

黄河三角洲内陆到潮滩土壤中碳、氮元素的梯度分布规律

李 远^{1,2}, 章海波¹, 陈小兵¹, 涂 晨¹, 骆永明^{1*}

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 黄河三角洲是我国典型的通过黄河冲积泥沙填海造陆形成的近代沉积区。区域受到黄河冲积、沉积等自然过程和农业耕种熟化等人类活动的双重影响。本研究通过在黄河三角洲地区内陆到河口海湾不同距离采集典型土壤类型剖面发生层样品, 探讨土壤有机碳、总氮等生源要素的空间分布规律, 为阐明我国典型海岸带地区陆源碳、氮的输送及循环特征提供基础依据。研究结果表明, 黄河三角洲内陆与河口地区呈现出完全不同的土壤碳、氮分布规律。表层土壤碳、氮含量在黄河沿岸及三角洲南部均表现出由陆向海逐级递减的空间分布特征, 而在黄河刁口流路和清水沟流路沿行水方向有梯度升高的趋势。内陆地区土壤碳、氮与盐分呈一定的负相关关系, 表明土壤碳、氮主要受到耕作熟化过程的影响; 而在河口地区两者呈显著的正相关关系($p < 0.01$), 表明靠近海湾地区土壤碳、氮积累可能受到细颗粒泥沙沉积和滩涂湿地厌氧等环境影响。表层土壤碳、氮比变幅在 3.6~8.6 之间, 说明该地区土壤有机质分解较快, 不利于有机碳的积累。土壤剖面中, 一些特殊发生层如红色夹黏层、黑色炭泥层对土壤碳、氮的富集具有明显的作用, 其中红色夹黏层的土壤碳、氮含量接近耕层土壤。总之, 黄河三角洲土壤在耕作垦殖、泥沙沉积等综合作用下形成的空间分布格局以及剖面特征发生层是影响碳、氮封存、释放和增汇等循环过程的关键驱动因素。

关键词: 土壤; 总氮; 有机碳; 黄河三角洲; 空间分布

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2014)04-0338-08

Gradient distributions of nitrogen and organic carbon in the soils from inland to tidal flat in the Yellow River Delta

LI Yuan^{1,2}, ZHANG Hai-bo¹, CHEN Xiao-bing¹, TU Chen¹ and LUO Yong-ming^{1*}

1. Key Laboratory for Coastal Environment Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

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

Abstract: The Yellow River Delta (YRD) is a typical fluvial plain that formed by the Yellow River alluvial sediments. The soils of the area are heavily influenced by natural processes (e.g., alluviation and deposition of the Yellow River) and human activities (e.g., long-term cultivation). The objective of this study was to reveal the spatial distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) in the YRD region based on the pedogenetic horizon samples from the typical soil sections of inland to tidal flat. The study could be helpful to understand the transport and cycling of terrestrial organic carbon and nitrogen in estuarine-coastal zone. The results showed that distinct distribution patterns of soil carbon and nitrogen were observed in the inland and estuary areas. The concentrations of TN and SOC in surface soils gradually decreased seaward along the Yellow River and in the southern part of the delta, while an increasing trend could be found along the Qingshuigou and Diaokou course. A negative correlation of SOC and TN with salt content was found in the soils of the inland areas, implying the influence of cultivation on the accumulation of SOC and TN. However, an inverse relationship was found in the estuary, which implied that fine particle sediment and reduction condition might make an impact on

收稿日期(Received): 2013-12-14; 改回日期(Revised): 2014-03-10; 接受日期(Accepted): 2014-03-26

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 国家自然科学基金(41371313, 41230858)

作者简介: 李远(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学。E-mail: yli@yic.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): LUO Yong-ming, E-mail: ymluo@yic.ac.cn, Tel: +86-535-2109007

the accumulation of SOC and TN in the soils of the tidal flat area. The ratio of carbon to nitrogen (C/N) in the soil was relatively lower than that in other farmlands. This meant that the soil environment was favorable to the accumulation of nitrogen and decomposition of soil organic matter. The depth distribution of SOC and TN indicated that the special pedogenic horizons, such as red clay layer in the depth of > 60 cm and peat layer in the topsoil of tidal flat, played an important role in the enrichment of SOC and TN in the Yellow River Delta. Therefore, spatial distribution pattern and special pedogenic horizons of the soils in YRD formed by cultivation and sediment deposition were important factors that affect their seal, release and sink during the SOC and TN cycle process.

Key words: soil; total nitrogen; organic carbon; Yellow River Delta; spatial distribution

0 引言

黄河三角洲是世界上大型河流三角洲中最活跃的陆海交互区域之一,也是我国造陆速度最快的河口三角洲^[1]。该区具有我国暖温带最广阔、最完整的河口新生湿地生态系统,是中国湿地生态系统的重点保护区域。区域内土地资源优势突出,地理位置优越,蕴藏有丰富的地热资源、油气资源、海洋渔业资源和卤水资源,具有发展高效经济的良好条件^[2]。同时,该地区也是我国重要的粮食、棉花生产区;拥有后备可开发利用的荒碱地418万亩,是我国重要的后备土地资源,其合理开发利用对于缓解环渤海地区耕地紧张,实现农业可持续发展具有重要的现实意义。目前,已有众多学者对黄河三角洲典型区域中土壤养分和盐渍化相关的农业及生态环境问题做了大量调查研究。其中,包括湿地生态系统的营养元素地球化学行为^[3];油田地区土壤物理化学性质^[4];军区生产基地土壤盐渍化与耕地保护^[5];孤岛地区土壤物理性状等^[6]。但目前针对现代沉积特征下黄河三角洲地区土壤碳、氮的分布规律及其对近海碳、氮等生源要素的输入影响尚缺乏系统了解,特别是在不同土地利用方式、农业垦殖历史及黄河改道等因素影响下黄河三角洲地区的陆地土壤碳、氮分布以及河口、海岸带地区碳、氮物质循环过程中的关键驱动机理尚不清楚。为此,本文拟通过对黄河三角洲地区内陆到河口海湾不同距离土壤中碳、氮分布规律及其影响因素的探讨,为评估我国典型河口海岸带地区碳、氮的封存与释放及增汇途径提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域设在山东省东营市境内的黄河三角洲核心区(38°06'~36°59'N, 118°10'~119°07'E),地处渤

海湾和莱州湾之间。气候类型属暖温带季风性气候,多年平均降水量在600 mm左右,70%的降水集中在7、8月份,多年平均蒸发量1944 mm,远高于降水量,区域土壤的盐渍化特征明显。土壤类型包括褐土、潮土、盐化潮土和滨海潮盐土等类型,成土母质以黄河冲积母质和海相沉积物(盐渍淤泥)为主^[7]。自然植被类型主要有芦苇(*Phragmites communis* Trin.)、柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)及翅碱蓬(*Suaeda heteroptera* Kitag),粮食作物以小麦和玉米为主,经济作物主要为棉花。

1.2 研究方法

2012年11月进行了野外土样采集,共采集土壤剖面发生层样品95份,此时耕层土壤盐分及地下水性质较为稳定,地下水蒸发量相对较小,表层土壤含盐量变化不大^[7]。在东营市境内由内陆至沿海方向布设两纵一横三条采样带(图1)。线路A:现今黄河河道,即清水沟流路,黄河口镇沿黄河岸边至入海口;线路B:近海地区为黄河早期的沉积区,从垦利县黄河北至套尔河口;线路C:为黄河故道,即刁口流路,从黄河南岸广饶县至北岸湿地自然保护区;线路A和C包括了现今黄河口两大片湿地。各采样点具体信息如表1所示。

三条线路的土地利用类型均由农田向湿地、潮滩过渡,线路A和C分别受到黄河新道和故道影响,线路B则避开黄河取点。研究区域由陆向海逐渐过渡,景观植被为玉米/小麦轮作、蔬菜间作—玉米/小麦轮作—棉花—芦苇—碱蓬/柽柳—荒滩的过渡分布,地势平缓,海拔均在10 m以内,地貌大致为缓岗—微斜平地—河滩高地—滩涂的过渡分布^[8]。

在每个采样点按照土壤发生层采集土壤剖面样品,实地记录样点的基本情况、地貌类型、景观特征等,并用全球定位系统(GPS)精确定位,记录点位经纬度。样品取回后风干,分别研磨过10目和100目孔筛,用于土壤基本理化性质的测定,分析方法参考文献^[9]。其中土壤盐分按水土比5:1制备浸提液,

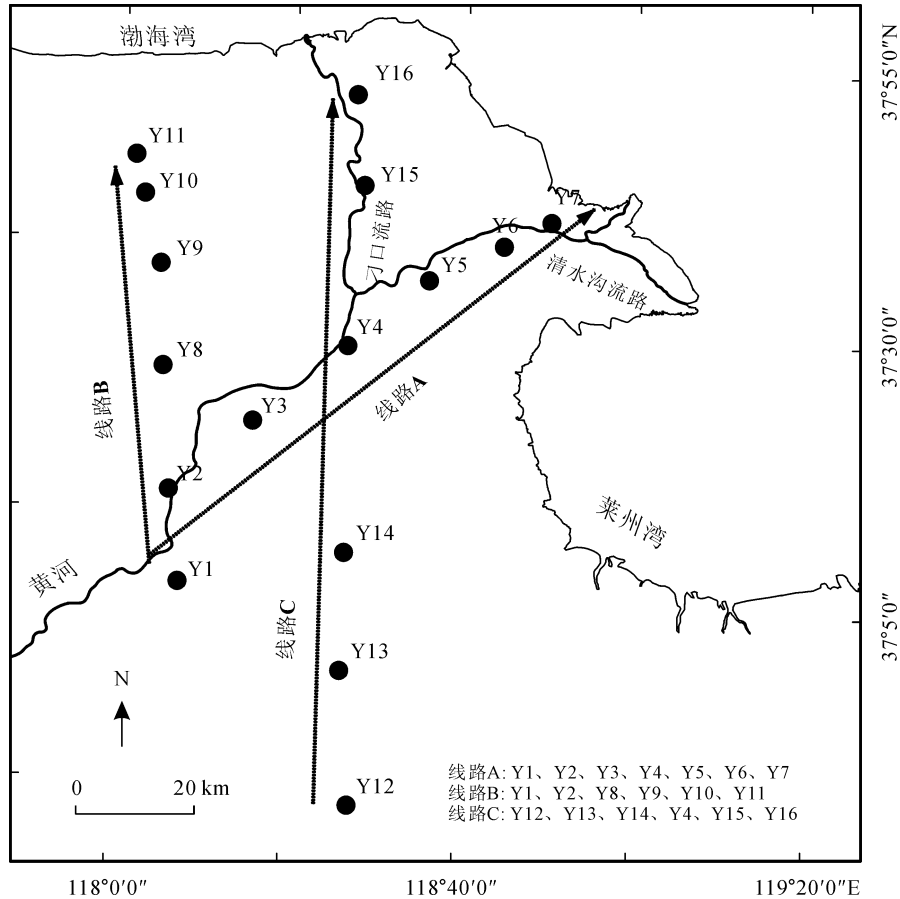


图1 研究区土壤采样点布置图

Fig.1 Location of the sampling sites

表1 采样点位置描述

Table 1 Description of the sampling sites

名称	经纬度	采样地点	备注
Y1	37°19'N, 118°13'E	博兴县乔庄乡王庄村	线路 A、线路 B
Y2	37°28'N, 118°14'E	利津县北宋乡小郭家村	线路 A、线路 B
Y3	37°33'N, 118°26'E	垦利县胜坨乡胜利村	线路 A
Y4	37°39'N, 118°38'E	垦利县西宋乡	线路 A、线路 C
Y5	37°43'N, 118°49'E	垦利县黄河口镇新林村	线路 A
Y6	37°45'N, 118°58'E	垦利县黄河口镇	线路 A
Y7	37°47'N, 119°04'E	黄河口生态湿地公园管理站	线路 A
Y8	37°40'N, 118°16'E	利津县盐窝镇东洋江村	线路 B
Y9	37°49'N, 118°18'E	沾化县下河乡下河村	线路 B
Y10	37°56'N, 118°18'E	东营市河口区太平乡	线路 B
Y11	38°00'N, 118°17'E	东营市河口区新户乡以北	线路 B
Y12	36°56'N, 118°29'E	广饶县大王乡	线路 C
Y13	37°09'N, 118°30'E	广饶县稻庄乡佛王村	线路 C
Y14	37°20'N, 118°33'E	东营区六户镇	线路 C
Y15	37°53'N, 118°43'E	军马场十七连七分场	线路 C
Y16	38°02'N, 118°44'E	黄河生态湿地保护区	线路 C

采用重量法和电导法测定全盐含量; 土壤pH按水土比2.5:1测定; 土壤颗粒组成分析为去除土壤有机质和碳酸盐后在激光粒度仪(Marvern Mastersizer 2000F)上测定, 按照国际制土壤粒级划分标准, 土壤粒径 < 0.002 mm划为黏粒; 土壤总氮用元素分析仪(Vario MAX CNS)测定; 土壤有机碳含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定。

1.3 数据处理

根据野外调查GPS数据, 采用ArcGis 10.0绘制采样图(图1)。采用SPSS 20.0和Origin 8.0软件分析、处理实验数据及作图。

2 结果与讨论

2.1 表层土壤有机碳和总氮的梯度分布特征

黄河三角洲各线路土壤表层有机碳和总氮含量如图2所示。从图中可以得出, 区域内碳、氮变化趋势十分接近, 表明黄河三角洲土壤氮与碳存在很好

的相关性。三条采样线路前半段和后半段具有不同的土壤碳、氮分布规律, 总体上黄河干流和三角洲南部区域(图2a)呈向海方向递减的规律, 而黄河入海流路和三角洲北部区域(图2b)则呈递增的梯度分布。目前, 对于黄河三角洲由陆向海方向主要以研究土壤盐分为主^[7], 而对土壤碳、氮分布的研究多集中于某一局部区域^[3, 10]。经过笔者对黄河三角洲采样区域的研究发现, 表层土壤碳、氮的分布受到陆海距离、自然过程和人为熟化因素的显著影响, 在内陆和靠海湾区域具有不同的梯度分布。由此, 将研究区域按照陆海距离, 分为内陆和靠海湾两部分进行讨论。

黄河三角洲土壤有机碳和总氮含量在这两个区间之间略有差异。其中后半段的有机碳平均含量略高于前半段, 分别为7.74 g/kg 和7.40 g/kg; 而总氮的平均含量则相反, 后半段略低于前半段, 分别为1.11 g/kg 和1.27 g/kg。这可能反映了在该区域, 由于长期的农业施肥增加了土壤氮的积累, 但耕作过

程会破坏土壤中富含有机碳的大团聚体, 并提高土壤通气性, 加快有机质的降解和矿化^[11]。Gregorich *et al.*^[12] 35年的对比试验结果表明, 与附近森林相比, 种植玉米的农田土壤有机质损失达到30%~40%^[13]。另外, 由于化石燃料燃烧、含氮肥料的大量生产和使用、土地利用方式的改变等人类活动增强, 使得含氮化合物排放和沉降激增。山东省冬小麦/夏玉米轮作种植区年平均施氮量为500 kg/ha, 大气氮沉降约是施氮量的4%~16%^[14], 区域内氮素的损失和积累使得氮素循环仍处于一个相对稳定的状态。

土壤碳、氮在两个区间内的分布则呈现大致相反的梯度分布规律。采样区域前半段, 由于潜水埋深10 m以下^[8], 土壤盐渍化水平低, 土地以农作为主, 线路A和线路B农田耕种作物主要是棉花和玉米; 线路C则为玉米伴有蔬菜间作, 表现出较高的总氮含量。三条线路向海推进, 地下水埋深变浅, 土壤盐渍化加重, 植被逐渐从小麦和蔬菜过渡到棉花为主, 并有芦苇伴生, 农耕强度降低, 农业输入的

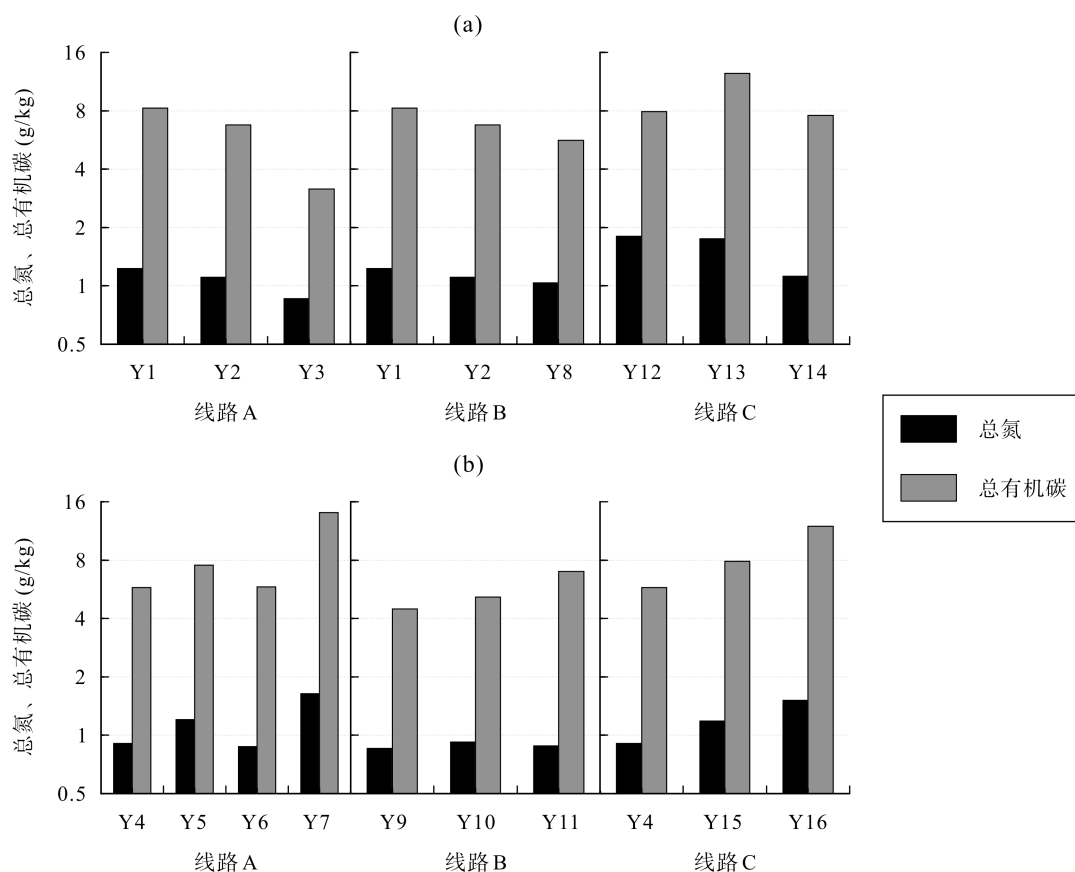


图2 研究区域土壤表层有机碳和总氮含量分布

Fig.2 Distribution of organic carbon and total nitrogen in the topsoils of the study area

(a) 采样线路前半段(靠内陆): 黄河干流及三角洲南部地区; (b) 采样线路后半段(靠海湾): 黄河分支流路及三角洲北部地区。

(a) The front part of the sampling lines (landward): the mainstream of the Yellow River and the southern region of the delta; (b) the latter part of the sampling lines (seaward): the course of the Yellow River and the northern region of the delta.

碳、氮量减少,导致土壤碳、氮含量呈梯度下降。其中Y12采样点出现较低的有机碳含量,是由于该点位于广饶县南部地区,农作物出现玉米-小麦轮作和蔬菜种植,施肥量要高于黄河三角洲北部地区,大量氮肥进入土壤促进微生物活动,使土壤有机碳的分解释放速率加快。刘兴华等^[10]对新户镇土壤碳、氮的研究指出,农耕区表层土壤碳、氮含量高于农田过渡区和未利用地区。然而内陆农耕区和滨海湿地、滩涂区域相对比的土壤碳、氮分布差异仍鲜有报道。

采样区域后半段,随着离海越近,受海水倒灌影响,出现洼地、湿地和滩涂,景观植物由棉花向碱蓬过渡,农业活动的影响减弱、海水侵蚀、泥沙冲积等自然过程影响加强。从图2b中可以看出线路A和线路C具有十分相似的碳、氮分布规律;而线路B的总氮含量基本不变,有机碳含量有升高趋势。由于线路A和线路C的后半段受到黄河现代沉积影响显著,因此土壤中的碳、氮分布规律可能受到黄河泥沙沉积的影响。黄河泥沙主要来源于青海东部的黄土地区,淤积物的肥力较高^[15],悬浮泥沙中有机质的含量多在0.43%~0.92%之间,平均值为0.79%,其中约有50%的有机质富集于 < 0.005 mm的细颗粒物中,并且黄河泥沙中 < 0.01 mm的颗粒物是黄土中的2倍^[16],由于细颗粒物质的运输距离较远,可在近海处发生沉积。如,在河口区由陆向海土壤黏粒含量升高^[17]。因此,土壤碳、氮等营养元素可能随细颗粒泥沙的沉积而富集在近海土壤中。同时,由于线路A和线路C末端位于滩涂、湿地地区,其常年积水的水位条件形成的厌氧环境和较低的有机质转换速率使碳、氮在此汇集^[18]。于君宝等^[3]对滨海湿地土壤养分的研究发现,表层土壤碳有向滩涂方向增高的趋势,推测可能受到海洋的外源输入影响。线路B末端(Y11)和线路A农田和湿地过渡区(Y6)较低的氮素水平是由于其土地利用方式为旱地荒地且线路B存在盐田,土壤通透性相对较好使氮的矿化能力增强^[19];同时Y6点位也表现出较低的有机碳含量,是由于此处植被以芦苇为主,芦苇根系发达,地下部分腐解导致土壤表层碳、氮的归还能力降低。

研究区间内土壤碳、氮的分布规律也可从其与土壤盐分关系间接推出(图3)。前半段黄河三角洲南部偏向内陆区域,含盐量与有机碳、总氮呈现出一定的负相关性,而在后半段支流路路和靠海区域则呈极显著($p < 0.01$)正相关关系。

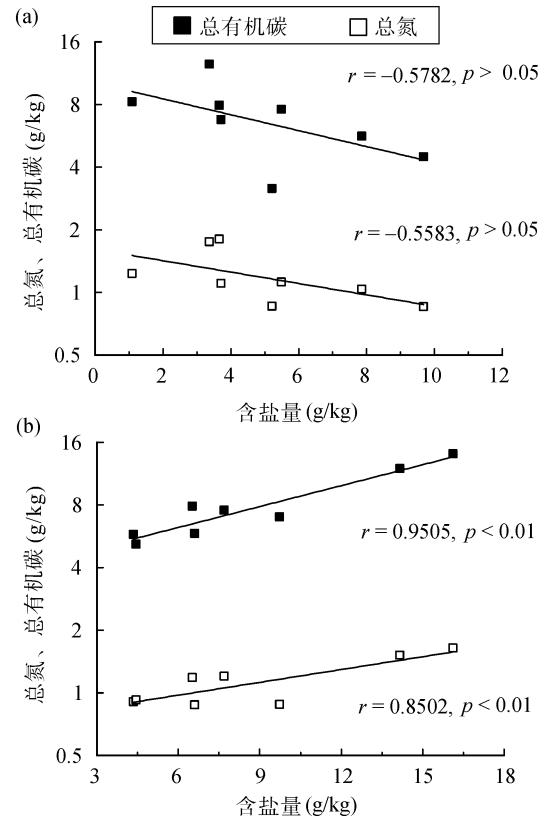


图3 黄河三角洲表层土壤盐分含量和营养元素的关系

Fig.3 The correlation between salinity and soil nutrient content in the topsoils of Yellow River Delta

(a) 采样线路前半段(靠内陆): 黄河干流及三角洲南部地区; (b) 采样线路后半段(靠海湾): 黄河分支流路及三角洲北部地区。

(a) The front part of the sampling lines (landward): the mainstream of the Yellow River and the southern region of the delta; (b) the latter part of the sampling lines (seaward): the course of the Yellow River and the northern region of the delta.

2.2 表层土壤碳氮比

土壤碳氮比是反映土壤氮素矿化能力和土壤有机质分解的重要指标。碳氮比在25以下则有利于微生物分解有机质,在释放养分的过程中增加土壤中的有效氮含量^[20]。如表2所示,黄河三角洲地区表层碳氮比值较低,说明区域内氮的积累速率要快于有机碳积累。我国东北松嫩平原玉米地土壤以及浙北太湖平原水稻土的碳氮比分别在11.6~12.6和3.6~13.5之间^[21-22],与这两个地区的农业土壤碳氮比相比较,黄河三角洲土壤在有机碳的积累上要明显低于东北地区,但与浙北水稻土相当。黄河三角洲地区蒸发量是降雨量的3倍多,因此,土壤氮素淋溶损失相对较小。同时,该地区土壤质地疏松,土壤通气性好,有利于有机碳的分解。因此,该地区的土壤环境条件总体上有利于氮素的积累但不利于土壤有机碳的积累^[23]。

从空间上来看, 两个离海不同距离的采样区间在土壤碳氮比上也有显著差异, 靠近内陆段的土壤碳氮比在3.6~7.1之间, 而靠近海湾段的土壤碳氮比在5.2~8.6之间(表2)。这主要是随着农业活动的减弱, 以及土壤pH和盐分含量升高, 土壤有机质的分解速率降低, 有助于土壤有机碳的积累。

2.3 典型土壤剖面中有机碳和总氮的分布

黄河三角洲地区土壤剖面碳、氮的研究工作较

少, 又多集中在湿地地区, 且剖面深度在50~80 cm左右^[3, 10, 24], 有关剖面特征层的描述及其对碳、氮积累的影响尚缺乏分析支撑。根据此次野外实际调查情况, 研究区域存在两种特殊发生层: 在黄河三角洲现代沉积区普遍分布着约10~30 cm厚度的红色夹黏层(Y4和Y10), 分布位置大体上在60 cm以下, 个别剖面分布位置较高, 在40 cm左右; 而在滨海滩涂地区表层土壤存在约5 cm厚的黑色泥炭层(Y7和Y12)。Y3和Y9采样点代表了其他一般的滨海盐化潮土剖面, Y12和Y13采样点代表了三角洲南部非现代沉积区耕作土壤的典型剖面。

从图4可以看出, 具有红色夹黏层的土壤剖面对黄河三角洲土壤剖面中下部碳、氮含量影响较大, 该特征层中碳、氮含量已接近表层土壤碳、氮含量。研究区域土壤剖面碳、氮含量与土壤黏粒(< 0.002 mm)成极显著正相关关系($r = 0.6934, p < 0.01$), 说明剖面碳、氮的富集受到黏粒含量的显著影响。另一方面, 夹黏层中游离铁氧化物以及蒙脱石、水云母、高岭石和绿泥石等黏土矿物含量相对较高, 容易与土壤有机碳形成团聚体, 对有机碳形成物理保护^[22,25]。具有黑色泥炭层的土壤剖面碳、氮主要富集在表层,

表 2 黄河三角洲表层土壤碳氮比
Table 2 C/N ratios of the topsoils in the Yellow River Delta

前半段采样点	C/N	后半段采样点	C/N
Y1	6.7	Y4	6.4
Y2	6.1	Y5	6.3
Y3	3.6	Y6	6.7
Y8	5.4	Y7	8.6
Y12	4.4	Y9	5.2
Y13	7.1	Y10	5.6
Y14	6.7	Y11	7.9
		Y15	6.7
		Y16	7.9

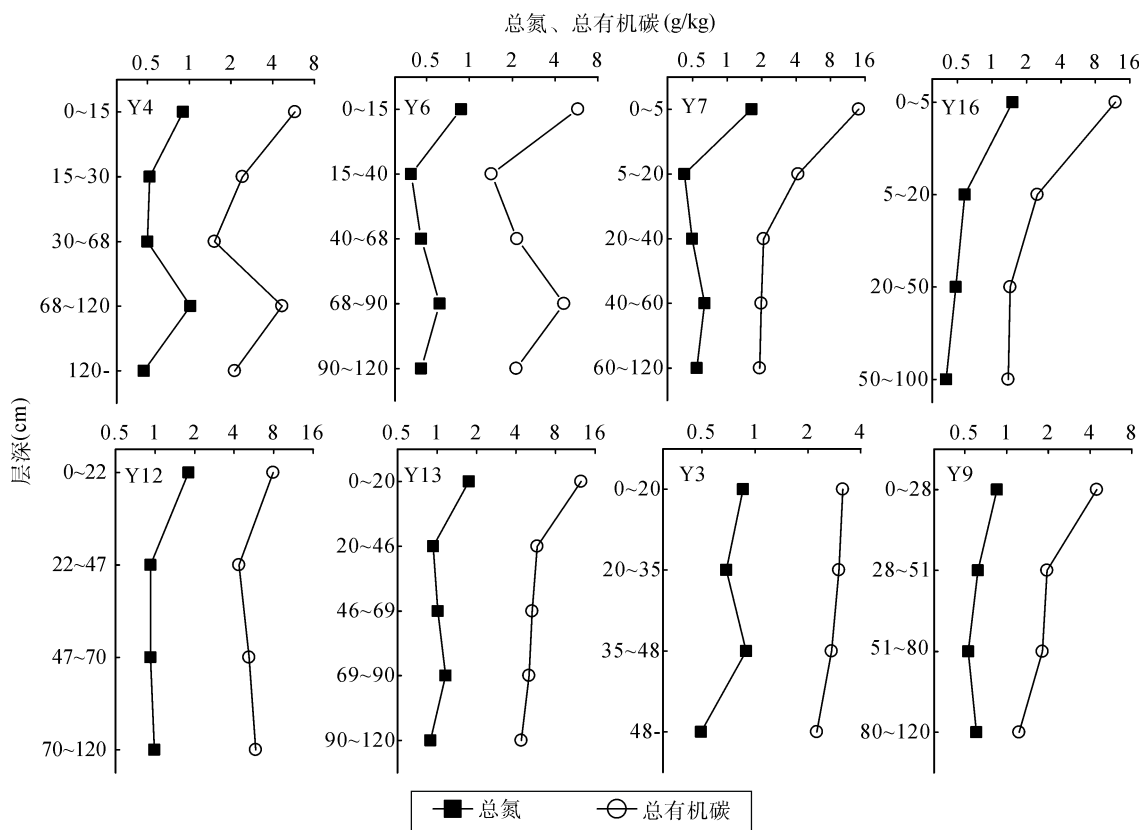


图 4 黄河三角洲土壤剖面中总氮和有机碳含量的变化趋势

Fig.4 Variation in content of total nitrogen and organic carbon in the soil profiles of the Yellow River Delta

这种剖面分布在地势低洼地区,如河口沼泽、滨海滩涂等。由于滩涂地区的碱蓬、芦苇等易于积累氮素^[26],其腐解后在长期渍水条件下形成泥炭层,使得大量碳、氮在滩涂或湿地土壤中封存。此外,由于滩涂处于潮间带,海水中夹带的原油、生物物质等可能也会对滩涂土壤中泥炭层的形成具有促进作用^[3,27]。Y12和Y13采样点位于广饶县南部,根据东营市第二次土壤普查资料^[8],该地区土壤以褐土为主,土壤发育良好,有机碳和氮素主要在耕作层聚集,表层以下土壤碳、氮变化不明显。表层土壤碳、氮的积累主要是由于长期耕作熟化形成的。Y3和Y9是黄河三角洲分布较广的盐化潮土剖面,尽管经过一定时期的耕作熟化,但土壤碳、氮在整个剖面未见有明显的差异,剖面整体养分含量不高。这可能是由于砂质土壤剖面整体通透性好,剖面碳、氮容易矿化损失;并且表层土壤植株密度低,植物无法吸收利用的过量氮素也很容易受地表径流和地下潜流的作用而流失。

3 结论及建议

(1) 黄河三角洲地区内陆和近海湾区域土壤表层有机碳和总氮在空间上具有不同的梯度分布规律,内陆区域有机碳和总氮含量向三角洲外围递减,而近海湾区域则为递增的规律。清水沟流路和刁口流路具有相似的碳、氮分布特征,但有别于非黄河流域行水地区。靠近内陆地区的土壤碳、氮积累主要受到耕作熟化过程的影响,而在近海湾地区可能主要受到黄河细颗粒泥沙的沉积以及长期渍水厌氧环境的影响。因此,耕种熟化及湿地生态系统封存是该地区土壤碳、氮增汇的主要途径。三角洲地区土壤碳氮比值总体较低,靠近海湾地区略高于内陆地区,区域内土壤环境条件总体上更倾向于氮素积累。

(2) 黄河三角洲土壤剖面碳、氮的分布明显受到土壤特征发生层的影响。现代沉积区土壤剖面中广泛分布的红色夹黏层对土壤碳、氮在剖面中的富集作用显著,近似于耕作层对土壤碳、氮的富集。河口滩涂地区泥炭层的发育对土壤有机碳和氮素的封存具有显著作用。因此,黄河三角洲土壤剖面中红土层的沉积可能是该区域土壤碳、氮封存的另一个关键因素。

(3) 黄河三角洲地区土壤碳、氮的分布明显受到现代沉积过程和土壤特性的影响,因此进一步结合黄河三角洲现代沉积历史和土壤剖面特征发生层(红土层、泥炭层等)深入开展典型海岸带地区陆地碳、氮的时空演变规律及转化过程,为评估海岸带

地区陆地碳、氮收支提供科学的数据支撑。

参考文献(References):

- [1] Cui B S, Zhang Q J, Zhang K J, Liu X H, Zhang H G. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China [J]. *Environ Pollut*, 2011, 159(5): 1297-1306.
- [2] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/土地覆盖变化研究现状与展望[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(1): 110-118. Wang Hong, Gong Peng, Liu Gao-huan. The review and prospect on land use and land cover change research in Yellow River Delta [J]. *J Nat Resour*, 2004, 19(1): 110-118 (in Chinese with English abstract).
- [3] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 谢文军, 毛培利, 吴春发, 董洪芳, 牟晓杰, 栗云召, 管博, 单凯. 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. Yu Jun-bao, Chen Xiao-bing, Sun Zhi-gao, Xie Wen-jun, Mao Pei-li, Wu Chun-fa, Dong Hong-fang, Mu Xiao-jie, Li Yun-zhao, Guan Bo, Shan Kai. The spatial distribution characteristics of soil nutrients in new-born coastal wetland in the Yellow River delta [J]. *Acta Sci Circums*, 2010, 30(4): 855-861 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王传远, 杨翠云, 孙志高, 杨玉玮, 瞿成利, 王允周. 黄河三角洲生态区土壤石油污染及其与理化性质的关系[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 214-217. Wang Chuan-yuan, Yang Cui-yun, Sun Zhi-gao, Yang Yu-wei, Qu Cheng-li, Wang Yun-zhou. Contamination characteristics and its relationship with physico-chemical properties of oil polluted soils in the Yellow River Delta swamp [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, 24(2): 214-217 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李庆梅, 侯龙鱼, 刘艳, 马风云. 黄河三角洲盐碱地不同利用方式土壤理化性质[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(6): 1132-1136. Li Qing-mei, Hou Long-yu, Liu Yan, Ma Feng-yun. Properties of saline-alkaline soil under different land use types in Yellow River Delta [J]. *Chinese J Eco-Agric*, 2009, 17(6): 1132-1136 (in Chinese with English abstract).
- [6] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 张杰, 夏家宝. 黄河三角洲滩地土壤颗粒形特征及其与土壤有机质的关系[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 134-138. Lü Sheng-qiao, Gao Peng, Geng Guang-po, Zhang Jie, Xia Jiang-bao. Characteristics of soil particles and their correlation with soil organic matter in lowlands of the Yellow River Delta [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, 25(6): 134-138 (in Chinese with English abstract).
- [7] 翁永玲, 宫鹏. 黄河三角洲盐渍土盐分特征研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2006, 42(6): 602-610. Weng Yong-ling, Gong Peng. Soil salinity measurements on the Yellow River Delta [J]. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 2006, 42(6): 602-610 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王金荣. 东营市土壤[M]. 东营: 东营市土壤肥料工作站, 1987: 19-104. Wang Jin-rong. *Soils in Dongying* [M]. Dongying: Dongying Workstation of Soil and Fertilizer, 1987: 19-104.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 中国农业

- 科技出版社, 2000: 1-813.
- Lu Ru-kun. The Conventional Methods of Agricultural Chemical Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 1-813 (in Chinese).
- [10] 刘兴华, 陈为峰, 段存国, 王凯, 王海翠. 黄河三角洲未利用地开发对植物与土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 204-208.
- Liu Xing-hua, Chen Wei-feng, Duan Cun-guo, Wang Kai, Wang Hai-cui. Effect of exploitation of unutilized land on ecological stoichiometry characteristics of plants and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the Yellow River Delta [J]. J Soil Water Conserv, 2013, 27(2): 204-208 (in Chinese with English abstract).
- [11] Balesdent J, Chenu C, Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage [J]. Soil Tillage Res, 2000, 53(3/4): 215-230.
- [12] Gregorich E G, Drury C F, Baldock J A. Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation [J]. Can J Soil Sci, 2001, 81(1): 21-31.
- [13] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 787-796.
- Yang Jing-cheng, Han Xing-guo, Huang Jian-hui, Pan Qing-min. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices [J]. Acta Ecol Sinica, 2003, 23(4): 787-796 (in Chinese with English abstract).
- [14] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, 494(7438): 459-462.
- [15] 龚子同, 张甘霖, 王吉智, 张累德, 袁大刚, 阮心玲. 中国的灌溉人为土[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 4-10.
- Gong Zi-tong, Zhang Gan-lin, Wang Ji-zhi, Zhang Lei-de, Yuan Da-gang, Ruan Xin-ling. Formation and taxonomy of irrigation-silted soils in China [J]. Arid Zone Res, 2005, 22(1): 4-10 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈静生, 张宇, 于涛, 何大伟. 对黄河泥沙有机质的溶解特性和降解特性的研究——再论黄河水的 COD 值不能真实反映其污染状况[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 1-5.
- Chen Jing-sheng, Zhang Yu, Yu Tao, He Da-wei. A study on dissolution and bio-degradation of organic matter in sediments from the Yellow River [J]. Acta Sci Circumst, 2004, 24(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [17] 冯秀丽, 沈渭铨, 杨荣民, 杨中卿. 现代黄河口区沉积环境与沉积物工程性质的关系[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(S3): 21-28.
- Feng Xiu-li, Shen Wei-quan, Yang Rong-min, Yang Zhong-qing. Relation between the geotechnical character of sediment and the sedimentary environment of the modern Huanghe estuary area [J]. J Ocean Univ Qingdao, 1994, 24(S3): 21-28 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1594-1599.
- Dong Hong-fang, Yu Jun-bao, Sun Zhi-gao, Mu Xiao-jie, Chen Xiao-bing, Mao Pei-li, Wu Chun-fa, Guan Bo. Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River estuary tidal flat wetland [J]. Environ Sci, 2010, 31(6): 1594-1599 (in Chinese with English abstract).
- [19] Pathak H, Rao D L N. Carbon and nitrogen mineralization form added organic matter in saline and alkali soils [J]. Soil Biol Biochem, 1998, 30(6): 695-702.
- [20] Paul E A, Clark F E. Dynamics of residue decomposition and soil organic matter turnover. In: Soil Microbiology and Biochemistry [M]. San Diego: Academic Press, 1989: 115-130.
- [21] 张春华, 王宗明, 居为民, 任春颖. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1407-1414.
- Zhang Chun-hua, Wang Zong-ming, Ju Wei-min, Ren Chun-ying. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt [J]. Environ Sci, 2011, 32(5): 1407-1414 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王加恩, 郑洁, 康占军, 胡艳华, 潘卫丰, 沈晓春, 来红. 浙北典型稻作区近30年表层土壤碳氮含量变化[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1191-1196.
- Wang Jia-en, Zheng Jie, Kang Zhan-jun, Hu Yan-hua, Pan Wei-feng, Shen Xiao-chun, Lai Hong. The content change of carbon and nitrogen in surface soil of typical rice area in Northern Zhejiang [J]. Ecol Environ Sci, 2010, 19(5): 1191-1196 (in Chinese with English abstract).
- [23] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1718-1725.
- Zhou Jian-bin, Chen Zhu-jun, Li Sheng-xiu. Contents of soil microbial biomass nitrogen and its mineralized characteristics and relationships with nitrogen supplying ability of soils [J]. Acta Ecol Sinica, 2001, 21(10): 1718-1725 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 孙万龙. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1339-1445.
- Wang Ling-ling, Sun Zhi-gao, Mu Xiao-jie, Sun Wan-long. Spatial distribution of nitrogen in different wetlands' soils in intertidal flat of Yellow River estuary [J]. Chinese J Soil Sci, 2011, 42(6): 1339-1445 (in Chinese with English abstract).
- [25] Amézketa E. Soil aggregate stability: A review [J]. J Sustain Agric, 1999, 14(2/3): 83-151.
- [26] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 梁兆攀, 张玉霞. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494-1498.
- Bai Jun-hong, Deng Wei, Zhu Yan-ming, Luan Zhao-qing, Zhang Yu-xia. Spatial distribution characteristics and ecological effects of carbon and nitrogen of soil in Huolin River catchment wetland [J]. Chinese J Appl Ecol, 2003, 14(9): 1494-1498 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李海明, 郑西来, 刘宪斌. 渤海滩涂沉积物中石油污染物的迁移-转化规律研究[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 9-12.
- Li Hai-ming, Zheng Xi-lai, Liu Xian-bin. Regulation of movement and transformation of oil in sediment on tidal flat of Bohai Bay [J]. Mar Environ Sci, 2005, 24(3): 9-12 (in Chinese with English abstract).