

DOI:10.13205/j.hjgc.202306004

葛嘉欣, 崔步礼, 王晓杰, 等. 潮沟形态对潮滩湿地土壤有机碳空间分布的影响[J]. 环境工程, 2023, 41(6): 23-31.

潮沟形态对潮滩湿地土壤有机碳空间分布的影响

葛嘉欣^{1,2,3} 崔步礼¹ 王晓杰^{2,3} 谢宝华^{2,3} 赵明亮^{2,3} 于冬雪⁴ 于洋^{2,3}

宋维民^{2,3} 马海青^{2,3} 张孝帅^{2,3} 韩广轩^{2,3*}

(1. 鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 山东 东营 257500; 4. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 土壤有机碳是潮滩湿地生态系统的主要碳库。以 1 条典型天然潮沟为研究对象, 通过划分潮沟发育等级并计算潮沟形态特征指数, 分析潮沟形态特征空间分布特点; 运用地统计学方法探究潮滩湿地土壤有机碳空间分布特点, 及潮沟形态特征对土壤有机碳空间分布的影响。结果表明: 潮沟形态特征具有明显的空间异质性特点, 潮沟在中潮滩比较发育, 其密度、曲率与分叉率均大于低潮滩和高潮滩; 潮沟长度随着潮沟发育等级的增加而逐渐增加, 而潮沟曲率随着潮沟发育等级的增加而逐渐减小。空间插值结果显示: 0~10 cm 土壤有机碳含量最低值出现在潮沟较发育的中潮滩, 10~20 cm 土壤有机碳含量呈由海向陆逐渐增加的趋势, 并呈条带状的空间分布特点。在低潮滩, 三级潮沟土壤有机碳平均值显著大于一级潮沟; 在中潮滩, 二级潮沟土壤有机碳平均值显著大于三级潮沟和一级潮沟; 高潮滩土壤有机碳含量与潮沟发育等级无显著相关性。随着潮沟侧向距离的增加, 0~10 cm 土壤有机碳含量在低潮滩与中潮滩逐渐增加; 而中潮滩 10~20 cm 土壤有机碳含量随着潮沟侧向距离的增加而逐渐减少; 高潮滩土壤有机碳含量与潮沟侧向距离无显著相关性。潮沟形态空间分布异质性是导致潮滩湿地土壤有机碳含量空间分布差异的重要原因。因此, 潮滩湿地土壤碳库的精确估算需要关注潮沟形态的影响。

关键词: 土壤有机碳; 潮沟形态; 潮滩湿地; 潮沟发育等级; 潮沟侧向距离

EFFECTS OF TIDAL CREEK MORPHOLOGY ON SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON IN SOIL IN TIDAL WETLAND

GE Jiaxin^{1,2,3}, CUI Buli¹, WANG Xiaojie^{2,3}, XIE Baohua^{2,3}, ZHAO Mingliang^{2,3}, YU Dongxue⁴, YU Yang^{2,3}, SONG Weimin^{2,3}, MA Haiqing^{2,3}, ZHANG Xiaoshuai^{2,3}, HAN Guangxuan^{2,3*}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264003, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 3. Yellow River Delta Field Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem, Chinese Academy of Science, Dongying 257500, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soil organic carbon is a major carbon pool in tidal wetland ecosystems. By dividing the level of the tidal creek and calculating its morphological characteristic index, the spatial distribution characteristics of the typical tidal creek system were analyzed, taking a typical natural tidal channel as the research object. The spatial distribution characteristics of soil organic

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金“黄河口盐沼湿地固碳关键过程、调控机理及增汇潜力研究”(U2106209); 国家自然科学基金“黄河河口水文-地貌-生态系统不平衡演变机理与多维调控”(U2243207)

第一作者: 葛嘉欣(1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为滨海生态与环境。1677261079@qq.com

* 通信作者: 韩广轩(1978-), 男, 研究员, 主要研究方向为滨海湿地生态学。gxhan@yic.ac.cn

carbon were analyzed by geostatistical methods. In addition, the effects of morphological characteristics of the tidal creek on the spatial distribution of soil organic carbon were explored. The results showed that there was obvious spatial heterogeneity in the morphological characteristics of the tidal creek. In the middle tidal flats, the connectivity of the tidal creek network was higher, and the density, curvature and bifurcation ratio were also higher than that in other tidal zones. The tidal creek length gradually increased with the increase of tidal creek development grade, while the tidal creek curvature gradually decreased with the increase of tidal creek development grade. The spatial interpolation results showed that the lowest soil organic carbon in 0 to 10 cm soil layer occurred in the middle tidal flats where tidal creeks were more developed, and within the 10~20 cm soil layer, soil organic carbon showed a gradually increasing trend from sea to land, and showed a strip-shaped spatial distribution characteristic. In the low tidal flats, the mean value of soil organic carbon in a third-order creek was significantly greater than that in a first-order creek. In the middle tidal flats, the mean value of soil organic carbon in a second-order creek was significantly greater than that in a third-order and a first-order creek. The soil organic carbon of the high tide flats was not significantly correlated with the tide creek development level. Within the 0 to 10 cm soil layer, the soil organic carbon gradually increased with increasing distance to the tidal creek in low and middle tidal flats. Within the 10 to 20 cm soil layer, the soil organic carbon gradually decreased with increasing distance to tidal creek in the middle tidal flats. However, there was no correlation between the soil organic carbon and the distance to the tidal creek in high tidal flats. The spatial heterogeneity in the morphological characteristics of the tidal creek was one of the important factors of spatial differences in soil organic carbon content in the tidal wetland. Therefore, morphology changes in tidal creeks should be considered in order to accurately estimate the soil carbon pools in tidal wetlands.

Keywords: soil organic carbon; tidal creek morphology; tidal wetland; tidal creek development grade; distance to tidal creek

0 引言

滨海湿地是介于海洋和陆地之间^[1]、受水陆交互作用形成的独特的生态系统^[2]。由滨海湿地生态系统捕获的碳,被称为滨海蓝碳,这部分碳对降低大气 CO₂、缓解全球气候变化具有不可替代的作用^[3,4]。海岸带蓝碳生态系统所占面积不到海洋面积的 0.5%,但其所固存的碳含量是海洋沉积物碳固存量的 50%^[3]。潮滩湿地是我国滨海湿地中面积最大的海岸带蓝碳生态系统^[5],也是地球上的高生产力生态系统之一^[6]。据统计,我国海岸带蓝碳生态系统的年碳埋藏量为 0.35~0.84 t,其中潮滩湿地约占 80%,是我国蓝碳碳汇的主要贡献者^[7]。土壤是潮滩湿地中最大的有机碳库,是其碳收支的核心^[8]。潮滩湿地的土壤碳主要有 2 个来源:1) 潮滩土壤长期处于淹水厌氧状态,植被生长代谢过程的产物难以在这种环境中被转化和分解,以腐殖质等有机质形式不断沉积形成稳定的土壤碳^[9];2) 潮汐及河流中悬浮颗粒物有机碳的沉积^[10]。土壤碳库对全球变化敏感的主要组分是土壤有机碳^[11],其较小的变化幅度就能导致大气 CO₂ 浓度的较大波动,进而可加剧或减缓全球变暖的趋势^[12],同时湿地土壤有机碳含量对湿地生态系统的生产力也有显著影响^[13]。

潮沟是发育于潮滩上活跃的地貌单元,是潮水和泥沙输入与输出的通道^[14],也是潮滩与海洋进行物

质和能量交换的主要渠道。潮沟形态特征在一定程度上决定了潮间带不同位置的水量分布特征。已有研究表明,潮沟形态与淹水频率和累积淹水时长有显著的相关性^[15]。潮沟网络体系中水文背景的差异,导致盐离子分布、土壤氧化还原状况、土壤理化性质及微生物群落结构等均呈明显的梯度变化规律,从而对滨海湿地土壤碳循环产生重要影响^[16-18],这也是土壤中固存碳能力产生差异的本质原因^[19]。

黄河三角洲是我国暖温带保存最完整的湿地生态系统,有广阔的潮间带。以往对黄河三角洲湿地土壤有机碳的研究比较丰富,主要包括土壤有机碳含量沿水盐梯度变化特征^[20-22]、植被群落对土壤有机碳的影响^[23,24]、土壤有机碳储量估算等^[25,26],而对潮沟形态和土壤有机碳含量的关系研究较少。明确滨海湿地土壤有机碳空间分布特征及其机制,对于准确估算潮滩土壤碳库增量,正确评价潮滩土壤有机碳在陆地生态系统碳循环、全球碳循环及全球变化中的作用具有重要意义。因此,本研究选择 1 条典型天然潮沟为研究对象,通过野外调查和采样测定,分析潮沟分级特征并计算潮沟形态指数、研究土壤有机碳空间分布特征、探究潮沟形态对土壤有机碳空间分布的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区(118°33'E—119°

20°E, 37°35'N—38°12'N)地处山东省东营市,属于东亚大陆性季风气候,年平均气温为 11.7~12.6 °C,无霜期 196 d,年平均蒸发量 1962.1 mm,年平均日照时数 2590~2830 h,年平均降水量 555.9 mm,降水主要集中在夏季。潮汐属于不正规半日潮,平均高潮间隙为 10~11 h,平均大潮潮差 1.06~1.78 m,小潮潮差为 0.46~0.78 m。常年洪涝面积约为 2.11×10^7 ha,占该区域湿地总面积 63%以上。本试验布设于黄河三角洲黄河南岸 1 条典型、完整,且具有主次支流的天然潮沟系统(图 1),研究区总面积 1.22 km²,其中潮沟总面积为 0.20 km²,土壤面积为 1.02 km²。土

壤类型以滨海盐渍土为主,自然植物从海洋到陆地呈带状分布,分别为光滩(*Bare flat*)—盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、盐地碱蓬—芦苇(*Phragmites australis*)群落交错带、盐地碱蓬—柽柳(*Tamarix chinensis*)—芦苇群落交错带。结合高程、潮汐水位及植被分布状况,将高程较低且受潮汐淹没频率较高的光滩—盐地碱蓬分布区划分为低潮滩;将盐地碱蓬—芦苇群落交错带划分为中潮滩;将高程较高且受潮汐淹没频率较低的盐地碱蓬—柽柳—芦苇群落交错带划分为高潮滩。其中低、中、高潮滩面积分别为 0.28, 0.40, 0.54 km²。

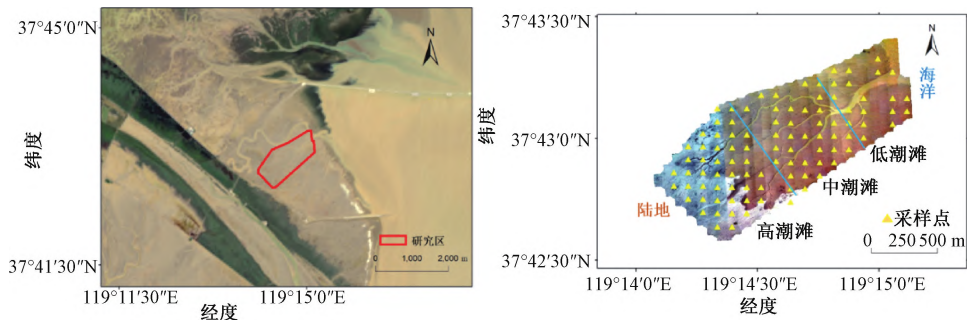


图 1 研究区采样点分布

Figure 1 Distribution of the sampling sites in the study area

1.2 潮沟形态特征及参数的定义

本研究遥感影像由大疆精灵 4 无人机于 2021 年 6 月拍摄,主航向重叠率 80%,旁向重叠率为 78%,飞行高度 150 m。运用 ArcMap 10.8 软件进行潮沟提取和有机碳空间分析。

参照 Horton-Shrahler 的分级原则,一级潮沟定义为末梢不再有分叉的潮沟,由同级潮沟汇集而成的潮沟其等级增加一级,由不同等级潮沟相汇集而成的潮沟,其潮沟等级定义为汇入潮沟等级最高者^[27,28]。

潮沟长度(L),指潮沟中轴线的长度。

潮沟密度(D)是潮沟在滩面上发育程度的重要指标之一,通常用一定区域潮滩内所有潮沟的总长度与潮滩面积的比值来表示,计算见式(1)。

$$D = \sum L/A \quad (1)$$

式中: D 为潮沟密度,km/km²; $\sum L$ 为单位面积潮滩内所有潮沟的总长度,km; A 为潮滩面积,km²。

潮沟分叉率(Y)是反映潮沟发育程度的指标之一,通常用单位面积潮滩上的潮沟交汇点数量来表示,计算见式(2)。

$$Y = \sum N/A \quad (2)$$

式中: Y 为潮沟分叉率,个/km²; $\sum N$ 为潮滩上潮沟交汇点的个数。

潮沟曲率(r)反映潮沟的弯曲程度,通常用潮沟的长度与潮沟两端之间直线距离的比值来表示,当曲率为 1 时,说明潮沟呈直线发育。曲率越大,表示潮沟弯曲程度越大,计算见式(3)。

$$r = L/L' \quad (3)$$

式中: r 为潮沟曲率; L' 为潮沟两端的直线距离,km。

1.3 土壤样品采集和指标测定

在 1.22 km² 研究区内进行网格式取样,每个网格尺寸为 100 m×100 m,研究区被划分为 112 个网格,考虑实际可操作性及潮沟水系的影响,剔除落在大面积为潮沟水域以及边界处非研究区的网格,最终在 99 个网格内采集土样(图 1)。2021 年 11 月进行土壤样品的采集,在每个网格的中心区域随机设 3 个样点,采集 0~10, 10~20 cm 2 个深度的土壤样品,将 3 个样点的同层土壤均匀混合为 1 份土样,共采集 198 份土样。土壤样品经风干研磨过筛处理后,加入 1 mol/L 的 HCl 充分反应,离心 15 min 后去除上层清液,样品烘干重新过 100 目筛,包样送元素分析仪测定。

1.4 数据分析

利用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件进行数据整理与统计分析。运用 Kolmogorow-Smirnow (K-S) 检验土壤有机碳数据正态性,结果显示数据符合正态分布。借助 ArcMap10.8 的空间分析工具对土壤有机碳指标进行 kriging 空间插值分析。利用单因素方差 (One-way ANOVA) 分析对比在不同潮沟形态下土壤有机碳含量的差异性 (显著性检验 $P < 0.05$)。采用 Sigmaplot 14.0 进行数据图的绘制。

2 结果

2.1 潮沟分级与形态特征

研究区内潮沟系统包括 3 个潮沟等级 (图 2), 三级潮沟主要分布于低潮滩, 二级潮沟主要分布于中潮滩, 一级潮沟主要分布于高潮滩区域。通过计算潮沟形态特征指数 (表 1) 可知: 中潮滩潮沟发育状况最好。

3 个区域的潮沟分布特征具有一定的空间异质性, 按照潮沟数量排序为中潮滩 > 高潮滩 > 低潮滩。三级潮沟由低潮滩发育至中潮滩, 并在此发育为更低等级的二级潮沟与一级潮沟。二级潮沟在整个研究区内均匀分布, 但集中发育在中潮滩。高潮滩分布的一级潮沟数量最多, 其次是中潮滩, 低潮滩分布的一级潮沟数量最少。

在潮沟长度和潮沟曲率上, 低潮滩 (图 3a)、中潮滩 (图 3b) 和高潮滩 (图 3c) 3 个区域各级潮沟长度平均值均为一级潮沟最小, 其次是二级潮沟, 低潮滩和中潮滩内三级潮沟长度最长; 而各级潮沟曲率的变化趋势与潮沟长度变化趋势相反, 3 个区域各级潮沟曲率平均值均为一级潮沟最大, 其次是二级潮沟, 低潮滩和中潮滩内三级潮沟曲率最小。潮沟长度随着潮

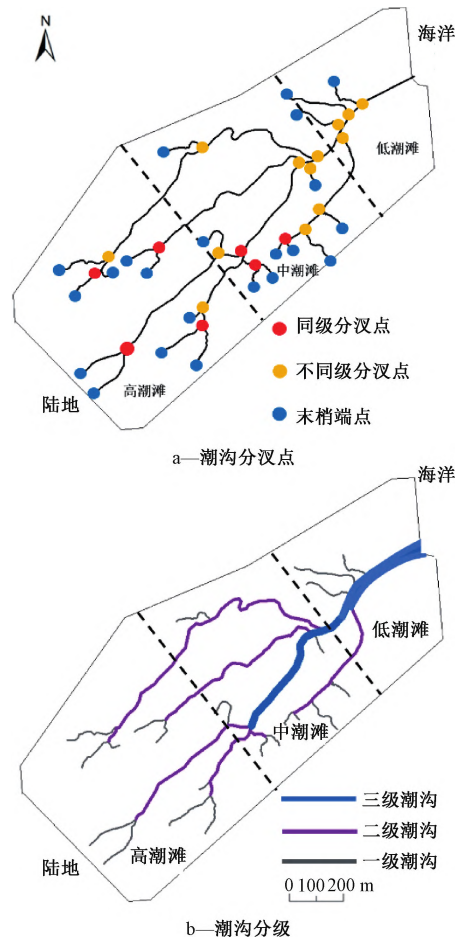


图 2 潮沟形态空间分布示意

Figure 2 Spatial distribution of tidal creek morphology

表 1 潮沟形态特征指数

Table 1 Tidal creek morphological characteristic indexes

潮滩	潮沟密度/ (km/km^2)	潮沟曲率	潮沟分汊率/ ($\text{个}/\text{km}^2$)
低潮滩	4.57	1.11	14.20
中潮滩	8.40	1.26	27.54
高潮滩	5.10	1.09	11.17

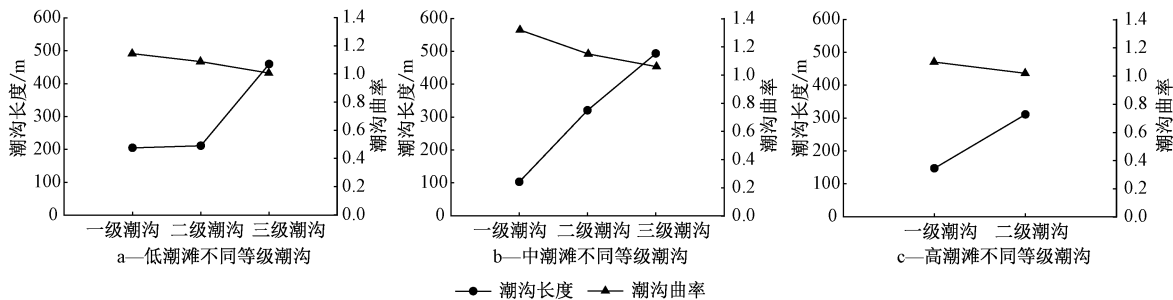


图 3 不同发育等级潮沟的形态特征

Figure 3 Morphological characteristics of different developmental levels of tidal creek

沟发育等级的增加而逐渐增加, 而潮沟曲率随着潮沟发育等级的增加而逐渐减小。

2.2 土壤有机碳空间分布特征

土壤有机碳含量整体呈条带状的空间分布特征

(图 4)。0~10 cm 深度土壤有机碳含量均值为 (1.79 ± 0.37) g/kg,在中潮滩较低,在高潮滩较高,低、中、高潮滩均值分别为 (1.75 ± 0.33) , (1.66 ± 0.40) , (1.91 ± 0.32) g/kg(图 4a);10~20 cm 深度土壤有机碳含量均值为 (1.91 ± 0.40) g/kg,从低潮滩到高潮滩逐渐增加,由海到陆呈明显的条带状空间分布特点,低、中、高潮滩均值分别为 (1.67 ± 0.36) , (1.88 ± 0.32) , (2.04 ± 0.41) g/kg(图 4b)。

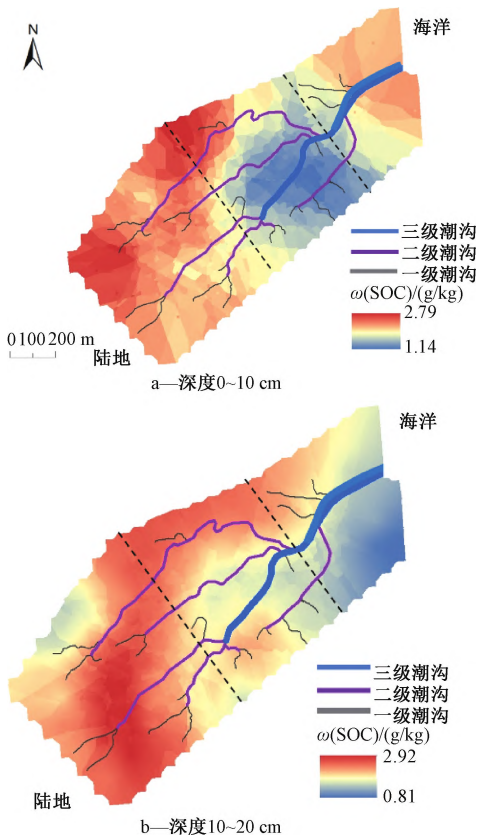


图 4 土壤有机碳含量空间分布

Figure 4 Spatial distribution of soil organic carbon

2.3 潮沟发育等级对土壤有机碳空间分布的影响

在低潮滩的深度 0~10 cm 土层中,三级潮沟土壤有机碳含量(图 5a)显著高于一级潮沟($P < 0.05$),而二级潮沟与三级潮沟和一级潮沟土壤有机碳含量均无显著差异;低潮滩深度 10~20 cm 土层中,不同等级潮沟下的土壤有机碳含量均无显著差异(图 5a)。在中潮滩 0~10 cm 土层中,二级潮沟土壤有机碳含量显著高于三级潮沟($P < 0.05$),而在一级潮沟与三级潮沟之间无显著差异;中潮滩 10~20 cm 土层中,二级潮沟土壤有机碳含量显著高于一级潮沟($P < 0.05$),而三级潮沟土壤有机碳含量与一级潮沟和二级潮沟的土壤有机碳含量无显著差异(图 5b)。

不同等级潮沟下土壤有机碳含量在高潮滩的 2 层土壤中均无显著差异(图 5c)。

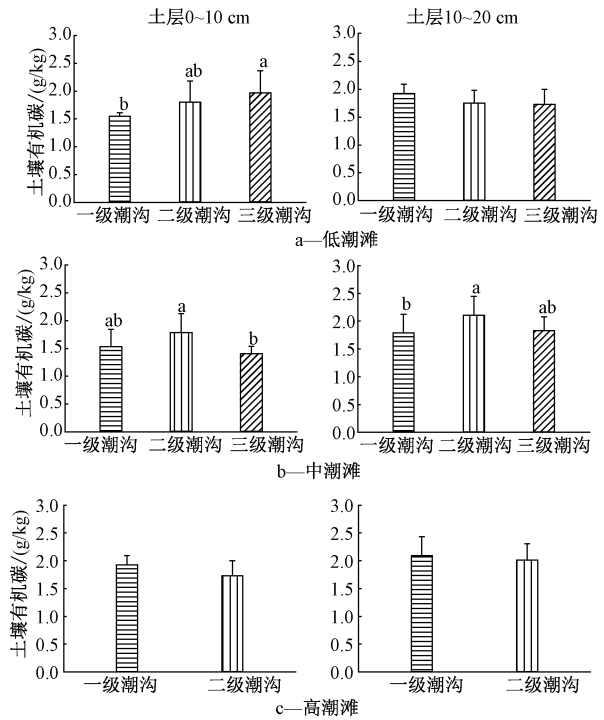


图 5 不同发育等级潮沟 0~10,10~20 cm 深度土壤有机碳含量变化
Figure 5 Changes in soil organic carbon content at 0 to 10 cm and 10 to 20 cm for different developmental levels of tidal creek

2.4 潮沟侧向距离对土壤有机碳空间分布的影响

研究区潮滩湿地土壤有机碳含量均值为 $(1.79 \pm 0.37) \sim (1.91 \pm 0.40)$ g/kg。在低潮滩,0~10 cm 深度土壤有机碳含量与潮沟侧向距离无显著相关性(图 6a),10~20 cm 深度土壤有机碳含量则随着潮沟侧向距离的增大而减小,呈显著负相关(图 6a, $P < 0.01$)。在中潮滩,0~10 cm 土壤有机碳含量随着潮沟侧向距离增大而增加,两者呈显著正相关(图 6b, $P < 0.01$),而 10~20 cm 土壤有机碳含量随着潮沟侧向距离的增大而减小,呈显著负相关(图 6b, $P < 0.01$);高潮滩 2 层土壤有机碳含量与潮沟侧向距离均无显著相关性(图 6c)。

3 讨论

3.1 潮沟形态空间分布特征

潮沟是在潮水与滩面相互作用下逐渐形成的地貌单元^[29],其形态特征反映潮流的动力特征及滩面组成特征。本研究的潮沟可分为 3 个潮沟等级,通过对潮滩区块的划分及潮沟形态指标的计算,发现潮沟的形态特征呈明显的等级差异性与空间异质性^[30]。较高等级的三级潮沟主要分布于低潮滩,二级潮沟主

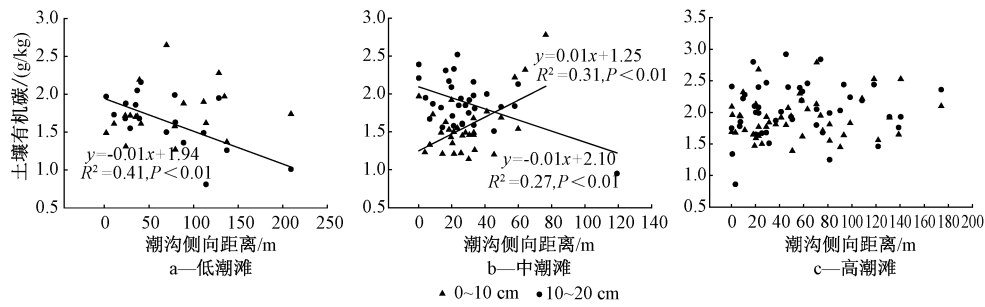


图6 潮沟侧向距离与土壤有机碳空间分布的关系

Figure 6 Relationship between tidal creeks lateral distance and spatial distribution of soil organic carbon

要分布于中潮滩,而高潮滩主要分布较低等级的一级潮沟,主要是因为低潮滩较大的净流量与较宽阔的潮滩为潮沟等级的提升提供了发育条件^[31]。本研究发现,中潮滩的潮沟密度最大,其次是高潮滩,低潮滩潮沟密度最小。在高强度水动力作用下,低潮滩近海潮沟难以建立稳定的分支网络结构,导致低潮滩潮沟密度较低。随着滩面表面高程梯度的升高,潮汐水动力减弱,促进了潮沟分支的发展,导致中潮滩潮沟支流密度显著增加^[32]。潮汐水动力在高潮滩减弱至最小,甚至有时无法抵达至高潮滩,高潮滩受潮水扰动作用最小,因此高潮滩的潮沟密度也较小。同时,中潮滩潮沟弯曲程度最大,其次是低潮滩,高潮滩潮沟弯曲程度最小。在海水冲刷过程中,发育于低潮滩的潮沟所受的侵蚀作用要强于中潮滩,这是由于潮沟归槽水位的高低差异所致。中潮滩的归槽水位较低潮滩更低,故在落潮时会阻碍潮水排出,导致潮沟在中潮滩上的发育更加曲折;反之,低潮滩由于拥有更高的归槽水位,在潮汐过程中受影响更大,潮汐带来的冲击力较大,所以位于低潮滩的潮沟发育相较于中潮滩更加顺直。此外,在地貌高程等因素的影响下,导致潮水到达中潮滩时速率明显降低,甚至无法漫出潮沟,故中潮滩的潮沟曲率要显著高于低潮滩^[33]。高潮滩所受潮汐扰动作用最小,因此潮沟发育等级最低,潮沟的弯曲程度也最小。同时,中潮滩潮沟分汊率最大,其次是低潮滩,高潮滩潮沟分汊率最小。在潮汐作用的周期性影响下,位于中潮滩的潮沟为尽快宣泄滩面水流而发育出较多与主潮沟连接的一、二级小潮沟,而位于低潮滩的潮沟由于潮水流速较大而直接退回海洋,因此中潮滩发育的潮沟的分汊率较高,而位于低潮滩的潮沟分汊率较低^[30]。地表高程随着距海距离的增加而不断增加,高潮滩受到的潮汐作用不断减小,潮沟分汊率也随之降低。

3.2 潮沟形态对土壤有机碳空间分布的影响

由于受入海径流、潮流和地形等因素的影响,潮沟区微环境相对复杂,其研究具有典型性,同时也有很大的不确定性^[34]。本研究对潮滩土壤有机碳含量进行空间分析,结果显示:深度0~10 cm土壤有机碳含量为1.14~2.79 g/kg,最低值出现在中潮滩,而高潮滩、低潮滩及中潮滩西北部3个区域土壤有机碳含量相对较高;10~20 cm土壤有机碳含量为0.81~2.92 g/kg,由低潮滩向高潮滩逐渐增加直至出现峰值。潮沟可带来一定量的外源有机质沉积在土壤表层,但潮水对地表的直接冲刷也会带走表层的有机物质^[35]。中潮滩的潮沟密度及潮沟分汊率均大于低潮滩与高潮滩,潮流携带表层土壤有机碳外流^[19],导致深度0~10 cm土壤的有机碳含量在中潮滩最低。淹水频率是影响潮滩湿地固碳潜力的关键环境因子之一^[36],而地上植物凋落物、地下根系的残体和根系分泌物是潮滩土壤有机碳含量的主要来源^[37-39]。随着高程的不断增加,高潮滩经历了更长时间的演替,植被由先锋物种逐渐向较成熟的大型盐生植物转变^[40];同时在地貌高程的影响下,潮汐对高潮滩的影响减小,淹水频率逐渐降低,盐度胁迫得到一定加强^[20],有利于大型盐地植被在高潮滩定植,能将更多的碳转化为生物量而输入至土壤中^[35],因此高潮滩土壤有机碳含量最大;而低潮滩与高潮滩和中潮滩相比,受到的潮汐扰动更加频繁,淹水频率更高,不利于植被定植生长,因此土壤在低潮滩接收到的有机质相对更少,另外,低潮滩在潮汐强烈的冲刷作用下,使土壤中有机碳不易滞留^[40],因此土壤有机碳含量在低潮滩最少。这就出现了如10~20 cm土壤有机碳含量插值结果所示的情况:土壤有机碳含量从低潮滩向高潮滩逐渐增加,也与大多学者的研究结果^[40,41]相一致。

3.3 潮沟发育等级对土壤有机碳空间分布的影响

处于不同发育阶段的潮沟,其形态特征具有一定差异性,通过直接与间接作用,影响潮滩土壤有机碳含量的空间分布特征。不同类型的潮滩或者同一潮滩的不同位置,有机碳输入的控制因素不同^[42,43]。河口区的潮滩,由于受到海洋的强烈影响,加之低潮滩较低的植被覆盖度和较少的地上生物量,因此低潮滩沉积物中的有机碳可能主要来自外源输入^[44]。三级潮沟较一级潮沟长度更长,潮沟断面流量更大,由于三级潮沟直接与海洋相连,因此其受到的海水冲刷作用更强,潮流输送到潮滩土壤中的有机碳含量也更多^[44],所以在低潮滩表层土壤中,三级潮沟流经土壤中的有机碳含量显著高于一级潮沟。中潮滩相较于低潮滩,受潮汐的侵蚀沉积作用影响相对更小,盐度胁迫得到一定加强^[20],中潮滩更有利于植被定植。潮沟形态特征会在一定程度上影响区域的水文特征和水盐条件^[45],进而影响土壤水盐和养分,影响植物的生长和分布^[46],而植物的生长和分布状况也会影响土壤的养分状况。三级潮沟较二级潮沟长度更长,发育更顺直,潮沟断面更大,潮流向侧面的侵蚀能力更强,这种生长环境更适合于根系入土浅、耐盐、繁殖力强的盐地碱蓬生存。而二级潮沟较三级潮沟,其宽度变窄、曲率变大,对潮滩的侵蚀冲刷能力减弱,更有利于根系发达的挺水植物或草本植物生存^[45],可将更多的碳输入至土壤中^[35],使土壤有机碳含量增加。因此在中潮滩0~10 cm土层中,二级潮沟流经的土壤有机碳含量显著高于三级潮沟。而在中潮滩10~20 cm土层中,二级潮沟流经的土壤有机碳含量显著高于一级潮沟,这可能与植被地下生物量有关。已有研究表明,土壤有机碳储量随着植被根系密度的增加而呈线性增加的趋势^[47,48]。而高潮滩受到潮汐的侵蚀沉积作用影响最小,潮水有时甚至不能漫出潮沟,因此潮沟发育等级对高潮滩土壤有机碳含量影响不显著。

3.4 潮沟侧向距离对土壤有机碳空间分布的影响

在低、中、高潮滩,土壤有机碳含量与潮沟侧向距离的相关性不同。本研究中,随着潮沟侧向距离的增加,土壤有机碳含量在低、中潮滩均发生显著变化,而高潮滩土壤有机碳含量与潮沟侧向距离无显著相关性。潮水或潮流对养分的携带输送作用对土壤有机碳的堆积和积累具有重要贡献^[44],同时潮水漫滩时也会将土壤有机碳含量的空间差异显著降低,潮水的

养分输送作用减小其空间分布的差异性^[49]。因此在潮流强烈的均质化影响作用下,低潮滩0~10 cm土壤有机碳含量与潮沟侧向距离无相关性;而低潮滩的10~20 cm土层有机碳含量与潮沟侧向距离呈显著负相关,可能是因为潮水携带输送的养分被此层土壤吸收^[15],因此越靠近潮沟,土壤淹水频率越高,土壤有机碳含量也越高。中潮滩潮沟密度大于低潮滩与高潮滩,广泛分布着二级潮沟,密集分布的潮沟至此区域遭受频繁地潮汐冲刷,导致表层有机碳外流^[19],表层沉积物被潮水携带至远处^[34,50],致0~10 cm土壤有机碳含量离潮沟越远而越高;中潮滩10~20 cm土壤有机碳含量随着潮沟侧向距离的增加而逐渐减少,一方面是潮水所携带的养分被此层土壤吸收^[15],另一方面,随着潮沟侧向距离的增加,土壤的淹水频率逐渐降低,土壤含水量随之减少,土壤的通气透水性增强,土壤由还原环境变为氧化环境,土壤有机碳含量因此而减少^[51]。高潮滩主要分布着一级潮沟和二级潮沟较细的末端,除大潮期间,其余时间潮沟内一直没有潮水填充,受潮汐及潮沟水文影响最小,因此高潮滩潮沟两侧潮滩土壤有机碳含量与潮沟距离相关性不显著。

4 结论

1) 研究区内的潮沟一共被分为3级,且潮沟在中潮滩发育状况最好。较高等级的三级潮沟主要分布于低潮滩,二级潮沟主要分布于中潮滩,高潮滩主要分布一级潮沟。通过对低、中、高潮滩的潮沟密度、曲率和分叉率进行计算与比较发现,潮沟在中潮滩发育程度最高。此外,对研究区整体的潮沟发育状况进行统计发现,潮沟长度与潮沟曲率随着潮沟发育等级的增加而表现出相反的趋势。

2) 0~10 cm土壤有机碳含量空间分布状况受潮沟形态影响较大,具体表现为,在潮流对养分的携带作用与潮汐的扰动作用下,土壤有机碳含量在潮沟较发育的中潮滩处呈最低值;10~20 cm土壤有机碳含量由低潮滩向高潮滩逐渐增加,呈带状分布特征,主要是由于高潮滩经历了更长时间的演替,植被由先锋物种向大型盐生植物群落转变,同时高潮滩的水盐环境更有利于大型盐生植物在此定植,能将更多的碳输入至土壤中。

3) 潮沟形态特征对土壤有机碳含量的影响在低、中、高潮滩表现出不同的趋势。在低潮滩与中潮滩,不同等级潮沟的有机碳含量表现出一定的差异

性,且随着潮沟侧向距离的增加,土壤有机碳含量也发生了一定的变化。土壤有机碳含量在低潮滩与中潮滩受潮沟形态的影响更大,而高潮滩土壤有机碳含量几乎不受潮沟形态的影响,主要是因为高潮滩受到潮汐侵蚀和沉积作用影响最小。

潮滩湿地具有重要的碳汇功能,在潮沟的影响下其碳存储能力存在明显的空间差异。潮沟水位的波动及潮滩淹水频率影响潮滩湿地的结构和功能,进而影响其碳汇功能,以后研究中值得深入探讨。

参考文献

- [1] 周金戈,覃国铭,张靖凡,等. 中国盐沼湿地蓝碳碳汇研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 765-781.
- [2] 李静泰,闫丹丹,么秀颖,等. 中国滨海湿地碳储量估算[J]. 土壤学报: 2013, 3(17): 1-18.
- [3] DUARTE C M, MIDDELBURG J J, CARACO N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle[J]. Biogeosciences, 2005, 2(1): 1-8.
- [4] CHEN L Z, PAN L H, QIU G L. Coastal blue carbon sink in China under the influence of human activity[J]. J Guangxi Acad Sci, 2021, 37(3): 186-194.
- [5] 王法明,唐剑武,叶思源,等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 241-251.
- [6] SCHUERCH M, SPENCER T, TEMMERMAN S, et al. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise[J]. Nature, 2018, 561(7722): 231-234.
- [7] 周晨昊,毛覃愉,徐晓,等. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(4): 475-486.
- [8] SPENCER T, SCHUERCH M, NICHOLLS R J, et al. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: the DIVA wetland change model[J]. Glob Planet Change, 2016, 139: 15-30.
- [9] SANDERMAN J, HENGL T, FISKE G J. Soil carbon debt of 12000 years of human land use[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114(36): 9575-9580.
- [10] XIONG Y M, LIAO B W, WANG F M. Mangrove vegetation enhances soil carbon storage primarily through in situ inputs rather than increasing allochthonous sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 131: 378-385.
- [11] 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.
- [12] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [13] 王经波,郑利林,郭宇菲,等. 鄱阳湖湿地土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 915-926.
- [14] 龚政,耿亮,吕亭豫,等. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制: II. 潮汐作用[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 231-239.
- [15] 骆梦,王青,邱冬冬,等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 17-24.
- [16] WEBSTER G, O'SULLIVAN L A, MENG Y Y, et al. Archaeal community diversity and abundance changes along a natural salinity gradient in estuarine sediments[J]. Fems Microbiology Ecology, 2015, 91(2): 1-18.
- [17] CHAMBERS L G, DAVIS S E, TROXLER T, et al. Biogeochemical effects of simulated sea level rise on carbon loss in an everglades mangrove peat soil[J]. Hydrobiologia, 2014, 726(1): 195-211.
- [18] CHEN Q F, GUO B B, ZHAO C S, et al. Characteristics of CH₄ and CO₂ emissions and influence of water and salinity in the Yellow River delta wetland, China[J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 289-299.
- [19] 原一荃. 长江口典型潮沟系统有机碳累积与横向输移[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [20] 李冬雪,李雨岑,张珂豪,等. 黄河口典型潮沟土壤碳氮分布特征规律[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 460-471.
- [21] 杜书栋,白军红,贾佳,等. 黄河三角洲芦苇湿地土壤有机碳储量沿盐分梯度的变化特征[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 80-87.
- [22] 李远,章海波,陈小兵,等. 黄河三角洲内陆到潮滩土壤中碳、氮元素的梯度分布规律[J]. 地球化学, 2014, 43(4): 338-345.
- [23] 郭雨桐. 黄河口湿地不同植被类型条件下土壤有机碳分布及真菌群落结构特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [24] 夏志坚,白军红,贾佳,等. 黄河三角洲芦苇盐沼土壤碳、氮含量和储量的垂直分布特征[J]. 湿地科学, 2015, 13(6): 702-707.
- [25] 于君宝,王永丽,董洪芳,等. 基于景观格局的现代黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳储量估算[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 1-6.
- [26] 贾佳,白军红,高照琴,等. 黄河三角洲潮间带盐沼土壤碳、氮含量和储量[J]. 湿地科学, 2015, 13(6): 714-721.
- [27] 吕亭豫,龚政,张长宽,等. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 178-188.
- [28] 牟奎南,宫兆宁,邱华昌. 黄河三角洲潮沟网络形态特征的时空分异规律及其发育过程[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2312-2328.
- [29] 沈永明,张忍顺,王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征[J]. 地理研究, 2003, 22(4): 520-527.
- [30] 孙佳琪. 基于LiDAR DEM的江苏中部沿海潮沟及其集水区形态特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [31] WANG X Y, SUN J W, ZHAO Z H. Effects of river discharge and tidal meandering on morphological changes in a meso tidal creek[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 234: 106635.
- [32] CHEN X, ZHANG M L, JIANG H Z. Morphological characteristics and hydrological connectivity evaluation of Tidal Creeks in Coastal Wetlands[J]. Land, 2022, 11(10): 1-17.
- [33] 贺宝根. 长江口潮滩水动力过程, 泥沙输移与冲淤变化[D].

- 上海:华东师范大学,2004.
- [34] 贾瑞霞,全川,王维奇,等. 闽江河口盐沼湿地沉积物有机碳含量及储量特征[J]. 湿地科学, 2008,6(4):492-499.
- [35] 全川,贾瑞霞,王维奇,等. 闽江口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化[J]. 地理研究, 2010,29(7):1203-1213.
- [36] PETER M, DIRK G, STEFSNIE N, et al. Unrecognized controls on microbial functioning in blue carbon ecosystems: the role of mineral enzyme stabilization and allochthonous substrate supply [J]. *Ecology and Evolution*, 2020,10(2):998-1011.
- [37] 高灯州,曾从盛,章文龙,等. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征[J]. 水土保持学报, 2014,28(6):216-227.
- [38] 陈桂香,高灯州,陈刚,等. 互花米草入侵对我国红树林湿地土壤碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017,31(6):249-256.
- [39] GUAN B, ZHANG H X, WANG X H, et al. Salt is a main factor shaping community composition of arbuscular mycorrhizal fungi along a vegetation successional series in the Yellow River Delta [J]. *Catena*, 2020,185: 104318.
- [40] 姜俊彦,黄星,李秀珍,等. 潮滩湿地土壤有机碳储量及其与土壤理化因子的关系:以崇明东滩为例[J]. 生态与农村环境学报, 2015,31(4):540-547.
- [41] 王红丽,肖春玲,李朝君,等. 崇明东滩湿地土壤有机碳空间分异特征及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2009,28(7):1522-1528.
- [42] 陈杰. 中国潮间带滩涂沉积物碳氮磷的埋藏特征[D]. 上海:华东师范大学,2021.
- [43] 顿佳耀,王初,姚东京,等. 崇明东滩盐沼表层沉积物有机碳空间分布特征及其来源示踪研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(1):157-165.
- [44] 曹磊,宋金明,李学刚,等. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2013,33(17):5141-5152.
- [45] 武亚楠,王宇,张振明. 黄河三角洲潮沟形态特征对湿地植物群落演替的影响[J]. 生态科学, 2020,39(1):33-41.
- [46] 赵欣胜,崔保山,孙涛,等. 黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J]. 生态环境学报, 2010,19(8):1855-1861.
- [47] 张彦军,郭胜利. 复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献[J]. 环境科学, 2019,40(2):961-969.
- [48] WANG Y G, LI Y, YE X H, et al. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: from forest to desert[J]. *Science of the Total Environment*, 2010,408(8):1925-1931.
- [49] 王进欣,张威,郭楠,等. 影响海岸带盐沼土壤有机质, TN 和 TP 含量时空变化的关键因子: 潮水和植被[J]. 地理科学, 2016,36(2):247-255.
- [50] 王杰,孙志高,李家兵,等. 2015年7月末不同淹水条件下闽江河口沼泽土壤有机碳和氮的分布[J]. 湿地科学, 2018,16(4):559-567.
- [51] 刘吉平,吕宪国,杨青,等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律[J]. 土壤学报, 2006,43(2):247-255.

(上接第 22 页)

- [13] LIU B, WANG X L, LIU L, et al. Simulation analysis of flow velocity and liquid film of saline wastewater in falling film evaporation [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 19:100790.
- [14] VICTOR Y, STEVEN A O. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory [J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1):3-51.
- [15] 北京石油化工工程公司. 氯碱工业理化常数手册(修订版) [M]. 北京:化学工业出版社, 1988.
- [16] SHARQAWY M, LIENHARD V, ZUBAIR S. Erratum to thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data [J]. *Desalination Water Treatment*, 2012, 44(1): 361.