

黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征

董洪芳^{1,2}, 于君宝^{1*}, 管博¹

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

摘要: 应用物理分组方法研究了黄河三角洲典型碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征. 结果表明, 研究区土壤重组有机碳是土壤有机碳的主要组成部分, 土壤重组有机碳含量、土壤颗粒有机碳含量与土壤总有机碳含量都显著正相关. 研究区土壤轻组组分比例和含量范围分别在 0.008%~0.15% 和 0.10~0.40 g·kg⁻¹, 颗粒有机碳分配比例范围为 8.83%~30.58%, 说明黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳中非保护性组分较低, 碳库相对稳定.

关键词: 黄河三角洲湿地; 土壤有机碳; 重组组分; 轻组组分; 颗粒有机碳; 碱蓬湿地

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0288-05

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in *Suaeda salsa* Wetland in the Yellow River Delta

DONG Hong-fang^{1,2}, YU Jun-bao¹, GUAN Bo¹

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

Abstract: Applying the method of physical fractionation, distribution characteristics of soil organic carbon and its composition in *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River delta were studied. The results showed that the heavy fraction organic carbon was the dominant component of soil organic carbon in the studied region. There was a significantly positive relationship between the content of heavy fraction organic carbon, particulate organic carbon and total soil organic carbon. The ranges of soil light fraction organic carbon ratio and content were 0.008%~0.15% and 0.10~0.40 g·kg⁻¹, respectively, and the range of particulate organic carbon ratio was 8.83%~30.58%, indicating that the non-protection component of soil organic carbon was low and the carbon pool was relatively stable in *Suaeda salsa* wetland of the Yellow River delta.

Key words: Yellow River Delta Wetland; soil organic carbon; heavy fraction organic carbon; light fraction organic carbon; particulate organic carbon; *Suaeda salsa* wetland

湿地是陆地表层重要的生态系统之一, 尽管面积仅占陆地表层的 4%~6%, 其有机碳储量约是陆地生态圈碳储量的 20%~25%^[1,2]. 湿地是碳重要的转化场所, 湿地土壤有机碳库的源、汇转换对气候变化的响应极为敏感. 土壤有机碳库可分为周转时间较短的活性库和周转时间较长的稳定库, 土壤有机碳的变化主要表现为活性有机碳库的变化^[3]. 通过密度分组的方法, 可将土壤有机质分为轻组有机质(LFOM)和重组有机质(HFOM), 其中轻组有机质(土粒密度 < 1.8~2.0 g·cm⁻³)主要包括处于不同分解阶段的植物残体、小的动物和微生物^[4], 是植物残体分解后形成的一种过渡有机质库, 具有较高的周转速率, 易分解^[5]. 重组有机质(土粒密度 > 1.8~2.0 g·cm⁻³)主要由与黏土矿物牢固复合的腐殖物质组成, 属于分解速度极慢的有机碳库. 利用粒径分组法可分出颗粒有机质(53~2000 μm). 颗粒有机质主要来源于分解速度中等的植物残体分

解产物, 周转期 5~20 a, 分解活性介于轻组有机质和腐殖化有机物之间^[6]. 轻组有机质和颗粒有机质代表了土壤有机质中的非保护性组分. 土壤有机碳的密度分组和粒径分组统称为物理分组, 物理分组方法对有机碳结构破坏程度极小, 分离的有机碳组分能够反映原状有机碳结构与功能, 尤其反映有机碳周转特征^[7,8]. 因此, 采用物理分组方法分离土壤有机碳不同组分, 对揭示土壤碳过程和碳库动态变化机理具有重要的意义.

黄河三角洲滨海湿地是世界上暖温带保存最广阔、最完善、最年轻的湿地生态系统, 生态类型独特.

收稿日期: 2012-03-07; 修订日期: 2012-06-20

基金项目: 山东省自然科学基金杰出青年基金项目(JQ201114); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223); 中国科学院百人计划项目“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B01)

作者简介: 董洪芳(1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学.

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

近年来对黄河三角洲海滨湿地生态系统生源元素生物地球化学行为研究逐渐增多^[9-15], 而其机制研究还需进一步深入. 因此本研究目的是应用物理分组方法, 分析黄河三角洲典型碱蓬湿地土壤有机碳的结构和功能, 以期为进一步深入探讨黄河三角洲湿地碳元素生物地球化学循环过程提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与土壤样品采集

研究区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黄河三角洲国家级自然保护区. 该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℃, 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*)、翅碱蓬 (*Suaeda salsa*)、荻 (*Triarrhena sacchariflora*)、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^[9, 15]. 供试土壤样品于 2010 年 5 月采自山东省东营市黄河三角洲自然保护区内的潮间带典型碱蓬湿地(中潮滩和低潮滩). 土壤剖面样品的采集自上而下分层进行, 每层 10 cm, 采样深度为 60 cm. 随机选择 3 个重复点采样, 将对应土层的 3 份土壤混合, 作为该采样点表层土壤的代表性样品带回实验室. 样品经自然风干后, 用四分法取一部分, 剔除可见的植物残体, 经研磨制备 2 mm 的待测样品.

1.2 土壤物理组分的分离和测定方法

密度组分分离采用改进的比重法^[16]. 取研磨过 2 mm 孔径土壤筛的干土 5.0 g, 放置于 25 mL 1.8 g·cm⁻³ ZnBr₂ 溶液中, 振荡 5 min, 再采用超声波 (400 J·mL⁻¹) 振荡 3 min 后, 用离心机离心, 虹吸法取上清液, 过滤, 重复操作 5 次. 所得样品用 100 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液洗涤, 再用 200 mL 蒸馏水反复冲洗, 得到轻组组分. 剩余部分为重组组分, 用 100 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液洗涤, 再用 200 mL 蒸馏水反复冲洗. 60℃ 下烘干, 称量. 计算烘干样品质量占土壤样品质量的比例后, 再取出部分样品用于分析有机碳含量. 根据计算的比例和有机碳含量, 计算各组分中有机碳在整个样品中的含量. 以各组分有机碳含量值除以土壤有机碳总含量得到

各组分有机碳的分配比例.

颗粒组分有机碳分离首先取研磨过 2 mm 孔径土壤筛的干土 20.0 g, 把土样放在 100 mL 焦磷酸钠 ($(\text{NaPO}_3)_6$) (5 g·L⁻¹) 的水溶液中. 摇匀后用振荡器 (120 r·min⁻¹) 振荡 18 h. 把土壤悬液过 53 μm 筛, 反复用蒸馏水冲洗, 留在筛子上的部分为 > 53 μm 的颗粒组分, 其所含有机碳为颗粒组分有机碳 (POC). 60℃ 下烘干, 称量. 通过分析烘干样品中有机碳含量, 计算颗粒有机质中的有机碳含量, 再换算为单位质量土壤样品的对应组分有机碳含量. 以颗粒有机质中有机碳含量值除以土壤有机碳总含量得到颗粒有机碳的分配比例.

土壤有机碳物理组分分配比例: $P_w = \text{FOC}/\text{SOC}$ 式中 P_w 为土壤有机碳物理组分分配比例; FOC 为土壤物理组分有机碳含量 (g·kg⁻¹); SOC 为土壤有机碳含量 (g·kg⁻¹).

1.3 数据处理

数据处理用 SPSS 16.0, 采用 Origin Pro 7.5 软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 有机碳密度组分的剖面分布

分组过程中分离出的轻组有机质由于量少而无法直接测定其碳含量, 因此, 本研究采用的轻组碳含量为总有机碳含量减去重组碳含量 (表 1). 图 1 为研究区土壤轻组组分和重组组分占整个土壤质量的比例. 分析结果表明, 中潮滩碱蓬湿地轻组分比例范围 0.008% ~ 0.02%, 低潮滩碱蓬湿地轻组分比例范围 0.03% ~ 0.15%, 相应的轻组有机碳含量范围分别为 0.10 ~ 0.19 g·kg⁻¹ 和 0.16 ~ 0.40 g·kg⁻¹, 低潮滩碱蓬湿地中轻组分比例及轻组碳含量明显高于中潮滩碱蓬湿地. 中潮滩土壤轻组组分大部分聚集在土壤表层, 随土层深度的增加而下降. 低潮滩湿地土壤轻组组分比例峰值在 50 ~ 60 cm 土层. 此外, 该研究区 (中潮滩、低潮滩) 土壤重组组分比例均高于 99%.

由图 2 可以看出, 重组中集中了 90% 以上的土壤有机碳, 即该研究区土壤有机碳的主要组成部分是重组有机碳. 重组有机碳在土壤剖面分布特征与土壤有机碳分布特征一致, 随土壤深度呈一定的高低波动变化, 没有表现出明显的规律性. 低潮滩土壤有机碳及重组有机碳含量高于中潮滩区域. 相关分析表明, 土壤轻重组分比例与 SOC 没有相关性, 而土壤重组有机碳含量与 SOC 显著正相关 ($P < 0.01$).

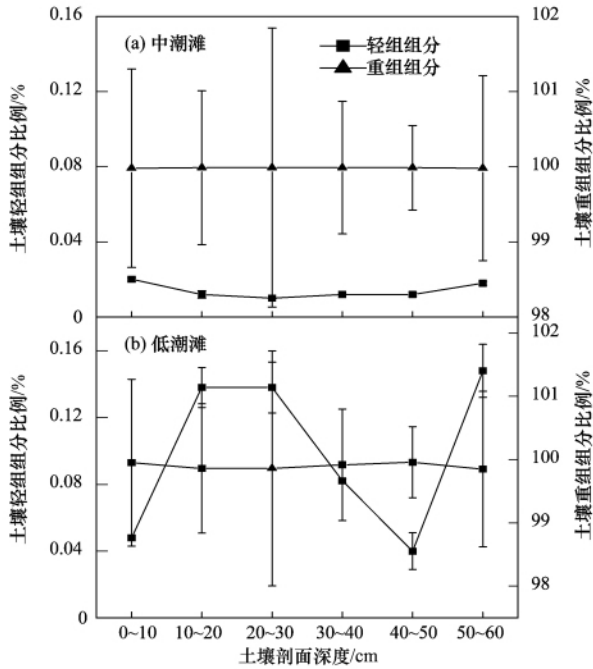


图1 黄河三角洲中潮滩碱蓬湿地和低潮滩碱蓬湿地土壤有机碳轻组组分与重组组分比例

Fig. 1 Ratio of physical fractions in the middle tidal flat and low tidal flat *Suaeda salsa* wetland of the Yellow River delta

表1 土壤轻组组分特征

Table 1 Content of light fraction of soil organic carbon

研究区	土壤剖面深度 /cm	轻组有机碳含量 (LFOC) /g·kg ⁻¹	轻组有机碳分配比例 (P _{LF}) /%
中潮滩碱蓬湿地	0~10	0.17 ± 0.09	5.65 ± 2.94
	10~20	0.10 ± 0.06	4.06 ± 2.21
	20~30	0.19 ± 0.06	3.88 ± 1.27
	30~40	0.15 ± 0.01	3.33 ± 0.25
	40~50	0.13 ± 0.04	4.73 ± 1.60
	50~60	0.16 ± 0.06	4.77 ± 1.74
低潮滩碱蓬湿地	0~10	0.16 ± 0.03	4.79 ± 0.86
	10~20	0.40 ± 0.06	6.49 ± 0.99
	20~30	0.37 ± 0.05	8.17 ± 1.09
	30~40	0.21 ± 0.03	7.15 ± 1.11
	40~50	0.20 ± 0.07	6.09 ± 2.17
	50~60	0.29 ± 0.06	8.80 ± 1.80

2.2 土壤颗粒组分有机碳剖面分布特征

土壤颗粒组分比例是粒径在 53 ~ 2 000 μm 土粒质量占整个土壤质量的比例,颗粒有机碳比例是土壤中颗粒有机碳含量占土壤有机碳含量的比例。由表 2 可以看出,中潮滩碱蓬湿地土壤颗粒组分比例范围是 10.03% ~ 50.59%,10 ~ 20 cm 土层土壤颗粒组分分配比例最高;低潮滩碱蓬湿地土壤颗粒组分比例范围为 3.29% ~ 32.57%,10 ~ 20 cm 土层土壤颗粒组分分配比例最低。在剖面分布上 0

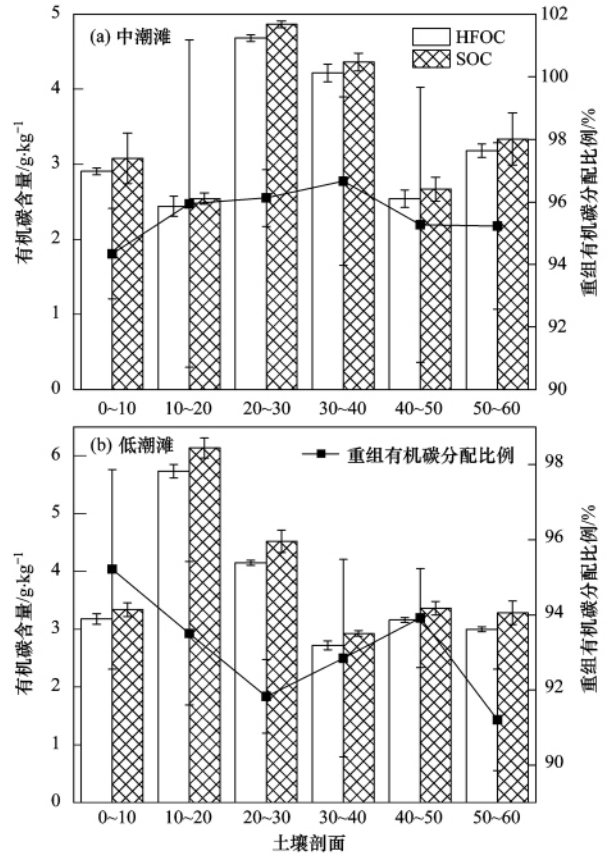


图2 中潮滩和低潮滩碱蓬湿地的土壤重组有机碳含量及分配比例比较

Fig. 2 Comparison of the content and proportion of HFOC in the middle tidal flat and low tidal flat *Suaeda salsa* wetland of the Yellow River delta

~20 cm 土层中潮滩碱蓬湿地土壤颗粒组分比例显著高于低潮滩碱蓬 20 ~ 60 cm 剖面上规律相反。

在垂直剖面上,两种类型碱蓬湿地土壤颗粒有机碳含量呈现明显的层次结构 0 ~ 30 cm > 30 ~ 60 cm。POC 分配比例在土壤深度上有差异,在中潮滩呈 M 分布,在低潮滩随土壤深度增加而降低。二者比较而言,除表层土壤外,中潮滩湿地土壤颗粒有机碳含量及颗粒有机碳分配比例高于低潮滩。

相关分析表明(表 3),土壤颗粒组分比例与颗粒碳含量有显著负相关性 (P < 0.05),土壤颗粒组分有机碳含量与 SOC 显著正相关 (P < 0.01)。

3 讨论

土壤轻组有机质对土壤有机质周转有重要作用,是植物养分的短期储存库,是土壤中不稳定有机碳库的重要组成部分。前人研究发现,在 0 ~ 110 cm 土层轻组有机碳平均分配比例农田为 31.6%,牧草地为 33.8%,天然次生林为 23% ~ 35%,而落叶松

表2 土壤颗粒组分特征

Table 2 Characteristics of soil particulate fraction of organic carbon

类型	土层 /cm	土壤有机碳含量 /g·kg ⁻¹	土壤颗粒组分比例 /%	土壤颗粒组分碳含量 /g·kg ⁻¹	土壤颗粒有机碳含量 /g·kg ⁻¹	土壤颗粒有机碳分配比例 /%
中潮滩碱蓬湿地	0~10	3.08 ± 0.33	25.25 ± 2.30	2.98 ± 0.29	0.75 ± 0.07	24.42 ± 2.39
	10~20	2.54 ± 0.88	50.59 ± 4.57	1.54 ± 0.27	0.78 ± 0.13	30.58 ± 5.28
	20~30	4.87 ± 0.04	10.03 ± 1.42	7.75 ± 0.31	0.78 ± 0.03	15.97 ± 0.64
	30~40	4.36 ± 0.12	13.69 ± 1.27	3.22 ± 0.33	0.44 ± 0.05	10.12 ± 1.05
	40~50	2.67 ± 0.16	22.26 ± 1.72	3.07 ± 0.27	0.68 ± 0.06	25.61 ± 2.21
	50~60	3.34 ± 0.35	15.59 ± 1.76	3.18 ± 0.25	0.50 ± 0.04	14.84 ± 1.15
	平均值	3.48 ± 0.18	22.90 ± 2.17	3.62 ± 0.29	0.66 ± 0.06	20.26 ± 2.12
低潮滩碱蓬湿地	0~10	3.34 ± 0.12	25.32 ± 2.56	3.69 ± 0.27	0.94 ± 0.07	28.03 ± 2.02
	10~20	6.14 ± 0.18	3.29 ± 0.12	16.44 ± 0.88	0.54 ± 0.03	8.83 ± 0.47
	20~30	4.52 ± 0.19	14.52 ± 1.23	5.29 ± 0.29	0.77 ± 0.04	16.99 ± 0.94
	30~40	2.93 ± 0.04	32.57 ± 3.16	1.18 ± 0.25	0.39 ± 0.08	13.15 ± 2.74
	40~50	3.36 ± 0.12	26.24 ± 2.46	1.57 ± 0.31	0.41 ± 0.08	12.23 ± 2.42
	50~60	3.29 ± 0.2	18.16 ± 1.98	2.20 ± 0.29	0.40 ± 0.05	12.19 ± 1.61
	平均值	3.93 ± 0.14	20.02 ± 1.92	5.06 ± 0.38	0.58 ± 0.06	15.24 ± 1.70

表3 土壤颗粒组分比例与颗粒有机碳及SOC的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients of soil particulate fraction ratio, soil particulate organic carbon and SOC

	SOC	颗粒组分比例	土壤颗粒组分碳含量	土壤颗粒有机碳含量	土壤颗粒有机碳分配比例
SOC	1	-0.0797**	0.892**	-0.594*	0.249
颗粒组分比例		1	-0.674*	0.651*	0.039
土壤颗粒组分碳含量			1	-0.356	0.425
土壤颗粒有机碳含量				1	0.502
土壤颗粒有机碳分配比例					1

1) **表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$; $N = 12$

人工林为 30.7% ~ 34.4%^[8]; 洞庭湖湿地湖草滩地表层 0 ~ 10 cm 轻组碳分配比例在 20% 以上, 而芦苇滩地和垦殖水田表层 0 ~ 10 cm 的有机碳以稳定的重组碳为主 (>90%)^[17]; 小叶章沼泽化草甸土壤轻组碳分配比例为 33.8%, 重组碳分配比例为 66.2%^[18]。与之相比, 本研究区土壤轻组分含量极少, 约为 0.008% ~ 0.15%, 低潮滩碱蓬湿地轻组分比例高于中潮滩碱蓬湿地轻组分比例。土壤轻组有机质主要来源于不同分解阶段的植物残体^[19], 因而其大小和组成具有季节波动性, 植物凋落物以及凋落物的分解速率将影响轻组有机质的含量。在碱蓬生长初期, 碱蓬湿地土壤中轻组有机质含量极低主要是由于研究区受潮汐海流影响严重, 潮间带水动力混合作用强烈, 带走大量地表植物枯落物及残体。相对而言, 低潮滩区域土壤有机碳含量及轻组组分比例高于中潮滩区域, 一方面可能受生物活动的影响, 低潮滩区域常年有大量潮汐蟹、蝼蛄等动物活动, 动物的一系列行为如挖洞、搅拌、再混合、捕食, 使得部分植物残体由地表浸入到地下; 另一方面, 受潮汐涨落影响, 泥沙输移和冲淤变化频繁, 地表动植物残体及表层沉积物不断沉降, 增加了土壤

中有机碳及轻组分的含量。重组有机碳含量决定土壤碳库的稳定性和土壤质量。本研究区土壤有机碳的主要组成部分是重组有机碳, 属于分解速度极慢的有机碳库, 土壤碳库比较稳定。低潮滩土壤有机碳及重组有机碳含量高于中潮滩区域, 可能受外源输入的影响, 潮汐海流带来营养物质堆积导致。

土壤颗粒组分比例反映了土壤中非保护结构部分的相对数量, 土壤颗粒有机碳含量反映了土壤中非保护性有机碳数量, 颗粒有机碳比例则反映了土壤中非保护性有机碳或非稳定性有机碳的相对数量^[6]。颗粒有机碳的比例越高, 有机碳中不稳定部分越高。颗粒有机物受土壤外界条件的影响很敏感, 提高这部分碳在土壤中被抵押的比例, 对提高团聚体稳定性和缓解大气 CO₂ 浓度的上升尤为重要^[20]。研究表明, 森林(0 ~ 35 cm)的颗粒有机碳分配比例为 55% ~ 68%^[21], 0 ~ 110 cm 土层颗粒有机碳平均分配比例农田为 27%, 牧草地为 22%^[8], 而本研究区 0 ~ 60 cm 土壤颗粒有机碳平均分配比例 (15.24% ~ 20.26%) 略低于其他土地利用类型土壤。中潮滩碱蓬湿地土壤颗粒组分比例大于低潮

滩,说明中潮滩湿地土壤中非保护结构部分较高。且由于植物根系分布、水分、pH值和土壤有机碳含量等的差异,土壤颗粒有机碳分配比例在土壤剖面上的分布也不同,中潮滩土壤颗粒有机碳平均分配比例高于低潮滩。

4 结论

黄河三角洲新生碱蓬湿地非保护性有机碳分配比例低,稳定碳库(重组有机碳)比例高,说明该研究区土壤有机碳比较稳定。受潮汐海流影响,黄河三角洲典型碱蓬湿地土壤轻组组分含量及轻组碳分配比例很低,低潮滩碱蓬湿地土壤中轻组分高于中潮滩。土壤有机碳的主要组成部分是重组有机碳。该研究区土壤颗粒有机碳分配比例较低($<31\%$),说明土壤中非保护性有机碳的相对数量较低。相关分析表明土壤重组有机碳含量、土壤颗粒有机碳含量与土壤总有机碳含量都显著正相关($P < 0.01$)。

致谢:本研究得到“中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站”的大力支持。

参考文献:

- [1] Parish F, Looi C C. Wetlands, biodiversity and climate change. Opinions and needs for enhanced linkage between the Ramsar conventions on wetland [R]. Convention on biological diversity and UN framework convention on climate change. Tokyo, 1999.
- [2] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils-regional and global perspectives [J]. Chemosphere 1993, 27(6): 999-1023.
- [3] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover [J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(2): 207-222.
- [4] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Soil structure and carbon cycling [J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32(5): 1043-1068.
- [5] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.
- [6] Cambardella C, Elliott E. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 123-130.
- [7] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover [J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(3): 345-353.
- [8] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组份中有机碳分配的影响 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 19-29.
- [9] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 855-861.
- [10] 吕学军, 刘庆, 陈印平, 等. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响 [J]. 农业现代化研究, 2011, 32(4): 505-508.
- [11] 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 等. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4778-4782.
- [12] 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 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 66-71.
- [13] 陈印平, 夏江宝, 王进闯, 等. 黄河三角洲盐碱地人工林土壤可溶性有机氮含量及特性 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 121-124, 130.
- [14] 于君宝, 陈小兵, 毛培利, 等. 新生滨海湿地土壤微量元素空间分异特征 [J]. 湿地科学, 2010, 8(3): 213-219.
- [15] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征 [J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1594-1599.
- [16] Freixo A A, De A Machado P L O, Dos Santos H P, et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 64(3-4): 221-230.
- [17] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 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.
- [18] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响 [J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 857-859.
- [19] Barrios E, Buresh R J, Kwesiga F, et al. Light fraction soil organic matter and available nitrogen following trees and maize [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 826-831.
- [20] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展 [J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.
- [21] 吴建国, 艾丽, 田自强, 等. 祁连山中部土壤颗粒组份有机质碳含量及其与海拔和植被的关系 [J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2358-2365.