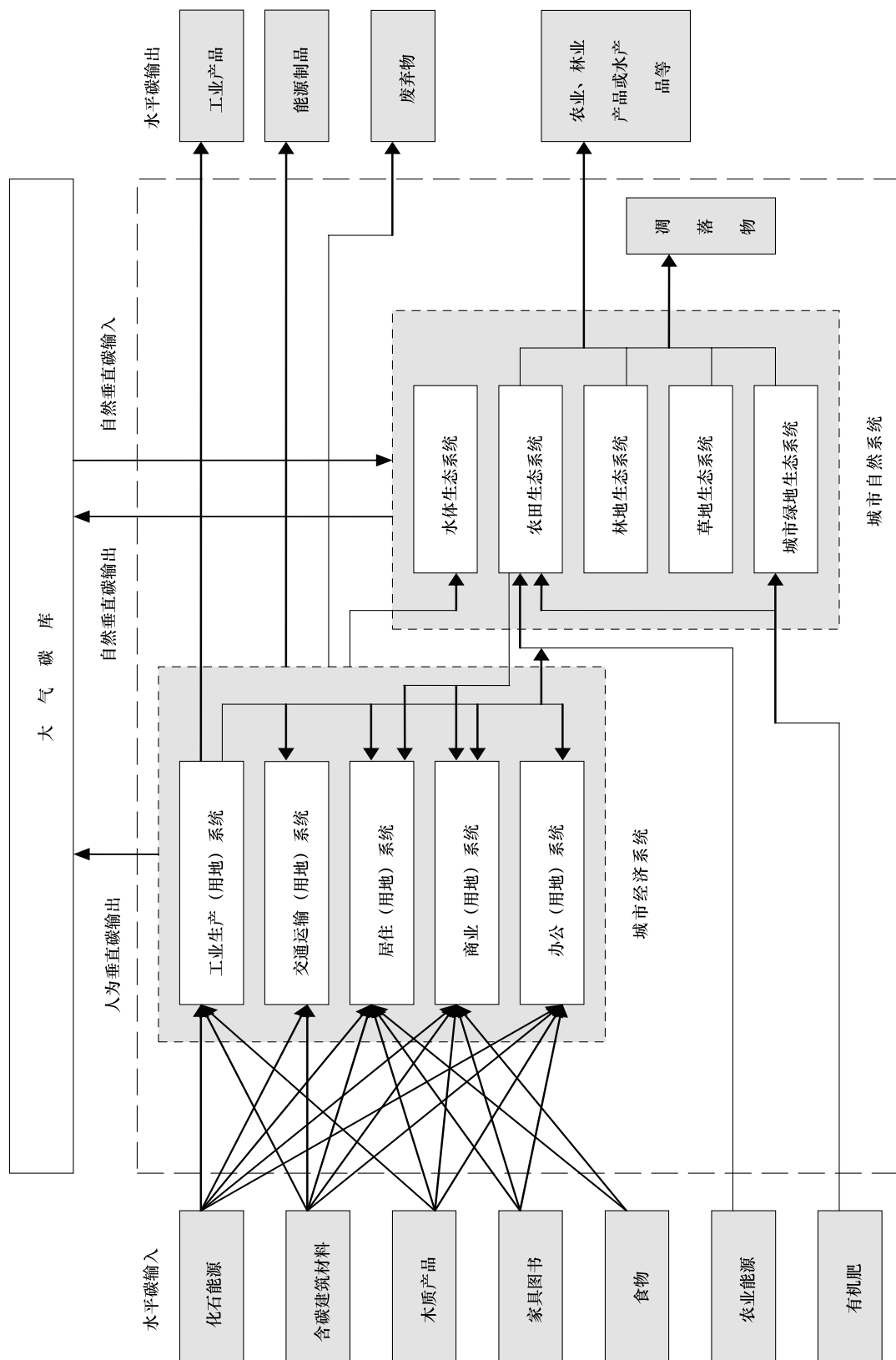


图5 城市系统碳循环的理论框架

Fig.5 Framework of carbon cycle of urban system

(注:外部虚框代表城市系统的边界,其内部包含城市自然系统和城市经济系统两个子系统,各自又分为若干次一级的子系统。)

城市,其碳排放特征和碳流通效率存在较大差异。因此,应开展对不同城市碳流通和碳代谢的对比研究,分析城市功能和模式与碳排放及其强度之间的对应关系,以及城市不同发展阶段和城市化模式对区域碳循环的影响。

(4)加强对于碳循环关键过程的控制和管理,提高城市碳循环效率。将减排、增汇和提高碳的利用率作为碳管理过程控制的三个关键目标,并确定城市碳循环过程的若干重要的干预点(如工业能源加工和转换,资源循环再生利用、碳汇工程等),一方面实现对碳排放的总量控制,另一方面尽可能提高城市碳循环效率,促进城市经济社会的低碳转型与可持续发展。

**致谢:** 南京大学彭补拙教授和中国科学院南京土壤研究所孙波研究员对论文提出了宝贵的意见,在此表示衷心感谢。

#### References:

- [ 1 ] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modelling*, 2008, 216(2): 107-113.
- [ 2 ] Zhao R Q, Huang X J, Xu H, Gao S. Progress in the research of carbon cycle and management of Urban System. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1847-1859.
- [ 3 ] Alberti M, Waddell P. An integrated urban development and ecological simulation model. *Integrated Assessment*, 2000, 1(3): 215-227.
- [ 4 ] Grimm N B, Grove J M, Pickett S T, Redman C L. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. *Bioscience*, 2000, 50(7): 571-584.
- [ 5 ] Christen A, Coops N, Kellett R, Crawford B, Heyman E, van der Laan M, Olchovski I, Tooke R. A LiDAR-based urban metabolism approach to neighbourhood scale energy and carbon emissions modelling. University of British Columbia, 2010.
- [ 6 ] Lebel L, Garden P, Banaticla M R N, Lasco R D, Contreras A, Mitra A P, Sharma C, Nguyen H T, Ooi G L, Sari A. Integrating carbon management into the development strategies of urbanizing regions in Asia. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 61-81.
- [ 7 ] Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: a preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4856-4869.
- [ 8 ] Zhao R Q, Huang X J, Peng B Z. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(6): 758-770.

#### 参考文献:

- [ 2 ] 赵荣钦, 黄贤金, 徐慧, 高珊. 城市系统碳循环与碳管理研究进展. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1847-1859.
- [ 8 ] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析. *地理学报*, 2012, 67(6): 758-770.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013( Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review ..... CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities ..... CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ..... ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study ..... HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ..... ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory ..... LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

### Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China ..... YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. .... ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters ..... OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size ..... LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* ..... LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature ..... LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

### Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China ..... SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ..... ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland ..... REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain ..... SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang ..... LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ..... ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test ..... LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China ..... QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 ..... WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China ..... SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change ..... XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 .....	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O <sub>3</sub> and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat .....	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
<b>Resource and Industrial Ecology</b>	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland .....	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau .....	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation .....	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions .....	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
<b>Urban, Rural and Social Ecology</b>	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component .....	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study .....	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress .....	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake .....	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil .....	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil .....	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
<b>Research Notes</b>	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay .....	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors .....	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings .....	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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: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 90.00 元