

黄河口典型潮沟土壤碳氮分布特征规律

李冬雪¹, 李雨琴¹, 张珂豪¹, 马旭¹, 张树岩²,
刘伟华², 车纯广², 崔保山¹

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 山东黄河三角洲国家级自然保护区黄河口管理站, 东营 257500)

摘要: 为探究黄河三角洲盐沼土壤碳氮含量在潮沟水系中的时空分布特征, 选取黄河口一条典型的潮沟系统, 采集一、二、三级潮沟表层土壤, 探寻土壤有机碳、总氮与土壤容重、盐度、pH等理化因子的相关关系。结果表明: 土壤有机碳和总氮在时空尺度上表现出极大的异质性特征。时间尺度上, 土壤有机碳和总氮出现先上升后下降的趋势。空间尺度上, 一级潮沟土壤有机碳和总氮平均值($2.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)大于二级($1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、三级($1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)潮沟。相关分析表明, 土壤有机碳和总氮与盐度呈显著正相关($P < 0.01$), 与容重呈显著负相关($P < 0.01$)。盐沼湿地土壤碳氮含量受土壤水盐条件的影响, 而潮沟水系的树状结构对水盐条件的影响是导致土壤碳氮含量时空差异分布的重要因素。

关键词: 滨海湿地; 土壤有机碳; 土壤总氮; 水文连通; 潮沟

碳、氮元素是天然湿地土壤中的两种关键生源要素。湿地土壤中有机碳的含量变化显著影响着湿地生态系统结构和功能^[1]。滨海湿地作为全球氮元素的源、汇及调节器^[2], 其氮素的含量直接影响湿地生态系统功能的发挥^[3]。

潮沟是盐沼湿地中常见的地貌单元, 是物质流、能量流与信息传递的主要通道。潮沟系统的水文连通能够提供影响水、土壤的营养条件^[4]。已有研究表明^[5-8], 湿地土壤中同一营养元素在不同水文条件下的分布特征具有显著差异。潮沟网络体系不同区域由于水文背景的不同^[9], 会使得水盐条件呈现空间梯度性分布, 水盐条件的不同是造成土壤中固定和储存碳氮能力产生差异的本质原因^[10]。

目前的研究表明, 湿地土壤养分含量变化受湿地生态系统的植物类型^[11]、土壤理化性质^[12]、分解过程^[13]、凋落物类型与输入量^[14]、微生物群落^[15]等多种因素的制约, 具有很强的时空尺度效应^[16]。以往对黄河三角洲湿地的研究集中在景观格局变化、群落演变及生物多样性的保护等方面^[17], 而对黄河三角洲典型潮沟水系盐沼湿地营养元素的含量时空分布特征的研究较少。本文通过分析黄河三角洲典型潮沟水系盐沼土壤碳氮含量时空分布特征及影响因素, 为滨海盐沼土壤质量管理和湿地生态系统服务功能维持提供科学依据^[18]。

收稿日期: 2018-11-21; 修订日期: 2019-02-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0404505); 国家自然科学基金项目 (51639001); 中国工程院咨询研究项目 (2018-XZ-14)

作者简介: 李冬雪 (1996-), 女, 重庆人, 博士研究生, 主要从事湿地生态环境研究。

E-mail: 201511180117@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 崔保山 (1967-), 男, 河北涪源人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态过程与环境响应研究。

E-mail: cuibs@bnu.edu.cn

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄河三角洲国家自然保护区 (118°33'~119°20'E, 37°35'~38°12'N) 位于山东省东营市黄河入海口、渤海湾南岸和莱州湾西岸的交汇处, 是中国最完整的滨海湿地生态系统。黄河三角洲属于暖温带半湿润大陆性季风气候区, 年平均气温 12.1 °C, 年平均降雨量 551.6 mm。黄河水为弱碱性, pH 为 8.0~8.3。近海表层海水盐度为 14.9‰~26‰。潮汐属于不正规半日潮, 平均高潮间隙为 10~11 h, 平均大潮潮差是 1.06~1.78 m, 平均小潮潮差为 0.46~0.78 m。与潮滩同时形成和演化的潮沟系统在黄河三角洲潮滩上广泛发育, 构成了一个密集分布的巨大网络体系, 成为黄河三角洲潮滩的显著特征之一。本实验选取黄河三角洲一条典型、完整且具有主次支流的潮沟系统作为研究区 (图 1)。主要盐沼植被类群为盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*)、盐角草 (*Salicornia europaea*) 和怪柳 (*Tamarix chinensis*), 各级潮沟由于土壤盐度、容重、营养元素及潮汐作用等差异具有不同的植物盖度和分布特征。盐地碱蓬主要分布在低潮滩盐沼, 高潮滩盐沼及陆缘以怪柳、盐角草为主。研究区土壤以盐土为主, 顺海岸呈带状分布, 矿化度高。据于小娟等^[19]关于黄河三角洲潮沟曲率的研究, 一级潮沟弯曲程度 ($\rho=1.193$) 往往大于三级潮沟 (1.101)。研究区所在南部区域潮沟频数为 0.734 条/km², 其水文网络连通性相对较差, 网络结构较为简单, 系统性连接程度较低, 导致潮沟间异质性程度突出。

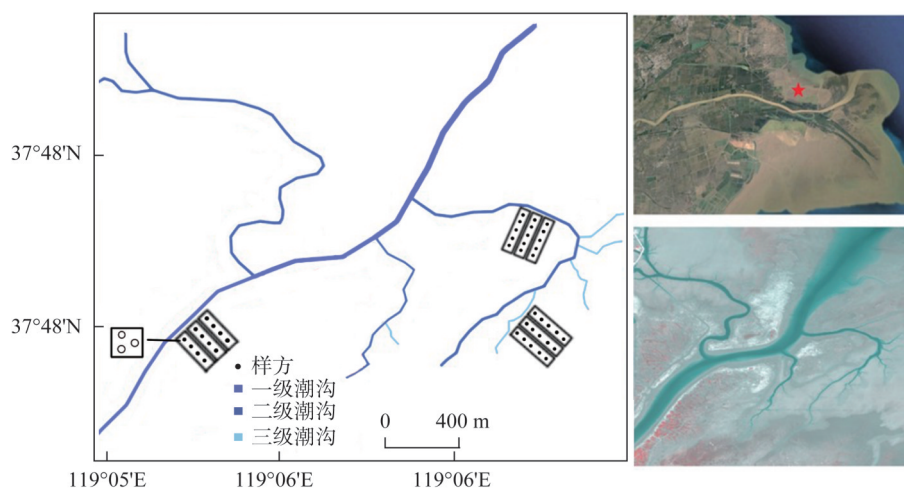


图1 研究区和采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and sampling plots

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集

根据实验潮沟的主次支流将潮沟分级, 分别表示: 主流为一级潮沟, 支流为二级潮沟, 次支流为三级潮沟。实验分别于 2017 年 7-9 月份在三个等级潮沟上分别布设三条样带。每条样带中设置三条与潮沟垂直的重复样线。每条样线上按照潮沟距离依次布设 4~5 个样方。按随机性原则利用环刀法在每个样方中采集土壤表层土样 3 个 (100 cm³),

126个样方，共计采集378个土壤样品；并记录各样方内植物种类和数量。

将所有土壤样品带回实验室，剔除肉眼可见的植物残体和石块后将样品转移至事先称量并标记的铝盒中，放置于烘箱内在60℃条件下烘72h至恒重，测定容重。将样品初步研磨后，过0.75mm分样筛。先取每份土壤样品的一半，用于测定土壤pH和盐度；将另外一半继续研磨，过0.149mm筛后，用于测定土壤有机碳和总氮含量。

在每个样方分别设立垂直于潮沟方向的凋落物拦截网、土壤总沉积量测量装置和土壤沉积侵蚀综合量测量装置（图2a）。将所有拦截物带回实验室，剔除外来杂物（如鸟羽）并进行清洗后置入60℃烘箱烘干，测定凋落物干重；径长20cm的PVC管经一端封口后竖直埋入土壤，开口端朝上并与土壤表面齐平（图2b），以PVC管高度作为初始值，定期测量底部土壤与开口端的距离，则 $S=S_0-S_1$ （ S 表示土壤沉积量； S_0 表示初始值； S_1 表示测量值）；固定测量针使之与土壤表面平行，定期测量土壤表面与测量针的距离即为沉积侵蚀综合量，由此 $E=S-C$ （ E 表示土壤侵蚀量； C 表示沉积侵蚀综合量）。

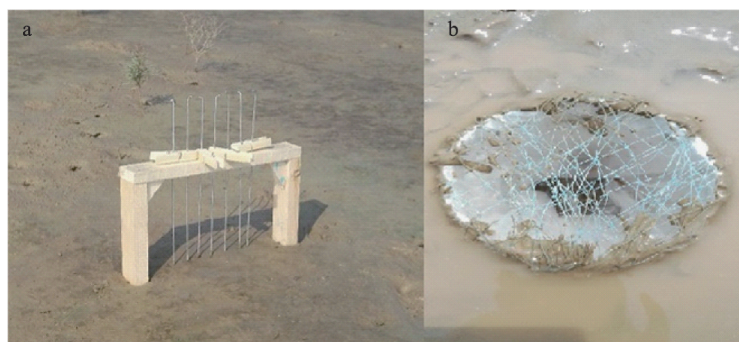


图2 土壤沉积侵蚀测量装置

Fig. 2 Soil sediment and erosion measuring device

1.2.2 土壤样品分析

测定土壤盐度和pH，在土水1:5（质量:体积）和土水1:2.5（质量:体积）的上清液中分别使用便携式盐度计（JENCO 3010 M）和pH计（HANNA HI 8424）的方法；测定土壤有机碳和总氮，均匀混合每个样方中的三个土壤样品，将42个样方的混合土样分别转移至试管中，加入新配置的1 mol/L的HCL溶液，振荡离心，完全去除无机碳，处理后的土壤样品放入60℃烘箱烘干至恒重，干燥样品重新研磨过0.149mm筛，采用Vario EL III型元素分析仪测定有机碳和总氮含量。

1.2.3 统计分析

采用相关性分析，探究潮沟侧向距离与土壤有机碳和总氮含量的相关关系。采用单因素方差分析比较不同潮沟土壤容重、pH、盐度与有机碳、总氮含量等指标的差异性（显著性检验 $P<0.05$ ）。各项分析均采用SPSS统计分析软件Version 20.0（SPSS Inc, Chicago, USA）完成，置信区间为95%。结果以平均值±标准误的形式表达，其中标准误表示平行样本间的标准误。文中制图均采用Origin 9.0（Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA）绘制。

2 结果分析

2.1 黄河三角洲盐沼湿地土壤有机碳含量时空分布特征

通过对研究区的样品分析发现,有机碳的分布在时空尺度存在极强的异质性特征。如图3所示,在空间尺度上,一级潮沟土壤有机碳的空间分布梯度差异巨大,且距离潮沟越远含量越高,最高含量达到 $5.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是二级、三级潮沟相同距离的1.09~6.75倍。而三级潮沟的有机碳分布规律与一级潮沟相反。在时间尺度上,土壤有机碳含量在八月份最高,这说明有机碳含量在时间尺度上出现先上升后下降的趋势,且二级潮沟的这种变化幅度最大,三级潮沟变化最小。

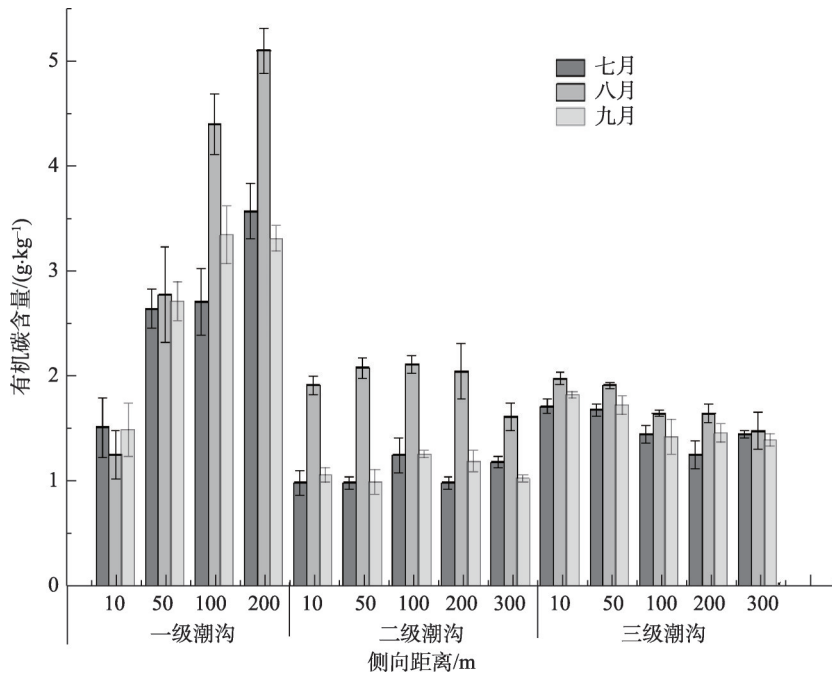


图3 黄河三角洲典型潮沟水系土壤有机碳含量时空分布特征

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of soil organic carbon contents of typical tidal creeks in the Yellow River Delta

2.2 黄河三角洲盐沼湿地土壤总氮含量时空分布特征

实验结果表明,土壤总氮含量在空间尺度与时间尺度上表现出很强的异质性分布特征。如图4所示,在空间尺度上,土壤总氮含量表现为一级>三级>二级,一级潮沟土壤总氮含量最高达 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是二级、三级相同距离的0.87~4.08倍。一级潮沟土壤总氮含量表现出巨大的差异性,且总体上随潮沟侧向距离增加而增加。三级潮沟总氮含量分布与一级潮沟相反,沿侧向距离减少并趋于平缓。在时间尺度上,一级潮沟土壤总氮含量呈现八月份>九月份>七月份;二级、三级潮沟总氮含量在九月份最高,而在七月份和八月份没有明显差异。

2.3 黄河三角洲盐沼湿地土壤碳氮比时空分布特征

由于潮沟网络系统水文背景的不同,导致碳氮比呈现时空分布的梯度性特征。如图5所示,土壤碳氮比值为5.00~15.83,在6.00~10.70范围内较为集中,最大值出现在八月份二级潮沟侧向距离10 m样方处。一级、二级及三级潮沟土壤的碳氮比平均值分别为

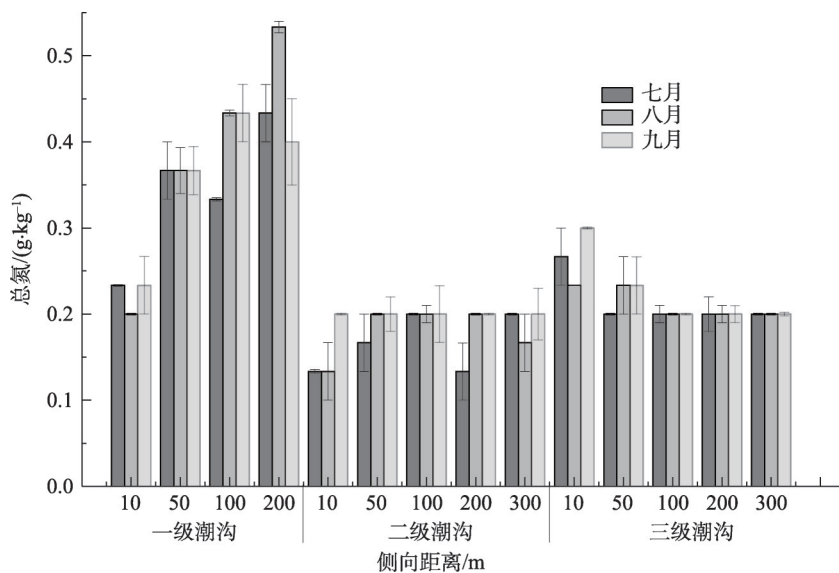


图4 黄河三角洲典型潮沟水系土壤总氮含量时空分布特征

Fig. 4 Temporal and spatial distribution of soil total nitrogen contents of typical tidal creeks in the Yellow River Delta

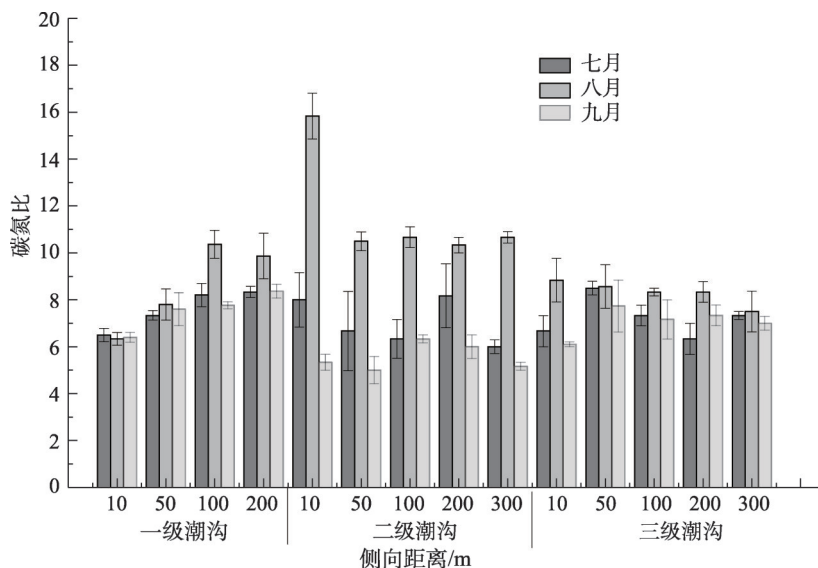


图5 黄河三角洲典型潮沟水系土壤碳氮比时空分布特征

Fig. 5 Temporal and spatial distribution of carbon nitrogen ratio of typical tidal creeks in the Yellow River Delta

7.91、8.07、7.54。沿潮沟侧向距离增加，一级潮沟土壤的碳氮比总体呈增长趋势。在时间尺度上，土壤碳氮比表现出较大的异质性特征。研究区土壤的碳氮比在8月份（6.33~15.83）最高，7月份（6.33~8.50）次之，9月份（5.00~5.37）最低。

3 讨论

3.1 水盐条件和植被结构对土壤有机碳含量的影响

潮沟体系下盐沼湿地水盐条件的空间异质性导致植被群落结构的异质性，从而影响土壤中营养元素的含量和分布^[20]。一级潮沟较长，潮沟断面流量大，受海水冲刷作用较

强,在潮滩高程较低的位置,其水文连通强度大。且一级潮沟采样区处于中高潮滩,为高低频淹水区交界处,受潮汐沉积与侵蚀作用影响较小(图6),盐度胁迫得到一定程度加强(图7),利于怪柳、盐角草等大中型盐地植被定植,有助于土壤种子库的累积,形成怪柳—盐角草垂直潮沟方向带状分布特征。以怪柳为主的植被群落体系会给土壤环境引入大量的凋落物,地表有机物沉积量显著提高,而较高的盐度使得微生物呼吸消耗减少,有机碳降解途径受到限制,因此呈现一级潮沟土壤有机碳含量最高的特点。

陈国平等^[21]指出,凋落物和土壤微生物分解对土壤有机碳的贡献极大。贺俊霞等^[22]的研究表明怪柳的生物量远大于其他盐沼植被,在策勒绿洲前缘怪柳冠下有机质凋落物

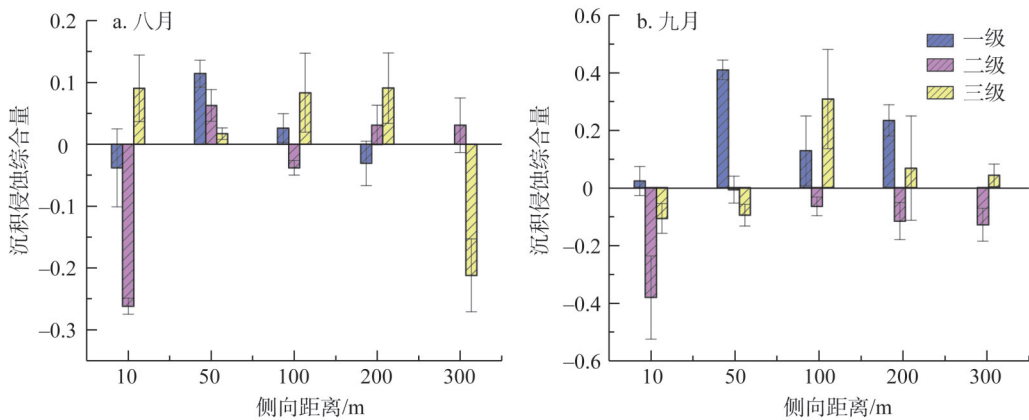


图6 黄河三角洲典型潮沟水系八、九月份各潮沟等级土壤沉积与侵蚀

Fig. 6 Soil erosion deposition and erosion at different levels in typical tidal channel system of the Yellow River Delta in August and September

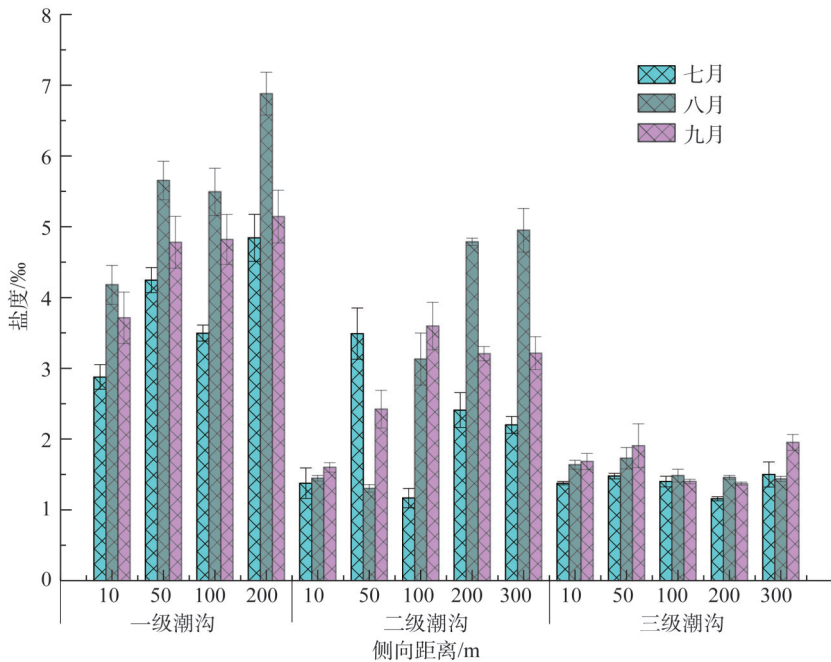


图7 黄河三角洲典型潮沟水系七、八、九月份各潮沟等级土壤盐度

Fig. 7 Salinity of typical grade creeks in the Yellow River Delta in July, August and September

年沉积量甚至可以达到 $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。缪雄谊等^[23]指出盐地碱蓬分布稀疏,单株高大,更容易受潮汐冲蚀作用的影响,所以土壤有机碳的含量较低。这与本研究中柽柳区的有机碳含量高于盐地碱蓬区的结果一致。

随着土壤含盐量的增加,微生物活性会受到抑制,从而引起微生物数量降低,周转速率较慢,便于碳积累^[24],本研究结果与此一致,研究区土壤有机碳含量与土壤盐度呈显著正相关关系 ($P < 0.01$, 表1)。土壤容重升高,土壤孔隙度逐步降低,土体逐渐变得紧实致密,有机体进入土壤的概率降低,从而致使土壤有机碳含量的流失^[25],故本研究中土壤有机碳含量与土壤容重呈显著负相关关系 ($P < 0.01$, 表1)。

3.2 水盐条件和植被结构对土壤总氮含量的影响

滨海潮沟由于自身结构形成了潮汐作用下特殊的水盐分布特征,从而影响土壤的氮素质量分数^[26]。九月份土壤总氮含量大于七、八月份。九月份处于旱季,缺水使得土壤盐碱化程度加重,高盐碱环境(图7、图8)不利于微生物对土壤氮的矿化作用,导致九

表1 黄河三角洲典型潮沟水系湿地土壤碳氮含量与理化因子的相关关系

Table 1 Correlations between soil carbon and nitrogen contents and physico-chemical factors in typical tidal creek system of the Yellow River Delta

参数	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳氮比	pH	盐度/%	容重/ ($\text{N} \cdot \text{m}^3$)	沉积侵蚀 综合量/cm
有机碳($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1	0.919**	-0.281	0.043	0.702**	-0.529**	-0.258
总氮($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		1	-0.177	0.015	0.712**	-0.625**	-0.216
碳氮比			1	-0.244	0.047	0.249	-0.242
pH				1	-0.059	-0.244	-0.123
盐度/%					1	-0.413**	-0.439*
容重($\text{N} \cdot \text{m}^3$)						1	0.002*
沉积侵蚀综合量/cm							1

注: *、**分别表示在0.01、0.05水平(双侧)上显著相关。

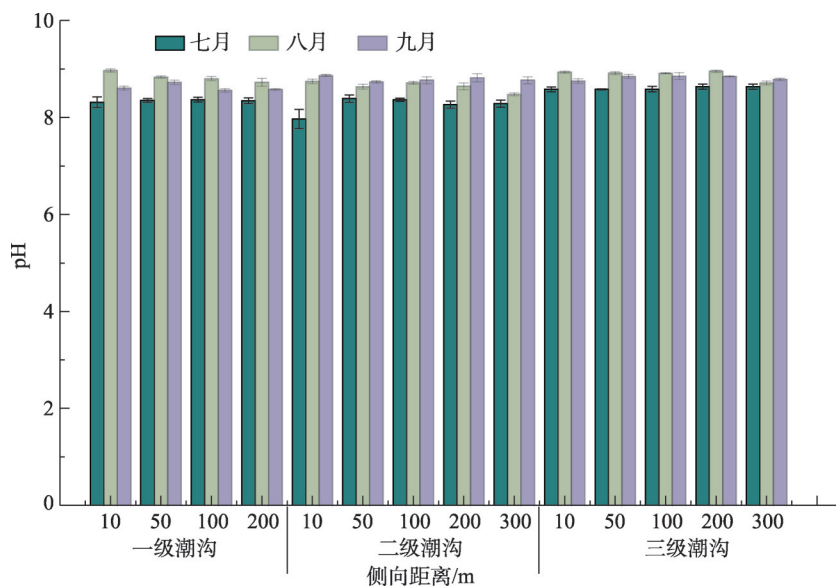


图8 黄河三角洲典型潮沟水系七、八、九月份各潮沟等级土壤pH

Fig. 8 The pH values of typical grade creeks in the Yellow River Delta in July, August and September

月份土壤全氮含量较高。同时由于植物残体和凋落物在土壤表层发生累积(图9)^[27,28],导致潮间带土壤表层的总氮含量升高。与此相反,七月份降水量大(图10),盐碱化程度降低有利于微生物生长,从而加速氮的矿化分解降低土壤中氮含量;且七、八月份为盐沼植物生长期,植株所需氮量增多,导致土壤总氮积累量减少。

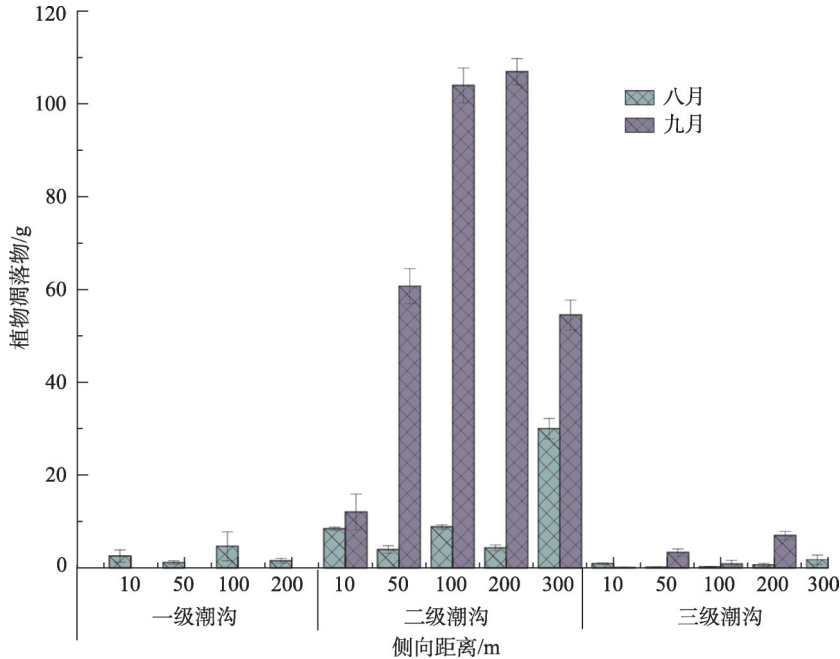


图9 黄河三角洲典型潮沟水系八、九月份植物凋落物干重

Fig. 9 Dry weight of plant litter in August and September in the typical tidal channel system of the Yellow River Delta

Chen等^[16]研究发现土壤总氮含量表现出巨大的异质性特征可能与干湿交替有关^[29]。Smith等^[30]指出,相当短的干湿交替周期有利于湿地脱氮。随着潮沟侧向距离的变化,一级潮沟研究区干湿交替周期变化^[31]明显,呈现出较大的空间梯度分布差异。研究区土壤总氮含量与土壤盐度呈显著正相关关系($P<0.01$,表1),这主要是因为较高的土壤盐分会影响微生物对氮素的吸收^[32]。土壤总氮含量与容重呈显著负相关关系,与土壤有机碳呈现显著正相关关系($P<0.01$,表1)。

3.3 水盐条件和植被结构对土壤碳氮比含量的影响

土壤碳氮含量的比值是表征土壤质量变化的重要指标,既反映湿地生态系统中土壤微生物群落结构特征,又在一定程度上揭示植被凋落物对土壤容重的积累贡献^[33]。有机质的碳氮比对微生物的分解作用有着重要影响,碳氮比值为25~30时出现净矿化,最有利于微生物分解^[34]。本文研究区土壤碳氮比值集中在6.0~10.7之间,平均值为7.838,

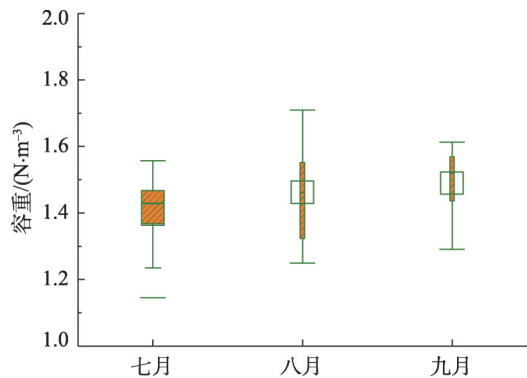


图10 黄河三角洲典型潮沟水系七、八、九月份各潮沟等级土壤容重

Fig. 10 Bulk density for typical tidal channel systems in the Yellow River Delta in July, August and September

表明微生物对有机质分解作用强烈,所以有机氮较容易矿化^[35,36]。随潮沟侧向距离的增加,一级潮沟土壤碳氮比呈上升趋势,这是由于潮沟作用导致近潮沟处淹水频繁,盐度降低,微生物活动抑制作用减弱,有机质分解速率快,碳氮比值减少。二级潮沟由于其特殊的地形结构,研究区域内多处有小范围的积水现象,故该变化不显著。三级潮沟的植被群落以盐地碱蓬为主(表2),且经常处于淹水状态(图10),植物残体的分解作用相对较弱,故三级潮沟土壤碳氮比平均值最低。

表2 黄河三角洲典型潮沟水系七、八、九月份植物种类与数量

Table 2 Plant species and quantity of typical tidal channel system in July, August and September in Yellow River Delta

数量/棵	种类		
	盐地碱蓬	怪柳	盐角草
七月一级	36	43	2
八月一级	33	31	1
九月一级	29	20	1
七月二级	64	8	0
八月二级	62	8	0
九月二级	55	7	0
七月三级	240	1	1
八月三级	239	0	0
九月三级	238	0	0

4 结论

黄河三角洲潮沟网络分布的差异性导致水盐条件和植被结构的异质性,从而使土壤有机碳、总氮含量存在显著的时空分布梯度特征。土壤有机碳和全氮含量的总体特征基本一致,表现为一级潮沟>三级潮沟>二级潮沟。各样带土壤有机碳、总氮含量在侧方向上均表现出差异性变化特征。水盐条件变化会改变植物群落结构,从而影响土壤营养元素的含量和分布。而潮沟水系植被发达的地下根系、丰富的凋落物为微生物提供了适宜的生存环境,这对于土壤碳、氮元素的固定极为重要,因此采样带土壤有机碳和总氮含量的峰值出现在植被生物量丰富的区域。此外,降水量和土壤沉积侵蚀强度等对土壤有机碳、总氮含量和分布也有一定影响。

由土壤碳、氮含量与理化因子的相关性分析,发现土壤盐度对土壤有机碳和总氮含量有显著正影响($P<0.01$),而盐度主要通过限制微生物活性来起作用。需要指出的是,虽然水盐条件是限制盐沼植被分布的关键因子,但盐沼植被的分布也必然受到其他一些生物和非生物因素的影响,如植物竞争、土壤养分等。本文所得出的盐沼植被时空分布特征仅是针对黄河三角洲湿地水盐条件,且其精度也必然会受到植物竞争、土壤养分等其他生物生态因素的影响。

参考文献(References):

- [1] REICH P B, HUNGATE B A, LUO Y. Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide. *Annual Review of Ecology Evolution & Systematics*, 2006, 37(611-636): 611-636.
- [2] CACADOR I, COSTA A L, VALE C. Carbon storage in Tagus salt marsh sediments. *Water Air & Soil Pollution Focus*, 2004, 4(2-3): 701-714.
- [3] 谢文霞,朱鲲鹏,崔育倩,等.胶州湾河口湿地土壤有机碳及氮含量空间分布特征研究. *草业学报*, 2014, 23(6): 54-60. [XIE W X, ZHU K J, CUI Y Q, et al. Spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Jiaozhou Bay Estuarine Wetlands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 54-60.]
- [4] 崔保山,蔡燕子,谢焱,等.湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2016, 52(6): 738-746. [CUI B S, CAI Y Z, XIE T, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: Problems and

- prospects. Journal of Beijing Normal University, 2016, 52(6): 738-746.]
- [5] 凌敏, 刘汝海, 王艳, 等. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤养分的空间异质性及其与植物群落分布的耦合关系. 湿地科学, 2010, 8(1): 92-97. [LING M, LIU R H, WANG Y, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and the relationship between soil nutrients and plant community in *Tamarix Chinensis* forest farm wetland of Yellow River Delta Wetland. Wetland Science, 2010, 8(1): 92-97.]
- [6] 于君宝, 董洪芳, 王慧彬, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤金属元素空间分布特征. 湿地科学, 2011, 9(4): 297-304. [YU J B, DONG H F, WANG H B, et al. Spatial distribution characteristics of metals in new-born coastal wetlands in the Yellow River Delta. Wetland Science, 2011, 9(4): 297-304.]
- [7] 白军红, 崔保山, 李晓文, 等. 向海芦苇沼泽湿地土壤铵态氮含量的季节动态变化. 草业学报, 2006, 15(1): 117-119. [BAI J H, CUI B S, LI X W, et al. Ammonium nitrogen concentration seasonal dynamics in soils from reed wetlands in Xianghai. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(1): 117-119.]
- [8] 田娟, 刘凌, 王桂凤, 等. 变化的淹水条件对土壤磷素释放影响. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(5): 766-769. [TIAN J, LIU L, WANG G F, et al. Effect of variable flooding conditions on soil phosphorus release. Journal of Liaoning Technical University, 2008, 27(5): 766-769.]
- [9] PERILLO G M E, RIPLEY M D, PICCOLO M C, et al. The formation of tidal creeks in a salt marsh: New evidence from the Loyola Bay salt marsh, Rio Gallegos Estuary, Argentina. Mangroves & Salt Marshes, 1996, 1(1): 37-46.
- [10] SANGER D M, HOLLAND A F, SCOTT G I. Tidal creek and salt marsh sediments in South Carolina coastal estuaries: II. Distribution of organic contaminants. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 1999, 37(4): 458-471.
- [11] BAER S G, CHURCH J M, KWJ W, et al. Changes in intrasystem N cycling from N₂-fixing shrub encroachment in grassland: Multiple positive feedbacks. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 115(1): 174-182.
- [12] IOST S, LANDGRAF D, MAKESCHIN F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang province P. R. China. Geoderma, 2007, 142(3): 245-250.
- [13] ZHAO Q, BAI J, LIU P, et al. Decomposition and carbon and nitrogen dynamics of *Phragmites australis* litter as affected by flooding periods in coastal wetlands. Clean-Soil, Air, Water, 2015, 43(3): 441-445.
- [14] LIU D Y, SONG C C. The litter characteristics of *Calamagrostis Angustifolia* and its early-stage decomposition affected by exogenous nitrogen input in freshwater marsh. Wetland Science, 2008, 6(2): 235-241.
- [15] KENT A D, PERALTA A, KENT A D, et al. Soil microbial community structure and function along environmental gradients: Implications for wetland nitrogen cycling. Soil Microbial Ecology, 2011, <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/29446>.
- [16] CHEN H P, ZHANG T Y, GE Z M, et al. Distribution of soil carbon and nitrogen stocks in salt marsh wetland in Dongtan of Chongming. Journal of Ecology & Rural Environment, 2017, 33(3): 242-251.
- [17] 牟晓杰, 孙志高, 王玲玲, 等. 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬氮的累积与分配特征. 湿地科学, 2010, 8(1): 57-66. [MU X J, SUN Z G, WANG L L, et al. Characteristics of nitrogen accumulation and allocation of *Suaeda Salsa* in different growth conditions of intertidal zone in Yellow River Estuary. Wetland Science, 2010, 8(1): 57-66.]
- [18] 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. 湿地科学, 2015, 13(6): 714-721. [JIA J, BAI J H, GAO Z Q, et al. Carbon and nitrogen contents and storages in the soils of intertidal salt marshes in the Yellow River Delta. Wetland Science, 2015, 13(6): 714-721.]
- [19] 于小娟, 张仲胜, 薛振山, 等. 1989年以来7个时期黄河三角洲潮沟的形态特征及连通性研究. 湿地科学, 2018, 16(4): 517-523. [YU X J, ZHANG Z S, XUE Z S, et al. Morphological characteristics and connectivity of tidal channels morphological characteristics and connectivity of tidal channels in the Yellow River Delta for 7 periods since periods since 1989. Wetland Science, 2018, 16(4): 517-523.]
- [20] 谢丽纯, 陈建耀. 近10a来珠江三角洲地区氮收支演变及区域差异分析. 自然资源学报, 2014, 29(2): 237-248. [XIE L C, CHEN J Y. Nitrogen budgets of the Pearl River Delta and its regional differences during the past decade. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2): 237-248.]
- [21] 陈国平, 程珊珊, 刘静, 等. 天津滨海湿地3种典型群落土壤理化性质及碳氮差异性分析. 植物研究, 2015, 35(3): 406-411. [CHEN G P, CHENG S S, LIU J, et al. Physical-chemical properties of soil C and N of three typical communities in Tianjin coastal wetland. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(3): 406-411.]

- [22] 贺俊霞, 穆桂金, 张鹏, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘柽柳冠下枯枝落叶沉积特征. 第四纪研究, 2009, 29(4): 781-788. [HE J X, MU G J, ZHANG L, et al. Litter sedimentary characteristics under the *Tamarix Ramosissima* shrub at the southern margin of the Taklimakan Desert. Quaternary Sciences, 2009, 29(4): 781-788.]
- [23] 缪雄道. 黄河三角洲滨海湿地表层土壤矿物与地球化学特征研究. 青岛: 中国海洋大学, 2014. [MIU X Y. The geochemical and mineral research of surface soil of coastal wetland in Yellow River Delta. Qingdao: Ocean University of China, 2014.]
- [24] ELGHARABLY A, MARSCHNER P. Microbial activity and biomass and N and P availability in a saline sandy loam amended with inorganic N and Lupin Residues. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(5): 310-315.
- [25] 金宝石, 高灯州, 杨平, 等. 闽江河口区互花米草入侵不同年限下湿地土壤有机碳变化. 自然资源学报, 2016, 31(4): 608-619. [JIN B S, GAO D Z, YANG P, et al. Change of soil organic carbon with different years of *Spartina alterniflora* invasion in wetlands of Minjiang River Estuary. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 608-619.]
- [26] BELLEVEAU L J, TAKEKAWA J Y, WOO I, et al. Vegetation community response to tidal marsh restoration of a large river estuary. Northwest Science, 2015, 89(2): 136-147.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. [LU R K. Soil Agrochemistry Analysis Protocols. Beijing: China Agriculture Science Press, 1999.]
- [28] BULL I D, BERGEN P F, BOL R, et al. Estimating the contribution of *Spartina anglicabiomass* to salt marsh sediments using compound specific stable carbon isotope measurements. Organic Geochemistry, 1999, 30(7): 477-483.
- [29] 张天雨, 葛振鸣, 张利权, 等. 崇明东滩湿地植被类型和沉积特征对土壤碳、氮分布的影响. 环境科学学报, 2015, 35(3): 836-843. [ZHANG T Y, GE Z M, ZHANG L Q, et al. Influence of saltmarsh vegetation and sedimentation on the distribution of soil carbon and nitrogen in the Chongming Dongtan Wetlands. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 836-843.]
- [30] SMITH M S, TIEDJE J M. Phases of denitrification following oxygen depletion in soil. Soil Biology & Biochemistry, 1979, 11(3): 261-267.
- [31] 陈琳, 韩震. 长江口九段沙潮沟系统分维研究. 海洋通报, 2015, 34(2): 190-196. [CHEN L, HAN Z. Fractal dimensions of tidal channels at Jiuduansha Shoal in the Yangtze River Estuary. Marine Science Bulletin, 2015, 34(2): 190-196.]
- [32] 金宝石, 闫鸿远, 张林海, 等. 中国滨海互花米草湿地土壤有机碳时空变化及其影响因素. 生态环境学报, 2016, 25(12): 2021-2027. [JIN B S, YAN H Y, ZHANG L H, et al. Spatial-temporal variations and their influence factors of soil organic carbon under the *Spartina Alterniflora* wetland in China. Ecology & Environmental Sciences, 2016, 25(12): 2021-2027.]
- [33] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1214-1223. [ZHANG Y J, GUO S L, NAN Y F, et al. The changes and influencing factors of soil C: N ratio in small watershed of hilly region of Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7): 1214-1223.]
- [34] ROY S. Seasonally and spatially coordinated strategy of detritus conservation and use in the world's largest mangrove ecosystem. Proceedings of the Zoological Society, 2011, 64(2): 63-71.
- [35] 刘吉平, 梁晨, 赵亮. 非生长季农田中孤立湿地土壤有机质及氮的空间分布规律. 江苏农业学报, 2017, (6): 1288-1293. [LIU J P, LIANG C, ZHAO L. Spatial distribution of soil organic matter and nitrogen in soil of isolated wetland in farmland during the non-growing season. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2017, (6): 1288-1293.]
- [36] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 等. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494-1498. [BAI J H, DENG W, ZHU Y M, et al. Spatial distribution characteristics and ecological effects of carbon and nitrogen of soil in Huolin River catchment wetland. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1494-1498.]

Characteristics of carbon and nitrogen distribution in typical tidal creeks of the Yellow River Delta

LI Dong-xue¹, LI Yu-qin¹, ZHANG Ke-hao¹, MA Xu¹, ZHANG Shu-yan²,
LIU Wei-hua², CHE Chun-guang², CUI Bao-shan¹

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Huanghekou Management Station, Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve Administration, Dongying 257500, Shandong, China)

Abstract: Carbon and nitrogen are two key elements in the natural wetland soil. Changes of organic carbon contents in wetland soil significantly affect the structure and function of wetland ecosystems. Soil carbon and nitrogen contents in coastal salt marshes are closely related to hydrological connectivity patterns of coastal wetlands. To explore the spatio-temporal characteristics of soil carbon and nitrogen contents in different tidal creek systems of salt marsh, this research selected a typical, complete tidal creek system with major and minor tributaries in the estuary of the Yellow River. By collecting surface soil (0-5 cm) in the first-, second-, and third-level tidal creek regions, we attempted to explore the relationship between soil organic carbon, total nitrogen contents and soil moisture contents, salinity, bulk density, pH and other physical-chemical factors. Results illustrated that the soil organic carbon and total nitrogen contents presented great heterogeneity on both temporal and spatial scales. On the time scale, the soil organic carbon contents increased firstly and then decreased, the second tidal creek changed the most striking while the third tidal creek showed the least significant. The soil total nitrogen contents presented variability in different grades of tidal creeks. The total nitrogen contents were listed as August > September > July in the first-degree tidal creek, while the contents reached the peak in September of the second and third tidal creeks. The soil carbon and nitrogen ratio reached the peak in August. On the spatial scale, the average contents of the soil organic carbon and total nitrogen ($2.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the first tidal creek were greater than those of the second tidal creek ($1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the third tidal creek ($1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The longer the lateral distance of the first tidal creek is, the higher the contents of the soil organic carbon and total nitrogen are. The soil organic carbon and total nitrogen contents in the third-degree tidal creek showed a slow downward trend in distance which was opposite to those of the first-degree tidal creek. Correlation analysis showed that there was a significantly positive correlation between soil organic carbon, total nitrogen contents and salinity ($P < 0.01$), and a prominently negative correlation with soil bulk density ($P < 0.01$). In summary, the soil carbon and nitrogen contents of the salt marsh wetland are affected by the soil water and salt conditions, and the tree structure of the tidal water system is crucial to the water and salt conditions of the surrounding soil. The influence of the structural characteristics of the tidal water system on the water and salt conditions is one of the important factors of spatial and temporal differences in soil carbon and nitrogen content.

Keywords: coastal salt marsh; soil organic carbon; soil total nitrogen; hydrological connectivity; tidal creeks