DOI: 10.20103/j.stxb.202312192762

倪冉旭,胡敏杰,钟懿,闫睿冰,吴辉,王景涛,刘春雅,廖浩宇.闽江河口湿地土壤磷形态变化对盐度增加的响应及其影响因素.生态学报,2024,44 (16):7140-7149.

Ni R X, Hu M J, Zhong Y, Yan R B, Wu H, Wang J T, Liu C Y, Liao H Y.Response of soil phosphorus forms to increased salinity in the Min River estuarine wetlands and its drivers. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16):7140-7149.

闽江河口湿地土壤磷形态变化对盐度增加的响应及其 影响因素

倪冉旭¹, 胡敏杰^{1,2,*}, 钟 懿¹, 闫睿冰¹, 吴 辉¹, 王景涛¹, 刘春雅¹, 廖浩宇¹ 1 福建师范大学地理科学学院, 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350117

2 国家林业和草原局福建闽江河口湿地生态系统国家定位观测研究站,福州 350215

摘要:以闽江河口湿地为研究对象,沿自然盐度梯度分别采集不同盐度区的短叶茳芏湿地(有植被)和光滩(无植被)土壤样品, 对不同盐度条件下土壤理化性质、植物生物量及土壤磷形态等进行研究,以评估盐度增加对湿地土壤磷形态变化的影响及其调 控因子。结果表明:①不同盐度条件下,土壤全磷和各形态磷含量大体表现为短叶茳芏湿地高于无植被的光滩,尤其在淡水条 件下最为显著。总体上,随盐度增加,土壤全磷和有机磷含量逐渐减低,无机磷和氢氧化钠磷含量表现为先降低后增加,而盐酸 磷含量则逐渐增加。无机磷是闽江河口不同盐度湿地土壤全磷的主要赋存形态,分别占全磷的 74%、77%和 83%,占比随盐度 增加而增大。②不同植被条件下,短叶茳芏湿地土壤全碳、全氮含量和氮磷比均显著高于光滩土壤(P<0.05)。不同盐度条件 下,淡水区土壤全碳、全氮含量和碳氮比均显著高于咸水湿地,并且高盐区大于中盐区(P<0.05)。③地上和地下植物生物量沿 盐度梯度呈现明显不同的趋势,地上生物量表现为随盐度增加而增大,地下生物量在淡水区高于咸水区,尤其是显著高于中等 盐度区。④相关分析显示,盐度及其关联的地上/地下生物量、全碳、全氮和有机质含量等的变化共同调控了土壤磷形态和有效 性的变化。研究表明,滨海河口湿地盐度的增加通过改变土壤有机质含量和地上/地下植物生物量,调控了土壤磷的形态和转 化,进而影响湿地生态系统的养分循环和化学计量平衡。

关键词:磷形态;有机质;生物量;自然盐度梯度;闽江河口湿地

Response of soil phosphorus forms to increased salinity in the Min River estuarine wetlands and its drivers

NI Ranxu¹, HU Minjie^{1,2,*}, ZHONG Yi¹, YAN Ruibing¹, WU Hui¹, WANG Jingtao¹, LIU Chunya¹, LIAO Haoyu¹

- 1 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Processes, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China
- 2 Fujian Minjiang Estuary Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350215, China

Abstract: In the Min River estuarine wetlands, we investigated the changes in soil physicochemical properties, plant biomass, and soil phosphorus (P) forms in *Cyperus malaccensis* wetlands and bare mudflats under different salinity conditions, to assess the impact of the increased salinity on the changes in soil P forms and their regulating factors. The results showed that: (1) Across diverse salinity conditions, soil total P and various P forms consistently showed higher

基金项目:国家自然科学基金(42171102);福建省林业科技项目(2023FKJ14);中央财政林业科技推广示范项目(闽【2024】TG28号);福建省自 然科学基金(2021J01177)

收稿日期:2023-12-19; 网络出版日期:2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: mjhu@fjnu.edu.cn

levels in *C. malaccensis* wetlands than in bare mudflats, with a notable significance under freshwater conditions. Overall, as salinity increased, soil total P and organic P contents gradually decreased, while inorganic P and NaOH-P contents initially decreased then increased, and HCl-P gradually increased. Inorganic P was identified as the primary form of soil total P in the Min River estuarine wetlands, accounting for 74%, 77%, and 83% of total P, with the proportion increasing with salinity. (2) Under varying vegetation conditions, soil total carbon (C), total nitrogen (N), and N:P ratios in *C. malaccensis* wetlands surpassed those in bare mudflat soils (P < 0.05). Furthermore, in different salinity conditions, soil total C, total N, and C:N ratios in freshwater sites were notably higher than in saltwater wetlands, with high salinity areas exceeding moderate (P < 0.05). (3) Plant aboveground and belowground biomass exhibited distinct trends along the salinity gradient. Aboveground biomass increased with rising salinity, while belowground biomass was more substantial in freshwater sites than in saltwater, particularly significantly higher in moderately salinity. (4) Correlation analysis indicated that changes in salinity and its associated aboveground/belowground biomass, total C, total N, and organic matter collectively regulated the variations in soil P forms and availability. The study suggests that increasing salinity in coastal estuarine wetlands alters soil organic matter content and aboveground/belowground biomass, thereby influencing the forms and transformation of soil P. This, in turn, has implications for nutrient cycling and stoichiometric balance in wetland ecosystems.

Key Words: phosphorus form; organic matter; plant biomass; natural salinity gradient; Min River estuarine wetland

磷是自然生态系统中不可或缺的元素之一,对于生物体的生长和维持生态平衡等具有重要作用。在自然 界中,磷的循环是典型的沉积型循环,通常以有机态和无机态的形式存在,其赋存形态及转化直接影响着生物 体对营养物质的获取和利用,进而影响生态系统功能与服务^[1]。湿地生态系统中的植物和微生物对磷的敏 感性和依赖性,使磷成为决定湿地系统健康及生产力的关键因素^[2-3]。磷循环是湿地系统最复杂的循环过程 之一,具有"源"和"汇"的双重功能,其与有机质分解、金属阳离子交换、铁-硫循环等一系列重要生物地球化 学过程耦合在一起^[4-5]。据估计湿地中绝大部分的磷通过微生物固定、Fe/Al吸附以及与有机物结合等形式 被固定在土壤/沉积物中^[6]。河口湿地是地球上具有多功能的独特生态系统,其在全球元素循环及平衡中有 着极其重要的作用^[3-4]。受河流径流和海洋潮汐作用的共同影响,河口湿地在由陆向海方向存在明显的盐度 差异^[7]。尽管淡水湿地和咸水湿地在功能上具有相似性,但盐度和溶质浓度等的差异,导致这些湿地类型之 间的植物群落和生物地球化学过程等存在显著差异^[8]。

全球变暖背景下,海平面上升耦合河流(淡水)径流量减少将导致河口淡水-盐水混合区上溯(即盐水入 侵)^[9-10],这强化了盐度对河口湿地养分循环的影响^[3,11]。沿河口盐度梯度(由陆向海),最直接的差异就是 盐度和离子强度的显著增加。盐度的增加可以通过调节铁还原和硫酸盐还原过程改变河口湿地土壤磷的解 吸速率和再供给能力,加速磷的再迁移和内源释放^[12]。但目前,关于盐度对磷循环的影响尚不明确,存在促 进、抑制和无影响等结论。例如,Jun 等^[13]通过室内培养实验发现,在盐度增加 2‰—3‰—周后,盐度通过促 进吸附明显降低了淡水湿地磷浓度。闫睿冰等^[14]通过模拟盐水入侵实验发现,盐度的上升以及土壤微生物 及其交互作用的变化对湿地土壤中磷的存在形式和转化产生了明显影响,导致土壤磷库的降低,但这种影响 存在明显的时间效应和滞后性。相反,也有研究表明,盐分添加后淡水和半咸水湿地中溶解性活性磷的释放 量明显高于盐沼湿地^[15]。但先前研究多是盐分添加室内控制实验,缺乏原位实验证据。此外,植物在湿地磷 循环过程中发挥着重要的作用,植物通过根系吸收土壤中的磷,其生长和代谢过程中释放的根际物质也影响 土壤中磷的形态和有效性^[16]。原位自然盐度梯度上的盐度差异如何影响土壤和植物条件,进而改变湿地磷 的形态周转和来源特征尚不明确。了解湿地生态系统中磷的循环过程和形态特征对于维持湿地系统健康和 可持续发展至关重要。

闽江地处中亚热带与南亚热带过渡区,是福建省最大的独流入海河流。闽江河口湿地作为闽江与东海相

互作用形成的重要生态类型,是对全球变化最为敏感的区域之一^[17-18]。目前关于海平面上升和盐水入侵背 景下闽江河口湿地土壤磷循环已经开展了一些研究,但主要集中在中型生态系和控制实验^[14],而关于自然盐 度差异耦合有无植被条件下土壤磷形态转化特征及其影响因素的研究尚未开展。因此,本文以闽江河口湿地 为研究对象,沿河口低、中、高盐度梯度分别采集短叶茳芏湿地(有植被)和光滩(无植被)土壤样品,对不同盐 度条件下土壤理化性质、植物生物量及土壤磷形态等进行研究,以评估盐度增加对湿地土壤磷形态变化的影 响及其调控因子。研究结果不仅可以揭示全球变化情景下河口湿地土壤磷循环对盐水入侵的潜在响应,厘清 河口湿地系统磷循环动力学机制,还可为合理保护和维持湿地生态系统功能提供参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

闽江河口湿地(25°50′56″—26°12′42″N,119°16′30″—119°42′45″E)位于我国中亚热带和南亚热带过渡 区,气候温暖潮湿,雨热同期,年平均温度为19.3 ℃,年降水量超过1380 mm。本研究根据河口区自然盐度差 异,由河口向上游依次选择鳝鱼滩湿地、蝙蝠洲湿地和塔礁洲湿地进行样地布设(图1)。其中,鳝鱼滩湿地是 闽江河口区面积最大的咸水湿地,受潮汐盐水的影响明显,平均盐度4.2‰^[17—18]。塔礁洲湿地位于闽江下游, 主要受河口径流影响,为淡水湿地。蝙蝠洲湿地位于二者之间,平均盐度为1.2‰。原位分别在三个不同盐度 湿地有植被的短叶茳芏(*Cyperus malaccensis*)湿地和无植被的光滩布设实验样地,三个湿地的优势植被、土壤 类型、受潮汐影响的频率和时间等大致相同,环境条件较为一致。



1.2 样品采集及处理

为揭示盐度增加对河口湿地土壤磷形态变化的影响及其调控因子,于 2022 年植物生长季,在闽江河口湿 地沿自然盐度梯度采集土壤样品,测定土壤理化因子、植物生物量及土壤磷形态特征。在不同盐度湿地,我们 分别选择了短叶茳芏湿地和无植被的光滩作为实验样区。在每个样区,分别布设4个2m×2m的样方(4个 重复),去除淤泥和枯落物后,使用自制的圆柱形土钻采集表层土壤(0—20 cm)样品。表层土壤含有丰富的 有机物和微生物,是土壤养分循环(包括磷)最活跃的区域。此外,由于水分的蒸发和渗透作用使盐分在表层 土壤中积累,强化了盐度对磷形态和有效性的影响。在实验室,土样经风干、研磨、过筛后用于测定土壤磷的 赋存形态及相关理化指标。同时,使用样方法(0.25 m×0.25 m)采集不同盐度区地上和地下植物样品。

1.3 样品处理与分析

土壤全碳和全氮含量使用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario Max CN,德国)测定。土壤中磷形态提 取采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分析方法^[19],包括全磷、无机磷、有机磷、氢氧化钠磷和盐酸 磷,各形态磷浸提后用连续流动分析仪(Skalar Analytical San++,荷兰)测定。土壤 pH 按土水比 1:5 振荡后使 用便携式 pH 计测定(IQ Instruments,美国)。土壤有机质使用烧失量法测定。电导率采用 2265FS 便携式电 导计测定(Spectrum,美国)。土壤容重采用环刀法测定,含水率用烘干法进行测定。地上和地下生物量使用 烘干法测定。

1.4 数据处理

所有数据经方差齐次性检验和正态分布检验,满足统计分析需要。利用单因素方差分析(One-way ANOVA)评估不同盐度和植被条件下,土壤理化性质和磷形态含量的差异。使用双因素方差分析(Two-way ANOVA)评估盐度、植被及其交互作用对土壤磷形态的影响。此外,使用 Mantel test 和冗余分析(RDA)揭示 盐度及其关联因子对湿地土壤磷形态变化的影响。所有统计分析使用 SPSS 进行,图形绘制使用 Origin 2022 软件完成。冗余分析(redundancy analysis)采用 Canoco 5 统计分析软件进行绘制。Mantel test 基于 R (linkET)平台实现。

2 结果与分析

2.1 土壤磷形态特征

由图 2 可知, 闽江河口低盐湿地土壤全磷、无机磷和有机磷含量平均值分别为(654.0±104.3) mg/kg、(481.3±90.5) mg/kg 和(172.7±27.2) mg/kg, 无机磷约占全磷的 74%。中盐湿地土壤全磷、无机磷和有机磷含量平均值分别为(558.3±28.7) mg/kg、(429.8±23.9) mg/kg 和(128.5±42.7) mg/kg, 无机磷约占全磷的 77%。高盐湿地土壤全磷、无机磷和有机磷含量平均值分别为(582.8±34.4) mg/kg、(483.7±42.5) mg/kg 和(99.1±14.1) mg/kg, 无机磷约占全磷的 83%。沿盐度梯度(由低到高), 土壤盐酸磷含量平均值分别为(191.4±27.2) mg/kg、(206.3±16.7) mg/kg 和(225.9±7.7) mg/kg, 氢氧化钠磷含量平均值分别为(265.4±63.8) mg/kg、(207.2±14.9) mg/kg 和(248.0±36.5) mg/kg。总体上, 随盐度增加, 土壤全磷和有机磷含量逐渐降低, 无机磷和氢氧化钠磷含量表现为先降低后增加, 盐酸磷含量则逐渐增加; 土壤全磷和各形态磷含量大体表现为在短叶茳芏湿地高于无植被的光滩, 尤其在淡水条件下最为显著(P<0.05)。

2.2 土壤碳氮含量及其计量学特征

在河口低、中、高盐度湿地,土壤全碳含量平均值分别为(18.0±2.3)g/kg、(12.6±0.8)g/kg和(14.5±2.3) g/kg,全氮含量分别为(1.7±0.3)g/kg、(1.4±0.2)g/kg和(1.5±0.2)g/kg,均表现为随盐度先降低后增加,在淡水湿地显著高于咸水湿地(P<0.05;图3)。相同盐度下,短叶茳芏湿地土壤全碳和全氮含量均显著高于无植被的光滩土壤(P<0.05)。土壤碳氮比沿盐度梯度分别为(11.0±0.8)、(8.9±0.7)和(9.5±0.7),在低盐湿地显 著高于中盐湿地(P<0.05),并且在短叶茳芏湿地低于光滩。土壤碳磷比分别(27.7±2.4)、(22.6±0.8和(24.7±2.7),且短叶茳芏湿地和光滩的土壤碳磷比在低盐度均显著高于中盐度(P<0.05)。土壤氮磷比分别为(2.5±0.2)、(2.5±0.3)和(2.6±0.2),不同盐度无明显差异,但在相同盐度下短叶茳芏湿地土壤氮磷比高于 无植被的光滩(P<0.05)。

2.3 土壤理化性质和植物生物量

不同盐度梯度下,土壤理化性质和植物生物量变化特征如表1所示。土壤pH 随盐度增加波动变化,无 明显变化规律,短叶茳芏湿地与光滩之间差异不显著。土壤电导率随盐度增加而迅速增加,但在短叶茳芏湿 地和光滩间无明显差异。土壤容重随着盐度无明显变化规律,但含水率随盐度的增高而波动降低。土壤含水



图 2 不同盐度条件下土壤磷形态变化特征

Fig.2 Changes of soil phosphorus forms under different salinity conditions

LS: 低盐 low salinity; MS: moderate salinity; HS: high salinity; 不同大写字母表示相同盐度下短叶茳芏湿地和光滩间差异显著,不同小写字 母表示不同盐度处理间差异显著(P<0.05)

率在低盐区表现为短叶茳芏湿地显著高于光滩,但在高盐区则相反。土壤有机质含量随盐度增加先降低后增加,在不同盐度条件下均是短叶茳芏湿地高于无植被的光滩。随盐度增加,植物地下生物量先降低后增加,总 体表现为淡水高于盐水湿地,相反,地上生物量则表现为随盐度增加而增加,高盐区显著高于低盐区(P<0.05)。

2.4 盐度及其关联因子对土壤磷形态变化的影响

相关性分析显示(图4),土壤 pH、全碳含量、碳氮比和碳磷比与盐度呈显著负相关关系(P<0.05),土壤 全碳和全氮含量与有机质、地上/地下生物量呈显著正相关关系(P<0.05)。随盐度增加,盐度与土壤全磷和 有机磷含量呈负相关关系,与盐酸磷含量呈正相关关系(P<0.05)。此外,土壤全磷、无机磷和氢氧化钠磷含 量与有机质、地上/地下生物量、全碳及全氮含量呈显著正相关关系(P<0.05)。为探明调控土壤磷形态的主 导因子,我们对土壤磷形态与环境因子进行冗余分析。环境因子对土壤磷形态在第1排序轴的解释量为 65.27%,第2排序轴的解释量为9.5%,即前2轴对土壤磷动态的特征解释值为74.77%,能较好解释不同盐度 条件下土壤磷动态与环境因子的关系。总体而言,盐度及其关联因子(地上/地下生物量、全碳、全氮和有机



图 3 不同盐度条件下土壤碳氮磷含量及其化学计量特征

Fig.3 Soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents, and stoichiometric characteristics under different salinity

LS: 低盐 low salinity; MS: moderate salinity; HS: high salinity; 不同大写字母表示相同盐度下短叶茳芏湿地和光滩间差异显著,不同小写字 母表示不同盐度处理间差异显著(P<0.05)

质含量)共同调控了土壤磷形态和有效性的变化。

3 讨论

3.1 盐度增加对土壤磷形态及转化的影响

本研究发现,土壤全磷和有机磷含量随盐度增加而降低(图 2),这与 Hu 等^[12]研究结论相同。随着盐度的升高,土壤中硫酸盐含量逐渐增加,厌氧条件下硫酸盐还原作用会产生硫化物,这些硫化物与土壤中的铁结合形成沉淀,使原本被铁包裹的磷被释放出来^[4]。这一过程增强了土壤中磷的不稳定性,促进了磷的释放和流失。此外,随着盐度的增加,土壤中氢氧化钠磷含量呈下降趋势,进一步印证了这一观点。氢氧化钠磷主要以铁/铝结合态的形式存在,是一种生物有效磷。随着盐度的升高,土壤中铁与硫酸盐还原产生的硫化物发生共沉淀,导致铁结合态磷被释放^[12]。这一现象表明盐度增加促进了磷形态的转化,强化了土壤中磷的释放趋势,显著影响土壤磷的生物有效性。相反,土壤中盐酸磷含量随着盐度的升高而增加,这表明随着盐度的增



图 4 土壤磷形态与盐度及其关联因子的关系

Fig.4 Relationship between soil phosphorus forms and salinity and its associated parameters

TP:全磷; IP:无机磷; OP:有机磷; HCl-P:盐酸磷; NaOH-P: 氢氧化钠磷; EC:电导率; Salinity:盐度; SOM:有机质; AB:地上生物量; BB: 地下生物量; TC:全碳; TN: 全氮; C:N:碳氮比; C:P:碳磷比; N:P:氮磷比

加,土壤中的磷趋向于更为稳定的形态^[20]。盐酸磷主要以钙结合态的方式存在,属于一种相对稳定的磷形态,其不容易被植物吸收和利用^[21]。这一趋势反映了盐度对土壤中磷的形态和有效性产生的复杂影响,随盐 度增加有效态磷被释放后,土壤中磷主要以稳定态磷为主。

Table 1 Variations in soil physicochemical properties and plant biomass under different salinity conditions									
	低盐 Low salinity		中盐 Moderate salinity		高盐 High salinity		Р		
参数 Parameters	短叶茳芏 Cyperus malaccensis	光滩 Bare mudflat	短叶茳芏 Cyperus malaccensis	光滩 Bare mudflat	短叶茳芏 Cyperus malaccensis	光滩 Bare mudflat	盐度 Salinity	植被 Plant	交互 Interaction
рН	6.87±0.18a	$6.76{\pm}0.04{\rm b}$	$6.80 \pm 0.06 \mathrm{ab}$	6.89±0.05a	$6.66 \pm 0.08 \mathrm{b}$	$6.62 \pm 0.05 \mathrm{c}$	< 0.01	0.578	0.099
电导率 Electric conductivity/(mS/cm)	$0.36{\pm}0.05{\rm c}$	$0.4{\pm}0.05{\rm b}$	$0.73{\pm}0.07{\rm b}$	$0.7 \pm 0.09 \mathrm{b}$	2.08±0.3a	2.48±1.07a	< 0.001	0.479	0.618
容重 Bulk density/(g/cm ³)	$0.76{\pm}0.08\mathrm{Bb}$	0.9±0.03Aa	$0.83{\pm}0.04{\rm b}$	0.83±0.07a	0.98±0.03Aa	0.88±0.03Ba	< 0.01	0.427	< 0.01
含水率 Moisture/%	93.40±12.7Aa	72.91±4.7B	$78.39{\pm}2.2\mathrm{b}$	79.57±8.2	$60.88 \pm 5.4 \mathrm{c}$	73.14±3.3	< 0.01	0.424	< 0.01
有机质 Organic matter/%	7.69±0.7Aa	6.44±0.5Ba	$5.75{\pm}0.8{\rm b}$	$4.92{\pm}0.5{\rm c}$	6.41±1.5ab	$5.71 \pm 0.3 \mathrm{b}$	< 0.01	< 0.05	0.780
地上生物 Aboveground biomass/(g/m ²)	83.21±16.2b	_	94.33±8.2b	_	150.79±18.2a	—	< 0.01	<0.001	< 0.01
地下生物量 Belowground biomass/(g/m ²)	172.50±74.9a	_	57.52±7.2b	_	167.31±50.9a	—	< 0.001	<0.001	< 0.001

表1 不同盐度条件下土壤理化性质和植物的

不同大写字母表示相同盐度下短叶茳芏湿地和光滩间差异显著,不同小写字母表示不同盐度下差异显著(P<0.05);"—":没有数据

一般而言,盐度的增加对土壤和植物具有负面影响,其通过影响土壤和植物环境,从而调节土壤磷循环过 程^[22-23]。盐度的增加会显著提高土壤电导率(表1),主要是因为盐分的存在引起了土壤中离子的溶解。随 着盐度的提高,土壤中的阳离子和阴离子的浓度增加,形成了电解质,从而提高了土壤的电导率^[24]。此外,土 壤有机质含量随盐度增加先降低后增加,在淡水湿地高于咸水湿地,这与土壤全磷、无机磷和氢氧化钠磷含量 变化趋势一致(图2)。淡水湿地可能容纳更多对盐敏感的微生物和土壤酶,促进有机质的分解和转化,因此 有机质含量相对较高^[25]。随着盐度的升高,这些盐敏感的生物可能受到抑制,导致有机质分解减缓,从而引 起土壤有机质含量的降低^[26]。植物在适应高盐度的同时,其残体的分解可能也为土壤有机质的增加提供贡 献^[27]。这一趋势表明土壤有机质含量受到盐度梯度的调控,反映了土壤生态系统对盐度变化的复杂响应。 我们也发现,相较于无植被的光滩,短叶茳芏湿地土壤更容易积累和维持更高水平的有机质,因为植物的生长和代谢过程为土壤提供了丰富的有机物来源,并促进了与微生物的相互作用,从而对土壤有机质的形成和稳定性产生了积极的影响^[28]。

我们也发现,随盐度增加植物地下生物量先降低后增加,地上生物量则表现为随盐度增加而增加,高盐区 显著高于低盐区(表1),这反映了植物对盐度变化的复杂适应策略。首先,土壤中的盐度增加可能对植物的 根系造成负面影响,限制了根系的生长和发育,导致植物地下生物量在高盐度条件下降低^[29]。随着盐度增 加,植物可能逐渐适应高盐度环境,通过调整根系结构和生理机制来减轻盐分的影响水平^[30]。这可能导致植 物地下生物量的增加,使其在高盐度区域恢复到相对较高的水平。另一方面,地上生物量的增加可能反映了 植物在适应高盐度环境的过程中采取的一些适应性措施。短叶茫芏可能通过增加地上部分的生物量,如叶 片、茎等,来增强对光合作用的利用,以弥补地下部分受到限制的情况,包括减少叶片蒸腾、提高叶片的盐分排 泄能力等生理调节^[31-32]。总体而言,植物对盐度的适应是一个动态过程,植物通过调整生物量分配和生理机 制来适应高盐度环境,以维持其生存和生长,进而调控土壤磷循环。

3.2 盐度增加对土壤碳氮磷含量及其计量学特征的影响

土壤碳、氮、磷是陆地生态系统中植物生长所必需的关键元素,同时也是反映土壤营养水平的重要指标^[33]。本研究发现,随着盐度的增加,土壤全碳和全氮含量呈下降趋势(图3),与上述全磷含量变化趋势一致。高盐条件可能导致植物根系的生长受到限制,减少了植物对土壤中碳和氮的吸收^[34]。由于植物是土壤有机碳和氮的主要来源之一,其减少导致了土壤全碳和全氮含量的降低。其次,盐分的存在可能改变土壤中微生物的群落结构和活性,抑制了微生物对有机物质的分解过程,减缓了有机碳和氮的释放速率^[3,9]。此外,我们也发现,在相同盐度条件下,短叶茫芏湿地土壤全碳、全氮和全磷含量均显著高于无植被的光滩(图3),这反映了植物在土壤养分动态中的关键作用^[35]。首先,植物通过光合作用吸收二氧化碳,将固定的碳部分通过根系分泌物和残体输入土壤,从而有效地增加了土壤有机碳含量^[36]。同时,植物的根系通过吸收土壤中的氮和磷,将这些关键养分输送到地上部分,一部分通过植物的生物循环过程重新归还到土壤中^[37-38]。其次,植物根系的生长和分泌活动改善了土壤结构,创造了更适宜微生物活动的环境。微生物参与有机物的降解,将有机氮和有机磷逐步转化为更为稳定的无机形式,进一步提升了土壤中氮和磷的含量^[39],因此有植被的土壤在碳、氮、磷方面的丰富表明了植物-土壤相互作用和生态系统养分循环的协同效应。

我们也发现,淡水湿地相比咸水湿地呈现出显著较高的土壤碳氮比和碳磷比,然而氮磷比则没有显著差 异,这一现象可能反映了两种湿地类型在碳、氮、磷循环和相互关系方面的特定响应。首先,淡水湿地地下生 物量较高(表1),这促进了土壤中碳的累积。植物通过光合作用吸收并固定碳,一部分通过根系分泌物和残 体的归还进入土壤^[36]。其次,淡水湿地可能有助于维持土壤中相对较高的氮含量。盐分对土壤中氮的影响 复杂,但较低的盐度可能有利于植物对氮的吸收^[40]。这两个因素共同导致淡水湿地中土壤碳氮比和碳磷比 的升高。然而,氮磷比没有显著差异可能是因为土壤中氮和磷的输入和输出相对平衡,或者存在一些复杂的 相互作用,如微生物的作用可能在氮磷相对比例上产生调节作用。这些差异强调了湿地生态系统对环境变化 的敏感性和复杂性,需要进行深入研究。

综上所述,考虑到全球海平面持续上升的趋势,特别是在滨海地区,盐度增加可能加剧土壤盐渍化,对土 壤养分循环产生深远的影响。盐度升高可能导致土壤中有机碳和氮的流失,破坏土壤结构,影响植被的生长。 从养分平衡的角度来看,盐度增加对土壤中碳、氮、磷的含量变化可能打破原有的养分平衡。高盐度条件下, 植物对氮和磷的归还量减少,同时有机碳和氮的分解可能受到限制,导致土壤中养分的积累。滨海湿地是重 要的生态系统,对海岸线的稳定、水质净化、生物多样性维护等起着重要作用。盐度增加可能引发湿地土壤养 分的流失,降低土壤肥力,从而威胁湿地植被的生存和发展。通过科学合理的土壤管理和湿地保护政策,减轻 盐度增加和植被缺失等对湿地生态系统的负面影响,对于保护和维持滨海湿地生态系统功能至关重要。

4 结论

(1)土壤全磷和有机磷含量随盐度增加而降低,无机磷和氢氧化钠磷含量先降低后增加,而盐酸磷则随 盐度而增加,无机磷是土壤磷的主要赋存形态。这表明盐度对土壤中磷的形态和有效性产生复杂的影响,盐 度增加促进了活性磷的释放,土壤中残余磷主要以稳定态磷为主。此外,有植被湿地土壤磷含量显著高于无 植被的光滩,尤其在淡水区,表明植物在磷的形成和有效性调节过程中扮演重要角色。

(2)随盐度增加,土壤有机质含量先降低后增加,与地下生物量变化趋势一致,但地上生物量则随盐度逐渐增加。土壤全碳和全氮含量随盐度增加呈下降趋势,与全磷含量变化趋势一致。相关分析显示,盐度及其关联因子(地上/地下生物量、全碳、全氮和有机质含量)共同调控了土壤磷形态和有效性的变化。

(3)全球气候变暖引起的海平面上升和盐水入侵已成为影响滨海湿地生态系统功能与服务的重要因素。 本研究结果有助于理解滨海湿地土壤磷循环对盐度增加的响应过程,为降低河口养分流失风险,维持湿地系 统养分平衡等提供理论与实践参考。未来应在更广泛的盐度和时空梯度下,探讨盐度及其关联因子变化对土 壤磷循环的影响。

参考文献(References):

- [1] Filippelli G M. The global phosphorus cycle: past, present, and future. Elements, 2008, 4(2): 89-95.
- [2] Lambers H. Phosphorus acquisition and utilization in plants. Annual Review of Plant Biology, 2022, 73: 17-42.
- [3] Hu M J, Le Y X, Sardans J, Yan R B, Zhong Y, Sun D Y, Tong C, Peñuelas J. Moderate salinity improves the availability of soil P by regulating P-cycling microbial communities in coastal wetlands. Global Change Biology, 2023, 29(1): 276-288.
- [4] Queiroz H M, Ferreira T O, Barcellos D, Nóbrega G N, Antelo J, Otero X L, Bernardino A F. From sinks to sources: the role of Fe oxyhydroxide transformations on phosphorus dynamics in estuarine soils. Journal of Environmental Management, 2021, 278(Pt 2): 111575.
- [5] Xiao K, Pan F, Li Y R, Li Z Y, Li H L, Guo Z R, Wang X H, Zheng C M. Coastal aquaculture regulates phosphorus cycling in estuarine wetlands: mobilization, kinetic resupply, and source-sink process. Water Research, 2023, 234: 119832.
- [6] Roy E D, Nguyen N T, White J R. Changes in estuarine sediment phosphorus fractions during a large-scale Mississippi River diversion. The Science of the Total Environment, 2017, 609: 1248-1257.
- [7] Luo M, Huang J F, Zhu W F, Tong C. Impacts of increasing salinity and inundation on rates and pathways of organic carbon mineralization in tidal wetlands: a review. Hydrobiologia, 2019, 827(1): 31-49.
- [8] Weston N B, Neubauer S C, Velinsky D J, Vile M A. Net ecosystem carbon exchange and the greenhouse gas balance of tidal marshes along an estuarine salinity gradient. Biogeochemistry, 2014, 120(1): 163-189.
- [9] Neubauer S C, Piehler M F, Smyth A R, Franklin R B. Saltwater intrusion modifies microbial community structure and decreases denitrification in tidal freshwater marshes. Ecosystems, 2019, 22(4): 912-928.
- [10] Pan F, Xiao K, Cai Y, Li H L, Guo Z R, Wang X H, Zheng Y, Zheng C M, Bostick B C, Michael H A. Integrated effects of bioturbation, warming and sea-level rise on mobility of sulfide and metalloids in sediment porewater of mangrove wetlands. Water Research, 2023, 233: 119788.
- [11] Ury E A, Wright J P, Ardón M, Bernhardt E S. Saltwater intrusion in context: soil factors regulate impacts of salinity on soil carbon cycling. Biogeochemistry, 2022, 157(2): 215-226.
- [12] Hu M J, Sardans J, Le Y X, Yan R B, Zhong Y, Huang J F, Peñuelas J, Tong C. Biogeochemical behavior of P in the soil and porewater of a low-salinity estuarine wetland: availability, diffusion kinetics, and mobilization mechanism. Water Research, 2022, 219: 118617.
- [13] Jun M, Altor A E, Craft C B. Effects of increased salinity and inundation on inorganic nitrogen exchange and phosphorus sorption by tidal freshwater floodplain forest soils, *Georgia* (USA). Estuaries and Coasts, 2013, 36(3): 508-518.
- [14] 闫睿冰, 胡敏杰, 吴辉, 倪冉旭, 仝川. 模拟盐水入侵对河口湿地土壤磷形态、磷酸酶活性及功能基因群落的短期影响. 环境科学学报, 2023, 43(11): 328-337.
- [15] Chambers L G, Osborne T Z, Reddy K R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment. Biogeochemistry, 2013, 115(1): 363-383.
- [16] 何敏,许秋月,夏允,杨柳明,范跃新,杨玉盛.植物磷获取机制及其对全球变化的响应.植物生态学报,2023,47(3):291-305.
- [17] Sun Z G, Sun W G, Tong C, Zeng C S, Yu X, Mou X J. China's coastal wetlands: conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement. Environment International, 2015, 79: 25-41.

- [18] Tong C, Wang W Q, Huang J F, Gauci V, Zhang L H, Zeng C S. Invasive alien plants increase CH₄ emissions from a subtropical tidal estuarine wetland. Biogeochemistry, 2012, 111: 677-693.
- [19] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, Rauret G, Muntau H, Quevauviller P. Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material. Journal of Environmental Monitoring, 2001, 3(1): 121-125.
- [20] Hu M J, Peñuelas J, Sardans J, Tong C, Chang C T, Cao W Z. Dynamics of phosphorus speciation and the *phoD* phosphatase gene community in the rhizosphere and bulk soil along an estuarine freshwater-oligohaline gradient. Geoderma, 2020, 365: 114236.
- [21] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 52(5): 617-629.
- [22] Bazihizina N, Barrett-Lennard E G, Colmer T D. Plant growth and physiology under heterogeneous salinity. Plant and Soil, 2012, 354(1): 1-19.
- [23] Munns R, Passioura J B, Colmer T D, Byrt C S. Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil. The New Phytologist, 2020, 225(3): 1091-1096.
- [24] 刘超毅,何凌茜,黄庄,王纯,仝川.模拟盐度脉冲耦合潮汐过程对闽江河口湿地土壤孔隙水中无机氮组分的影响.湿地科学,2023,21 (3):483-492.
- [25] Yarwood S A. The role of wetland microorganisms in plant-litter decomposition and soil organic matter formation: a critical review. FEMS Microbiology Ecology, 2018, 94(11): fiy175.
- [26] 胡启凯,罗敏,黄佳芳,吴杰,朱爱菊,谭季,李敬.闽江河口潮汐沼泽湿地天然低盐度梯度土壤胞外酶活性特征.环境科学学报,2019, 39(9):3107-3116.
- [27] 杨阳,王宝荣,窦艳星,薛志婧,孙慧,王云强,梁超,安韶山.植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展.应用生态学报, 2024,35(01):111-123.
- [28] Paul E A. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 109-126.
- [29] 张晓婷, 王俊杰. 红树植物功能性状对盐和铜胁迫的响应. 生态学报, 2024, 44(3): 1284-1297.
- [30] Zhao C Z, Zhang H, Song C P, Zhu J K, Shabala S. Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. The Innovation, 2020, 1 (1): 100017.
- [31] 潘艳文,古勇波,唐占辉,姜明,吕宪国,娄彦景.盐度和氮添加对盐碱湿地芦苇幼苗生长及生物量分配的影响.土壤与作物,2018,7 (2):257-265.
- [32] Tang L, Zhou Q S, Gao Y, Li P. Biomass allocation in response to salinity and competition in native and invasive species. Ecosphere, 2022, 13 (1): e3900.
- [33] Peñuelas J, Sardans J. The global nitrogen-phosphorus imbalance. Science, 2022, 375(6578): 266-267.
- [34] Ma Y, Dias M C, Freitas H. Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. Frontiers in Plant Science, 2020, 11; 591911.
- [35] 张剑, 宿力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.
- [36] Dijkstra F A, Zhu B, Cheng W X. Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword. The New Phytologist, 2021, 230(1): 60-65.
- [37] Polglase P J, Attiwill P M. Nitrogen and phosphorus cycling in relation to stand age of *Ecucalyptus regnans* F. Muell: I. Return from plant to soil in litterfall. Plant and Soil, 1992, 142: 157-166.
- [38] 彭婉婷, 邹琳, 段维波, 李银霞, 潘远智, 曾德刚. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果. 环境科学学报, 2012, 32(3): 612-617.
- [39] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. Plant Physiology, 2011, 156 (3): 989-996.
- [40] Dluzniewska P, Gessler A, Dietrich H, Schnitzler J P, Teuber M, Rennenberg H. Nitrogen uptake and metabolism in *Populus×canescens* as affected by salinity. The New Phytologist, 2007,173(2): 279-293.