

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **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 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 彭松耀, 李新正 (5274)

景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH₄ 吸收和 N₂O 排放通量 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-09



封面图说: 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

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

DOI: 10.5846/stxb201206030803

曹磊, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展. 生态学报, 2013, 33(17): 5141-5152.

Cao L, Song J M, Li X G, Yuan H M, Li N, Duan L Q. Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5141-5152.

中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展

曹 磊^{1,2}, 宋金明^{1,*}, 李学刚¹, 袁华茂¹, 李 宁¹, 段丽琴¹

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:滨海盐沼湿地由于其较高的初级生产力和较缓慢的有机质降解速率而成为缓解全球变暖的有效蓝色碳汇, 近年来引起全球范围内的热切关注。我国滨海盐沼湿地分布较广, 国内学者对滨海盐沼湿地碳循环及碳收支研究取得了一定进展, 深入研究滨海盐沼湿地碳循环有助于对全球碳循环及全球变化的理解, 并为利用滨海湿地进行碳的增汇减排提供科学依据。主要从我国滨海盐沼湿地碳循环主要观测方法、碳收支与碳循环过程及特点、碳库的组成与影响因素、气态碳的输入输出、潮汐作用对其碳收支的影响这 5 个方面出发, 对国内的滨海盐沼湿地碳循环与碳收支的研究进展进行了归纳总结, 并对今后的研究方向给出如下建议: (1) 加强滨海盐沼湿地土壤碳库在深度上和广度上的研究; (2) 标准化滨海盐沼湿地碳储量、碳通量的量化方法和观测技术; (3) 在研究尺度上要宏观、微观并重, 同时加强长期原位监测湿地碳通量的变化与室内模拟研究; (4) 量化在潮汐影响下滨海盐沼湿地碳与邻近生态系统之间的横向交换通量。只有对我国滨海盐沼湿地碳库收支进行更准确的评估和长期的碳库动态变化监测, 方可进一步认识我国盐沼湿地对全球气候变化的影响及其反馈作用, 这对于预测全球变化及制定湿地碳储备功能的提升策略具有重要的意义。

关键词:碳收支; 滨海盐沼湿地; 影响因素

Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China

CAO Lei^{1,2}, SONG Jinming^{1,*}, LI Xuegang¹, YUAN Huamao¹, LI Ning¹, DUAN Liqin¹

1 Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

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

Abstract: Due to its higher primary productivities and lower carbon decomposition rates, the coastal salt marsh can be as an efficient sink to reduce global warming by sequestering carbon. In recent years, the researches on the function of coastal salt marshes on global climate change have been paid more attention. As an important part of global carbon budget, the research on carbon cycle in the coastal salt marshes will be useful to understand the global carbon cycle and global climate change, and can also provide scientific basis for the use of the coastal salt marshes as a carbon sink to reduce carbon emission. The distribution of the Chinese coastal salt marshes is widespread, and it plays an important role in global change. In this paper, the research progresses on carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China were analyzed and summarized from five aspects, i. e., the observation methods of carbon cycle, processes and characteristics of carbon budget and cycle, carbon pools and their influencing factors, input and output of gaseous carbon, and the tidal effect on coastal salt marsh carbon budget. The results suggested that carbon cycle in the coastal salt marshes included outer cycle (i. e., carbon input and output) and inner cycle (i. e., mineralization and carbon storage). The monitoring methods for each system of the wetland carbon cycle were quite different. The common methods mainly included eddy covariance

基金项目:国家海洋公益性项目(201205008); 国家海洋局环境评价项目(DOMEP(MEA)-01-01)

收稿日期:2012-06-03; **修订日期:**2013-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

method, box method and stable isotope method. The primary way of carbon output in the coastal salt marshes was soil and plant respiration releasing CO_2 and CH_4 to the atmosphere and it was mainly influenced by tidal and soil temperature. Vegetation and soils as the two most important carbon pools for the coastal salt marshes were mainly dependent on vegetation types, invasive alien plants, anthropogenic activities and tidal effect. Besides, tidal effect also was the main factor affecting carbon budget in the coastal salt marshes through direct physical transport. In conclusion, tidal effect was the common and dominant factor affecting both carbon cycle and budget in the coastal salt marshes. Although there have been so many researches on the biogeochemical characteristics of carbon in the coastal salt marshes, but it is deficient in accurately quantifying the carbon sequestration potential of the coastal salt marshes. Thus, there are several suggestions for the future researches on carbon budget and cycle in the coastal salt marshes put forward as follows: (1) to strengthen both the extensive and intensive researches on carbon pools in the coastal salt marshes; (2) to standard the quantization and observation methods of carbon storages and fluxes; (3) to enhance the long-term field observation and laboratory experiments; and (4) to quantify the carbon exchange fluxes between the coastal salt marshes and other adjacent ecosystems. Consequently, the more accurate assessment and long-term monitoring on carbon budget in the coastal salt marshes should be performed before the further understanding of impact of the coastal salt marshes on and its feedback roles in global climate changes, which have important significance to predicting global change and developing the promotion strategy in reserve function of wetland carbon.

Key Words: carbon cycle and budget; influencing factor; the coastal salt marshes

全球变暖与大气中不断增加的温室气体之间的密切关系已成为不争的事实,减少温室气体排放、增加碳汇成为缓解气候变化的首要任务,因此,对全球碳循环的研究则成为其中关键过程。湿地作为一个水陆相互作用形成的独特生态系统,具有季节或常年积水、生长或栖息喜湿动植物和土壤发育潜育化 3 个基本特征。湿地环境的水文特征、生物地球化学过程和湿地生物适应使其具有独特的物理、化学和生物学结构及功能,使其具有“碳汇”的功能。尽管全球湿地面积仅占陆地面积的 4%—6%,但是其碳储量却占陆地碳库的 12%—20%,相比于农业生态系统、温带森林生态系统以及热带雨林生态系统储量都要高^[1-5]。IPCC 第四次综合评估报告指出^[6],全球 CO_2 浓度从工业革命前的 280 mg/L 上升到了 2005 年的 379 mg/L,未来 50—100 a 间,地球表面 CO_2 浓度将升高约 1 倍,平均温度可能升高 1.1—6.4 °C。随之而来的世界范围内持续的气候变暖将引发一系列严重的生态灾害问题,对湿地生态系统的结构和功能产生巨大的影响,而湿地中储存的大量有机碳对气候变化也将有一定程度的反馈^[1,6]。湿地生态系统的碳过程是生态系统产量的基础,也直接影响大气温室气体浓度。因此,对湿地生态系统中碳循环、碳储量变化的研究是理解湿地生态系统对气候变化的影响及响应具有十分重要的意义。

滨海湿地则是介于陆地和海洋生态系统之间复杂的自然综合体,它包括在海陆交互作用下被水体浸淹的沿海低地,潮间带滩地以及低潮时水深不超过 6 m 的浅海水域,盐沼、滩涂等。全球沿海湿地的分布面积大约为 $20.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,而沿海湿地碳的积累速率为 $\text{C}(210 \pm 20) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,要远远高于泥炭湿地^[7],并且沿海湿地大量存在的 SO_4^{2-} 粒子抑制了甲烷的产生,从而降低了甲烷的排放量^[8]。由于具有较高的碳封存速率和相对较低的甲烷释放速率,使得单位面积的滨海湿地在全球变暖的情况下可能是更有价值的碳汇,研究其碳循环具有着重要的意义。我国滨海湿地面积约为 $5.94 \times 10^4 \text{ km}^2$,可分为盐沼湿地、潮间砂石海滩、潮间带有林湿地、基岩质海岸湿地、珊瑚礁、海草床、人工湿地、海岛,其中,滨海盐沼湿地是我国最普遍的湿地类型之一。本文通过综述国内不同区域开展滨海盐沼湿地碳收支和碳循环研究,对我国滨海盐沼湿地碳循环观测方法、碳收支与碳循环过程及特点、碳库的组成与影响因素、气态碳的输入输出、潮汐作用对其碳收支的影响 5 个方面对国内的滨海盐沼湿地碳循环与碳收支的研究进展进行归纳总结,以期深入理解滨海湿地碳循环过程及碳收支情况,进一步研究滨海湿地固碳功能及其变化,气候变化、人类活动对湿地碳循环的影响,为利用湿地进行

碳的增汇减排提供参考依据。

1 滨海盐沼湿地碳循环观测方法

在湿地碳循环方面有多种多样的技术用于监测和核查湿地碳通量和碳贮存:与水流有关的碳收支可以通过监测水流的体积和碳浓度而得到;植被从大气中吸收 CO₂ 实现的碳固定量则可以通过地上地下生物量的积累来测定;通过稳定同位素监测碳的来源与周转可以研究碳素在碳循环过程中的动态;土壤有机碳的降解可以沿着碳素从植物和藻类的死亡至有机质和埋藏到沉积物中的路径进行研究;对于气体交换的研究主要是测量呼吸与降解作用产生的 CO₂、CH₄ 流失量;对土壤剖面的取样调查则可以得到湿地沉积物中碳的储备。

目前,我国学者主要采用涡度协相关法、箱法及稳定同位素法来对滨海盐沼湿地碳通量、碳储存等环节进行研究。涡度协相关方法是通过分别测定垂直风速和二氧化碳浓度的变化来计算生态系统与大气间的二氧化碳净交换量,用于测定大气系统 CO₂、水和能量通量以及植被群落的微气象数据^[9-10],测量精确度高,是一个直接连续测量生态系统碳通量的途径,但对环境条件和技术要求较高。在我国的长江口崇明东滩湿地,建有基于涡度协方差技术的通量监测塔,研究者可以通过地面监测、遥感分析和模型模拟等研究河口湿地碳通量的变化及其影响因子,这是国内目前最先进的滨海湿地碳通量观测和研究技术^[11]。而箱法是一种估测生态系统要素中净碳交换的传统方法^[12]。通常采用不同类型的箱子罩在植被地面或者土壤表面,通过测定向内的 CO₂ 和 CH₄ 等气体浓度随时间的变化来计算植被-大气或土壤-大气之间的气体交换通量。其测量的准确性依赖于箱内的气体浓度与外部环境之间的差异。箱法的缺点就是会严重改变观测气体的空间变化性,扰动土壤和植被环境,导致测定结果不够反映实际情况。但因其成本低,操作方便,适宜进行小尺度的测量,是观测土壤碳通量的的常用方法,见表 1。

表 1 我国不同滨海盐沼湿地不同季节 CO₂、CH₄ 通量
Table 1 CO₂、CH₄ fluxes of different seasons from different coastal salt marshes in China

研究区域 Study area	时间 Time /month	CO ₂ 通量 CO ₂ Flux /(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	CH ₄ 通量 CH ₄ Flux /(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	方法 Methods	资料来源 Data sources
崇西湿地 Chongxi wetland	2	0.025	—	开放式涡度相关系统	[13]
	8	-0.06	—	开放式涡度相关系统	
崇明东滩 East beach of Chongming Island	7、8	-86.3	0.040	静态密闭箱	[14]
黄河三角洲 The Yellow River Delta	8	-30.78—43.73	-0.07—0.22	静态暗箱-气相色谱法	[15]
	9、10	—	-0.74—1.77	静态暗箱-气相色谱法	
闽江河口 Min River Estuary	1—12	203.3—563.7	—	静态箱-色谱法	[16]
	1—12	—	4.74—5.13	静态箱-色谱法	[17]
辽河三角洲 Liaohe Delta	6—11	—	-0.97—2.73	封闭式箱法	[18]

尽管已经有众多可行的技术用于研究湿地碳循环及其各个细节,但是,如何快速而准确地评估滨海盐沼碳储存及简单而有效地监测碳储量随时间的变化对碳循环科研群体来说仍是个重大挑战。

2 滨海盐沼湿地的碳收支与碳循环过程及特点

湿地碳循环的基本模式是:大气中的 CO₂ 通过光合作用被植物吸收并合成有机物;植物死亡后的残体经腐殖化作用和泥炭化作用形成腐殖质和泥炭;土壤有机质经微生物矿化分解产生 CO₂,在厌氧环境下则产生 CH₄ 释放到大气中。然而,滨海湿地处于海陆交互作用地带,受潮汐特征影响,陆地碳库与海洋碳库紧密相连,其碳循环过程更为错综复杂。总体来说,滨海湿地的碳循环包括碳的外部循环和内部循环^[7-8,19]。滨海盐沼湿地碳的外部循环主要包括有机碳、无机碳的输入输出,这由生物地球化学作用和潮汐的机械搬运作用主导的;碳的内部循环则包括:有氧矿化作用、厌氧矿化作用和碳酸盐的形成和储存。

由此可以看出,滨海盐沼湿地碳循环过程主要为碳的输入、输出和碳的贮存。碳的输入包括三个方面:气态碳输入,指湿地植物和藻类对大气中 CO₂ 的固定;固态碳输入,主要是指凋落物、潮水和土壤的侵蚀等造成

的碎屑输入;溶解态碳的输入,包括溶解有机碳和溶解无机碳的输入。相对而言,碳的输出同样发生于这3种状态:经过呼吸作用而产生CO₂、CH₄等气体的输出,凋落物的输出及通过地表和地下径流的溶解态有机碳和无机碳的输出。湿地碳的贮存时间尺度上有长短之分,即长期贮存于湿地沉积物中,短期则贮存于现存生物量(如植物、土壤动物、细菌和真菌等活生物区碳库)、表层和地下水的溶解成分中。因此,影响滨海湿地碳贮存的因素有很多,包括湿地类型、植被组成、沉积物深度、南北纬度变化、气候、温度、水文以及周围的土地利用方式等。由于其影响因素的错综复杂,滨海盐沼湿地碳的贮存能力具体有多大很难探明。

在我国,目前对于长江口潮滩湿地开展了较为系统的碳库动态评估^[20],而对于我国其它重要的滨海湿地如黄河口湿地、闽江口湿地等的碳循环研究则集中于对少数样点的碳通量的非连续性观测和土壤剖面碳储存特征描述^[21-22]。这些研究对于综合评估滨海盐沼湿地对区域碳平衡的贡献是明显不够的。尽管有一些滨海盐沼湿地碳循环相关数据在小尺度上能够行得通,但是这些数据能否代表所有情况下或者能否推算到景观水平上尚未可知^[23]。

3 滨海盐沼湿地碳库的组成与影响因素

滨海盐沼湿地的碳循环内容既包含湿地内部各个碳库对碳的储存,又包含各碳库之间的碳通量。具体来说,滨海盐沼湿地生态系统的碳主要以5种形式存在^[24]:植物生物量碳、颗粒有机碳、溶解有机碳、微生物量碳及气态终产物如CH₄和CO₂。活跃的生物量碳存在于湿地植物和水生附着物中,它们负责由无机碳向有机碳转变的光合作用,滨海湿地初级生产力由于地理位置、营养状态和植被类型的不同而有极强变异性。颗粒有机碳主要包括腐烂的植物体、微生物细胞、颗粒流入物以及土壤表层的颗粒有机物。溶解有机碳同样是比较活跃的碳库,是土壤中有效性较高,易被土壤微生物分解矿化的那部分碳,溶解有机碳含量不足土壤总有机碳含量的1%,却占据了地表水中总有机碳的90%。微生物量碳存在于异养微生物的分解活动中,这些分解活动将有机碳转化为无机碳,并且将颗粒有机碳和溶解有机碳矿化。活性生物量碳的周转相对来说比较快,通常以天数计,然而相应的土壤有机物的周转则需要几十年。由碳素的存在形式可以看出,植被和土壤是滨海湿地两个最重要的碳库,而土壤碳库则是其碳循环的核心,对滨海盐沼湿地植被、土壤两大碳库及其影响因素的认识是湿地碳循环研究的关键部分。

3.1 滨海湿地植被碳库及其影响因素研究

滨海湿地具有非常高的初级生产力,盐沼植被作为滨海潮滩有机碳的最主要来源,盐沼植物在整个潮滩生态系统生源物质循环中发挥着重要作用。其在潮滩上的生长、沉积和掩埋使滨海湿地成为全球碳库的重要组成部分^[24-27]。芦苇群落是我国滨海湿地分布最广泛的草本盐沼类型,碱蓬群落则是中国北方滨海湿地的重要群落,互花米草群落及海三棱藨草群落是分布于江苏、浙江、河北等地潮间带湿地特有的湿地植物群落。目前,我国学者对滨海湿地植被的碳循环研究集中于对不同盐沼植物与湿地沉积物之间在生源物质的生物地球化学行为过程中所发挥重要作用的研究,时间与空间尺度的植被固碳、储碳能力的研究^[28-29]。

由于环境因素影响,不同滨海湿地相似植物群落生物量有一定程度的差异,不同植物群落碳含量差异也较大,我国不同滨海盐沼湿地不同植被类型的生物量及固碳能力见表2。

表2 我国不同滨海盐沼湿地不同植被类型生物量及碳密度
Table 2 Biomass and carbon density of different vegetation type from different coastal salt marshes in China

研究区域 Study area	植被类型 Vegetation type	生物量 Biomass /(kg/m ²)	碳密度 Carbon density /(kg/m ²)	固碳能力 Carbon sequestration /(kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	资料来源 Data sources
崇明东滩 East beach of Chongming Island	芦苇	6.28—11.74	2.81—5.23	1.24—2.02	[30]
	海三棱藨草	0.80—1.50	0.36—0.66	0.35—0.91	
辽河三角洲 Liaohe Delta	芦苇、水稻	—3.86	—2.38	—1.77	[31]
闽江河口 Min River Estuary	芦苇	—2.72	—	—	[32]
	互花米草	—3.40	—	—	
	咸草	—2.02	—	—	

对崇明东滩芦苇带湿地植被的生物量和初级生产力进行研究得到^[30],长江口典型芦苇带湿地植被的碳储量平均为 4.02 kg/m^2 ,地下/地上生物量比率为 2.33—3.64,碳储量是地上部分的近 3 倍,固碳能力达 $1.11\text{—}2.41 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是全国陆地植被平均固碳能力的 2.3—4.9 倍,全球植被平均固碳能力的 2.7—5.9 倍。辽河三角洲盘锦地区湿地植被的储碳、固碳能力则高于崇明东滩^[31]。闽江河口湿地由于地处南亚热带季风气候,水热条件充足,湿地植被具有较高的生物生产力^[32],主要植物群落的平均生物量表现为:互花米草群落(3.40 kg/m^2) > 芦苇群落(2.72 kg/m^2) > 咸草群落(2.02 kg/m^2)。而冯忠江等^[33]对黄河三角洲芦苇生物量的调查则显示,盐度是植被生物量大小的最主要限制因子,生物量随盐度的增加而减少,水深是最主要的促进因子,地上生物量随着水深的增加而增加,而地下与地上生物量之比则随着水深的增加而减少。

滨海盐沼湿地演替显著,而植被则是演替过程的指示者,其碳储量也在不断发生变化。不同演替阶段的湿地植被的现存碳储量及其分配格局特征存在较大差异。在崇明东滩湿地植被演替过程中,植被的储碳、固碳功能变化很大^[34]:先锋物种海三棱藨草的现存碳储量仅占芦苇现存碳储量的 13%;地下根茎为芦苇现存碳储量的主要场所,而地上部分是海三棱藨草碳储量的主要场所;处于潮滩湿地演替中后期的芦苇群落比处在生态演替早期的海三棱藨草群落具有更强的固碳能力,说明随着海三棱藨草群落向芦苇群落演替,其固碳能力不断增强。已有一些研究证明^[35-37],土壤理化因子在影响滨海盐沼植被的组成,空间分布及多样性具有不可忽视的作用。相关学者对于黄河三角洲自然湿地植被的特征及演化的研究也表明,植被的演化与土壤含盐量相关,土壤含盐量多少决定着植物群落各方面的特征,土壤脱盐使植被发生进展演替,植物的枯落物开始归还土壤,土壤有机质和全氮等养分质量分数上升^[38-39]。

来自地上和地下的有机物质生产构成了湿地土壤有机碳的主要来源。植物初级生产力中只有很少一部分配置给多年的植物活组织,而大部分分配给了叶片、细枝和细根,进而导致了每年的植物凋落物及残体向土壤的输入^[40-41]。湿地系统植物根系对于地下碳库的输入规模取决于细根的比例及其周转速率,输入规模可以是地下净初级生物力 3.10—0.15 倍^[42-43]。然而,我国对于滨海湿地植被地上、地下生产力的研究尚未深入,地上凋落物输入占地上净生产力的比例大小目前还相对缺乏相关研究,仅对影响凋落物分解的因素方面做了一些探讨。对闽江河口湿地 3 种主要植物芦苇、咸草、互花米草的冬春季枯落物分解特征、性质和潮汐对枯落物分解的影响研究显示^[44],3 种植物的枯落物在分解过程中分解速率由快转慢,而 C/N 比值与枯落物分解的相关性不强,冬春季潮汐对枯落物分解速率的影响也不明显。而周俊丽等^[45]对长江口潮滩先锋植物藨草腐烂分解过程进行了研究则发现,植物体中初始的 N 浓度及 C/N 比值是影响藨草茎和根残体分解速率的主要因素,更高的氮含量和更低的 C/N 比值,使其茎组织具有更快的分解速率;由于受潮汐影响,湿润的环境为微生物的生存繁殖提供了良好的条件,促进了其对植物残体的分解作用。

滨海盐沼湿地具有极高的初级生产力,湿地植物净同化的碳仅有 15% 再释放到大气中去,湿地植被碳库在全球碳循环中占有重要地位。研究我国不同滨海盐沼湿地植被的储碳、固碳能力,了解湿地有机碳的积累过程和机理,包括地上、地下凋落物的输入与分解及厌氧环境下有机碳积累机制等,对于认识我国滨海盐沼湿地碳循环、提高碳汇能力至关重要。

3.2 滨海盐沼湿地土壤有机碳库

滨海盐沼湿地在植物生长、促淤造陆、潮汐泥沙搬运等过程中积累了大量无机碳和有机碳,由于沉积物厌氧环境的限制,植物残体分解和转化速率十分缓慢,通常以泥炭或有机质形式表现为有机碳的积累。土壤是滨海盐沼湿地碳收支的核心,也是其中最大的有机碳库。相关学者对我国滨海湿地(如闽江口、长江口、黄河三角洲和苏北潮滩湿地等)土壤碳库开展了一系列研究,主要集中于不同植被类型下土壤剖面有机碳含量分布特征、有机碳密度、及土地利用变化对盐沼湿地土壤碳库的影响。

植被类型对滨海盐沼湿地土壤有机碳含量和组成具有重要影响,如表 3 所示。我国学者主要从影响土壤有机碳储存的控制因子对土壤有机碳储量及分布的影响进行研究。在闽江河口盐沼湿地^[46],有机碳含量、储量与植物种类及生物量密切相关,芦苇、咸草和藨草覆盖下 0—60 cm 沉积物中有机碳储量平均为 10045.7 、

9706.9 t/km² 和 5303.9 t/km²。对崇明东滩海三棱藨草生长期沉积物有机碳含量变化进行观测得到^[47],夏季是潮滩沉积物有机碳库的“碳亏”期,秋季起沉积物碳库进入“碳盈”期,即海三棱藨草死亡分解使得有机碳在沉积物中累积,这说明,枯落的海三棱藨草是长江口潮滩盐沼带沉积物有机碳库的主要碳源,通过光合作用所固定的碳在植物的生长末期输入沉积物有机碳库中。而董洪芳等^[48]的研究则认为,黄河口滨岸潮滩湿地土壤有机碳密度与植物碳密度相关性不显著,表层有机碳含量仅在 0.75—8.35 Cg/km² 之间。这可能与黄河三角洲湿地土壤有机质来源以黄河流域有机质为主,当地植被的贡献较小有关^[49]。

外来植物入侵对也在一定程度上影响着滨海盐沼湿地的土壤有机碳库^[50]。对苏北潮滩湿地不同生态带有机质来源辨析与定量估算显示^[51],入侵物种互花米草滩对总有机碳、有机质的富集量要远大于芦苇、盐蒿等生态带,在整个潮滩湿地生态系统的物质循环和交换中发挥着不可替代的作用。而在杭州滨海湿地^[52],植被演替对土壤有机碳分布则有不影响,外来入侵种互花米草的大量入侵和扩散将有可能降低潮滩湿地生态系统土壤的储碳功能。

表 3 我国不同滨海盐沼湿地土壤有机碳含量及有机碳库
Table 3 Soil organic carbon content and density from different coastal salt marshes in China

研究区域 Study area	植被覆盖类型 Vegetation type	碳含量 Carbon content /(g/kg)	碳密度 Carbon density /(kg/m ²)	土壤深度 Soil depth /cm	资料来源 Data sources
闽江河口 Min River Estuary	芦苇	—	10.05	0—60	[46]
	咸草	—	9.71	0—60	
	藨草	—	5.30	0—60	
黄河三角洲 The Yellow River Delta	芦苇、碱蓬等	0.75—8.35	0.09—0.49	0—30	[48]
杭州湾 Hangzhou Bay	芦苇	8.5 ± 0.04	—	0—50	[52]
	互花米草	7.31 ± 0.08	—	0—50	
	海三棱藨草	5.48 ± 0.29	—	0—50	

不同植物通过影响滨海盐沼湿地土壤有机碳的输入数量和质量而影响土壤有机碳分布和储量,而人类活动,如围垦、填海工程和城市化,转变为养殖池塘等,则通过对滨海盐沼湿地的干扰和破坏,使土壤中的有机碳分解速率加快,导致滨海湿地碳库急剧减小。据研究,土壤有机碳含量随围垦时间延长表现为先降低后升高的趋势,围垦引起的土壤水分、颗粒组成的变化以及耕作、土地利用和利用历史是影响围垦湿地土壤有机碳分布的主要原因^[52]。在闽江河口湿地,土地利用变化对表层土壤有机碳含量及其活性的影响较大^[53],滩涂养殖地、水田、池塘养殖地、草地和撂荒地的土壤有机碳含量分别比芦苇沼泽地低 27% ,75% ,67% ,1% ,60% ;而不同土地利用方式间土壤活性有机碳含量的差异比有机碳的差异大,与芦苇地相比,滩涂养殖地、水田、池塘、草地活性有机碳含量分别低 24% ,83% ,84% ,42%。这是因为在土地利用变化过程中,土壤有机碳含量和活性有机碳含量都将受到不同程度的影响,由于受到影响的程度不同,这些差异表现在不同土地利用方式下土壤活性有机碳的分配比例方面^[54]。

滨海湿地除具备湿地的一般性质外,因受潮汐影响,又有其自身特征。涨潮时海水流经过植物群落后,流速大量减弱,水中所携带的大量颗粒物沉降,而在落潮初期的水流速度小,无法使滩面沉积物发生再悬浮,加大了沿海盐沼的沉积速率,从而实现了固碳的功能。决定滨海盐沼湿地结构与功能的主要因素有:被潮水浸没的频率与持续时间、土壤的渗透性和盐度、营养元素(尤其是氮素)的限制^[7-8]。陈庆强等^[55]利用柱样元素含量、稳定同位素组成(¹³C)、粒度与 C/N 比等的测定,对长江口盐沼滩面演化的有机碳积累效应进行研究发现,随着滩面演化,柱样上部层段的有机质含量增加,陆源物质与当地植被逐渐成为有机质的主要来源。长江口盐沼有机质的分解程度低,颗粒有机碳与黏土含量的垂向分布主要受控于滩面沉积过程,与盐沼高的淤积速率直接相关。从物质净累积看,盐沼是大气中 CO₂ 的一个汇,高淤积速率,独特的沙、泥纹层构造及其优良的封堵效应,使堆积埋藏成为盐沼碳汇的主要途径。

滨海盐沼湿地沉积物是碳素的主要储存场所。土壤沉积物中有机碳包括动、植物及微生物的遗体,排泄

物、分泌物及其分解产物和土壤腐殖质。土壤有机碳的积累是进入土壤的有机物质量与其在土壤微生物作用下分解所损失的量之间平衡的结果,其库容的大小受气候、植被、土壤理化特性以及人类活动等诸多物理、生物和人为因素的影响,这些因子间的相互作用对土壤有机碳的动态变化尤其重要^[54]。滨海湿地土壤碳贮存的规模、水平和垂直分布以及其组分是湿地碳循环整体研究的重要环节,但是我国目前对湿地土壤碳储存的研究大多只涉及到总碳库的测定,对于碳库中不同组分,如可溶性有机碳、微生物碳及轻、重组碳的研究很少见报道。关于潮汐对滨海湿地土壤碳库中溶解有机碳和无机碳含量的影响研究也较为薄弱,总体上对于滨海湿地碳储量的研究仍局限于小尺度范围内,没有对滨海湿地整体的碳储量大小的估算。此外,土地利用形式转化对于滨海盐沼湿地碳库的影响十分重要,如要提高我国滨海湿地固碳能力,需要对土地利用方式转化前后滨海盐沼湿地的土壤碳库变化加强研究。

4 滨海盐沼湿地 CO₂、CH₄ 的输出及影响因素

全球滨海盐沼湿地分布很广,较高的初级生产力与碳埋藏速率使其成为抑制大气温室效应的有效“碳汇”^[7]。但由于微生物作用,滨海湿地生态系统在一定时期和条件下释放 CO₂、CH₄,从而转化为“碳源”^[56]。滨海盐沼湿地在碳的源、汇之间的转化取决于土壤碳的输入输出量和土壤碳驻留时间,其核心是土壤中有机碳的转化动态和平衡过程^[57-58]。滨海湿地生态碳素输出主要考虑植被、土壤呼吸排放出的 CO₂ 与 CH₄。我国在研究自然湿地温室气体排放通量观测技术和环境影响因子方面比较成熟^[59-60],而关于滨海盐沼湿地碳排放的研究也取得了一定的进展。

4.1 CO₂ 的排放

滨海盐沼湿地土壤与植物呼吸产生 CO₂ 并向大气中释放是碳输出的重要方式,研究其 CO₂ 收支情况及其反馈机制对于研究全球范围的碳收支情况非常重要。滨海盐沼湿地的一个重要特征就是受潮汐作用影响,水位是影响湿地土壤 CO₂ 通量的重要因素。此外,土壤温度与土壤微生物活性密切相关,于是土壤温度与土壤呼吸也有着密切关系。我国学者对不同滨海湿地 CO₂ 通量进行了观测,如表 1。同时,也对植被、水位与温度等影响因子进行了相关研究。

对崇西湿地的 CO₂ 交换研究表明^[13],湿地在植物生长季与非生长季分别起到碳的汇、源作用,土壤温度对生态系统呼吸的影响有一定的局限性,仅在一定范围内发挥作用。而潮汐对土壤的呼吸作用影响较大,生态系统 CO₂ 交换与潮汐的相关性随着水位波动的幅度而增强,因此,在任何季节大潮期的 CO₂ 释放均低于小潮期。总体来讲,崇西湿地年固碳能力约为 0.225 kg·m⁻²·a⁻¹,表现为碳汇。由于海三棱藨草的生长,夏季长江口潮间带的低潮滩是 CO₂ 的汇,中潮滩表现为 CO₂ 排放源^[14]。而对黄河口滨岸潮滩湿地 CO₂ 研究得出了不同的结论^[15],夏季低潮滩全天表现为 CO₂ 的源,潮滩 CO₂ 通量与气温的相关性不显著。这可能是由于滨海湿地地理位置与环境或者观测方法的不同而造成的结论差异。全川等^[16]对闽江河口潮汐沼泽湿地 CO₂ 排放通量特征研究指出,潮水显著减少了湿地直接排向大气环境的 CO₂ 通量,但涨潮前和落潮后 CO₂ 排放通量并无显著差异,芦苇和咸草沼泽湿地 CO₂ 排放量与大气温度和土壤温度的关系呈显著正相关,对冬季闽江河口湿地的 CO₂ 排放研究也得到了相似的结果^[17]。

4.2 CH₄ 的排放

CH₄ 是滨海盐沼湿地碳输出的另一种重要形式。IPCC 最新报告显示,CH₄ 的温室效应潜力是 CO₂ 的 21—25 倍,尽管在大气中只占很少的部分,但其在大气中浓度的持续增长对全球气候变化产生了显著的影响。关于 CH₄ 的相关研究,特别是 CH₄ 从湿地的产生及排出等过程及相应机理的研究很早就引起了人们的重视。目前,湿地 CH₄ 排放的相关研究主要分为两大类:一类是以测定和估算 CH₄ 排放及分析影响 CH₄ 排放的生物和非生物因子为主要内容,静态箱原位采集气体联合气相色谱分析法是目前测定 CH₄ 排放国内外普遍应用的方法,如表 1;另一类是从机理上深入研究 CH₄ 的产生、氧化到排放的化学、生物及物理过程。国内对湿地 CH₄ 排放的研究则集中于第一类,而且关于滨海湿地 CH₄ 通量的研究并没有像泥炭湿地具有普遍认可的数据。对影响湿地 CH₄ 排放的主要环境因子的研究是目前国际上温室气体排放研究的一个重要领

域^[56]。湿地土壤的许多理化性质,如温度、湿度、pH 值、氧化还原电位等都影响着湿地 CH_4 的排放。

作为常年受潮汐影响的滨海湿地,积水深度的变化直接影响到湿地 CH_4 的排放。此外,滨海湿地植被与 CH_4 排放也有着重要关系。辽河三角洲芦苇湿地温室气体 CH_4 的排放受水深和植被生长影响较明显^[18],淹水前土壤为 CH_4 汇,淹水期间则有大量的 CH_4 排放,排水后 CH_4 排放明显减少;有芦苇生长的湿地 CH_4 排放量是无芦苇生长的 15 倍,这说明土壤中产生的 CH_4 主要是通过芦苇植株的输导作用进入到大气中的。相关学者对秋季黄河口湿地系统的 CH_4 “源、汇”效应进行监测并指出^[21],秋季不同潮滩湿地 CH_4 排放通量的差异主要与温度以及植被生长状况的差异有关,其中,气温与通量呈显著正相关关系。对闽江河口芦苇潮汐湿地 CH_4 通量观测结果显示^[17,61],互花米草入侵明显增加了当地的 CH_4 排放通量,而 Cheng 等^[62]对长江口九段沙湿地的季节性 CH_4 排放及其稳定同位素 $^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 进行观测及研究认为,中国东部沿海互花米草的入侵对 CH_4 排放的影响并不显著。同时,此研究显示, CH_4 排放与温度正相关,与土壤湿度负相关。

CH_4 是土壤有机质厌氧分解的最终产物,土壤有机碳的供给程度和微生物的分解作用则直接影响到甲烷的产生,因此,甲烷的产生速率与土壤中有机物质的含量直接相关^[63]。同时,相关学者观察到在 SO_4^{2-} 沉积丰富的滨海湿地比淡水湿地释放的甲烷量要少得多^[7],一些研究也证明了 SO_4^{2-} 对甲烷的排放具有一定抑制作用^[64-65]。但是我国目前还缺乏对滨海湿地这两个方向的相关研究。

综上所述,影响滨海盐沼湿地土壤碳素通量的主要因素有土壤温度,土壤含水量或水位,而具体的主导因子则主要取决于滨海盐沼湿地具体地理位置、环境限制因子或者其季节变化。此外,影响盐沼湿地土壤碳素排放通量的因素还有土壤中有机质含量、地下水中的可溶性有机碳、土壤微生物群落和 pH 值等,而这些因子的具体影响程度还有待于进一步的研究。

5 潮汐作用对滨海盐沼湿地碳收支的影响

由于滨海湿地处于海陆相接的特殊位置,潮汐作用为水体悬浮物和碳的输运与沉积提供了环境机制,由水体带入或带出的有机物和可溶性碳在其总有机碳的收支上均不可忽视,也就是说,由水文过程和潮汐作用引起的盐沼湿地与近海之间的横向通量对于其碳循环是十分重要的。通过对盐沼湿地碳的输入、输出及碳的内部转化的影响,潮汐在滨海盐沼湿地碳收支方面占有重要地位。

潮汐作用能通过直接的物理搬运来影响盐沼湿地碳的碳收支,在 Fundy 海湾的低潮带,当地植被互花米草的大部分生物量被潮水带走,而处于高潮带的土壤则保存了 75% 的互花米草生物量^[66]。同时,不断涨落的潮水也向沿海湿地提供无机营养物质和颗粒有机质。一般来说,大潮和风暴潮期间盐沼湿地有机质向近海输出的几率比较大。这种物理搬运作用对盐沼湿地碳循环的影响主要取决于盐沼湿地的地理位置,潮差大小,植物的生产力等。潮汐作用还直接影响着湿地土壤的理化状况,如温度、厌氧程度、盐度和 pH 值等。温度通过促进微生物的活动直接影响着有机质的分解,水体的温度变化较慢,经常受潮汐作用的区域土壤温度变化也较慢。潮水导致的土壤湿度也会限制有机质分解作用,在一定程度上利于碳的累积。同时,湿地水体中 DOC (dissolved organic carbon) 的通量也受到潮汐周期中水淹时间的影响。在我国的长江口湿地,郭海强等^[11]观测了潮汐作用对于崇明东滩净生态系统碳交换量,研究显示,低潮滩的碳通量对于潮汐的敏感性高于高潮滩,在夜间,由于持续的淹水时间使得大潮期间的平均碳通量低于小潮。同时,潮汐向周围生态系统输送的有机质可能会引起碳的排放。可溶性有机碳的输出是盐沼湿地通过水文过程实现土壤碳输出的一个主要途径^[67]。潮汐作用使得碳的水文过程输出显得尤为重要。但是,对于滨海湿地通过水文过程输出的 DOC 的研究较少^[13],特别是在我国东南沿海的滨海湿地,都存在有不同程度的 DOC 水文输出。因此,为了探明潮汐对盐沼湿地碳的源、汇功能转变的影响,对盐沼湿地横向的碳输运需要深入研究。

6 问题与展望

滨海盐沼湿地由于其较高的初级生产力和较低的甲烷释放率而成为缓解全球变暖的有效蓝色碳汇,近年来引起全球范围内的热切关注。我国滨海盐沼湿地分布较广,国内学者对滨海盐沼湿地碳循环及碳收支研究取得了一定进展,但仍存在一些局限性。例如,对滨海盐沼湿地土壤有机碳在时间、空间上的分布大部分仅进

行简单的特征描述,只考虑部分环境因子对滨海盐沼湿地碳通量的影响等,这些都制约着对滨海盐沼湿地碳循环过程的整体理解以及对其碳收支的准确评估。因此,我们仍然需要更加深入和系统的研究去探寻滨海盐沼湿地的碳封存能力及不同地理位置和季节变化下碳通量的主控因素。要准确量化滨海盐沼湿地的固碳潜力,提高我国滨海湿地的蓝色碳汇价值,对今后的研究方向有以下几点建议:

(1)加强滨海盐沼湿地土壤碳库在深度上和广度上的研究。由于历史数据资料的缺乏和统计方法的单一,我国滨海盐沼湿地碳储量尚未能进行精确估算。目前,研究集中于对有机碳含量与水平分布特征的研究,对有机碳的沉积速率及埋藏效率方面的研究较缺乏,而这对于精确测量盐沼湿地的固碳能力是十分必要的。

(2)对滨海盐沼湿地碳储量、碳通量的量化方法和观测技术进行标准化。尽管已有许多测定土壤碳密度和碳通量的方法,但是目前各种方法所得结果之间的可比性较差,难以获得较大时间、空间尺度上的准确数据,因此,探索更有效而准确的方法并统一标准是进行碳收支评估的迫切需要。

(3)在研究尺度上要宏观、微观并重,长期原位监测湿地碳通量的变化与室内模拟研究都要加强。宏观上要明确滨海盐沼湿地碳循环在全球碳循环中扮演的角色,借助遥感和地理信息系统等新技术,研究滨海湿地作为“碳源”或者“碳汇”的地位及动态变化过程;微观上则要综合研究不同湿地碳循环特征及各影响因素之间的相互关系。

(4)量化在潮汐影响下滨海盐沼湿地碳与邻近生态系统之间的横向交换通量。因受潮汐影响,涨潮落潮所造成的外来碳堆积对于滨海盐沼湿地滩面演化、碳的沉积与长期埋藏有着重要贡献;同时,颗粒有机碳、溶解态有机碳与无机碳的水文输出对其碳库动态变化具有重要的意义。因此,量化碳的横向通量对于准确评估滨海盐沼湿地的碳收支是必不可少的。

滨海湿地生态系统在全球碳循环中起着重要的作用,并对全球气候变化有着巨大的影响,同时全球变化也将对滨海湿地碳循环与碳收支有着最直接的影响。气温升高,降水变化,海平面上升,是影响湿地分布和功能的主要因素。因此,建立长期的滨海湿地碳库动态监测平台,深入研究我国滨海湿地碳库对全球气候变化的影响及其反馈作用,对于预测全球变化及制定湿地碳储备功能的提升策略具有重要的意义。

References:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate Change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967-973.
- [3] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 92-102.
- [4] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu F, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 517-524.
- [5] Han B, Wang X K, Lu F, Duan X N, Ouyang Z Y. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612-619.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [7] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, Lynch J C. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17(4): 1111, doi: 10.1029/2002GB001917.
- [8] Choi Y, Wang Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radiocarbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: GB4016, doi: 10.1029/2004GB002261.
- [9] Baldocchi D D, Falge E, Gu L, Olson R, Hollinger D Y, Running S W, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K J, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B E, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W J, Oechel W C, Paw U K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K B, Wofsy S C. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [10] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [11] Guo H Q, Noormets A, Zhao B, Chen J Q, Sun G, Gu Y J, Li B, Chen J K. Tidal effects on net ecosystem exchange of carbon in an estuarine wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1820-1828.

- [12] Janssens I A, Ceulemans R. Spatial variability in forest soil CO₂ efflux assessed with a calibrated soda lime technique. *Ecology Letters*, 1998, 1 (2): 95-98.
- [13] Yue B J, Zhang J Q, Xin Y. Carbon biogeochemical cycle in the wetland ecosystem. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(2): 72-78.
- [14] Ge Z M, Zhou X, Wang K Y, Kellomäki S, Gong J N. Research methodology on carbon pool dynamics in the typical wetland of Yangtze River estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1097-1108.
- [15] Jiang H H, Sun Z G, Wang L L, Mu X J, Sun W L, Song H L, Sun W G. Methane fluxes and controlling factors in the intertidal zone of the Yellow River estuary in autumn. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 565-573.
- [16] Tong C, Wang W Q, Lei B, Lin L Y, Zeng C S. Characteristics of temperature sensitivity of methane flux from the Shanyutan tidal wetlands in Min River estuary. *Wetland Science*, 2010, 8(3): 240-248.
- [17] Connor R F, Chmura G L, Beecher C B. Carbon accumulation in Bay of Fundy salt marshes: Implications for restoration of reclaimed marshes. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2001, 15(4): 943-954.
- [18] Reddy K R, DeLaune R D. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008: 111-184.
- [19] Schlesinger W H. *An Overview of the C Cycle in Soils and Global Change*. Boca Raton: CRC Press, 1995.
- [20] Alongi D M, Tirendi F, Dixon P, Trott L A, Brunskill G J. Mineralization of organic matter in intertidal sediments of a tropical semi-enclosed delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 48(4): 451-467.
- [21] Thornton S F, Mcmanus J. Application of organic carbon and nitrogen stable-isotope and C/N ratios as source indicators of organic-matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 38(3): 219-233.
- [22] Vernberg F J. Salt-marsh process: a review. *Environmental Technology and Chemistry*, 1993, 12(12): 2167-2195.
- [23] Levin L A, Talley T S, Hewitt J. Macrobenthos of *Spartina foliosa* (Pacific Cordgrass) salt marshes in Southern California: community structure and comparison to a Pacific mudflat and a *Spartina alterniflora* (Atlantic smooth cordgrass) marsh. *Estuarine*, 1998, 21(1): 129-144.
- [24] Mei X Y, Zhang X F. Carbon storage and fixation by a typical wetland vegetation in Changjiang River Estuary-a case study of *Phragmites australis* in east beach of Chongming Island. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 269-272.
- [25] Suo A N, Zhao D Z, Zhang F S. Carbon storage and fixation by wetland vegetation at the estuaries in northern China: a case of Panjin area, Liaohe Delta. *Journal of Marine Sciences*, 2010, 28(3): 67-71.
- [26] Luo M J, Huang W J, Tan F L, Pan H, Gao Y J. Biomass of main plant community of estuarine wetland of Minjiang River. *Protection Forest Science and Technology*, 2009, (6): 1-3.
- [27] Feng Z J, Zhao X S. The environmental interpretation for the space change of the reed biomass in the Yellow River Delta. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(3): 170-174.
- [28] Mei X Y, Zhang X F. Carbon storage and carbon fixation during the succession of natural vegetation in wetland ecosystem on east beach of Chongming Island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 933-936.
- [29] Funk D W, Noel L E, Freedman A H. Environmental gradients, plant distribution, and species richness in arctic salt marsh near Prudhoe Bay, Alaska. *Wetlands Ecology and Management*, 2004, 12(3): 215-233.
- [30] Caçador I, Tibério S, Cabral H N. Species zonation in Corroios salt marsh in the Tagus estuary (Portugal) and its dynamics in the past fifty years. *Hydrobiologia*, 2007, 587(1): 205-211.
- [31] Touchette B W. Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: spatial variations in plant water relations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 337(1): 1-12.
- [32] Wu Z F, Zhao S L, Zhang X L. Studies on interrelation between salt vegetation and soil salinity in the Yellow River Delta. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(2): 184-193.
- [33] Zhang X L, Ye S Y, Yin P, Chen D J. Characters and successions of natural wetland vegetation in Yellow River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 292-298.
- [34] Roman C T, Daiber F C. Aboveground and belowground primary production dynamics of two Delaware Bay tidal marshes. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1984, 111(1): 34-41.
- [35] Aerts R, Berendse F, Klerk N M, Bakker C. Root production and root turnover in two dominant species of wet heathlands. *Oecologia*, 1989, 81 (3): 374-378.
- [36] Megonigal J P, Day F P Jr. Organic matter dynamics in four seasonally flooded forest communities of the dismal swamp. *American Journal of Botany*, 1988, 75(9): 1334-1343.
- [37] Finer L, Laine J. Root dynamics at drained peatland sites of different fertility in southern Finland. *Plant and Soil*, 1998, 201(1): 27-36.
- [38] Liu B G, Tong C, Luo R T. Litter decomposition of three main plants in Winter and Spring in the marsh of Minjiang River Estuary. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2008, 24(2): 80-85.
- [39] Zhou J L, Wu Y, Zhang J, Sun C X. Study on putrefaction and decomposition process of *Scirpus triquetus* on the Changjiang Estuary tidal flat. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(1): 44-50.
- [40] Jia R X, Tong C, Wang W Q, Zeng C S. Organic carbon contents and storages in the salt marsh sediments in the Min River Estuary. *Wetland*

- Science, 2008, 6(4): 492-499.
- [41] Chen H, Wang D Q, Chen Z L, Yang H X, Wang J, Xu S Y. The variation of organic carbon content in Chongming east tidal flat sediments during *Scirpus mariqueter* growing stage. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1): 135-142.
- [42] Dong H F, Yu J B, Sun Z G, Mu X J, Chen X B, Mao P L, Wu C F, Guan B. Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River estuary tidal flat wetland. *Environmental Science*, 2010, 31(6): 1594-1599.
- [43] Ding X G, Ye S Y, Wang J S. Stable carbon and nitrogen isotopes in the Yellow River delta wetland. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(2): 66-71.
- [44] Cheng X L, Luo Y Q, Chen J Q, Lin G H, Chen J K, Li B. Short-term C_4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C_3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine Island. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(12): 3380-3386.
- [45] Gao J H, Yang G S, Ou W X. Analyzing and quantitatively evaluating the organic matter source at different ecologic zones of tidal salt marsh, North Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2005, 26(6): 51-56.
- [46] Shao X X, Yang W Y, Wu M, Jiang K Y. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 658-664.
- [47] Zeng C S, Zhong C Q, Tong C, Liu Z Z. Impacts of LUCC on soil organic carbon contents in wetland of Minjiang River estuary. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 125-129.
- [48] Blair G J, Crocker G J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38(1): 71-84.
- [49] Chen Q Q, Zhou J Z, Meng L, Hu K L, Gu J H. Organic carbon accumulation effect in evolution of salt marsh in the Changjiang River Estuary in China. *Progress in Natural Science*, 2007, 18(5): 614-623.
- [50] Bartlett K B, Harriss R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere*, 1993, 26(1/4): 261-320.
- [51] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems-a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104(3): 399-417.
- [52] Scholes R J, Noble I R. Storing carbon on land. *Science*, 2001, 294(5544): 1012-1013.
- [53] Wang D X, Lv X G, Ding W X, Cai Z C, Wang Y Y. Comparison of methane emission from marsh and paddy field in Sanjiang plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(4): 500-503.
- [54] Yue G Y, Zhao L, Zhao Y H, Li Y S. Research advances of grassland ecosystem CO_2 flux on Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 166-174.
- [55] Ma A N, Lu J J. Net ecosystem exchange of carbon and tidal effects in Chongxi wetland, Yangtze estuary. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(7): 716-721.
- [56] Wang D Q, Chen Z L, Wang J, Xu S Y, Yang H X, Chen H, Yang L Y. Fluxes of CH_4 , CO_2 and N_2O from Yangtze estuary intertidal flat in summer season. *Geochimica*, 2007, 36(1): 78-88.
- [57] Wang L L, Sun Z G, Mu X J, Sun W L, Song H L, Jiang H H. A preliminary study on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from intertidal flat wetlands of the Yellow River estuary. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 51-61.
- [58] Tong C, E Y, Liao J, Yao S, Wang W Q, Huang J F, Zhang L H, Yang H Y, Zeng C S. Carbon dioxide emission from tidal marshes in the Min River Estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2830-2840.
- [59] Liu Z X, Zhu R Q, Yao S, Huang J F. Winter fluxes of methane and carbon dioxide from *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* in the estuary wetland of Min River and their influencing factors. *Wetland Science and Management*, 2010, 6(3): 46-49.
- [60] Huang G H, Xiao D N, Li Y X, Chen G X, Yang Y C, Zhao C W. CH_4 emissions from the reed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [61] Tong C, Zeng C S, Wang W Q, Yan Z P, Yang H Y. Main factors influencing CH_4 flux from a *Phragmites australis* wetland in the Min River estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(1): 207-216.
- [62] Cheng X L, Luo Y Q, Xu Q, Lin G H, Zhang Q F, Chen J K, Li B. Seasonal variation in CH_4 emission and its ^{13}C -isotopic signature from *Spartina alterniflora* and *Scirpus mariqueter* soils in an estuarine wetland. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 85-94.
- [63] Wachinger G, Fiedler S, Zepp K, Gatteringer A, Sommer M, Roth K. Variability of soil methane production on the micro-scale: spatial association with hot spots of organic material and archaeal populations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(8/9): 1121-1130.
- [64] Rejmankova E, Post R A. Methane in sulfate-rich and sulfate-poor wetland sediments. *Biogeochemistry*, 1996, 34(2): 57-70.
- [65] Freeman C, Hudson J, Lock M A, Reynolds B, Swanson C. A possible role of sulphate in the Suppression of wetland methane fluxes following drought. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(10): 1439-1442.
- [66] Cranford P J, Gordon D C, Jarvis C M. Measurement of cordgrass, *Spartina alterniflora*, production in a macrotidal estuary, Bay of Fundy. *Estuaries*, 1989, 12(1): 27-34.
- [67] Wetzel R G. Gradient-dominated ecosystem: sources and regulatory functions of dissolved organic matter in freshwater ecosystems. *Hydrobiologia*, 1992, 229(1): 181-198.

参考文献:

- [2] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [3] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 92-102.
- [4] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 517-524.
- [5] 韩冰, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 612-619.
- [13] 岳保静, 张军强, 辛一. 滨海湿地碳的生物地球化学循环过程. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 72-78.
- [14] 葛振鸣, 周晓, 王开运, Kellomäki S, 巩晋楠. 长江河口典型湿地碳库动态研究方法. 生态学报, 2010, 30(4): 1097-1108.
- [15] 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广. 秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究. 环境科学, 2012, 33(2): 565-573.
- [16] 仝川, 王维奇, 雷波, 林璐莹, 曾从盛. 闽江河口潮汐湿地甲烷排放通量温度敏感性特征. 湿地科学, 2010, 8(3): 240-248.
- [24] 梅雪英, 张修峰. 长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究——以崇明东滩芦苇为例. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 269-272.
- [25] 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究——以辽河三角洲盘锦地区为例. 海洋学研究, 2010, 28(3): 67-71.
- [26] 罗美娟, 黄炜娟, 谭芳林, 潘辉, 高元竞. 闽江河口湿地主要植物群落生物量研究. 防护林科技, 2009, (6): 1-3.
- [27] 冯忠江, 赵欣胜. 黄河三角洲芦苇生物量空间变化环境解释. 水土保持研究, 2008, 15(3): 170-174.
- [28] 梅雪英, 张修峰. 崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳及固碳功能变化. 应用生态学报, 2007, 18(4): 933-936.
- [32] 吴志芬, 赵善伦, 张学雷. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究. 植物生态学报, 1994, 18(2): 184-193.
- [33] 张绪良, 叶思源, 印萍, 陈东景. 黄河三角洲自然湿地植被的特征及演化. 生态环境学报, 2009, 18(1): 292-298.
- [38] 刘白贵, 仝川, 罗榕婷. 闽江河口湿地 3 种主要植物冬春季枯落物分解特征. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008, 24(2): 80-85.
- [39] 周俊丽, 吴莹, 张经, 孙承兴. 长江口潮滩先锋植物蘆草腐烂分解过程研究. 海洋科学进展, 2006, 24(1): 44-50.
- [40] 贾瑞霞, 仝川, 王维奇, 曾从盛. 闽江河口盐沼湿地沉积物有机碳含量及储量特征. 湿地科学, 2008, 6(4): 492-499.
- [41] 陈华, 王东启, 陈振楼, 杨红霞, 王军, 许世远. 崇明东滩海三棱蘆草生长期沉积物有机碳含量变化. 环境科学学报, 2007, 27(1): 135-142.
- [42] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 毛培利, 吴春发, 管博. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征. 环境科学, 2010, 31(6): 1594-1599.
- [43] 丁喜桂, 叶思源, 王吉松. 黄河三角洲湿地土壤、植物碳氮稳定同位素的组成特征. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 66-71.
- [45] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北潮滩湿地不同生态带有机质来源辨析与定量估算. 环境科学, 2005, 26(6): 51-56.
- [46] 邵学新, 杨文英, 吴明, 蒋科毅. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局. 应用生态学报, 2011, 22(3): 658-664.
- [47] 曾从盛, 钟春棋, 仝川, 柳铮铮. 土地利用变化对闽江河口湿地表层土壤有机碳含量及其活性的影响. 水土保持学报, 2008, 22(5): 125-129.
- [49] 陈庆强, 周菊珍, 孟翎, 胡克林, 顾靖华. 长江口盐沼滩面演化的有机碳累积效应. 自然科学进展, 2007, 18(5): 614-623.
- [53] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 蔡祖聪, 王毅勇. 三江平原沼泽湿地与稻田 CH_4 排放对比研究. 地理科学, 2002, 22(4): 500-503.
- [54] 岳广林, 赵林, 赵拥华, 李元寿. 青藏高原草地生态系统碳通量研究进展. 冰川冻土, 2010, 32(1): 166-174.
- [55] 马安娜, 陆健健. 长江口崇西湿地生态系统的二氧化碳交换及潮汐影响. 环境科学研究, 2011, 24(7): 716-721.
- [56] 王东启, 陈振楼, 王军, 许世远, 杨红霞, 陈华, 杨龙元. 夏季长江口潮间带 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量特征. 地球化学, 2007, 36(1): 78-88.
- [57] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 姜欢欢. 黄河口滨岸潮滩湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量特征初步研究. 草业学报, 2011, 20(3): 51-61.
- [58] 仝川, 鄂焱, 廖稷, 姚顺, 王维奇, 黄佳芳, 张林海, 杨红玉, 曾从盛. 闽江河口潮汐沼泽湿地 CO_2 排放通量特征. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2830-2840.
- [59] 刘泽雄, 朱瑞琴, 姚顺, 黄佳芳. 闽江河口咸草湿地冬季甲烷和二氧化碳通量及影响因子分析. 湿地科学与管理, 2010, 6(3): 46-49.
- [60] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 陈冠雄, 杨玉成, 赵长伟. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH_4)排放研究. 生态学报, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [61] 仝川, 曾从盛, 王维奇, 闫宗平, 杨红玉. 闽江河口芦苇潮滩湿地甲烷通量及主要影响因子. 环境科学学报, 2009, 29(1): 207-216.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea*
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an
example of slope and aspect BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy
soil LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,
China MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO₂ flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-
etic induction instruments YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 张利权

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 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 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