

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第8期 Vol.33 No.8 **2013**

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 33 卷 第 8 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态系统研究专题

- 城市生态系统:演变、服务与评价——“城市生态系统研究”专题序言 王效科 (2321)
- 城市生态景观建设的指导原则和评价指标 孙然好,陈爱莲,李 芬,等 (2322)
- 城市绿色空间格局的定量化方法研究进展 陶 宇,李 锋,王如松,等 (2330)
- 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例 赵 丹,李 锋,王如松 (2343)
- 基于市政综合监管信息的城市生态系统复杂性分析 董仁才,苟亚青,刘 昕 (2350)
- 原位生物技术对城市重污染河道底泥的治理效果 柳 敏,王如松,蒋 莹,等 (2358)
- 北京城区道路沉积物污染特性 任玉芬,王效科,欧阳志云,等 (2365)
- 绿地格局对城市地表热环境的调节功能 陈爱莲,孙然好,陈利顶 (2372)
- 北京城区气传花粉季节分布特征 孟 龄,王效科,欧阳志云,等 (2381)

个体与基础生态

- 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响 徐 翠,张林波,杜加强,等 (2388)
- 土壤砷植物暴露途径的土壤因子模拟 线 郁,王美娥,陈卫平 (2400)
- 不同寄主植物对马铃薯甲虫的引诱作用 李 超,程登发,郭文超,等 (2410)
- 蒙古栎、白桦根系分解及养分动态 靳贝贝,国庆喜 (2416)
- 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响 王 林,冯锦霞,王双霞,等 (2425)
- 不同郁闭度下胸高直径对杉木冠幅特征因子的影响 符利勇,孙 华,张会儒,等 (2434)
- 驯化温度与急性变温对南方鲢幼鱼皮肤呼吸代谢的影响 鲜雪梅,曹振东,付世建 (2444)

种群、群落和生态系统

- 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局 何艳华,闫 明,张钦弟,等 (2452)
- 玉龙雪山白水 1 号冰川退缩迹地的植被演替 常 丽,何元庆,杨太保,等 (2463)
- 五花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响 王 刚,杨文斌,王国祥,等 (2474)
- 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响 何友均,梁星云,覃 林,等 (2484)
- 入侵植物黄顶菊生长、再生能力对模拟天敌危害的响应 王楠楠,皇甫超河,李玉浸,等 (2496)
- 小兴安岭白桦次生林叶面积指数的估测 刘志理,金光泽 (2505)
- 草地植物群落最优分类数的确定——以黄河三角洲为例 袁 秀,马克明,王 德 (2514)
- 多毛类底栖动物在莱州湾生态环境评价中的应用 张 莹,李少文,吕振波,等 (2522)
- 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性 杨大星,杨茂发,徐 进,等 (2531)

景观、区域和全球生态

- 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系 张 杰,张 强,唐从国 (2545)

基于多源遥感数据的景观格局及预测研究..... 赵永华,贾 夏,刘建朝,等 (2556)

城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应.....

..... 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等 (2565)

资源与产业生态

碳汇目标下农户森林经营最优决策及碳汇供给能力——基于浙江和江西两省调查.....

..... 朱 臻,沈月琴,吴伟光,等 (2577)

基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究..... 刘国顺,常 栋,叶协锋,等 (2586)

春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用..... 麻雪艳,周广胜 (2596)

城乡与社会生态

广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力 刘 璐,管东生,陈永勤 (2604)

研究简报

桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应..... 刘自刚,沈 冰,张 雁 (2615)

基质养分对寄生植物南方菟丝子生长的影响 张 静,李钧敏,闫 明 (2623)

学术信息与动态

人类活动对森林林冠的影响——第六届国际林冠学大会述评..... 宋 亮,刘文耀 (2632)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-04



封面图说: 互花米草近景——互花米草是多年生高大禾本科植物,植株健壮而挺拔,平均株高约 1.5m,最高可达 3.5m,茎秆直径可达 1cm 以上。原产于大西洋沿岸,是一种适应海滩潮间带生长的耐盐、耐淹植物。我国于 1979 年开始引入,原意主要是用于保滩护堤、促淤造陆和改良土壤等。但是,近年来,互花米草迅速扩散,在一些区域里,已经完全郁闭,形成了单优种群,严重排挤了本土物种的生长,并且还在以指数增长的速度逐年增加,对海岸湿地土著物种和迁徙鸟类造成的危害日益严重,已经列为必须严格控制的有害外来入侵物种。

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/stxb201201100056

王刚, 杨文斌, 王国祥, 刘金娥, 杭子清. 互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响. 生态学报, 2013, 33(8): 2474-2483.

Wang G, Yang W B, Wang G X, Liu J E, Hang Z Q. The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2474-2483.

互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、 来源和分布的影响

王 刚^{1,2,3}, 杨文斌¹, 王国祥², 刘金娥^{2,*}, 杭子清²

(1. 安徽师范大学环境科学学院, 芜湖 241003; 2. 南京师范大学地理科学学院 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046;

3. 盐城师范学院城市与资源环境学院, 盐城 224002)

摘要: 在江苏盐城新洋港互花米草 (*Spartina alterniflora*) 盐沼选择光滩 (MF), 互花米草入侵 1a (SAF-1), 3a (SAF-3), 5a (SAF-5) 和 12a (SAF-12) 样地, 采集 0—20 cm 表层土壤样品, 分别测定土壤有机碳 (SOC)、顽固性有机碳 (RC) 和活性有机碳 (LC) 含量, 碳氮比 (C/N), 土壤有机碳和顽固性有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 分析互花米草海向入侵过程中土壤有机碳组分、分布及来源变化。结果表明: (1) SOC、RC、LC 含量分别介于 0.82—7.60 mg/g, 0.58—4.02 mg/g 和 0.23—3.58 mg/g, 由海向陆呈递增趋势; SAF-5 > SAF-12 > SAF-3 > MF > SAF-1。入侵 12 a 的 SAF-12 样地表土 SOC 储量最大, 年均碳汇积累速率为 1.8 t/hm²。(2) 互花米草来源 SOC、RC 和 LC 含量分别为 0.06—3.01 mg/g, 0.04—1.06 mg/g 和 0.03—2.00 mg/g, 各占 5.75%—47.40%、6.77%—31.77% 和 3.20%—64.40%。互花米草来源 SOC、RC、LC 由海向陆均呈递增趋势; SAF-12 > SAF-5 > SAF-3 > SAF-1 > MF。(3) 互花米草植物来源 SOC、RC、LC 含量、比例与入侵时间显著正相关 ($P < 0.01$)。互花米草入侵对 LC 的影响较大, 对 RC 的影响较小。(4) 随着入侵时间的增长, 互花米草来源有机碳的输入显著改变了土壤 SOC 组分。以上结果表明, 短期内互花米草海向入侵能够提高土壤碳汇能力。

关键词: 顽固性有机碳; 活性有机碳; 稳定碳同位素; 有机碳组分

The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution

WANG Gang^{1,2,3}, YANG Wenbin¹, WANG Guoxiang², LIU Jin'e^{2,*}, HANG Ziqing²

1 College of Environmental Science, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

3 College of Urban and Resource Environment, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China

Abstract: The exotic C_4 grass *Spartina alterniflora* was introduced in China in 1979 and transplanted to Xinyanggang coastal wetlands in North Jiangsu in 1989. Then it had expanded rapidly on the mudflats and become one of the dominant vegetation of local salt marsh. *S. alterniflora* invasion has affected comprehensively on biodiversity, sediment characteristic, landscape and especially on soil carbon cycling of the local ecosystem. The effects of *S. alterniflora* invasion on soil carbon cycling in China had been widely demonstrated; however, little is related to how the *S. alterniflora* seaward invasion influences the fractions and sources of soil organic carbon (SOC). The purpose of this study was to: (1) compare SOC, recalcitrant carbon (RC) and soil labile carbon (LC) pools at 0—20 cm depth between *S. alterniflora* salt marshes of different seaward

基金项目: 国家自然科学基金 (40973053, 41273082)

收稿日期: 2012-01-10; 修订日期: 2012-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujine@njnu.edu.cn

invasion period, and (2) evaluate the effect of *S. alterniflora* seaward invasion on SOC, RC and LC sources through stable carbon isotopic analysis of $\delta^{13}\text{C}$. In June of 2011, five sampling sites of mudflat (MF), *S. alterniflora* salt marshes of 1-year (SAF-1), 3-year (SAF-3), 5-year (SAF-5) and 12-year (SAF-12) along Xinyanggang coastal wetland were arranged and three 1 m×1 m sampling plots were randomly selected at each site. The different invasion time of *S. alterniflora* was identified based on historical marks. Three topsoil (0—20 cm) cores were taken at each sampling plot and the soils are mixed for the determination. The fresh plant and litters of *S. alterniflora* were collected in each plot. The soil samples were analyzed for SOC, RC, LC, and total nitrogen (TN) concentrations, C/N ratio, and $\delta^{13}\text{C}$ of SOC and RC. RC and LC were determined following the acid hydrolysis procedure. The leaves, roots and litters of plant were analyzed for $\delta^{13}\text{C}$. Meanwhile, soil water content, soil salinity, grain size and plant biomass were determined. The results showed that: (1) The SOC, RC and LC were between 0.82—7.60 mg/g, 0.58—4.02 mg/g and 0.23—3.58 mg/g, respectively, and increased as the same order of SAF-5 > SAF-12 > SAF-3 > MF > SAF-1. The highest value of SOC occurred in SAF-12, where the SOC accumulated by 1.8 tC / hm² per year. (2) The SOC, RC and LC derived from *S. alterniflora* were between 0.06—3.01 mg/g, 0.04—1.06 mg/g, and 0.03—2.00 mg/g, accounting as 5.75—47.40%, 6.77—31.77% and 3.20—64.40% of total SOC, RC and LC in soil, respectively, and increased with the same order as SAF-12 > SAF-5 > SAF-3 > SAF-1 > MF. (3) The contribution of *S. alterniflora* to SOC, RC and LC significantly increased with invasion time ($P < 0.01$). *S. alterniflora* invasion increased soil LC more than RC. The fractions of organic carbon in soils performed a significant positive correlation to *S. alterniflora* biomass and sediments grain size. (4) The fractions of SOC were changed significantly by *S. alterniflora* derived SOC inputs ($P < 0.01$). The results indicated that exotic *S. alterniflora* was of great importance to carbon sequestration in the Yancheng coastal wetland because of the high input of the organic carbon from *S. alterniflora* and alteration of sedimentary environment by *S. alterniflora*.

Key Words: recalcitrant carbon; labile carbon; $\delta^{13}\text{C}$ value; soil organic carbon fractions

湿地土壤有机碳 (SOC) 是全球陆地碳库的重要组成部分, 对全球碳循环有重要影响。SOC 中各种成分形态复杂, 从生化顽固性方面可以分为顽固性有机碳 (RC) 和活性有机碳 (LC) 两部分^[1]。一般而言, RC 占 SOC 比重大, 能长期留存于土壤中, 对土壤碳库的长期固存以及土壤质量意义重大; LC 占 SOC 比重小, 但具有较高的生物活性, 土壤碳库的最初变化主要发生在这一部分^[2-4]。对土壤 LC 和 RC 的研究是湿地土壤碳库动态及调控机理研究的重要方面。盐城海滨湿地是我国面积最大、生态类型最齐全、冲淤演变最复杂的典型淤泥质海滨湿地^[5-6]。出于促淤护滩的目的, 1989 年盐城海滨湿地引种了互花米草, 该物种最初仅在光滩小面积种植, 之后随着滩面的淤长迅速扩张形成大面积的互花米草盐沼, 并对盐沼生态系统产生了重要影响^[7-10]。其中关于互花米草入侵后土壤总有机质碳含量变化以及季节动态等方面的影响国内外已有大量文献报道^[11-17]; 对于互花米草对盐沼湿地微生物量 C、N 的影响也开展了一些相关研究^[10, 12, 18]。但是关于互花米草在海向入侵过程中对土壤有机碳库各组分的贡献比率以及变化趋势, 尚缺乏深入研究。本试验选择海向入侵不同年限的互花米草盐沼作为研究对象, 探讨盐城海滨湿地互花米草海向入侵过程中, 表土 SOC、RC、LC 和碳库的空间分布特征及影响因素, 利用¹³C 示踪法探讨互花米草对 SOC、RC、LC 的贡献, 为深入理解互花米草入侵对盐沼土壤碳库生物地球化学循环过程的影响提供支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

选择盐城新洋港地区海向入侵的互花米草盐沼 (33°35'—33°38'N, 120°30'—120°40'E) 作为研究区域。互花米草海向入侵区域原为光滩, 无植被生长, 互花米草入侵后形成了大面积单一的互花米草盐沼。本区位于亚热带向暖温带过渡地带, 属典型的季风气候区, 年平均气温介于 13.7—14.8 °C 之间, 年降水量为 900—1100 mm, 日光辐射总量 487—508 kJ/cm²。区内人为干扰极小, 海岸带植被演替序列由海向陆依次为: 光滩-

互花米草(*Spartina alterniflora*)滩-盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)滩-芦苇(*Phragmites australis*)滩。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与采样方法

采样于2011年6月进行,根据互花米草群落海向入侵时间建立5个样地:光滩、2011年米草入侵处、2009年米草入侵处、2007年米草入侵处、2000年米草入侵处,入侵时间分别为0、1、3、5、12 a,分别用MF(mudflat)、SAF-1(*S. alterniflora* flat of 1-year)、SAF-3(*S. alterniflora* flat of 3-year)、SAF-5(*S. alterniflora* flat of 5-year)、SAF-12(*S. alterniflora* flat of 12-year)表示(图1,表1)。入侵时间根据不同时期遥感图像叠加和往年研究设立的人工标志物确定。每个样地随机设3个1 m×1 m的样方,用多点混合法采集0—20 cm深度的土壤样品作为代表性样品,用环刀法采集土样带回实验室测容重,同时采集样方内互花米草全株及枯落物。

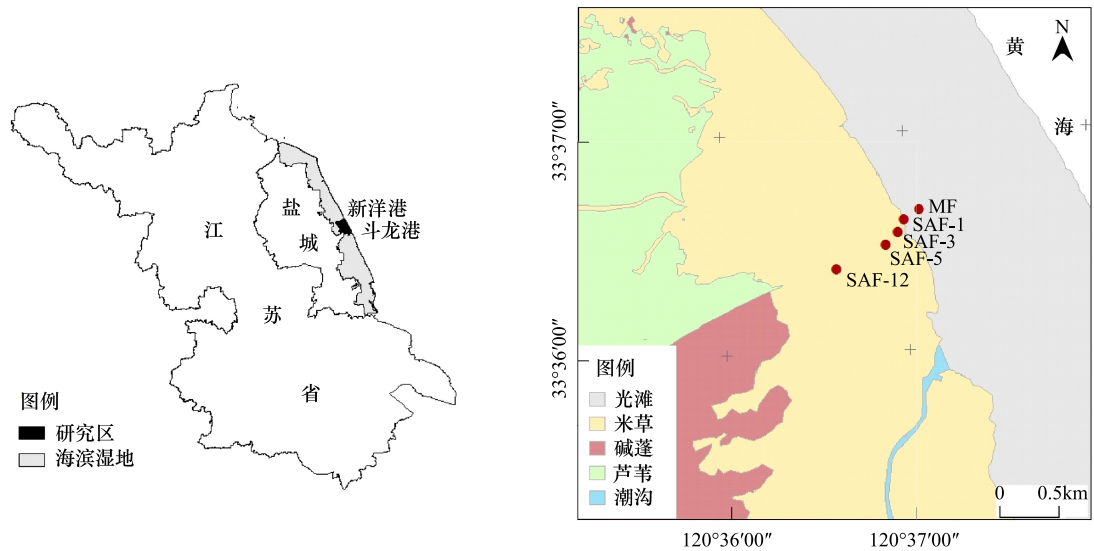


图1 研究区和采样点分布图

Fig. 1 Location of study area and sampling plots

光滩 MF Mudflat; 入侵1 a 互花米草盐沼 SAF-1 *S. alterniflora* flat of 1-year; 入侵3 a 互花米草盐沼 SAF-3 *S. alterniflora* flat of 3 year; 入侵5 a 互花米草盐沼 SAF-5 *S. alterniflora* flat of 5-year; 入侵12 a 互花米草盐沼 SAF-12 *S. alterniflora* flat of 12-year

表1 样地描述

Table 1 Descriptions of the plots

样地 Plots	距海堤距离/km Distance from the seawall	含水量 Soil water content/%	盐度 Salinity	粒度 Grain size/ ϕ	生物量/(g/m ²) Biomass
光滩 MF	9.55	45.27	1.34	3.49	0
2011 年米草入侵处 SAF-1	9.30	41.94	1.38	3.64	64.25
2009 年米草入侵处 SAF-3	9.16	48.75	0.75	4.07	762.11
2007 年米草入侵处 SAF-5	9.04	50.97	2.33	5.68	2470.64
2000 年米草入侵处 SAF-12	8.35	35.07	1.02	5.53	1028.66

光滩 MF Mudflat; 入侵1 a 互花米草盐沼 SAF-1 *S. alterniflora* flat of 1-year; 入侵3 a 互花米草盐沼 SAF-3 *S. alterniflora* flat of 3 year; 入侵5 a 互花米草盐沼 SAF-5 *S. alterniflora* flat of 5-year; 入侵12 a 互花米草盐沼 SAF-12 *S. alterniflora* flat of 12-year

1.2.2 样品处理与指标测定

植物样品 50 ℃烘干至恒重,称重法测互花米草全株生物量,植物叶、根、枯落物分别用球磨机(Restch-RM200)研磨过100目筛。

利用便携式土壤水分测量仪(TRIME-PICO64)现场测土壤水分。环刀法测容重。混合土样50 ℃烘干至恒重,研磨过100目筛。激光粒度仪(Malvern 2000)测土壤原样粒度。电导率法测盐度。凯氏定氮法测总氮

(Total nitrogen, TN)含量。

酸解法^[4]分离顽固性库(RP)和活性库(LP):以 HCl 溶液(1 mol/L)浸泡处理 24 h 得到土壤有机质(SOM),称取 500 mg SOM 放入试管,加入 20 mL H₂SO₄ 溶液(5 mol/L),密封后在 105 ℃ 条件下酸解 30 min,离心、倾析提取酸解产物后,残渣用 20 mL 蒸馏水清洗,清洗液加入酸解产物中得到 LP I。剩余残渣 60 ℃ 烘干后再用 2 mL H₂SO₄ 溶液(26 mol/L)室温下振荡酸解 12 h。然后加入蒸馏水稀释 H₂SO₄ 溶液至 2 mol/L,105 ℃ 条件下再酸解 3 h。离心、倾析提取酸解产物后的残渣再用 20 mL 蒸馏水清洗,清洗液离心、倾析加入酸解产物中,得到 LP II。LP I 加入 LP II 中,得到 LP。剩余残渣用蒸馏水漂洗两次,转移到预先称重的坩埚中,60 ℃ 烘干,得到 RP 样品。

同位素质谱仪(Sercon intergra CN)测植物样品 $\delta^{13}\text{C}$, SOM 样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 SOC, RP 样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 RC。

1.2.3 数据统计分析

试验数据采用统计软件 SPSS16.0 进行差异显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 互花米草盐沼表土各形态碳、有机碳储量和碳氮比分布特征

SOC、RC、LC 含量分别介于 0.82—7.60 mg/g、0.58—4.02 mg/g、0.23—3.58 mg/g,含量高低顺序为:SAF-5>SAF-12>SAF-3>MF>SAF-1,基本呈现由陆向海递减分布的特征(表 2)。SAF-5 样地 SOC、RC、LC 值最大,显著高于其他样地($P<0.05$)。SAF-1 样地 SOC、RC、LC 含量最低,与 MF 差异不显著($P>0.05$),显著低于其他样地($P<0.05$)。

SOC 储量介于 3.820—21.715 t/hm²,大小顺序为:SAF-12>SAF-5>SAF-3>MF>SAF-1,同样呈由陆向海递减分布的特征(表 2)。SAF-12 样地 SOC 储量最高,为 21.715 t/hm²,SAF-1 样地 SOC 储量最低,为 3.820 t/hm²。SAF-12 样地与 SAF-5 样地,SAF-1 样地与 MF 样地差异不显著($P>0.05$),其他样地两两之间差异显著($P<0.05$)。

C/N 介于 5.80—8.80,大小顺序为:SAF-5>SAF-12>SAF-3>MF>SAF-1,由陆向海呈下降趋势(表 2)。SAF-5 样地 C/N 最高,为 8.80;MF 样地 C/N 最低,为 5.80,SAF-5 和 SAF-12, MF 和 SAF-1 之间差异不显著($P>0.05$),其他样地两两之间差异显著($P<0.05$)。

表 2 土壤有机碳、顽固性碳、活性碳含量、有机碳储量、总氮和碳氮比

Table 2 SOC, RC and LC concentration, SOC storage, TN and C/N ratio in soil

样地 Plot	有机碳含量 SOC concentration /(mg/g)	顽固性碳含量 RC concentration /(mg/g)	活性碳含量 LC concentration /(mg/g)	有机碳储量 SOC storage /(t/hm ²)	总氮 TN concentration/ (mg/kg)	碳氮比 C/N ratio
光滩 MF	1.05±0.15d	0.67±0.05d	0.38±0.08d	4.227±0.331c	177.63±12.55d	5.89±0.48c
2011 年米草入侵处 SAF-1	0.82±0.13d	0.58±0.09d	0.23±0.07d	3.820±0.347c	141.04±10.03e	5.80±0.53c
2009 年米草入侵处 SAF-3	1.55±0.24c	1.02±0.05c	0.53±0.02c	5.053±0.682b	218.20±6.92c	7.11±0.52b
2007 年米草入侵处 SAF-5	7.60±0.22a	4.02±0.14a	3.58±0.15a	20.364±2.195a	863.54±10.03a	8.80±0.62a
2000 年米草入侵处 SAF-12	6.35±0.30b	3.36±0.16b	3.00±0.11b	21.715±1.970a	727.45±21.72b	8.73±0.42a

同一列中不同字母代表差异显著($P<0.05$)

2.2 互花米草来源各形态碳分析

C₃ 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -36‰—-23‰, C₄ 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -18‰—-10‰^[17],互花米草是典型的 C₄ 植物,本研究测得互花米草 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -12.15‰—-11.52‰。从互花米草不同部分中 $\delta^{13}\text{C}$ 差异来看:叶中 $\delta^{13}\text{C}$ 显著小于根和枯落物($P<0.05$),根与枯落物之间 $\delta^{13}\text{C}$ 差异不显著。以叶、根、茎 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -11.82‰ 作为互花米草植株 $\delta^{13}\text{C}$ 代表值。

互花米草海向入侵后,由于互花米草植物本身重碳的影响,各样地表土中 SOC、RC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随互花米草入侵时间的增长均呈显著增加趋势(表 4)。以光滩作为对照,假设碱蓬植物对互花米草海向扩张区域影响较

小可以忽略,根据双端元混合模型^[19-20](式1)可计算互花米草植物向表土中贡献的 SOC、RC 比例 f (式2),双端元取值分别为米草植物(表3)和光滩对照沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表4)。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{new}} = f \times \delta^{13}\text{C}_{\text{mix}} + (1 - f) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{old}} \quad (1)$$

$$f = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{new}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{old}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{mix}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{old}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, f 表示互花米草贡献土壤有机碳 SOC、顽固性有机碳 RC 比例, $\delta^{13}\text{C}_{\text{new}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{old}}$ 分别为互花米草盐沼和光滩对照表土 SOC、RC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表4), $\delta^{13}\text{C}_{\text{mix}}$ 取互花米草植株叶、根、枯落物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -11.82‰ (表3)。

根据质量平衡模型(式3),可计算出 LC 中互花米草贡献的比例:

$$f_{\text{LC}} = \frac{\theta_{\text{SOC}} \times f_{\text{SOC}} - \theta_{\text{RC}} \times f_{\text{RC}}}{\theta_{\text{SOC}} - \theta_{\text{RC}}} \quad (3)$$

式中, f_{LC} 、 f_{RC} 、 f_{SOC} 分别表示 LC、RC、SOC 中互花米草贡献的比例, θ_{RC} 、 θ_{SOC} 分别表示活性有机碳 RC、SOC 含量。

由海向陆互花米草贡献的 SOC、RC、LC 均呈上升趋势(图2);入侵 1 a 的 SAF-1 样地互花米草贡献的 SOC、RC、LC 分别为 0.06、0.04、0.03 mg/g, 各占 5.75%、6.77%、3.20%, 随着群落入侵时间的增长, 互花米草的贡献不断提高, 入侵 12 a 的 SAF-12 样地 SOC、RC、LC 中互花米草贡献分别高达 3.01、1.06、2.00 mg/g, 各占 47.40%、31.77%、64.40%。

表3 互花米草 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Table 3 $\delta^{13}\text{C}$ values of *S. alterniflora*

植物样品 Plant material	叶 Leaf	根 Root	枯落物 Litter
$\delta^{13}\text{C} / \text{‰}$	$-12.15 \pm 0.14\text{b}$	$-11.70 \pm 0.25\text{a}$	$-11.60 \pm 0.07\text{a}$

同一行中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

表4 土壤有机碳 SOC、顽固性碳 RC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 RI_{C}

Table 4 $\delta^{13}\text{C}$ value of SOC and RC, RI_{C} in soil

样地 Plot	土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}$ value of SOC/‰	顽固性碳 $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}$ value of RC/‰	总有机碳 RI_{C} RI_{C} of SOC/%	互花米草来源有机碳 RI_{C} RI_{C} of <i>S. alterniflora</i> derived SOC/%
光滩 MF	$-23.93 \pm 0.21\text{a}$	$-25.58 \pm 0.35\text{a}$	$64 \pm 3\text{a}$	—
2011 年米草入侵处 SAF-1	$-23.24 \pm 0.19\text{b}$	$-24.66 \pm 0.20\text{b}$	$71 \pm 4\text{a}$	$84 \pm 1\text{a}$
2009 年米草入侵处 SAF-3	$-22.47 \pm 0.23\text{c}$	$-23.99 \pm 0.15\text{c}$	$65 \pm 3\text{a}$	$63 \pm 3\text{b}$
2007 年米草入侵处 SAF-5	$-21.53 \pm 0.38\text{d}$	$-23.43 \pm 0.20\text{d}$	$53 \pm 1\text{b}$	$42 \pm 2\text{c}$
2000 年米草入侵处 SAF-12	$-18.25 \pm 0.22\text{e}$	$-21.25 \pm 0.28\text{e}$	$53 \pm 3\text{b}$	$36 \pm 2\text{d}$

RI_{C} : 顽固性碳指数 Recalcitrant index

2.3 各形态有机碳的影响因素分析

互花米草生物量和沉积物粒径是影响土壤各形态有机碳含量的主要因子(表5), 但互花米草来源 SOC、RC、LC 与米草生物量均无显著相关关系 ($P > 0.05$)。土壤含水量、盐度与各形态有机碳含量之间无显著相关关系 ($P > 0.05$)。在互花米草海向入侵的过程中, 随着入侵时间的增长, 互花米草贡献有机碳含量及其占土壤有机碳的比例均呈上升趋势, 两者与入侵时间显著正相关(图3, $P < 0.05$)。SOC、RC、LC 中互花米草的每年贡献为 0.27、0.09、0.17 mg/g, 贡献比例每年上升 3.85%、2.45%、5.46%。

2.4 土壤顽固性碳指数

根据公式4 计算顽固性碳指数 (RI_{C})^[4]:

$$RI_{\text{C}} = \frac{\theta_{\text{RC}}}{\theta_{\text{SOC}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, θ_{RC} 、 θ_{SOC} 分别表示 RC、SOC 含量。用 RI_{CW} 表示 SOC 的 RI_C 值, RI_{CS} 表示互花米草来源 SOC 的 RI_C 值。MF、SAF-1、SAF-3 样地之间,SAF-5、SAF-12 样地之间 RI_{CW} 无显著差异,且 MF、SAF-1、SAF-3 样地 RI_{CW} 显著高于 SAF-5、SAF-12 (表 4, $P<0.01$)。各样地 RI_{CS} 值差异极显著 ($P<0.01$),随着互花米草入侵时间增加, RI_{CS} 值不断降低。 RI_{CW} 和 RI_{CS} 之间存在极显著正相关关系 ($P<0.01$)。

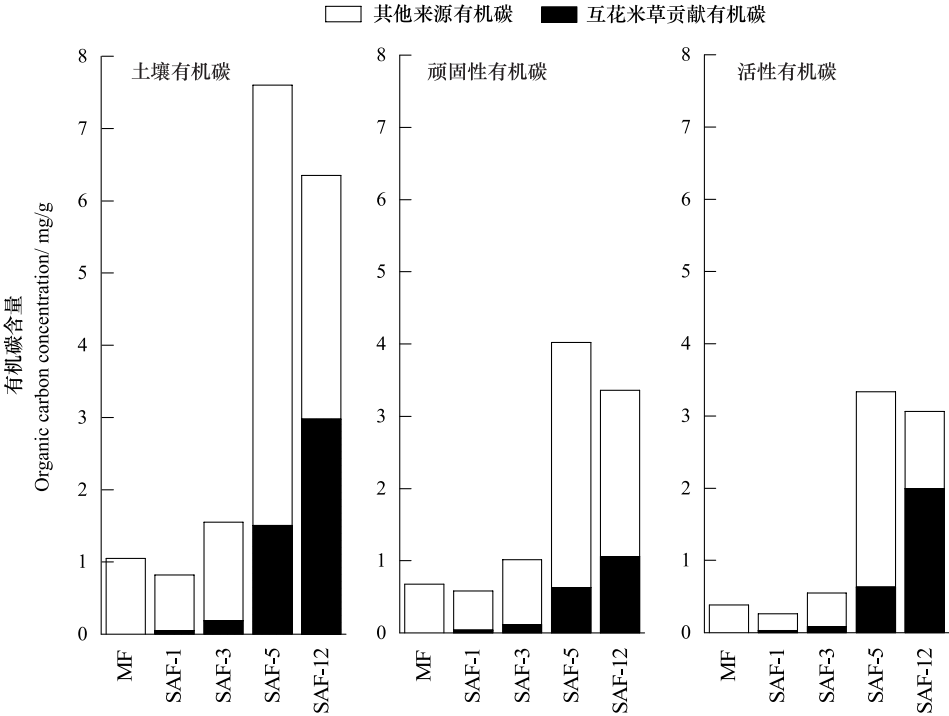


图 2 互花米草来源和其他来源土壤有机碳 SOC、顽固性有机碳 RC、活性有机碳 LC 含量
Fig. 2 Concentration of SOC, RC and LC derived from *S. alterniflora* and other sources

表 5 土壤碳含量与影响因子的相关系数

Table 5 Correlation between C concentration and parameter in soil				
影响因子 Parameter	植物生物量 Biomass	粒径 Grain size	土壤含水量 Soil water content	土壤盐度 Soil salinity
土壤有机碳 SOC	0.889 *	0.986 **	-0.045	0.542
米草来源有机碳 SOC derived from <i>S. alterniflora</i>	0.548	0.884 *	-0.532	0.102
其他来源有机碳 SOC derived from other sources	0.967 **	0.914 *	0.242	0.724
顽固性有机碳 RC	0.896 *	0.988 **	-0.034	0.538
米草来源顽固有机碳 RC derived from <i>S. alterniflora</i>	0.616	0.920 *	-0.464	0.155
其他来源顽固有机碳 RC derived from other sources	0.948 *	0.957 *	0.128	0.649
活性有机碳 LC	0.852	0.987 **	-0.12	0.495
米草来源活性有机碳 LC derived from <i>S. alterniflora</i>	0.384	0.782	-0.669	-0.063
其他来源活性有机碳 LC derived from other sources	0.968 **	0.84	0.376	0.801

* 相关性显著 ($P<0.05$); ** 相关性极显著 ($P<0.01$)

3 讨论

3.1 SOC、RC、LC 及 SOC 储量分布特征

入侵植物可以改变生态系统的碳循环过程。本研究结果显示,表土 SOC、RC、LC 含量分别介于 0.82—7.60 mg/g、0.58—4.02 mg/g 和 0.23—3.58 mg/g。相比光滩,互花米草入侵 1a 后,SOC、RC 和 LC 未发生显著变化 ($P>0.05$),入侵 3 a、5 a 和 12 a 的互花米草样地中,SOC 增长 47.6%、623.8% 和 504.8%,RC 增长 52.2%、500.0% 和 401.5%,LC 增长 39.5%、842.1% 和 689.5%,这表明入侵种互花米草可以有效提高表土

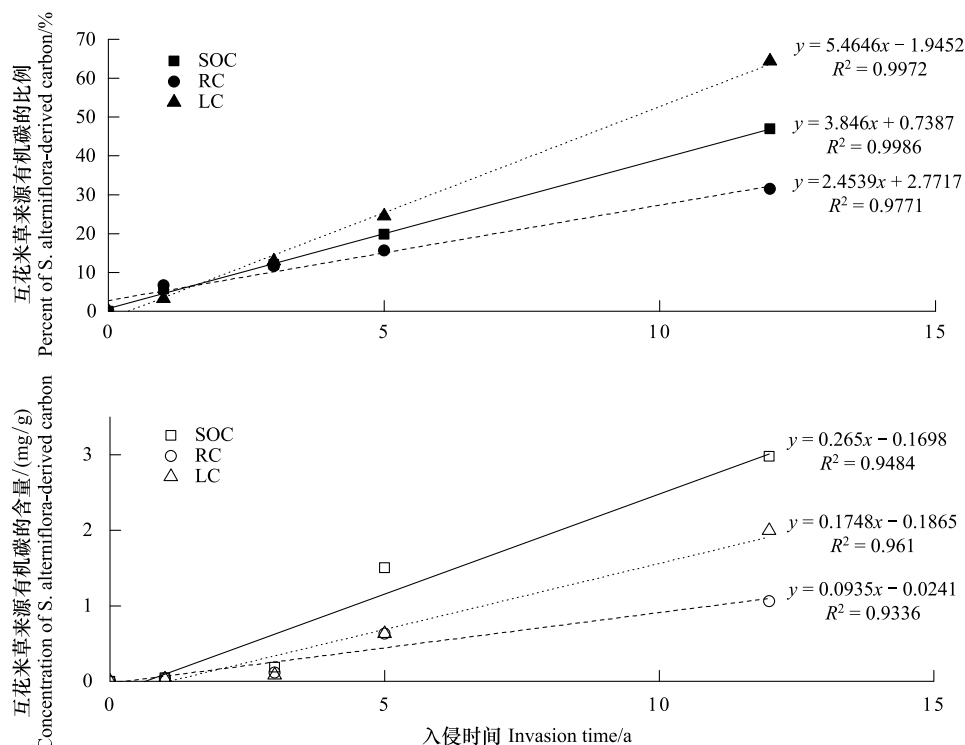


图3 互花米草来源碳的比例、含量与入侵时间的关系

Fig. 3 Relation between percent and concentration of *S. alterniflora*-derived organic carbon and invasion time

SOC: 土壤有机碳; RC: 顽固性有机碳; LC: 活性有机碳

各形态有机碳的含量,与前人研究相似^[11,15,17,21]。SAF-5样地SOC、RC和LC含量最高,表明在适宜条件下,互花米草海向入侵5—12 a,表土SOC、RC和LC含量即可达饱和。另外,各样地SOC、RC和LC含量时间变化趋势相同,说明SOC的增长同时受到RC和LC增长的影响。

入侵12 a的SAF-12样地表土SOC储量为21.7 t/hm²,年均碳汇速率为1.8 t/hm²,是中国农田碳汇速率的12倍^[22],这表明在中国沿海湿地,海向入侵的互花米草盐沼具有重要的固碳作用。从表土SOC储量的分布特征来看,入侵12 a的SAF-12样地SOC储量最高,但与SAF-5样地无显著差异。这表明在互花米草海向入侵5 a后,表土SOC碳储量即达最高值。这与人研究结果存在差异,江苏王港地区的研究^[23]显示互花米草入侵14 a后,表土碳汇能力尚未饱和。这可能是由于不同研究区内影响有机碳输入分解的沉积条件(如潮侵频率、潮水有机质含量)、环境因子(如土壤水分、氧化还原电位、热量状况、生物扰动等多种耦合因素),以及种群发育特征有关,但其具体机理还需更多研究加以探讨,这也是后续工作需要进一步深入的方向。

3.2 互花米草来源SOC、RC、LC的分布特征

地表植被是制约土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的重要因素,土壤各形态有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值受到上覆植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的强烈影响。随着互花米草入侵时间的增长,SOC、RC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋于偏重(表4),表明互花米草的生长对土壤有机碳的贡献趋于增加。互花米草海向入侵区域原为光滩,无碱蓬等土著植被生长。有研究表明苏北近海海底沉积物主要来自于废黄河等河流泥沙输入,海底沉积物和悬沙的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为-25‰—-23‰,沉积有机质陆源贡献约占50%^[24-25]。本研究区光滩沉积物主要由海底沉积物再悬浮产生的悬沙淤积而成,这可能是光滩沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值-23.93‰与碱蓬等陆地C₃植物较为接近的原因。野外调查结果显示碱蓬群落位于研究样地1—2 km以外,生物量为183.88 g/m²,虽高于SAF-1样地新生互花米草生物量,但仅为SAF-3、SAF-5、SAF-12样地互花米草生物量的7%、18%、24%。再考虑到互花米草发达的根系所产生的残体和根系碳沉淀可能也是土壤有机质的重要来源,而碱蓬凋落物大部分都被分解或被潮水带至外海,只有少量残留在沉积物中^[16]。因此,本研究假设碱蓬等土著植物对互花米草海向扩张区域沉积物有机碳的影响较小可以忽略。

以光滩为对照,忽略碱蓬等土著植物影响,采用双端元模型计算互花米草对表土有机碳的贡献,结果显示:随着互花米草海向入侵时间的增长,互花米草对土壤 SOC、RC、LC 贡献量和比例均呈上升趋势(图 3)。上海九段沙湿地的研究表明,海向扩张的互花米草入侵海三棱藨草(*Scirpus triquetus*)群落 8 a 后,对表土 SOC、RC、LC 的贡献介于 5%—10%^[15]。江苏省王港潮滩湿地的研究表明,向陆扩张的互花米草入侵碱蓬群落 14 a 后,对表土 SOC 的贡献率为 18.7%^[23]。本研究结果显示入侵 12 a 的 SAF-12 样地 SOC、RC、LC 中互花米草的贡献比例分别高达 47.40%、31.77%、64.40%,高于前人的研究结果,其主要原因可能是本研究中互花米草海向入侵区域原为无植物生长的光滩,而其他研究区域内三棱藨草和碱蓬等土著植物对表土有机碳亦有一定贡献。SAF-5 样地 SOC、RC、LC 含量为各样地最高,但互花米草对 SOC、RC、LC 的贡献量和贡献率均显著低于 SAF-12 样地($P<0.05$),这说明表土中互花米草来源 SOC、RC、LC 的积累可能是输入输出长期作用的结果。

C/N 也可用来指示有机质的来源,通常陆源有机质 C/N >12 而海源有机质 C/N 介于 6—9^[26]。本研究中各样地 C/N 介于 5.80—8.80,均小于 12,说明海源输入对沉积物有机质的来源有重要影响。从空间分布特征来看,由陆向海方向 C/N 呈递减趋势,基本可以反映出潮滩沉积物中陆源和海源有机质分配的变化,即随着互花米草入侵时间的增长,互花米草来源有机质的比例越来越大,而海源有机质的比例越来越小,这与 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究结果基本相符,但也存在一定差异:SAF-5 样地 C/N 最大,但 $\delta^{13}\text{C}$ 分析表明该样地互花米草来源的有机碳只占 19.99%,这可能是由于 C/N 受微生物活动和植物吸收等多种作用的影响,而在潮滩湿地这些作用的空间差异性较大^[27-28]。

3.3 互花米草对 SOC、RC、LC 的影响分析

互花米草主要通过以下两方面作用对有机碳输入产生影响:首先,互花米草具有较高的初级生产力,在生长过程中吸收固定大气和周围环境中的碳,然后通过凋落物和根系分泌物进入土壤,从而直接影响有机碳含量^[14,29];其次,互花米草还能通过发达的根系减弱潮水动力,固结滩面沉积物,使海水中粒径小的颗粒物大量沉积,由于细颗粒物比表面积大,更易吸附有机质,因此增加了土壤中有机碳含量^[30]。本研究结果显示互花米草生物量和沉积物粒径是影响土壤有机碳含量的主要因素(表 5),这与前人研究结果一致。此外,结果显示互花米草来源 SOC、RC、LC 含量与互花米草生物量均无显著相关关系($P>0.05$),但互花米草来源 SOC、RC 含量与粒径 ϕ 值显著正相关($P<0.05$),这表明有机碳从互花米草植物进入土壤可能存在复杂的周转过程,而土壤质地对其有重要影响。

互花米草海向入侵过程中,互花米草植物来源 SOC、RC、LC 含量和比例均与入侵时间呈极显著正相关关系($P<0.01$),说明在 12 a 内,互花米草植物向表土中贡献的有机碳随时间增长而持续增加。

LC 比 RC 更易受土地利用、植被演替等活动的影响^[31]。研究结果表明,表土中互花米草来源 LC 的年积累量和年积累比例均高于 RC,这说明互花米草入侵对 LC 的影响较大,而对 RC 的影响较小。

3.4 互花米草对有机碳组分的影响

RC 组分包括木质素、软木脂以及脂肪酸等难以酸解的化合物,LC 组分包括单糖、多聚糖等易被酸解的化合物,土壤中各形态有机碳存在复杂的输入、输出以及相互转化关系。本项研究结果表明:不同入侵时间互花米草群落土壤 RI_{CW} 约为 53%—71%,这与其他海滨湿地的研究结果接近^[20],高于陆地生态系统的研究结果^[32-33],原因可能是湿地土壤中的低氧环境限制了纤维素酶的活动^[34],因此导致 LC 积累,表现出 RI_{C} 的低值。随着互花米草入侵时间的增长,土壤 RI_{CW} 、 RI_{CS} 呈下降趋势,且 RI_{CW} 、 RI_{CS} 呈极显著正相关($P<0.01$)。这说明互花米草群落发育可以提高 SOC 中 LC 的相对比重,随着入侵时间的增长,互花米草来源 SOC 的输入显著改变了土壤 SOC 组分。

4 结论与展望

综上所述,得出以下结论:(1)表土 SOC、RC、LC 含量由海向陆基本呈递增变化趋势:SAF-5>SAF-12>SAF-3>MF>SAF-1。入侵 12 a 的 SAF-12 样地表土 SOC 储量最大,是中国农田碳汇速率的 12 倍。(2)表土互

花米草来源 SOC、RC、LC 由海向陆均呈递增趋势;SAF-12>SAF-5>SAF-3>SAF-1>MF。(3)互花米草生物量和沉积物粒径是影响土壤各形态有机碳含量的主要因素。互花米草植物来源 SOC、RC、LC 含量、比例与入侵时间显著正相关($P<0.01$)。互花米草入侵对 LC 的影响较大,对 RC 的影响较小。(4)随着入侵时间的增长,互花米草来源 SOC 的输入显著改变了土壤 SOC 组分。

互花米草入侵对海滨湿地土壤有机碳库周转的影响机理复杂,后续研究需要关注互花米草入侵本地种群对有机碳库周转的影响,加强凋落物降解的研究以及植物根系对机碳库作用机理的研究,同时应用更多手段如正构烷烃单体碳同位素、核磁共振进行分析。

致谢:南京师范大学孟天竹同学参加了野外采样,徐伟伟、刘波、杨飞、赵凯、吴晓东等同学帮助修改,特此致谢。

References:

- [1] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 109-141.
- [2] Belay-Tedla A, Zhou X H, Su B, Wan S Q, Luo Y Q. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [3] Huang Z Q, Clinton P W, Davis M R. Post-harvest residue management effects on recalcitrant carbon pools and plant biomarkers within the soil heavy fraction in *Pinus radiata* plantations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 404-412.
- [4] Casals P, Garcia-Pausas J, Montané F, Romanyà J, Rovira P. Root decomposition in grazed and abandoned dry Mediterranean dehesa and mesic mountain grasslands estimated by standard labelled roots. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 759-765.
- [5] Wang Y, Zhang Z K, Zhu D K, Yang J H, Mao L J, Li S H. River-sea interaction and the north Jiangsu plain formation. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 301-320.
- [6] Wang Y P, Gao S, Jia J J, Thompson C E L, Gao J H, Yang Y. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 147-161.
- [7] Wan S W, Qin P, Liu J, Zhou H X. The positive and negative effects of exotic *Spartina alterniflora* in China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 444-452.
- [8] Zhang H B, Liu H Y, Hao J F, Li Y F. Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 101-110.
- [9] Xie W J, Gao S. The macrobenthos in *Spartina alterniflora* salt marshes of the Wanggang tidal-flat, Jiangsu coast, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(8): 1158-1166.
- [10] Zhou H X, Liu J E, Qin P. Impacts of an alien species (*Spartina alterniflora*) on the macrobenthos community of Jiangsu coastal inter-tidal ecosystem. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 521-528.
- [11] Mao Z G, Wang G X, Liu J E, Ren L J. Influence of salt marsh vegetation on spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 293-297.
- [12] Mao Z G, Gu X H, Liu J E, Ren L J, Wang G X. Evolution of soil quality in salt marshes and reclaimed farmlands in Yancheng coastal wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 1986-1992.
- [13] Ren L J, Wang G X, He D, Mao Z G, Liu J E. Spatial distributions of soil organic matter in different vegetation zones of the Yancheng tidal flat. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(1): 54-62.
- [14] Liu J E, Zhou H X, Qin P, Zhou J. Effects of *Spartina alterniflora* salt marshes on organic carbon acquisition in intertidal zones of Jiangsu Province, China. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 240-249.
- [15] Cheng X L, Chen J Q, Luo Y Q, Henderson R, An S Q, Zhang Q F, Chen J K, Li B. Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* invasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 177-184.
- [16] 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. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2005, 26(6): 51-56.
- [17] Gao J H, Bai F L, Yang G S, Ou W X. Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments from different ecologic zones of tidal flats in north Jiangsu province. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 756-765.
- [18] Zhang Y H, Wang Y L, Li R Y, Zhu H X, Zhang F C, Huang B B, Peng X D. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on active soil organic carbon in the coastal marshes. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 102-106.
- [19] Kong A Y Y, Fonte S J, van Kessel C, Six J. Transitioning from standard to minimum tillage: trade-offs between soil organic matter stabilization, nitrous oxide emissions, and N availability in irrigated cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 256-262.
- [20] Kong A Y Y, Scow K M, Córdova-Kreylos A L, Holmes W E, Six J. Microbial community composition and carbon cycling within soil

- microenvironments of conventional, low-input, and organic cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 20-30.
- [21] Wang B X, Zeng C S, Chen D, Wang W Q, Zhang L H. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon in the *Phragmites australis* estuary wetlands of Minjiang River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(5): 114-118.
- [22] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [23] Zhang Y H, Ding W X, Luo J F, Donnison A. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C_4 plant *spartina alterniflora*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1712-1720.
- [24] Cai D L, Shi X F, Zhou W J, Liu W G, Zhang S F, Cao Y N, Han Y B. Sources and transportation of suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea; Evidence from stable carbon isotopes. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 2003, 48 (S1): 21-29.
- [25] Xing F, Wang Y P, Gao J H, Zhou X Q. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 459-468.
- [26] Cifuentes L A, Coffins R B, Solorzano L, Cardenas W, Espinoza J, Twilley R R. Isotopic and elemental variations of carbon and nitrogen in a mangrove estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(6): 781-800.
- [27] Kirkby C A, Kirkegaard J A, Richardson A E, Wade L J, Blanchard C, Batten G. Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*, 2011, 163(3/4): 197-208.
- [28] Gao J H, Yang G S, Ou W X. Influence of tidal flat plant on contents of nitrogen and phosphorus in North Jiangsu Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(2): 224-230.
- [29] Li B, Liao C Z, Zhang X D, Chen H L, Wang Q, Chen Z Y, Gan X J, Wu J H, Zhao B, Ma Z J, Cheng X L, Jiang L F, Chen J K. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 511-520.
- [30] Chen Q Q, Zhou J Z, Meng Yi, Gu J H, Hu K L. Trends of soil organic matter turnover in the salt marsh of the Yangtze River estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 72-80.
- [31] Biasi C, Rusalimova O, Meyer H, Kaiser C, Wanek W, Barsukov P, Junger H, Richter A. Temperature-dependent shift from labile to recalcitrant carbon sources of arctic heterotrophs. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2005, 19(11): 1401-1408.
- [32] Hu S, Coleman D C, Carroll C R, Hendrix P F, Beare M H. Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1997, 65(1): 69-78.
- [33] Gu L H, Post W M, King A W. Fast labile carbon turnover obscures sensitivity of heterotrophic respiration from soil to temperature: a model analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(1): 1022-1032.
- [34] Freeman C, Ostle N, Kang H. An enzymic "latch" on a global carbon store. *Nature*, 2001, 409(6817): 149-149.

参考文献:

- [5] 王颖, 张振克, 朱大奎, 杨競红, 毛龙江, 李书恒. 河海交互作用与苏北平原成因. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 301-320.
- [8] 张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 李玉凤. 自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异. *生态学报*, 2012, 32(1): 101-110.
- [11] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 任丽娟. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 293-297.
- [12] 毛志刚, 谷孝鸿, 刘金娥, 任丽娟, 王国祥. 盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 1986-1992.
- [13] 任丽娟, 王国祥, 何聃, 毛志刚, 刘金娥. 盐城滩涂湿地不同植被带土壤有机质空间分布特征. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 54-62.
- [16] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北滩涂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.
- [17] 高建华, 白凤龙, 杨桂山, 欧维新. 苏北滩涂湿地不同生态带碳、氮、磷分布特征. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 756-765.
- [18] 张耀鸿, 王艳玲, 李仁英, 朱红霞, 张富存, 黄宾宾, 彭晓丹. 互花米草入侵对滩涂土壤活性有机碳组分的影响. *土壤通报*, 2012, 43(1): 102-106.
- [21] 王宝霞, 曾从盛, 陈丹, 王维奇, 张林海. 互花米草入侵对闽江河口芦苇湿地土壤有机碳的影响. *中国水土保持科学*, 2010, 8(5): 114-118.
- [25] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 邹欣庆. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 459-468.
- [28] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北滩涂湿地植被对沉积物 N、P 含量的影响. *地理科学*, 2006, 26(2): 224-230.
- [30] 陈庆强, 周菊珍, 孟翊, 顾靖华, 胡克林. 长江口盐沼土壤有机质更新特征的滩面趋势. *地理学报*, 2007, 62(1): 72-80.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 8 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Urban Ecosystems

- Guidelines and evaluation indicators of urban ecological landscape construction SUN Ranhao, CHEN Ailian, LI Fen, et al (2322)
- Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns TAO Yu, LI Feng, WANG Rusong, et al (2330)
- Effects of land use change on ecosystem service value: a case study in Huaibei City, China ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (2343)
- Urban ecosystem complexity: an analysis based on urban municipal supervision and management information system DONG Rencai, GOU Yaqing, LIU Xin (2350)
- A case study of the effects of *in-situ* bioremediation on the release of pollutants from contaminated sediments in a typical, polluted urban river LIU Min, WANG Rusong, JIANG Ying, et al (2358)
- The pollution characteristics of Beijing urban road sediments REN Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2365)
- Effects of urban green pattern on urban surface thermal environment CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (2372)
- Seasonal dynamics of airborne pollen in Beijing Urban Area MENG Ling, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2381)

Autecology & Fundamentals

- Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers XU Cui, ZHANG Linbo, DU Jiaqiang, et al (2388)
- Predicting the plant exposure to soil arsenic under varying soil factors XIAN Yu, WANG Meie, CHEN Weiping (2400)
- Attraction effect of different host-plant to Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* LI Chao, CHENG Dengfa, GUO Wenchao, et al (2410)
- Root decomposition and nutrient dynamics of *Quercus mongolica* and *Betula Platyphylla* JIN Beibei, GUO Qingxi (2416)
- The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis* WANG Lin, FENG Jinxia, WANG Shuangxia, et al (2425)
- Effects of diameter at breast height on crown characteristics of Chinese Fir under different canopy density conditions FU Liyong, SUN Hua, ZHANG Huiru, et al (2434)
- Effects of temperature acclimation and acute thermal change on cutaneous respiration in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) XIAN Xuemei, CAO Zhendong, FU Shijian (2444)

Population, Community and Ecosystem

- Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China HE Yanhua, YAN Ming, ZHANG Qindi, et al (2452)
- Vegetation succession on Baishui No. 1 glacier foreland, Mt. Yulong CHANG Li, HE Yuanqing, YANG Taibao, et al (2463)
- The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution WANG Gang, YANG Wenbin, WANG Guoxiang, et al (2474)
- Community characteristics and soil properties of coniferous plantation forest monocultures in the early stages after close-to-nature transformation management in southern subtropical China HE Youjun, LIANG Xingyun, QIN Lin, et al (2484)
- Response of invasive plant *Flaveria bidentis* to simulated herbivory based on the growth and reproduction WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, LI Yujin, et al (2496)
- Estimation of leaf area index of secondary *Betula platyphylla* forest in Xiaoxing'an Mountains LIU Zhili, JIN Guangze (2505)
- Optimal number of herb vegetation clusters: a case study on Yellow River Delta YUAN Xiu, MA Keming, WANG De (2514)
- Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay ZHANG Ying, LI Shaowen, LÜ Zhenbo, et al (2522)
- Soil meso-and micro arthropod community diversity in the burned areas of *Pinus massoniana* plantation at different restoration stages YANG Daxing, YANG Maofa, XU Jin, et al (2531)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance ZHANG Jie, ZHANG Qiang, TANG Congguo (2545)
- Analysis and forecast of landscape pattern in Xi'an from 2000 to 2011 ZHAO Yonghua, JIA Xia, LIU Jianchao, et al (2556)
- Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed HU Hebing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (2565)

Resource and Industrial Ecology

- Household optimal forest management decision and carbon supply: case from Zhejiang and Jiangxi Provinces ZHU Zhen, SHEN Yueqin, WU Weiguang, et al (2577)
- Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS LIU Guoshun, CHANG Dong, YE Xiefeng, et al (2586)
- Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application MA Xueyan, ZHOU Guangsheng (2596)

Urban, Rural and Social Ecology

- Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou Municipality LIU Lu, GUAN Dongsheng, CHEN Yongqin David (2604)

Research Notes

- Morphological responses to temperature, drought stress and their interaction during seed germination of *Platycodon grandiflorum* LIU Zigang, SHEN Bing, ZHANG Yan (2615)
- Effects of nutrients on the growth of the parasitic plant *Cuscuta australis* R. Br. ZHANG Jing, LI Junmin, YAN Ming (2623)

《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,探索自然奥秘,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 吕永龙

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 8 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 8 (April, 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