

黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素的 时空动态变化特征*

魏卓群 白军红[†] 张玲 张光亮 王昕 王伟 贾佳

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

摘要 以黄河口潮间带芦苇湿地为研究对象, 在夏、秋和春季分别采集 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 的土壤样品, 研究黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素总氮(TN)、总磷(TP)、总硫(TS)和总钾(TK)质量分数及储量的时空动态变化特征及其影响因素. 结果表明: 研究区 0~50 cm 土壤剖面中 TN 和 TS 质量分数变化范围分别为 68.19~421.29 和 356.15~935.77 mg·kg⁻¹, 总体质量分数偏低, 且最高值出现在表层土壤, 在 3 个季节中春季质量分数较高; TP 质量分数变化范围为 379.8~728.30 mg·kg⁻¹, 在剖面中分布较为均匀, 质量分数最高值出现在夏季; TK 质量分数变化范围为 17852.41~23 265.30 mg·kg⁻¹, 无明显剖面分布特征. 0~50 cm 土层的 TN 储量(TNS)的变化范围为 109.66~227.36 g·m⁻², TP 储量(TPS)为 350.74~625.27 g·m⁻², TS 储量(TSS)为 331.15~575.70 g·m⁻², TK 储量(TKS)为 12220.77~19 780.33 g·m⁻². 总体上, 各生源要素主要储存在 0~30 cm 土层; TPS 季节变化由高到低依次呈现夏季、春季、秋季, TPS 和 TSS 均呈现夏季、秋季、春季($P<0.05$), TSS 呈现春季低于夏季和秋季. 冗余分析和相关性分析表明: 土壤总碳(TC)、电导率、Mg、Al 等指标与生源要素质量分数密切相关, 土壤 TC 质量分数和 C、N 质量比是影响 TNS 的重要因素, 而土壤密度、水土质量比和电导率则是影响 TPS 的重要因素.

关键词 芦苇湿地; 湿地土壤; 生源要素; 储量; 剖面分布; 季节变化

中图分类号 S153.6

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020425

0 引言

河口湿地生态系统具有较高的初级生产力, 在全球生物地球化学循环中发挥着重要作用^[1]. 湿地土壤是生态系统的重要组成部分, 发挥着生源要素(C、N、P、S、K)的源、汇和转化器功能^[2]. 湿地土壤生源要素的时空分布特征不仅能反映土壤肥力水平和供给能力^[3], 而且会影响湿地植被生长和演替过程. 同时, 土壤生源要素含量变化受制于生态系统的水文过程、植被类型、土壤理化性质等多种因素. 当前, 国内学者对辽河口、长江口、闽江口、珠江口和黄河口等^[4-13]主要河口的潮滩湿地土壤 C、N、P 质量分数和储量开展了大量研究, 而对 S 和 K 等生源要素质量分数及储量时空动态变化的研究较少.

黄河口湿地是由黄河携带大量泥沙在入海口淤积而成的新生湿地^[14]. 潮间带盐沼湿地受潮汐作用显著, 是海陆间的缓冲带, 发挥着净化污水、削减陆源污染物入海通量的作用^[15], 在维持滨海湿地生物多样性方面具有不可替代的作用^[16]. 湿地土壤生源

要素地球化学过程是黄河口湿地形成、发育和演化的重要驱动力. 目前已有学者对黄河三角洲湿地土壤 C、N、P 质量分数及储量分布特征开展了相关研究^[13, 15-19], 急需开展 S、K 等生源要素质量分数和储量时空分布特征研究, 进而实现对黄河三角洲湿地土壤肥力的综合评估. 因此, 本研究以黄河口潮间带芦苇湿地土壤为主要研究对象, 探究了 N、P、S、K 等土壤生源要素质量分数和储量时空变化特征及其关键影响因素, 以为黄河三角洲滨海湿地土壤品质管理和生态系统功能提升提供理论指导.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况 黄河三角洲(37°35'~38°12'N, 118°33'~119°20'E)位于山东省东营市, 地处黄河入海口, 毗邻渤海湾, 是我国温带最完整、最广阔和最年轻的原生湿地生态系统^[20]. 属温带大陆性季风气候, 四季分明, 年平均气温 12.1 °C, 年平均降雨量 576.7 mm, 无霜期 196 d, 年平均蒸发量达 1962 mm^[21]. 土壤质地以轻壤土和中壤土为主, 主要土壤类型为

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0505906); 北京师范大学学科交叉建设项目(11500-312231104)

[†] 通信作者: 白军红(1976—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 湿地水土过程和调控、湿地退化与生态恢复. E-mail: junhongbai@163.com
收稿日期: 2020-07-25

潮土和盐土. 芦苇是该区域的主要优势植被之一.

1.2 样品采集与分析 在黄河三角洲潮间带, 选择典型芦苇湿地作为采样区域, 该区域芦苇群落呈带状分布, 且与盐地碱蓬群落呈层状交替分布. 在黄河故道左侧设置 3 个样点: 样点垂直于黄河故道, 从黄河故道向图 1 所示道路依次分布, 样点间隔均约为 200 m. 土壤样品采集分别在夏季(8月)、秋季(11月)和次年春季(4月)进行, 在每个样地设置土壤剖面, 按 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 深度采集土壤剖面样品, 每层土壤做 3 个重复, 将相同土层的样品进行混合, 共获得 36 个混合土壤样品. 同时使用环刀取原状土, 用于测定土壤密度和水土质量比.

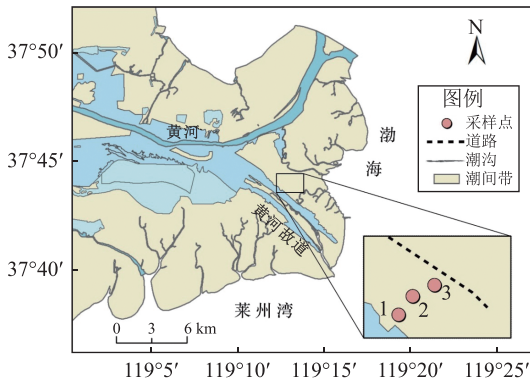


图 1 黄河口采样点位置

所有土壤样品装入自封袋带回实验室, 风干 3 周后, 剔除石块和植物残根. 将一部分风干土样研磨后过 0.85 mm 筛, 测定土壤 pH 和电导率(EC); 将另一部分风干土样研磨过 0.149 mm 筛, 用于测定其他化学指标. 土壤 pH 和电导率(水土质量比为 1:5) 分别使用 pH 计和盐度计测定; 土壤密度和水土质量比采用烘干法测定, 将环刀采集的土样在 105 °C 烘箱内烘 24 h 至质量恒定; 土壤总氮(TN)质量分数使用元素分析仪测定; 土壤有机质(SOM)质量分数采用重铬酸钾稀释热比色法测定; 土壤总磷(TP)、总硫(TS)、总钾(TK)、铝(Al)、镁(Mg)质量分数使用 ICP-AES 电感耦合等离子体光谱仪测定.

1.3 数据处理 对实验数据进行初步整理, 计算每个土层的土壤生源要素储量^[15], 计算公式为

$$S(\text{TN}) = \rho_b \cdot w(\text{TN}) \cdot h \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

$$S(\text{TP}) = \rho_b \cdot w(\text{TP}) \cdot h \cdot 10^{-2}, \quad (2)$$

$$S(\text{TK}) = \rho_b \cdot w(\text{TK}) \cdot h \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

$$S(\text{TS}) = \rho_b \cdot w(\text{TS}) \cdot h \cdot 10^{-2}, \quad (4)$$

式中: $S(\text{TN})$ 为土壤总氮储量(TNS), $S(\text{TP})$ 为土壤

总磷储量(TPS), $S(\text{TK})$ 为土壤总钾储量(TKS), $S(\text{TS})$ 为土壤总硫储量(TSS), 单位均为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; ρ_b 为土壤密度(BD), 单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $w(\text{TN})$ 、 $w(\text{TP})$ 、 $w(\text{TK})$ 和 $w(\text{TS})$ 分别为生源要素 TN、TP、TS 和 TK 的质量分数, 单位均为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; h 为土层深度, 单位为 cm; 10^{-2} 为单位换算系数. 各生源要素 0~50 cm 总储量为各层(0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm) 储量的和.

2 结果与讨论

2.1 潮间带芦苇湿地土壤生源要素质量分数的时空分布特征

2.1.1 土壤总氮质量分数($w(\text{TN})$) 如图 2 和表 1 所示, 潮间带芦苇湿地 0~50 cm 土壤 $w(\text{TN})$ 变化范围为 68.19~421.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 214.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土层中 $w(\text{TN})$ 平均值分别为 290.55、195.26、198.55 和 172.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 春季土壤 $w(\text{TN})$ 呈现“S”形剖面分布特征, 其中 0~10 cm 土层土壤最高, >20~30 cm 土层高于 >10~20 cm 土层, >30~50 cm 土层最低. 植物残体归还还是土壤中 N 元素的主要输入途径, 还有少部分来源于大气干湿沉降, 因此表层土壤 N 质量分数较高^[22]. 从季节变化来看, 土壤 $w(\text{TN})$ 由高到低呈现出春季、夏季、秋季的特征, 平均值分别为 262.27、

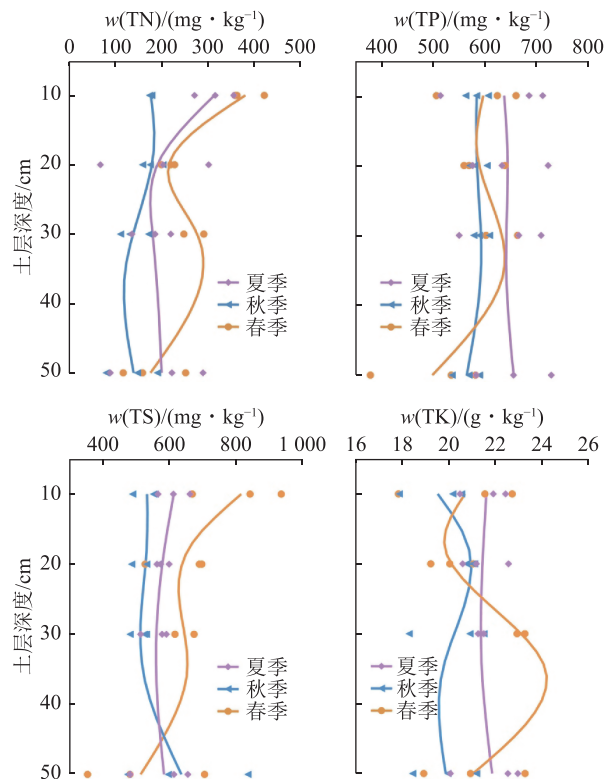


图 2 潮间带芦苇湿地土壤生源要素质量分数剖面分布的季节动态变化特征

表1 潮间带芦苇湿地土壤生源要素平均质量分数剖面分布的季节变化特征

生源要素	土壤深度/cm	平均质量分数/(mg · kg ⁻¹)		
		夏季	秋季	春季
TN	0~10	314.10±42.15bc	176.99±2.78ab	380.56±35.35c
	>10~20	190.73±117.07ab	179.22±22.24ab	215.84±14.54abc
	>20~30	180.59±42.29ab	138.41±30.98a	276.65±24.79abc
	>30~50	200.38±101.69ab	139.97±55.59a	176.02±69.02ab
TP	0~10	637.41±106.86a	584.71±21.75a	597.18±80.16a
	>10~20	644.02±73.43a	585.21±17.25a	589.58±42.91a
	>20~30	641.69±81.63a	592.62±15.21a	632.99±42.99a
	>30~50	655.66±72.52a	565.41±26.65a	499.19±106.05a
TS	0~10	614.06±47.66ab	534.47±37.87ab	815.85±135.22b
	>10~20	579.79±18.56ab	529.81±40.06ab	638.92±95.92ab
	>20~30	562.12±41.15ab	513.97±26.41a	646.22±40.33ab
	>30~50	584.73±90.23ab	636.70±182.94ab	515.14±177.26a
TK	0~10	21 612.14±1 007.39a	19 537.32±1 440.82a	20 704.56±2 538.3a
	>10~20	21 448.32±1 005.36a	20 965.61±186.11a	20 116.65±911.29a
	>20~30	21 381.78±119.02a	20 240.28±1 702.65a	23 095.22±235.53a
	>30~50	21 863.04±1 555.05a	19 879.73±1 374.94a	21 049.18±2 164.44a

注: 表中数据为平均值±标准差, 同一指标数据右侧不同的小写字母abc表示统计分析的显著性差异($p < 0.05$).

221.45 和 158.65 mg · kg⁻¹, 其中在土壤深度 0~10 cm 处季节变化差异显著 ($P < 0.01$), 这可能主要与植物生长和吸收氮素有关.

2.1.2 土壤总磷质量分数($w(\text{TP})$) 研究区 0~50 cm 土壤 $w(\text{TP})$ 变化范围为 379.8~728.3 mg · kg⁻¹, 平均值为 601.26 mg · kg⁻¹. 在研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土层 $w(\text{TP})$ 平均分别为 606.43、606.27、621.11 和 573.42 mg · kg⁻¹, 呈现表层土壤低于 >20~30 cm 土层. 以往学者在研究辽河口^[4]、黄河口^[16]、闽江口^[23] 等区域土壤磷素剖面特征时, 也发现有大河口湿地表层土壤 $w(\text{TP})$ 低于下层土壤, 其原因可能是河口湿地土壤表层磷素更容易受潮水侵蚀和淋溶作用而流失^[24]. 从季节变化来看, 总体而言, 夏季 $w(\text{TP})$ 较高 (644.70 mg · kg⁻¹), 春季 (574.89 mg · kg⁻¹) 和秋季 (581.99 mg · kg⁻¹) 差异不大, 但季节之间不存在显著性差异. $w(\text{TP})$ 夏季较高的原因可能与上一年的植物磷累积和归还^[25] 以及夏季降雨导致的磷沉降^[26] 有关.

2.1.3 土壤总硫质量分数($w(\text{TS})$) 研究区 0~50 cm 土壤 $w(\text{TS})$ 变化范围为 356.15~935.77 mg · kg⁻¹, 平均值为 596.26 mg · kg⁻¹. 于君宝^[27] 等研究表明, 相比于其他植被, 黄河三角洲自然植被覆盖区域中芦苇湿地土壤 $w(\text{TS})$ 较高, 0~30 cm 土壤 $w(\text{TS})$ 为 753~822

mg · kg⁻¹ (见表 2), 这与本研究结果相近. 研究期内 0~10 cm、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土层中土壤 TS 平均质量分数分别为 654.80、582.84、565.09 和 578.86 mg · kg⁻¹. 土壤 $w(\text{TS})$ 具有明显的季节性差异, 其平均值由高到低排序呈现春季 (654.74 mg · kg⁻¹)、夏季 (585.18 mg · kg⁻¹)、秋季 (553.74 mg · kg⁻¹). 表层土壤 (0~10 cm) $w(\text{TS})$ 高, 且具有明显的季节变化. 在春季, 不同剖面深度土壤样品的 $w(\text{TS})$ 之间存在显著差异, 表层土壤 $w(\text{TS})$ 显著高于底层土壤 ($P < 0.05$). 有研究表明, 有机质含量对土层中土壤 S 含量有着重要影响^[28]. 研究区芦苇以枯落物形式返还于土壤中, S 含量随之显著波动, 进而引起土壤 $w(\text{TS})$ 的剖面分布变化的季节波动.

2.1.4 土壤总钾质量分数($w(\text{TK})$) 研究区 0~50 cm 土壤 $w(\text{TK})$ 变化范围为 17 852.41~23 265.30 mg · kg⁻¹, 平均值为 20 931.04 mg · kg⁻¹. 研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土层中土壤 $w(\text{TK})$ 平均值分别为 20 618.01、20 843.53、21 382.08 和 20 930.65 mg · kg⁻¹, 不同样地间的差异较大. 春季各层土壤 $w(\text{TK})$ 差异较大, 最大值出现在 >20~30 cm 土层; 夏季和秋季各层土壤 $w(\text{TK})$ 差异较小. 与刘昕等^[29] 对黄河三角洲芦苇湿地 0~60 cm 土壤 $w(\text{TK})$ 的测定 (12.40~15.45 g · kg⁻¹, 见表 2) 相比, 本研究测得土壤 $w(\text{TK})$ 较高, 但其数值仍低于辽河口芦苇湿地土壤 (20.69~23.38

表 2 不同河口芦苇湿地土壤的生源要素含量

研究区域	土层深度/cm	$w/(g \cdot kg^{-1})$				数据来源
		TN	TP	TS	TK	
闽江口	0~50	0.66~1.80	0.36~1.51	1.17~2.32		文献[23]、[9]
辽河口	0~40	1.06~1.95	0.22~0.27		20.69~23.38	文献[4]、[30]
长江口	0~20	0.20~0.70	0.44~3.38			文献[41]
黄河口	0~60	0.03~0.33			12.40~15.45	文献[31]、[29]
	0~50		0.48~0.58			文献[42]
	0~30			0.75~0.82		文献[27]
	0~50	0.07~0.42	0.38~0.73	0.36~0.94	17.85~23.27	本研究

$g \cdot kg^{-1}$)^[30]. 这可能与芦苇湿地的空间异质性有关.

2.2 潮间带芦苇湿地土壤生源要素储量的时空分布特征

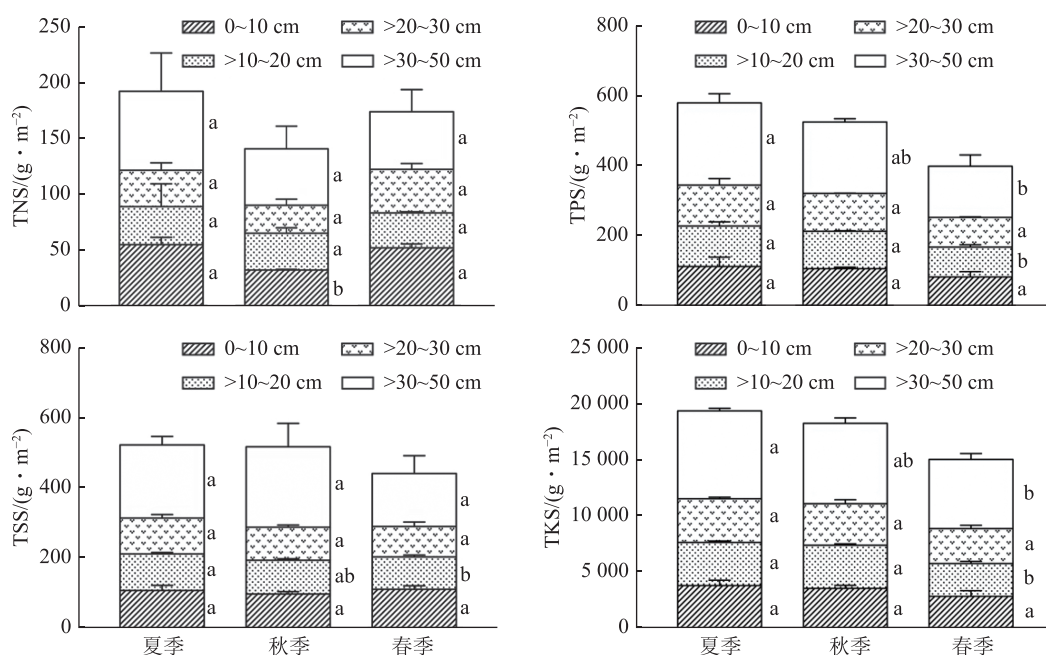
2.2.1 土壤总氮储量 (TNS)

如图 3 所示, 黄河口潮间带芦苇湿地 0~50 cm 土壤 TNS 为 109.66~227.36 $g \cdot m^{-2}$, 低于闽江口、长江口芦苇湿地土壤同等深度的 TNS(见表 3)^[23]. 研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 深度土壤氮储量分别占总储量的 27.46%、19.37%、19.10% 和 34.07%, 其中 0~30 cm 土层 TNS 占比为 65.93%. 这表明土壤 TN 主要储存在上部土层, 但是下部土层的 TN 储量也不容忽视, 这与夏志坚等^[31]对黄河三角洲芦苇盐沼土壤的研究结果相似. 已有研究表明, 在天然滨海湿地中, 表层土壤受到植物根系归还、大气 N 沉降和地表径流输入等 N 输入过程的影响, 因此 N 可在表层土壤中发生累积^[32]. 从季节变化来看, 0~50 cm 土壤 TNS 呈现

夏季、春季高, 而秋季低的变化特征, 其中最高值出现在夏季, 平均 TNS 为 191.96 $g \cdot m^{-2}$, 最低值出现在秋季 (140.49 $g \cdot m^{-2}$). 就 0~10 cm 土层而言, 秋季 TNS 显著低于夏季和春季 ($P < 0.05$).

2.2.2 土壤总磷储量 (TPS)

研究区 0~50 cm 土壤 TPS 为 350.74~625.27 $g \cdot m^{-2}$. 从不同深度来看, 研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土层中土壤 TPS 分别占总储量的 20.05%、20.49%、20.57% 和 38.89%; 与 TNS 相似, 0~30 cm 土层占土壤 TPS 的 61.11%, >30~50 cm 土层的 TPS 占比大于 38%. 有研究表明, 土壤 P 在剖面中垂直向下淋溶量极少, P 迁移的主要原因可能是地表径流和土壤侵蚀^[22, 33]. 0~50 cm 土壤 TPS 具有显著的季节变化特征 ($P < 0.05$), 从夏季、秋季到次年春季依次降低, 其中最高值出现在夏季, 平均储量达 578.91 $g \cdot m^{-2}$, 而春季平均储量最低, 仅为 398.62 $g \cdot m^{-2}$. 表层和深层土壤的 P 储



注: 图右侧不同的小写字母代表同一深度、不同季节的土壤生源要素储量之间存在显著性差异 ($P < 0.05$).

图 3 潮间带芦苇湿地土壤生源要素储量剖面分布的季节变化

量季节变化是 TP 剖面储量季节变化的主要原因, >10~20 cm ($P<0.05$) 和 >30~50 cm ($P<0.001$) 土层的 TPS 季节差异均达到显著性水平, 呈现出夏季高于秋季、秋季高于春季的季节变化规律. 有研究表明: 芦苇 P 储量与表层土壤 P 储量呈弱负相关关系^[34], 春季芦苇对 P 的吸收积累降低了表层土壤中的 P 储量; 而土壤 TPS 最高值出现在夏季, 可能与调水调沙工程输入的大量 P 元素有关^[35].

2.2.3 土壤总硫储量 (TSS) 研究区 0~50 cm TSS 为 331.15~575.70 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于闽江口芦苇湿地同等深度土层的 TSS (839.34 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 见表 3)^[9]. 研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 深度土壤 TS 平

均储量分别为 101.32、97.50、94.13 和 195.96 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占总储量的 21.37%、19.78%、19.10% 和 39.76%; 0~30 cm 土层占土壤 TSS 的 60.24%, 而 >30~50 cm 土壤 TSS 占比接近 40%. 从季节变化来看, 0~50 cm 土层夏季 (521.96 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 和秋季 (516.33 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) TSS 相当, 均高于春季 (492.90 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). 夏季 10~20 cm 土层中土壤 TSS 明显高于春季 ($P<0.05$); 而 >30~50 cm 土层中土壤 TSS 则呈现夏秋季明显大于春季, 尽管在统计上并无显著性差异 ($P>0.05$); 该土层 TSS 的季节波动是整个土壤剖面中土壤 TSS 呈现季节变化的主要原因.

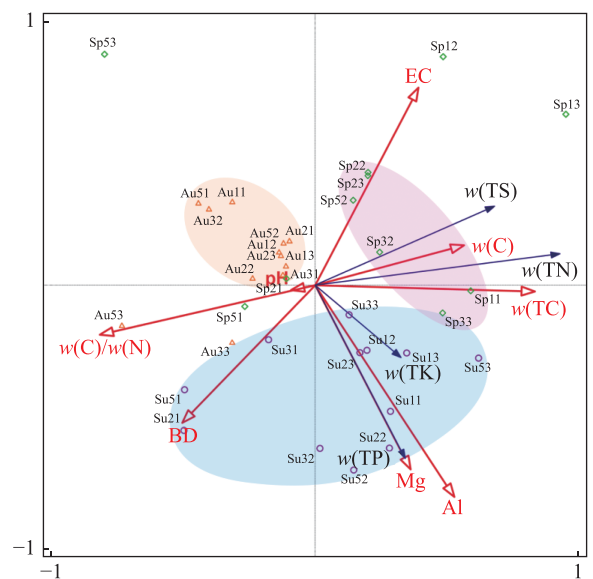
表 3 不同河口芦苇湿地土壤生源要素储量

研究区域	土层深度/cm	$S/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$				数据来源
		TN	TP	TS	TK	
闽江口	0~50	201.27~640.05	313.80~523.61	839.34		文献[23]、[9]
辽河口	0~20	216.89~956.47	133.99~217.54			文献[34]
长江口崇明东滩	0~50	363~510				文献[5]
黄河口	0~50	57~244	204.13	165.36		文献[31]、[27]、[41]
黄河口	0~50	109.66~227.36	350.74~625.27	331.15~575.70	12220.77~19780.33	本研究

2.2.4 土壤总钾储量 (TKS) 在不同季节, 研究区 0~50 cm 土壤 TKS 为 12 220.77~19 780.33 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. 研究期内 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~50 cm 土层的土壤 TK 平均储量分别为 3 399.64、3 529.79、3 552.37 和 7 033.81 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占剖面总储量的 19.41%、20.15%、20.28%、40.16%; 0~30 cm 土层占土壤 TKS 的 59.84%, >30~50 cm 土层中土壤 TKS 占比超过 40%. 芦苇群落有密集根系, 芦苇根系从中层土壤吸收的 K 一部分被利用, 一部分归还给土壤, 造成芦苇群落表层和深层存在差异^[29]. 土壤 TKS 的季节变化特征与 P 相似, 0~50 cm 土壤夏季 TKS (19 318.73 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 高于秋季 (18 209.34 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)、秋季高于春季 (15 018.76 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 且具有显著性差异 ($P<0.05$). 夏季、秋季 >10~20 cm 土层中土壤 TKS 明显高于春季 ($P<0.05$), 而夏季 >30~50 cm 土层中土壤 TKS 明显高于秋季 ($P<0.05$).

2.3 土壤生源要素质量分数和储量与土壤环境变量的关系 黄河三角洲潮间带芦苇湿地土壤生源要素质量分数的 RDA 分析结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 研究区湿地土壤生源要素质量分数呈现出明显的季节差异: 春季样品主要分布在坐标轴的第一象限; 夏季样品分布范围最广, 主要分布在第三象限和第四象限; 秋季样品分布最集中, 主要分布在第二象限. 然而, 不同土层的样品并没有被明显区分开.

RDA 分析结果表明, 4 个排序轴特征值分别为 0.4447、0.2378、0.1226 和 0.0437, 其中前 3 个轴综合解释了 80.5% 的累计方差, 环境变量对土壤生源要素质量



注: 图中编号代表采集的土壤样品, 编号中字母表示采样季节 (Su 表示夏季, Au 表示秋季, Sp 表示春季), 编号中第一位数字表示土层深度 (1 表示 0~10 cm, 2 表示 >10~20 cm, 3 表示 >20~30 cm, 5 表示 >30~50 cm), 编号第二位表示样地编号. 图中同一个半透明椭圆表示处于相同的季节.

图 4 黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素质量分数与土壤环境变量的 RDA 分析

分数的解释量累计达到了 86.7%。如图 4 所示,横轴正方向表征了土壤的高含水率和高碳质量分数;横轴负方向表征了较高的土壤碳氮质量比;纵轴正方向表征了土壤的高 EC;横轴正方向和纵轴负方向表征了较高的铝镁化合物含量。从采样点的分布来看,在植物生长旺盛期(夏季)土壤生源要素质量分数受多种因素(Al、Mg、密度)的综合影响,在植物凋落期(秋季)主要受 Al、Mg 影响且呈负相关,而在植物生长初期(春季)则主要受含水率、EC 和 TC 影响。

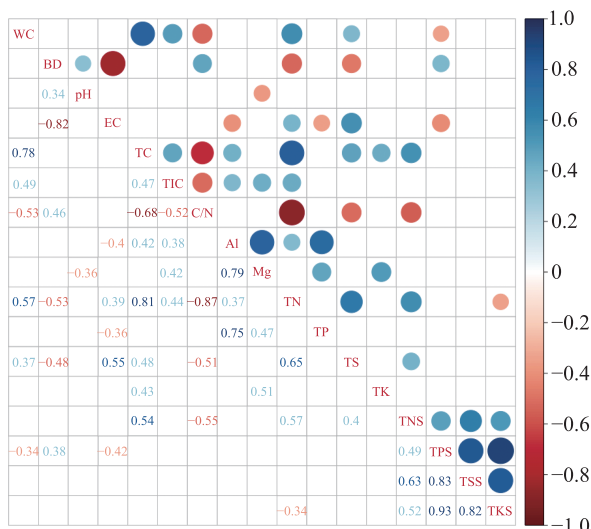
湿地土壤的理化性质能够反映土壤结构状况和蓄水能力,影响湿地植物生长和群落演替,从而制约着土壤中营养元素的含量^[15]。由 RDA 中响应变量与解释变量对应射线的夹角余弦值可知(图 4),土壤含水率、TC 的增大对土壤生源要素中 S、N 质量分数的增加有正向影响,而土壤密度和碳氮质量比的增大则对其有负影响。相关性分析的可视化结果(图 5)也显示,土壤 TN 质量分数与土壤含水率、TC、EC、总无机碳、Al 呈显著正相关($P<0.05$),而与土壤密度、碳氮质量比呈显著负相关($P<0.05$)。土壤总氮储量与 TC 质量分数也呈极显著正相关关系($P<0.01$),与碳氮质量比呈极显著负相关关系($P<0.01$),这说明黄河口芦苇湿地土壤中 N 的保持能力受限于 TC 质量分数,一定范围内的碳氮质量比增加促进了有机 N 矿化,从而导致土壤 N 流失^[36]。土壤 TS 质量分数与上述土壤理化因子也呈现显著

相关性($P<0.05$),但土壤 TKS 与这些土壤环境因子均未呈现显著相关性($P>0.05$)。土壤有机质中 N 和 S 官能团含量较高^[37],这可能是土壤总硫含量与总氮含量关系密切的原因^[27]。于君宝等^[27]研究认为海水中的 S 是黄河三角洲滨海湿地土壤中 S 的重要输入源之一,这可以在一定程度上解释土壤 EC 与 TN、TS 质量分数之间的显著正相关性。而较小的土壤密度表明土壤较为疏松,通透性较好,持水和蓄水性能强,肥力较高,营养元素含量较高^[38]。

RDA 分析表明土壤中铝镁化合物的增加对土壤生源要素中 TP 质量分数的增加有正向影响。相关性分析也表明,TP 与 Al、Mg 呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.75 和 0.47。其原因在于土壤中的活性 Al、Mg 可与土壤 P 结合形成 Al-P 和 Mg-P 等形态的无机 P^[39]。TP 与 EC 呈显著负相关关系($P<0.05$),这可能是由于高盐环境抑制了土壤中 P 相关微生物的活性^[40]。土壤 TPS 与土壤含水率和 EC 之间也存在显著负相关关系($P<0.05$)。TK 与 Mg 和 TC 夹角较小(图 4),且 TK 与 Mg($P<0.01$)和 TC($P<0.01$)呈显著正相关(图 5),表明湿地土壤 TK 质量分数受制于土壤 Mg 和 TC 质量分数的变化。但土壤 TKS 与这些土壤环境因子均未呈现显著相关性($P>0.05$)。影响黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素质量分数与储量的其他因素还有待进一步研究。

3 结论

黄河口潮间带芦苇湿地 0~50 cm 土壤剖面中:TN、TS 质量分数总体偏低,平均值最高值出现在表层,在 3 个季节中春季较高;TP 在土壤剖面中分布较为均匀,最高值出现在夏季;而 TK 质量分数无明显剖面分布特征。研究区土壤的生源要素(N、P、S、K)储量总体较低,且主要集中在 0~30 cm 土层,约占总储量的 60%,但下部土层的储量也不容忽视。该区湿地土壤生源要素平均储量具有明显的季节变化,土壤 TNS 由高到低排序呈现夏季、春季、秋季,TPS 和 TKS 呈现夏季、秋季、春季,TSS 呈现春季低于夏季和秋季。冗余分析和相关性分析表明,土壤 TC、EC、Mg、Al 等与生源要素质量分数密切相关,TN 与 TS、TP 与 TK 质量分数的影响因素较为一致。TC 质量分数和碳氮比是影响土壤 TNS 的重要因素,而密度、含水率和 EC 则是影响土壤 TPS 的重要因素。但是黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素迁移转化的影响机制尚不十分清晰,还有待进一步深入研究。黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素储量仍有很大的埋藏潜力,可通过控制人为活动(如管理芦苇收割、调控水盐)等方法来提升潮间带芦苇湿地的土壤



注: WC 代表土壤含水率(%), BD 代表土壤密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), EC 代表土壤电导率($\text{mS} \cdot \text{m}^{-3}$), TC 和 TIC 分别代表土壤总碳和土壤总无机碳质量分数($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), C/N 代表碳氮比, Al 和 Mg 分别代表金属铝和镁质量分数($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

左下角单元格内数字代表具有显著相关性($P<0.05$)的相关系数,空白单元格代表无显著性($P>0.05$)。

图 5 黄河口潮间带芦苇湿地土壤生源要素与土壤环境变量的相关关系

肥力和土壤品质, 进而增加潮间带芦苇湿地的生产力。

4 参考文献

- [1] KIRWAN M L, MEGONIGAL J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 53
- [2] CRAFT C. Biogeochemistry of wetlands: science and applications[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(2): 692
- [3] 赵永全, 何彤慧, 夏贵菊. 银川平原芦苇湿地土壤含水量及土壤生源要素垂直分布特征[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 37
- [4] 周红. 辽河口湿地土壤中生源要素分布、污染评价及计量学分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012
- [5] 陈怀璞, 张天雨, 葛振鸣, 等. 崇明东滩盐沼湿地土壤碳氮储量分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(3): 242
- [6] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(10): 1709
- [7] CHEN W, GE Z M, FEI B L, et al. Soil carbon and nitrogen storage in recently restored and mature native *Scirpus* marshes in the Yangtze Estuary, China: implications for restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 150
- [8] 仝川, 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
- [9] 何涛, 孙志高, 李家兵, 等. 闽江河口芦苇与短叶荳蔻空间扩展植物-土壤系统硫含量变化特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1607
- [10] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(2): 111
- [11] LIAN Z L, JIANG Z J, HUANG X P, et al. Labile and recalcitrant sediment organic carbon pools in the Pearl River Estuary, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640: 1302
- [12] HUANG C, BAI J H, WANG J J, et al. Spatial variability of nitrogen and phosphorus in wetland soils of the Yellow River Delta, China[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 610: 1028
- [13] BAI J H, YU L, Du S D, et al. Effects of flooding frequencies on soil carbon and nitrogen stocks in river marginal wetlands in a ten-year period[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 267: 110618
- [14] CUI B S, YANG Q C, YANG Z F, et al. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090
- [15] 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
- [16] 于子博, 庄涛, 白军红, 等. 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷含量和储量的季节动态变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 155
- [17] YE X F, BAI J H, LU Q Q, et al. Spatial and seasonal distributions of soil phosphorus in a typical seasonal flooding wetland of the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(11): 4811
- [18] YU J B, QU F Z, WU H F, et al. Soil phosphorus forms and profile distributions in the tidal river network region in the Yellow River Delta Estuary[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 2014: 912083
- [19] ZHAO Q Q, BAI J H, WANG X, et al. Soil organic carbon content and stock in wetlands with different hydrologic conditions in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecology and Hydrobiology*, 2020, 20(4): 537
- [20] 李晓晓, 杨薇, 孙涛, 等. 黄河故道尾间湿地大型底栖动物群落对生态补水的响应研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 64
- [21] BAI J H, YU Z B, YU L, et al. In-situ organic phosphorus mineralization in sediments in coastal wetlands with different flooding periods in the Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 682: 417
- [22] 王军静, 白军红, 赵庆庆, 等. 哈拉海湿地芦苇沼泽土壤碳、氮和磷含量的剖面特征[J]. *湿地科学*, 2014, 12(6): 690
- [23] 贾瑞霞. 闽江河口湿地沉积物碳、氮、磷含量及储量特征[D]. 福州: 福建师范大学, 2009
- [24] GUDIMOV A, RAMIN M, LABENCKI T, et al. Predicting the response of Hamilton Harbour to the nutrient loading reductions: a modeling analysis of the "ecological unknowns" [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, 37(3): 494
- [25] GAO Z Q, BAI J H, JIA J, et al. Spatial and temporal changes of phosphorus in coastal wetland soils as affected by a tidal creek in the Yellow River Estuary, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 89/90: 114
- [26] TRIPATHI S K, KUSHWAHA C P, SINGH K P. Tropical forest and savanna ecosystems show differential impact of N and P additions on soil organic matter and aggregate structure[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2572
- [27] 于君宝, 褚磊, 宁凯, 等. 黄河三角洲滨海湿地土壤硫含量分布特征[J]. *湿地科学*, 2014, 12(5): 559
- [28] SCHROTH A W, BOSTICK B C, GRAHAM M, et al. Sulfur species behavior in soil organic matter during decomposition[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, 112(G4): 1
- [29] 刘昕, 靖淑慧, 冯若昂, 等. 黄河三角洲土壤钾对植物群落的响应研究[J]. *科技资讯*, 2017, 15(3): 108
- [30] 郑云云. 辽河口退化湿地土壤理化性质及其对芦苇生长影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015
- [31] 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
- [32] 余璐, 白军红, 于子博, 等. 东营港附近排水湿地土壤全氮和微生物量氮的含量和储量[J]. 湿地科学, 2019, 17(5): 600
- [33] 赵海洋, 王国平, 刘景双, 等. 三江平原湿地土壤磷的吸附与解吸研究[J]. 生态环境学报, 2006, 15(5): 930
- [34] 罗先香, 张珊珊, 敦萌. 辽河口湿地碳、氮、磷空间分布及季节动态特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(12): 97
- [35] BAI J H, XIAO R, ZHANG K J, et al. Arsenic and heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater and salt marshes before and after the flow-sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 450/451: 244
- [36] WILD B, LI J, PIHLBLAD J, et al. Decoupling of priming and microbial N mining during a short-term soil incubation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 129: 71
- [37] 林鹏, 陈荣华. 红树林有机碎屑在河口生态系统中的作用[J]. 生态学杂志, 1991, 10(2): 45
- [38] 罗先香, 敦萌, 闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 154
- [39] SATTI P, MAZZARINO M J, ROSELLI L, et al. Factors affecting soil P dynamics in temperate volcanic soils of southern Argentina[J]. Geoderma, 2007, 139: 229
- [40] RIETZ D N, HAYNES R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 845
- [41] 陈华. 长江口滨岸湿地盐生植被对生源要素循环的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2006
- [42] 孙万龙, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤磷、硫的分布特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 104

Dynamics of soil biogenic element in *Phragmites australis* wetlands in intertidal zone in the Yellow River Estuary

WEI Zhuoqun BAI Junhong[†] ZHANG Ling ZHANG Guangliang
WANG Xin WANG Wei JIA Jia

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Wetland soil serves as source, sink and transfer conduit of biogenic elements. Soil profiles to a depth of 50 cm in *Phragmites australis* wetlands in intertidal zone in the Yellow River Estuary were collected at levels of 0-10, >10-20, >20-30 and >30-50 cm in three sampling seasons (summer, autumn and spring). The spatio-temporal dynamics and influencing factors of contents and stocks of biogenic elements including total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total sulfur (TS) and total potassium (TK) were examined. TN and TS contents in the top 50 cm soil were found to range from 68.19-421.29 mg · kg⁻¹ and from 356.15-935.77 mg · kg⁻¹, respectively. Contents were the highest in surface-soils, the highest in the spring among the three sampling seasons. TP contents were found to vary from 379.80-728.30 mg · kg⁻¹, with more uniform distributions, but with the highest content in summer season. TK contents varied from 17 852.41-23 265.30 mg · kg⁻¹, with no obvious profile distribution. Total nitrogen stocks (TNS) in the top 50 cm soil were found to be 109.66-227.36 g · m⁻², total phosphorus stocks (TPS) 350.74-625.27 g · m⁻², total sulfur stocks (TSS) 331.15-575.70 g · m⁻², total potassium stocks (TKS) 12 220.77-19 780.33 g · m⁻². Biogenic element stocks were mainly concentrated in the top 30 cm soil. TNS followed the order of summer, spring, autumn, while TPS and TKS followed the order of summer, autumn, spring ($P < 0.05$). TSS in spring was lower than in summer and autumn. Redundancy analysis and correlation analysis showed that total soil carbon, electrical conductivity, Mg and Al were closely related to contents of biogenic elements. It is concluded that total carbon content and carbon-nitrogen ratio were important factors influencing TNS. Bulk density, moisture content and electrical conductivity were important factors affecting TPS.

Keywords *Phragmites australis* wetlands; wetland soils; biogenic elements; stocks; profile distribution; seasonal dynamics