

# 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征

董洪芳<sup>1,2</sup>, 于君宝<sup>1\*</sup>, 孙志高<sup>1</sup>, 牟晓杰<sup>1,2</sup>, 陈小兵<sup>1</sup>, 毛培利<sup>1</sup>, 吴春发<sup>1</sup>, 管博<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室, 海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 了解黄河三角洲滨海湿地有机碳状况是开展我国典型砂质和淤泥型海滩湿地生物地球化学过程及湿地生态修复研究的基础。通过对黄河三角洲自然保护区新生滨海湿地植物-土壤系统有机碳的空间分布特征及其影响因子的研究表明, 不同类型湿地植物碳含量差异性不大, 而植物碳密度变化幅度较大, 且其空间变化趋势与植物生物量空间分布格局相似, 均呈 M 型。表层土壤有机碳含量范围在 0.75 ~ 8.35 g · kg<sup>-1</sup> 之间, 明显低于淡水沼泽湿地生态系统, 土壤有机碳密度分布趋势与土壤有机碳含量基本一致。相关分析表明, pH 值与土壤有机碳密度呈负相关, 土壤 TN、C/N、含盐量与土壤有机碳密度呈线性正相关性, 而土壤有机碳密度、土壤 TN、C/N、pH 值、含盐量与植物碳密度相关性不显著。

**关键词:** 滨海湿地; 有机碳; 空间分布; 黄河三角洲

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1594-06

## Spatial Distribution Characteristics of Organic Carbon in the Soil-Plant Systems in the Yellow River Estuary Tidal Flat Wetland

DONG Hong-fang<sup>1,2</sup>, YU Jun-bao<sup>1</sup>, SUN Zhi-gao<sup>1</sup>, MU Xiao-jie<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-bing<sup>1</sup>, MAO Pei-li<sup>1</sup>, WU Chun-fa<sup>1</sup>, GUAN Bo<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Well-understand the organic carbon status in the Yellow River delta is the most important for studying the biogeochemical processes of the muddy-sandy coastal wetland and ecological restoration. The spatial distribution characteristics and its impact factors of organic carbon in the plant-soil systems of new-born tidal flat wetland in the Yellow River estuary were studied. The results showed that the difference of plant organic carbon content in different plant communities were not obvious, however significant difference of the plant organic carbon density was observed. Moreover, the M-shaped spatial distribution of the plant organic carbon density, which was similar to the plant biomass, was found in the study. The organic carbon contents in top soils were varied from 0.75 to 8.35 g · kg<sup>-1</sup>, which was much lower than that in the typical freshwater marsh wetlands ecosystem. The spatial distribution trend of soil organic carbon density was similar to the soil organic carbon. The correlation analysis showed that soil organic carbon density was negatively correlated with pH, and positively correlated with TN, C/N and salinity. However, the correlations of plant organic carbon density with the soil organic carbon density, TN, C/N, pH and salinity were not significant.

**Key words:** coastal wetland; organic carbon; spatial distribution; Yellow River Delta

湿地是 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等温室气体的“源”、“汇”和全球尺度上的气候“稳定器”, 同时对全球气候变化具有较强的敏感性, 因此, 湿地碳素储量及变化对全球气候变化的影响及响应一直是国内外湿地研究的热点<sup>[1,2]</sup>。

国外关于湿地碳的研究开展较早且广泛, 主要包括碳的累积与分配<sup>[3-6]</sup>、碳的分布特征及其影响因素<sup>[7-9]</sup>等方面。我国有关湿地碳数量、分布、行为及其动态变化特征的研究主要集中在青藏高原东部的若尔盖高原<sup>[10-14]</sup>、东北的三江平原<sup>[14-17]</sup>和长江中下游湿地<sup>[18-20]</sup>, 而对于黄河三角洲这片最年轻的

湿地研究报道还很少。

湿地生态系统中生物地球化学过程十分复杂, 各种物理、化学和生物过程共同控制着有机质的赋存与转化。湿地植物作为湿地生态系统的重要组成部分

收稿日期: 2009-08-07; 修订日期: 2009-10-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-223); 山东省科技攻关计划项目 (2008GG20005006, 2008GG3NS07005); 中国科学院百人计划项目; 国家自然科学基金项目 (30770412); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目

作者简介: 董洪芳 (1984 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为滨海湿地生物地球化学, E-mail: xxls1984@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: jbyu@yic.ac.cn; junbao.yu@gmail.com

部分,其碳贮存能够消减大气日益增加的  $\text{CO}_2$ ,在稳定全球气候、减缓温室效应方面发挥重要作用<sup>[21]</sup>。湿地土壤有机碳是气候变化的一种敏感指示物,能用来指示对气候变化的响应<sup>[22]</sup>。湿地土壤中有机碳含量变化显著影响着湿地生态系统的生产力<sup>[23]</sup>。近年来,关于黄河三角洲的研究多数集中在湿地资源的开发利用<sup>[24]</sup>、湿地生态评价<sup>[25,26]</sup>、湿地环境影响<sup>[27,28]</sup>、湿地变化<sup>[29,30]</sup>和湿地修复<sup>[31,32]</sup>等方面,而关于黄河三角洲湿地中有机碳生物地球化学循环的研究极少报道。为此,本试验选择黄河滨岸潮滩湿地作为研究区域,通过野外调查和采样测定,研究黄河三角洲滨岸潮滩湿地不同植被带下植物-土壤有机碳的分布特征,分析影响其分布的各种因素,以期阐明黄河三角洲湿地生态系统的生物地球化学过程,探索脆弱生态系统的保护与恢复提供基础理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于黄河三角洲(东营)湿地自然保护区内。黄河三角洲国家级自然保护区( $37^{\circ}40' \sim 38^{\circ}10'N$ ,  $118^{\circ}41' \sim 119^{\circ}16'E$ )地处我国山东省东营市黄河入海口,总面积  $15.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是以保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主体的自然保护区。研究区属温带季风型大陆性气候,四季分明,冷热干湿界限极明显,春季干旱多风回暖快,夏季炎热多雨,秋季凉爽多晴天,冬寒少雪多干燥。年平均气温  $12.1^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 196 d,年平均降水量为 551.6 mm,70% 的降水集中于 7、8 月,年均蒸发量 1962 mm。土壤为隐域性潮土和盐土土类,主要植被有草本植物芦苇(*Phragmites australis*)、荻(*Triarrhena sacchariflora*)、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、补血草(*Limonium sinense*)、蒲草(*Typha angustifolia*)等;普遍存在的灌木仅柽柳(*Tamarix chinensis*) 1 种;天然乔木仅旱柳(*Salix matsudana*) 1 种,且仅在黄河河道两岸有少量分布。

### 1.2 研究方法

2008 年 8 月底,在研究区内按植被分布情况从黄河边至盐滩布置 10 个采样点(A~J),代表不同的植被类型及土壤。依次为 A 河边无植被区;B 三棱蔗草、朝天委陵菜区;C 假苇拂子茅区;D 白茅区;E 芦苇区;F 碱蓬-芦苇区;G 碱蓬-柽柳区;H 碱蓬-柽柳(过渡带)区;I 碱蓬区;J 光滩区。

在每个采样点采集植被及土壤样品。土壤剖面样品的采集自上而下分层进行,每层 10 cm。随机采集 0~20 cm 的表层土样各 3 份,将 3 份土壤混合,作为该采样点表层土壤的代表性样品;每个样点样品风干后研磨,过 0.25 mm 筛,用于项目测定。TOC、TN 用元素分析仪测定。土壤理化性质(容重、pH 值、含盐量)用常规方法测定。采用收获法测定植物地上生物量,挖掘法采集植物的地下生物量,样方大小为  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 。

### 1.3 数据处理

根据野外调查资料和实验室内的分析结果,采用 SPSS 16.0 和 ORIGIN 8.0 软件分析、处理数据及作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 植物碳空间分布

植物是生态系统有机碳库的重要分室,植物分解释放是土壤有机碳输入的主要途径之一,植物生物量则可以反映生态系统固碳能力的强弱。在自然状态下,群落的生物量取决于群落的结构特征和功能,反映群落在演替过程中土壤化学特性和营养状况的变化动态。黄河三角洲不同植被群落生物量研究结果[图 1(a)]表明:从黄河边至盐滩,植物总生物量大致呈 M 型分布,生物量主要集中在植物地上部分,各植被群落地上生物量明显大于地下生物量。对比各植物群落地上生物量,以 G 最高,且地上、地下部分差异最大(约相差 8.3 倍)。G、H、I 群落以碱蓬为优势种群,碱蓬总生物量平均值约占研究区湿地总生物量均值的 47.8%。

植物地上部分生物量与植物体的固碳关系密切,这是因为植物的有机碳含量主要来源于空气中的  $\text{CO}_2$ ,植物地上部分在生长过程中吸收  $\text{CO}_2$  形成光合产物并作为生物量固定贮存起来。黄河三角洲湿地从黄河边至盐滩的生物量空间变化与土壤的盐分有关,因为在研究区域内的植被类型与土壤含盐量具有较强的对应关系,随着土壤中含盐量的变化,植被变化明显,界限较为清晰,且相关研究证明了土壤盐分和土壤 pH 是影响黄河河口盐沼植被分布的主要土壤化学因子,TN、TP 与盐沼植被分布有显著相关关系<sup>[33]</sup>。相对于地上生物量,植物地下生物量较低,这与研究区土壤理化性质关系密切。区域盐土含盐量高,质地黏重,不利于植物根系生长,在研究的几种盐生植被中,除芦苇的根系相对发达外,其他植被根系大多分布在土壤表层 0~30 cm 处,且根系

不发达,因此研究区域盐生植被生物量以地上部分为主。

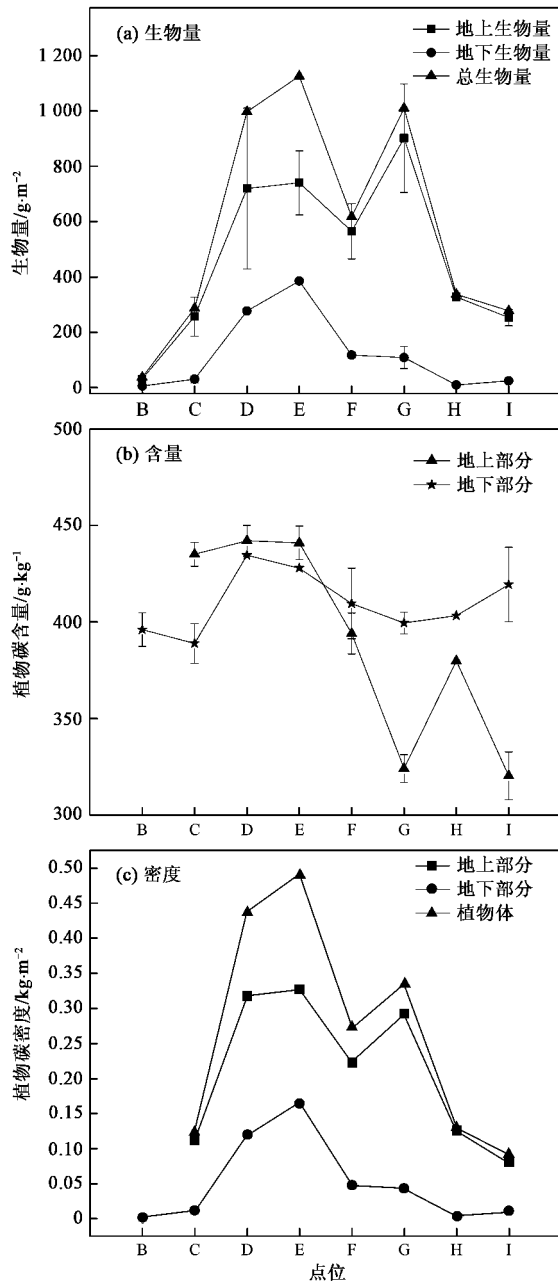


图1 植物生物量、碳含量及碳密度空间分布

Fig.1 Spatial distribution of biomass, carbon content and carbon density in plant

不同湿地植被碳含量分析表明[图1(b)]:8种湿地植物地上部分含碳量呈现出一定的差异性(最大差值约为 $52.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。其中D群落碳含量最高,其他群落碳含量依次为 $E > C > F > H > G > I$ 。各植物群落地下部分(根系)碳含量变化不大,在 $388.8 \sim 434.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。C、D及E群落中,地上部分碳含量大于地下部分碳含量。以碱蓬为优势植

物的群落(F、G、H、I)地上部分有碳含量小于地下部分碳含量。

根据不同植物群落生物量及碳含量,计算出植物碳密度,其公式为:

$$C_p = P \times C \times 10^{-6}$$

式中, $C_p$ 为碳密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $P$ 为植物生物量( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), $C$ 为植物碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。黄河三角洲不同植被类型植物碳密度见图1(c)。植物碳密度在 $0.09 \sim 0.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,平均值为 $0.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。植物碳密度空间变化趋势与植物生物量空间分布格局极其相似[图1(a)],相关分析表明植物碳密度主要取决于植物生物量( $r=0.981$ ,  $p < 0.01$ )。

## 2.2 表层土壤有机碳的空间分布

试验区内表层土壤有机碳含量空间分布见图2(a),黄河三角洲新生湿地表层土壤有机碳含量范围在 $0.75 \sim 8.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $3.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,同内陆沼泽湿地相比<sup>[34]</sup>,滨海湿地表层有机碳含量较低,约为沼泽湿地的1/90,这主要是因为研究区内大多为新生湿地,成土年龄短,土壤的潜育化程度低,植物生物量小,动植物残体分解快,且过水频繁,每年一到两次的调水调沙将大量动植物分解残体冲入大海而致使土壤中有机碳含量偏低。

各群落土壤有机碳含量中,0~10 cm土壤层中以E群落的最大[图2(a)],为 $8.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小值出现在C群落为 $2.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。比较而言0~10 cm土壤有机碳含量由高到低依次为 $E > H > G > F > I > J > B > D > A > C$ ;10~20 cm土壤层中以I群落的最大为 $5.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小值出现在B群落为 $0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤有机碳含量由高到低依次为 $I > H > J > G > F > E > A > D > C > B$ 。总体来说,0~10 cm土层相对于10~20 cm土层具有较高的有机碳含量,说明滨海湿地土壤有机碳主要在土壤的表层富集,其原因主要是研究区域植物生物量主要以地上部分为主[图1(a)],植物地上部分残体掉落其分解、半分解产物主要留存在土壤表层,从而成为表层土壤有机碳重要的碳源物质<sup>[35]</sup>,其次研究区域植物根系较浅(0~30cm),根系分布由表层向深层递减,这种根系分布形式也决定了土壤表层分布有更多的有机物质。

此外,植被覆盖区域土壤有机碳含量并不完全高于无植被区和光滩,说明该区域土壤有机碳的来源除湿地植物外,还受外源输入的影响。A样点区有机碳含量高的原因可能是由于黄河从上游带来大量工业废水和生活污水,虽然湿地本身具有净化功能,

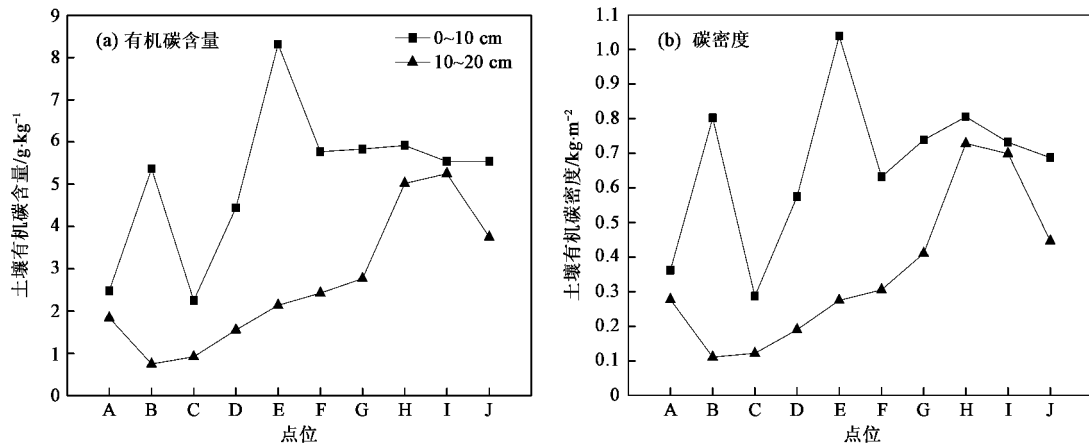


图2 表层土壤有机碳及碳密度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of organic carbon content and organic carbon density in soil

但土壤也会富集部分营养元素。J光滩有机碳含量高主要是由于处于低潮滩地势低,有机物质随地表径流或地下水向海洋方向流动,部分有机物质在此堆积,并且受到海洋的影响,水流和泥沙中大量的有机质在涨落潮流的作用下被频繁地往返搬运。

根据公式计算出土壤有机碳密度:

$$C_{ni} = d_{vi} \times C_i \times h_i / 100$$

式中, $d_{vi}$ :土壤容重( $g \cdot m^{-3}$ ); $C_i$ :碳含量( $g \cdot kg^{-1}$ ); $h_i$ :土层厚度(m)。

0~10 cm土壤有机碳密度在0.287~1.039  $kg \cdot m^{-2}$ 之间,10~20 cm土壤有机碳密度在0.111~0.729  $kg \cdot m^{-2}$ 之间,其空间变化如图2(b)所示,土壤有机碳密度空间分布和有机碳含量分布趋势基

本一致[图2(a)],二者具有显著相关关系( $r = 0.98$ ,  $p < 0.01$ )。

### 2.3 pH、TN、C/N比、含盐量与植物-土壤有机碳密度分布的关系

研究区域土壤为碱性土壤,pH值在8.45~9.59之间,相关分析表明(表1):土壤有机碳密度与pH值显著负相关( $r = -0.682$ ,  $p < 0.01$ )。这主要是由于土壤pH值可通过影响微生物的活动<sup>[36]</sup>,从而显著影响土壤有机质含量及其空间分布,微生物最适宜在中性环境下活动,在强酸或强碱条件下其活动受到抑制,土壤有机碳质量分数与土壤pH值存在明显负相关<sup>[14,37,38]</sup>。pH值同时也影响全氮的含量及其空间分布,因此TN与pH也呈负相关关系( $r = -0.652$ ,  $p < 0.01$ )。

表1 pH、TN、C/N比、含盐量与植物-土壤有机碳密度分布的关系<sup>1)</sup>

Table 1 Relationship among pH, TN, C/N, salinity and organic carbon density in plant-soil

	土壤 pH	土壤 TN	土壤 C/N	含盐量	植物碳密度	土壤有机碳密度
土壤 pH	1	-0.652**	-0.455*	-0.746**	-0.114	-0.682**
土壤 TN	-0.652**	1	-0.234	0.397	0.734	0.818**
土壤 C/N	-0.455*	-0.234	1	0.445*	-0.366	0.715**
含盐量	-0.746**	0.397	0.445*	1	-0.159	0.529*
植物碳密度	-0.114	0.734	-0.366	-0.372	1	0.433
土壤有机碳密度	-0.682**	0.818**	0.715**	0.529*	-0.372	1

1) \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$

土壤有机碳的含量说明营养元素N、P等的可利用状态<sup>[39]</sup>。一般情况下,随着土壤有机碳含量的增加,土壤中营养元素如有效性N、P、S、Ca、Mg、K及微量元素也随之增加。土壤有机碳密度与土壤全氮之间相关性极为显著( $r = 0.818$ ,  $p < 0.01$ )。土壤

中碳和氮的相互关系是通过微生物连接起来的,土壤微生物的活性对于土壤有机碳的分解非常重要,其中土壤微生物生物量碳与土壤有机碳、全氮及有效氮是显著相关的<sup>[40]</sup>。而土壤C/N的高低对于土壤微生物的活动能力有一定促进或限制作用。回归

分析表明,滨海湿地土壤有机碳密度与土壤 C/N 之间显著相关 ( $r=0.715$ ,  $p<0.01$ ). 滨海湿地中土壤含盐量是极为重要的指标,盐分决定了不同的植被类型的分布状况<sup>[33]</sup>,而不同盐沼植物对湿地土壤有机碳的分布有显著影响,因此黄河三角洲土壤有机碳密度和含盐量之间存在着良好的关系 ( $r=0.529$ ,  $p<0.05$ ).

关于植物碳密度及影响因子研究的相关报道很少. 2.1 分析表明,黄河三角洲滨海湿地植物碳密度除与植物生物量存在着显著相关外 ( $r=0.981$ ,  $p<0.01$ ),而与土壤相关指标相关性均不显著(表 1).

### 3 结论

(1) 黄河三角洲新生湿地各植被群落生物量以地上部分为主,从黄河边至盐滩,植物生物量呈 M 型分布. 植物碳含量范围在  $320 \sim 430 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,植物碳密度空间变化趋势与植物生物量空间分布格局相似.

(2) 表层土壤有机碳含量范围在  $0.75 \sim 8.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层中有机碳含量明显高于  $10 \sim 20 \text{ cm}$ . 土壤有机碳密度分布趋势与土壤有机碳含量基本一致. 而无植被覆盖区(A、J 群落)土壤有机碳主要是来源于河流、海洋等的外源输入.

(3) 土壤有机碳密度与 pH 值、土壤含盐量、土壤全氮、土壤 C/N 之间存在着较好的相关性,植物碳密度仅与生物量存在显著相关性.

#### 参考文献:

- [1] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学, 2003, **23**(5): 622-628.
- [2] Maltby E, Immirz P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils: Regional and global perspectives [J]. Chemosphere, 1993, **27**: 999-1023.
- [3] Hemminga M A, Huiskes A H L, Steegstra M, et al. Assessment of carbon allocation and biomass production in a natural stand of the salt marsh plant *Spartina anglica* using <sup>13</sup>C [J]. Marine Ecology-Progress Series 1, 1996, **30**(1-3): 169-178.
- [4] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, **17**(4): 1-22.
- [5] Kvet J, Pokorny J. Carbon accumulation by macrophytes of aquatic and wetland habitats with standing water [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B-Biological Sciences, 2008, **78**: 91-98.
- [6] Rhee J S, Amchaturapatr J I. Carbon capture and sequestration by a treatment wetland [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(3): 393-401.
- [7] Roman C T, Daiber F C. Organic-carbon flux through a delaware bay salt-marsh-tidal exchange, particle-size distribution, and storms [J]. Marine Ecology-Progress Series, 1989, **54**(1-2): 149-156.
- [8] Richert M, Saarnio S, Juutinen S, et al. Distribution of assimilated carbon in the system *Phragmites australis*-waterlogged peat soil after carbon-14 pulse labeling [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **32**(1): 1-7.
- [9] Adams J M, Lioubmtseva E. Some key uncertainties in the global distribution of soil and peat carbon [A]. In: Kimble J M, Lal R, Follett R F, (eds). Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil [C]. CRC Press Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 2002. 459-469.
- [10] 田应兵,熊明彪,宋光煜. 若尔盖高原湿地生态恢复过程中土壤有机质的变化研究[J]. 湿地科学, 2004, **2**(2): 88-93.
- [11] 田应兵,熊明彪,熊晓山,等. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(4): 490-495.
- [12] 高俊琴,欧阳华,白军红,等. 若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(1): 76-79.
- [13] 高俊琴,欧阳华,张锋,等. 若尔盖高寒湿地表层土壤有机碳空间分布特征[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1723-1727.
- [14] 刘景双,杨继松,于君宝,等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(3): 5-8.
- [15] 殷书柏,杨青,吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤有机碳剖面分布及碳储量[J]. 土壤通报, 2006, **37**(4): 659-661.
- [16] 杨继松,于君宝,刘景双,等. 三江平原典型湿地土壤腐殖质的剖面分布及其组成特征[J]. 土壤通报, 2006, **37**(5): 865-868.
- [17] Xi M, Lu X G, Li Y, et al. Distribution characteristics of dissolved organic carbon in annular wetland soil-water solutions through soil profiles in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2007, **19**(9): 1074-1078.
- [18] 迟传德,许信旺,吴新民,等. 安徽省升金湖湿地土壤有机碳储存及分布[J]. 地球与环境, 2006, **34**(4): 59-64.
- [19] 张文菊,彭佩钦,董成立,等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 56-60.
- [20] Zhou J L, Wu Y, Kang Q S, et al. Spatial variations of carbon, nitrogen, phosphorous and sulfur in the salt marsh sediments of the Yangtze Estuary in China [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2007, **71**(1-2): 47-59.
- [21] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 43-96.
- [22] 肖辉林. 气候变化与土壤有机质的关系[J]. 土壤与环境, 1999, **8**(4): 304-304.
- [23] Mitsch W J. Wetland [M]. New York: Van Norstrand Reinhold Company Inc, 1986. 89-125.
- [24] 刘红玉,吕宪国,刘振乾. 环渤海三角洲湿地资源研究[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(2): 102-104.
- [25] 许学工,林辉平,付在毅. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, **37**(1): 111-118.

- [26] 崔保山,李英华,杨志峰.基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J].生态学报,2005,25(3):606-613.
- [27] 武洪涛,张震宇,常宗广.小浪底工程对黄河下游湿地生态环境影响预测[J].国土与自然资源研究,2001,(3):54-55.
- [28] 袁祖贵,楚泽涵,杨玉珍.黄河入海口径流量和输沙量对黄河三角洲生态环境的影响[J].古地理学报,2006,8(1):126-130.
- [29] 崔保山,刘兴士.黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策[J].地理科学,2001,21(3):251-255.
- [30] 时连强,李九发,应铭,等.近、现代黄河三角洲发育演变研究进展[J].海洋科学进展,2005,23(1):97-102.
- [31] 房用,慕宗昭,孟振农.黄河三角洲湿地生态系统保育及恢复技术研究展望[J].水土保持研究,2004,11(2):183-185.
- [32] 邢尚军,张建锋,宋玉民,等.黄河三角洲湿地的生态功能及生态修复[J].山东林业科技,2005,(2):69-71.
- [33] 贺强,崔保山,赵欣胜,等.黄河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系[J].生态学报,2009,29(2):676-687.
- [34] 张文菊,吴金水,肖和艾.三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状[J].地球科学进展,2004,19(4):558-563.
- [35] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications, 2002, 10(2): 423-436.
- [36] 黄瑞农.环境土壤学[M].北京:高等教育出版社,1994.145-146.
- [37] 李忠,孙波,林心雄.我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素[J].地理科学,2001,21(4):301-307.
- [38] 白军红,邓伟,张玉霞,等.洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J].环境科学,2002,23(2):77-81.
- [39] 苏永中,赵哈林.土壤有机碳储量、影响及其环境效应的研究进展[J].中国沙漠,2002,22(3):220-228.
- [40] 姚槐应,何振立,陈国潮,等.红壤微生物量在土壤黑麦草系统中的肥力意义[J].应用生态学报,1999,10(6):725-728.