

目次

2013~2020年天津市PM_{2.5}-O₃污染变化趋势和影响因素分析 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O₃污染趋势及敏感性变化分析 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O₃污染特征、生成敏感性及传输影响分析 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O₃污染特征和驱动因子 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM_{2.5}和O₃对减排的响应 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新宪, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe₃O₄/桑秸秆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 古圳威, 刘京, 陈怡, 户新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响

秦纪法¹, 张佳彭¹, 桑变¹, 杨云斐¹, 杨继松^{1,2*}, 王志康¹, 栗云召¹, 周迪¹, 于君宝¹

(1. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 资源与环境工程学院, 烟台 264025; 2. 东营市农业科学研究院, 东营 257091)

摘要: 碳(C)、氮(N)、磷(P)是土壤重要的营养元素,其生态化学计量特征可以反映土壤供肥能力和质量状况,在揭示生态系统稳态机制中具有重要作用.水盐环境对河口湿地生态化学计量特征具有重要影响,但土壤C、N、P生态化学计量特征对水盐环境变化的响应仍不清楚.以黄河口湿地为研究对象,采用土柱移位培养法,将淡水湿地土壤分别移位至不同潮滩部位(高潮滩、中潮滩和低潮滩)的盐沼湿地,研究水盐环境对C、N、P生态化学计量特征的影响.结果表明,移位23个月后,淡水湿地土壤含水量(SWC)和电导率(EC)与C、N、P生态化学计量特征均发生了不同程度的变化.土壤SWC在高潮滩和中潮滩降低($P < 0.05$),在低潮滩升高($P < 0.05$); EC在3种潮滩上均有不同程度的升高($P < 0.05$).土壤有机碳(TOC)和全氮(TN)在高潮滩显著降低($P < 0.05$),全磷(TP)则在中潮滩和高潮滩显著降低($P < 0.05$); C:N在高潮滩和中潮滩及C:P和N:P在高潮滩显著降低($P < 0.05$); C、N、P生态化学计量比在低潮滩变化均不显著($P > 0.05$).水盐环境主要通过影响TOC和TP而作用于C:N和N:P.结果表明,未来海平面上升可能会改变淡水湿地土壤C、N、P生态化学计量学特征,并进而影响湿地养分循环过程.

关键词: 生态化学计量特征; 营养元素; 水盐环境; 移位培养; 黄河口湿地

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4698-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209205

Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland

QIN Ji-fa¹, ZHANG Jia-peng¹, SANG Luan¹, YANG Yun-fei¹, YANG Ji-song^{1,2*}, WANG Zhi-kang¹, LI Yun-zhao¹, ZHOU Di¹, YU Jun-bao¹

(1. Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. Dongying Academy of Agricultural Sciences, Dongying 257091, China)

Abstract: Carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) are important nutrients, and their ecological stoichiometric characteristics can reflect the quality and fertility capacity of soil, which is critical to understanding the stable mechanisms of estuarine wetland ecosystems. Under global changes, the increase in salinity and flooding caused by sea level rise will lead to changes in biogeochemical processes in estuarine wetlands, which is expected to affect the ecological stoichiometric characteristics of soil C, N, and P and ultimately interfere with the stability of wetland ecosystems. However, it remains unclear how the C, N, and P ecological stoichiometric characteristics respond to the water-salt environment in estuarine wetlands. We differentiated changes in the C, N, and P ecological stoichiometric characteristics through an ex-situ culture experiment for 23 months in the Yellow River Estuary Wetland. The five sites with distinct tidal hydrology were selected to manipulate translocation of soil cores from the freshwater marsh to high-, middle-, and low-tidal flats in June 2019. The results showed that soil water content (SWC); electrical conductivity (EC); and C, N, and P ecological stoichiometric characteristics of freshwater marsh soil significantly changed after translocation for 23 months. SWC decreased on the high- and middle-tidal flats ($P < 0.05$) and increased on the low-tidal flat ($P < 0.05$). EC increased to different degrees on all three tidal flats ($P < 0.05$). Soil total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) were significantly lower on the high-tidal flat ($P < 0.05$), whereas total phosphorus (TP) was significantly lower on the middle- and high-tidal flats ($P < 0.05$). C:N was decreased on the high- and middle-tidal flats ($P < 0.05$); C:P and N:P were lower on the high-tidal flat; and all C, N, and P ecological stoichiometric characteristics showed no change on the low-tidal flat ($P > 0.05$). Pearson's analysis showed that the ecological stoichiometric characteristics of C, N, and P were related to some properties of soil over the culture sites. The PLS-SEM model showed that the water-salt environment had different effects on soil C:N, C:P, and N:P through the main pathways of negative effects on soil TOC and TP. The results suggest that sea level rise may impact the C, N, and P ecological stoichiometric characteristics in freshwater marsh soil, resulting in some possible changes in the nutrient cycles of estuarine wetlands.

Key words: ecological stoichiometric characteristics; nutrient elements; water-salt environment; ex-situ culture; the Yellow River Estuary Wetland

湿地是水体系统和陆地系统相互影响、相互作用的地带,是地表生态系统的重要组成部分,是全球三大生态系统之一^[1].河口湿地位于河海交汇处,受到河流和潮汐的共同作用,具有咸淡水交互的特点,是向海延伸或收缩的物质多样性和多功能的生态边缘区^[2].河口湿地在拦截污染物、抵御洪水、调节气候和维持生物多样性等多个方面发挥着重要作用^[3],是碳(C)、氮(N)、磷(P)等营养元素的

源、汇和转换器,是对土壤营养元素进行传送、累积和再生的重要场所^[4,5].

作为土壤营养元素的重要组成部分,C、N、P是植物矿物质和有机养分的主要来源,对湿地生态

收稿日期: 2022-09-21; 修订日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871087,42271055); 黄河三角洲学者人才工程项目

作者简介: 秦纪法(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为湿地磷生物地球化学, E-mail: qinjifa6@163.com

* 通信作者, E-mail: yangjiesong@ldu.edu.cn

系统的土壤条件和养分循环具有重要意义^[6,7]. 土壤 C、N、P 元素在生态系统循环过程中相互耦合: C 是土壤 N 和 P 循环的驱动因子, C 在土壤中的固存和转化也受到 N、P 的显著影响^[8,9]. 土壤 C、N、P 生态化学计量特征可以作为衡量土壤质量的指标, 也可以反映土壤 C、N、P 循环和平衡机制, 对于掌握土壤质量状况和 C、N、P 转化情况具有重要意义^[10,11]. 土壤 C、N、P 及其生态化学计量特征受水分、盐度和温度等多种因素的控制, 其中, 复杂多样的水盐环境作为河口湿地最显著的特征之一, 对河口湿地土壤 C、N、P 的分布和转化以及植物对土壤营养元素的吸收利用具有重要影响^[12-14]. 全球变化背景下, 海平面上升带来的盐分和淹水的增加将导致河口湿地土壤环境和微生物属性等发生变化, 进而会影响土壤 C、N、P 的生态化学计量学特征, 并最终干扰湿地生态系统的稳定性^[15,16]. 然而, 河口湿地土壤 C、N、P 生态化学计量学特征对水盐环境变化的响应仍不清楚.

黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一, 是我国暖温带最完整、最年轻、最广阔的新生湿地生态系统^[11]. 受气候变化、海平面上升等自然环境变化和调水调沙、农业种植等人类活动的共同影响, 黄河口湿地土壤水盐和营养元素分布格局发生了相关变化^[17,18], 但 C、N、P 生态化学计量特征随水盐环境变化的研究相对缺乏. 本文以黄河口湿地为研究对象, 通过将淡水湿地土壤移位至不同潮滩湿地, 揭示水盐环境对 C、N、P 生态化学计量学特征的影响, 有助于理解气候变化背景下河口湿地土壤养分平衡机制, 以期为河口湿地响应环境变化研究和湿地保护管理提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

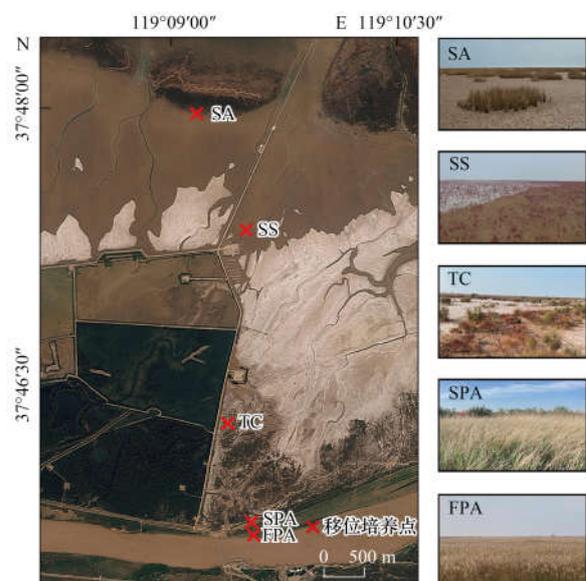
黄河口湿地位于黄河三角洲国家级自然保护区 (37°35'N ~ 38°12'N, 118°33'E ~ 119°20'E) 内, 地处山东省东营市东北部黄河入海口, 是我国三大河口三角洲之一. 该区域气候为温带大陆性季风气候, 雨热同期, 四季分明, 年平均气温为 12.1℃, 年平均降雨量为 552.6 mm, 年平均蒸发量为 1928.2 mm, 干旱指数为 3.56^[19]. 该地区的补给水源主要为大气降水、地表径流以及周期性潮汐. 研究区的主要植物物种有互花米草 (*Spartina alterniflora*)、盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*)、柽柳 (*Tamarix chinensis*) 和芦苇 (*Phragmites australis*) 等.

1.2 实验设计与样品采集

以黄河北岸自然湿地作为研究样地, 自黄河河

岸向海方向的天然水盐梯度带依次选取 5 个典型植被群落作为移位培养点, 包括淡水芦苇群落 (FPA)、盐沼芦苇群落 (SPA)、柽柳群落 (TC)、盐地碱蓬群落 (SS) 和互花米草群落 (SA) (图 1). 不同培养点具有不同的水盐环境特征: FPA 处于潮上带, 水文情势决定于黄河径流和降水, 地表呈现季节性淹水, 几乎不受潮汐的影响; SPA 处于高潮滩上部边缘, 水文情势取决于黄河径流和降水, 同时受特大潮的影响, 地表季节性淹水; TC 处于高潮滩, 水文情势受高潮的影响, 地表偶尔淹水; SS 和 SA 分别处于中潮滩和低潮滩, 水文情势受潮汐的影响, 地表周期性频繁淹水.

2019 年 6 月, 在 FPA 样点选取 5 × 5 m 的均一样方作为土柱采样地, 以确保土壤性质的均一性. 在选定的采样地内垂直打入直径为 8 cm、长度为 40 cm 的 PVC 管, 使管内充满土柱. 之后取出 PVC 管, 并用 0.25 mm 石棉网进行包裹. PVC 管壁事先钻取若干小孔, 以保证在培养期间管内外水盐的自由交换. 在 SPA、TC、SS 和 SA 内各选取 3 m × 3 m 的区域, 用不锈钢土钻钻取与 PVC 管同体积的孔洞, 将从 FPA 取出的 PVC 管埋入孔洞中, 进行为期 23 个月的移位培养, 同时在 FPA 作对照处理, 每个培养点设置 3 个重复. 2021 年 5 月, 在每个培养点随机取出 2 根 PVC 管, 将 PVC 管内的土壤混合均匀后, 分别测定土壤含水率 (SWC)、电导率 (EC, 水: 土 = 5: 1)、pH (水: 土 = 5: 1)、总有机碳 (TOC)、全氮 (TN) 和全磷 (TP) 等理化性质.



FPA: 淡水芦苇群落, SPA: 盐沼芦苇群落, TC: 柽柳群落,

SS: 盐地碱蓬群落, SA: 互花米草群落, 下同

图 1 研究样地与移位培养点位置示意

Fig. 1 Position of study plot and transfer culture sites

1.3 样品分析测定

土柱 SWC 采用烘干法(105℃烘 8 h)测定; EC (水:土=5:1)采用电导率仪(雷磁, DDBJ-350F)测定; pH(水:土=5:1)采用 pH 计(Mettler Toledo, FE28-Standard)测定; TOC 采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定; TN 采用浓硫酸消解后经连续流动分析仪测定(AMS France-Alliance Instruments, A16790); TP 采用浓硫酸-高氯酸消解后经紫外可见分光光度计(普析, TU-1810)测定.

1.4 数据处理与分析

运用 Excel 2016 对实验数据进行整理, 计算土柱 TOC、TN 和 TP 含量及生态化学计量比(C:N、C:P 和 N:P, 量比)的均值及标准误差; 运用 SPSS 26 对实验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)及相关性分析(pearson correlation coefficient); 运用 R 4.2.1 进行偏最小二乘法结构方程模型(partial least squares-structural equation model, PLS-SEM)的构建; 运用 Origin Pro 2021 进行绘图.

2 结果与分析

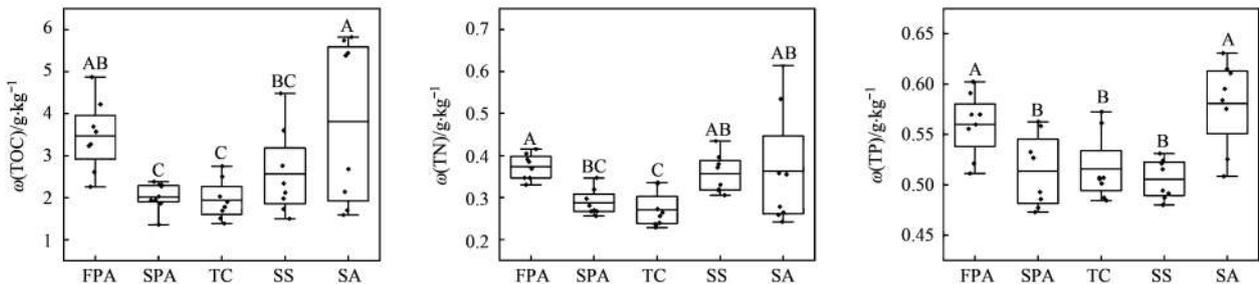
2.1 水盐环境对土壤 C、N、P 含量的影响

水盐环境改变后, 淡水湿地土壤 C、N、P 含量发生了不同程度的变化(图 2). 移位培养 23 个月后, 不同培养点土柱 $\omega(\text{TOC})$ 、 $\omega(\text{TN})$ 和 $\omega(\text{TP})$ 范围分别为 1.62~5.78、0.24~0.57 和 0.48~0.62 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 培养点间差异显著($P < 0.01$). 其中, 在对照点土柱中 $\omega(\text{TOC})$ 均值为 3.47 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在移位点 SPA、TC、SS 和 SA 土柱中 $\omega(\text{TOC})$ 均值分别为

2.01、1.94、2.56 和 3.81 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相对于对照点分别变化了 -42.0%、-44.0%、-26.1% 和 10.0% (图 3); 对照点土柱 $\omega(\text{TN})$ 均值为 0.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 移位至 SPA、TC、SS 和 SA 后土柱 $\omega(\text{TN})$ 分别变化为 0.29、0.27、0.36 和 0.36 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相对变化率分别为 -22.4%、-27.8%、-3.7% 和 -3.7%; 对照点土柱 $\omega(\text{TP})$ 均值为 0.56 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 移位至 SPA、TC、SS 和 SA 后土柱 $\omega(\text{TP})$ 分别变化为 0.51、0.52、0.51 和 0.58 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相对变化率分别为 -8.9%、-7.2%、-8.9% 和 3.6% (图 3). 总体来看, 淡水湿地土壤移位至盐沼湿地后, TOC 和 TN 表现为在高潮滩降低($P < 0.05$), 在中潮滩和低潮滩无显著变化($P > 0.05$); 而 TP 则在中潮滩和高潮滩显著降低($P < 0.05$), 在低潮滩无显著变化($P > 0.05$).

2.2 水盐环境对土壤 C:N、C:P 和 N:P 的影响

淡水湿地土壤移位至不同部位潮滩后, 土壤 C、N 和 P 的生态化学计量比呈现出不同程度的变化(图 4). 在对照培养点(FPA), 土壤 C:N、C:P 和 N:P 均值分别为 10.73、15.90 和 1.48; 移位至不同潮滩部分盐沼湿地后, 其值分别变化为 8.18~12.01、9.73~16.63 和 1.16~1.56. 其中, C:N 在高潮滩和中潮滩培养点(SPA、TC 和 SS)、C:P 和 N:P 在高潮滩培养点(SPA 和 TC)均呈现显著降低趋势($P < 0.05$), 分别下降了 21.8%~23.8%、18.3%~38.8% 和 15.8%~21.6% (图 3); C:N 在低潮滩培养点(SA)、C:P 和 N:P 在中潮滩和低潮滩培养点(SS 和 SA)的变化均不显著($P > 0.05$).



散点数据为土柱实测值, 箱体为 25%~75% 范围值, 箱内横线为均值, 棒状线为均值 \pm S. D. ;

不同大写字母表示不同培养点间差异性显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同移位培养点土柱中 TOC、TN 和 TP 含量特征

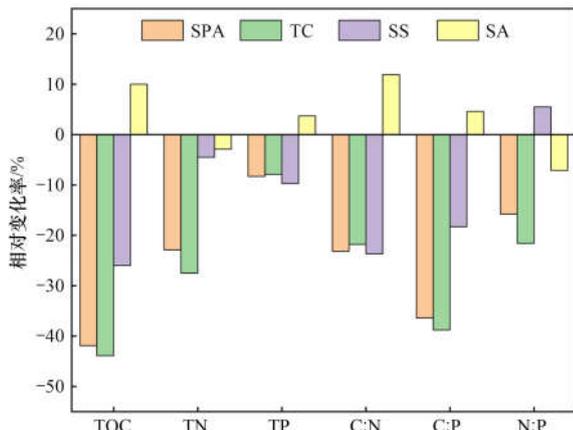
Fig. 2 Contents of TOC, TN, and TP in soil cores at different culture sites

2.3 土壤 C、N、P 生态化学计量特征与理化性质的相关性分析

不同培养点土柱 SWC 和 EC 差异均显著($P < 0.05$, 图 5); SWC 在对照点中的均值为 21.6%, 在移位点 SPA、TC 和 SS 中其值显著降低($P < 0.05$), 在 SA 中显著升高($P < 0.05$); 土壤 EC 在对照点中的均值为 0.38 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 在移位点 SPA、TC、SS 和

SA 中均显著升高($P < 0.05$). 不同培养点土柱 pH 变化在 7.71~7.82 之间, 样点间无显著差异($P > 0.05$). 总体上, 淡水湿地土壤 SWC 在中潮滩和高潮滩显著降低, 在低潮滩显著升高; 土壤 EC 在不同潮滩部位均显著升高, 而土壤 pH 无明显变化.

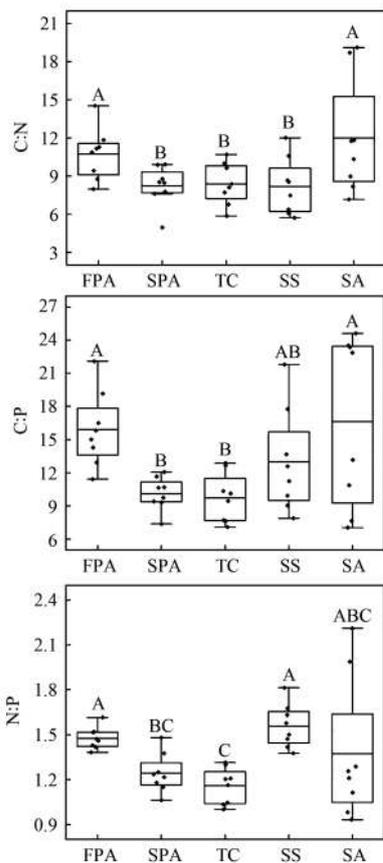
相关分析表明(图 6), 土壤 TOC、TN 和 TP 与 SWC 具有正相关关系, 与 EC 和 pH 具有负相关关



负值表示相对淡水湿地移位培养点减少,
正值表示相对淡水湿地移位培养点增加

图3 不同移位培养点 TOC、TN 和 TP 含量及生态化学计量比的相对变化率

Fig. 3 Relative changes in contents of TOC, TN, and TP and their ecological stoichiometric ratios in soil cores at different culture sites

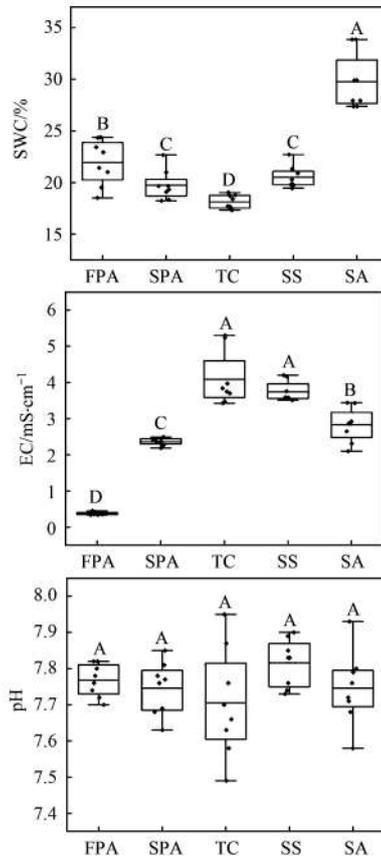


不同大写字母表示不同培养点间差异性显著 ($P < 0.05$)

图4 不同移位培养点土柱 C:N、C:P 和 N:P 变化特征

Fig. 4 Characteristics of C, N, and P ecological stoichiometric ratios in soil cores at different culture sites

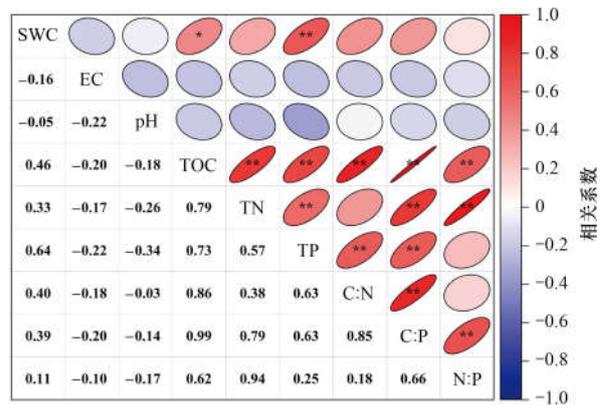
系,但仅有 TOC 和 TP 与 SWC 呈显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤 C:N、C:P 和 N:P 与 TOC 呈显著正相关 ($P < 0.01$), C:P 和 N:P 与 TN 呈显著正相关 ($P < 0.01$), C:N 和 C:P 与 TP 呈显著正相关 ($P < 0.01$); C:N、C:P 和 N:P 与 SWC 具有正相关关系,



不同大写字母表示不同培养点间差异性显著 ($P < 0.05$)

图5 不同移位培养点土柱 SWC、EC 和 pH 变化特征

Fig. 5 Characteristics of SWC, EC, and pH in soil cores at different culture sites



红色表示正相关,蓝色表示负相关,颜色强度与相关系数成正比;椭圆扁率越大,相关性越强,扁率越小,相关性越弱;椭圆长轴位于一、三象限表示正相关,位于二、四象限表示负相关; * 表示相关性显著 ($P < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)

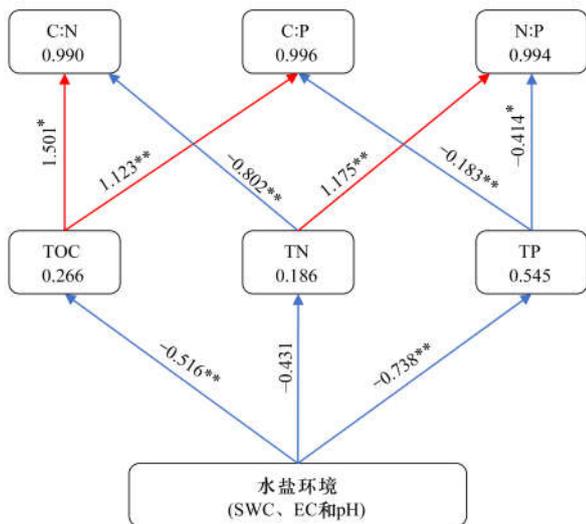
图6 土壤生态化学计量特征与理化性质的相关性分析

Fig. 6 Pearson's correlations between soil ecological stoichiometric characteristics and physicochemical properties

与 EC 和 pH 具有负相关关系。

PLS-SEM 模型结果表明 (图 7), C:N、C:P 和 N:P 的 R^2 均达到了 0.99, 说明土壤水盐环境 (SWC、EC 和 pH) 较好地解释了土壤 C:N、C:P 和 N:P 的变化. 土壤水盐环境对土壤 TOC、TN 和 TP 具有负

效应,进而对土壤 C:N、C:P 和 N:P 产生不同程度的影响. 其中,土壤水盐环境通过直接影响 TOC 对 C:N 和 C:P 产生间接的正向影响;通过 TN 的中介作用对 C:N 产生间接负向影响,对 N:P 产生间接正向影响;通过影响 TP 对土壤 C:P 和 N:P 产生负向影响. 而水盐环境对 TN 的影响不显著($P > 0.05$),且 TN 的 R^2 较低,说明水盐环境主要通过影响 TOC 和 TP 而作用于 C:N 和 N:P.



方框内部数值为 R^2 ; 红色箭头表示正效应,蓝色箭头表示负效应,箭头线上的数值表示路径系数; * 表示相关性显著($P < 0.05$), ** 表示相关性极显著($P < 0.01$)

图7 水盐环境与生态化学计量特征间的 PLS-SEM 模型分析

Fig. 7 PLS-SEM model of water-salt environment and ecological stoichiometric characteristics

3 讨论

3.1 移位培养对淡水湿地土壤水盐环境的影响

本研究结果表明,淡水湿地土壤移位至不同潮滩部位的盐沼湿地后,土壤的水、盐特征发生了显著变化,这主要与不同潮滩部位潮汐水文条件和原位土壤性质差异有关. 处于潮上带的淡水湿地培养点(FPA)土壤黏粒含量较低^[20],说明土壤持水能力差^[21],土壤中水分更多以自由水形式存在,更容易与土柱中的水分发生交换;而处于中-高潮滩的SPA、TC和SS培养点土壤黏粒含量相对较高^[20],土壤持水能力相对较强,说明土壤水中自由水相对较少,与土柱的水分交换作用较弱,这可能导致中潮滩和高潮滩培养点土柱中SWC相对较低. 低潮滩培养点SA受潮汐影响最强烈,土柱经常性处于潮汐淹没状态,导致土柱SWC相对较高. 本研究发现,淡水湿地土壤移位至不同潮滩部位后,土壤EC均显著提高,这主要与潮汐影响有关. 处于潮上带的淡水湿地几乎不受潮汐影响,外部环境中的盐离子含量低,与土柱发生离子交换的盐离子数量少,导致土柱

盐分较低;处于不同潮滩部位的培养点SPA、TC、SS和SA受潮汐的影响,潮汐携带的盐分在离子交换作用下使得盐离子在土柱中聚集,导致土柱EC升高^[22].

3.2 水盐环境对土壤C、N、P含量的影响

水盐环境的改变通过影响土壤理化性质和微生物活性等作用用于有机质的分解与积累过程,最终导致土壤C、N、P含量的变化^[23~25]. 有研究表明,潮滩湿地由于频繁的潮汐淹没,可导致土壤还原环境增强、盐度升高,抑制微生物分解活性,有利于有机质的积累^[26]. 然而,本研究发现,淡水湿地土壤移位至不同潮滩部位后,土柱内TOC、TN和TP含量在中潮滩和高潮滩发生明显下降(图3),说明淡水湿地土壤暴露于盐沼湿地水盐环境后,可导致土壤发生C、N、P的损失. 这一结果说明土柱内C、N、P含量的下降可能与土柱内有机质的分解关系不大,而更多与潮汐水动力条件对土柱-环境间物质的输入与输出过程的影响有关. 中潮滩和高潮滩环境土壤处于周期性的潮汐淹没状态,土壤还原环境强且盐度高^[27],导致环境土壤中微生物分解活性相对较低;加之受潮汐冲刷作用影响,地表枯落物难以积累、土壤有机质含量低等因素^[27],导致移位点环境土壤因微生物分解产生的溶解性有机物相对较低. Yang等^[25]在辽河口湿地的研究显示,土壤盐度的升高会改变土壤中微生物的群落结构,降低微生物活性,导致有机质分解速率下降. 此外,中潮滩和高潮滩土壤黏粒占比加大,黏粒的吸附作用也在一定程度上阻止了环境中的溶解性有机物向土柱内的传输^[28]. 相关研究表明,黏土矿物(如铁铝氧化物)具有较大的比表面积,带有较多的正电荷,对土壤有机物具有很强的吸附能力^[29,30]. 上述因素共同导致了输入到土柱内的溶解性C、N、P总量偏少、含量下降. 与此同时,中潮滩和高潮滩频繁的潮汐作用,也可能导致土柱内的溶解性C、N、P物质随潮汐向外输送^[31,32],从而造成土柱内TOC、TN和TP含量的降低. 这一结论也在PLS-SEM模型结果中得以证实,即水盐环境对TOC、TN和TP产生了不同程度的负效应. 然而,在低潮滩互花米草移位点并未发现土柱内TOC、TN和TP含量的显著变化(图3),这主要与互花米草植株密度高且生物量大,导致有机质积累快且程度高,从而抵消了潮汐动力条件的影响有关^[33]. 金宝石等^[34]的研究表明,互花米草生物量大,土壤可通过其枯落物分解、根系分泌物和植物残体进行有机质的固定与累积,互花米草还可依靠其发达的根系和茎叶削弱潮汐的动力,使径流携带的有机质和潮汐带来的生源物质不断沉积,从而

增加土壤中有机的含量. 本研究表明, 海水入侵可能会影响淡水湿地物质输入-输出过程, 进而造成土壤 C、N、P 含量的下降.

3.3 水盐环境对土壤生态化学计量比的影响

土壤 C、N、P 生态化学计量比是表征土壤 C、N、P 的固持-释放平衡的重要指标^[35]. 土壤 C:N 可指示土壤有机碳的生物可降解特征, 较低的 C:N 表明土壤有机质具有较快的降解速率^[36]; 土壤 C:P 可反映土壤 P 的有效性, 较低的 C:P 表示土壤 P 具有较高的生物有效性^[37]; 土壤 N:P 可预测养分限制状况, 土壤 N:P 越低, 植物生长受 N 的限制越大^[38]. 本研究中, 不同培养点土柱 C:N、C:P 和 N:P 范围分别为 8.18 ~ 12.01、9.73 ~ 16.63 和 1.16 ~ 1.56, 均低于我国湿地土壤平均水平 (C:N = 18.22、C:P = 245.22 和 N:P = 13.60)^[39], 说明不同水盐环境下土柱内有机质的分解速率快于积累速率, 土壤 P 的有效性较高, 而 N 相对供应不足.

水盐条件通过调节土壤微生态环境、微生物活性、物质溶解度等对土壤 C、N、P 的分解和释放产生影响, 进而调节土壤 C、N、P 生态化学计量比^[40]. 本研究发现, 淡水湿地土壤移位至中潮滩和高潮滩后, 其生态化学计量比发生了不同程度的变化 (图 5). 其中, C:N 在高潮滩和中潮滩显著降低; C:P 和 N:P 在高潮滩显著降低, 在中潮滩变化不显著, 说明当暴露在中-低强度潮汐环境中时, 淡水湿地土壤 C、N、P 的营养平衡状态可能会发生转变. 这可能与水盐环境变化改变了土壤碳源和营养物质的供给能力及土壤微生物对资源的需求强度有关. 本研究中淡水湿地土壤 C:N 和 C:P 相对偏低, 微生物分解更多受到碳源而非氮/磷营养的限制^[41]. 这与 Sinsabaugh 等^[42] 研究的结果相一致, 即当 C:N 较低时, 碳源作用更强, 微生物分解受碳的限制越大. 碳源受限条件下, 分解过程中微生物需要消耗更多的碳基质以获得维持其活性的能量^[43,44], 这种机制在中潮滩和高潮滩的盐分胁迫环境下更甚^[45]. Oren^[46] 研究发现, 微生物为抵御高盐环境所产生的胁迫, 会消耗更多的基质来产生相容性溶质和胞外多糖, 其对能量的需求随之增大. 因此, 碳源的受限加之盐胁迫导致淡水湿地土壤 C:N 和 C:P 在移至这些潮滩环境后发生 C:N 和 C:P 的下降. 而土柱 N:P 在高潮滩的显著降低则可能与 N 和 P 的供给能力的相对大小有关. 本研究中, 淡水湿地土壤 N:P 低于我国湿地平均值, 说明 N 供应能力相对偏低, 此种情形下, 微生物需要消耗更多的 N 以维持自身生长需求^[47], 而在环境胁迫下微生物对养分的需求更为强烈^[48]. Xiao 等^[49] 的研究显示, 环境胁迫下微

生物的生理活动、代谢能力和群落生态特征将发生改变, 此时为了维持其正常代谢活动, 微生物需要消耗更多的土壤养分. 而在中潮滩因其更强的潮汐作用, 潮汐中携带的 N 营养物质滞留在沉积物中^[50], 可能弥补了 N 的相对匮乏, 在一定程度上满足了微生物对 N 的需求, 因而表现为此处土柱 N:P 与淡水湿地培养点间无显著变化. PLS-SEM 模型结果显示, TOC、TN 和 TP 含量对其生态化学计量比存在显著正效应路径关系 (图 7), 这也证实了上述相关解释. 本研究发现, 淡水湿地土柱移至低潮滩后, C、N、P 的生态化学计量比均无显著变化 (图 5). 根据前述讨论可知, 低潮滩的互花米草移位点有机质积累程度较高, 频繁潮汐作用下丰富的有机质为微生物提供了充足的溶解性碳源和营养来源^[51], 即使在高盐胁迫环境下也足以维持微生物自身生长和活性需求. 这说明在较高的物质输入条件下, 淡水湿地土壤在高强度潮汐环境中也可以维持 C、N、P 的平衡状态. 本研究表明, 气候变化背景下, 低强度的海水入侵可能会通过影响有机质分解过程, 干扰淡水湿地土壤 C、N、P 元素平衡, 而高强度的海水入侵带来的大量外部物质的输入则可能对维持淡水湿地土壤 C、N、P 元素平衡具有积极效应.

4 结论

水盐环境改变后, 淡水湿地土壤 C、N、P 生态化学计量特征在不同的潮滩部位发生了不同程度的变化. TOC 和 TN 在高潮滩降低, 在中潮滩和低潮滩无显著变化; TP 则在中潮滩和高潮滩显著降低, 在低潮滩无显著变化; C:N 在高潮滩和中潮滩及 C:P 和 N:P 在高潮滩显著降低, C:N 在低潮滩及 C:P 和 N:P 在中潮滩和低潮滩的变化均不显著. PLS-SEM 分析表明, 水盐环境通过对淡水湿地土壤 TOC、TN 和 TP 的负效应而作用于其生态化学计量比. 结果表明, 全球气候变化背景下, 低强度的海水入侵可能会干扰淡水湿地土壤 C、N、P 元素平衡, 而高强度的海水入侵则可能对维持淡水湿地土壤 C、N、P 元素平衡具有积极效应.

参考文献:

- [1] 吕宪国. 湿地科学研究进展及研究方向[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(3): 170-172.
Lv X G. A review and prospect for wetland science[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(3): 170-172.
- [2] 刘景双. 湿地生物地球化学研究[J]. 湿地科学, 2005, 3(4): 302-309.
Liu J S. Wetland biogeochemistry research [J]. Wetland Science, 2005, 3(4): 302-309.
- [3] 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 等. 不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 204-

210.
Yue J J, Zhao S, Cheng H D, *et al.* Distribution of microplastics in the soil covered by different vegetation in Yellow River Delta wetland[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 204-210.
- [4] Lu Q Q, Bai J H, Yan D H, *et al.* Sulfur forms in wetland soils with different flooding periods before and after flow-sediment regulation in the Yellow River Delta, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **276**(8), doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122969.
- [5] Luo M, Zhu W F, Huang J F, *et al.* Anaerobic organic carbon mineralization in tidal wetlands along a low-level salinity gradient of a subtropical estuary: rates, pathways, and controls [J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 1245-1257.
- [6] Wang J L, Chen G F, Zou G Y, *et al.* Comparative on plant stoichiometry response to agricultural non-point source pollution in different types of ecological ditches [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(1): 647-658.
- [7] Lu Q Q, Bai J H, Zhang G L, *et al.* Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, **104**: 9-17.
- [8] Yu Q, Wilcox K, Pierre K L, *et al.* Stoichiometric homeostasis predicts plant species dominance, temporal stability, and responses to global change [J]. *Ecology*, 2015, **96**(9): 2328-2335.
- [9] 方晰, 陈婵. 植被恢复对土壤 N、P 积累转化及其耦合关系影响的研究进展 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, **42**(2): 84-97.
Fang X, Chen C. Research progress on effects of vegetation restoration on soil N and P accumulation, transformation and their coupling [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, **42**(2): 84-97.
- [10] Abrar M M, Xu H, Aziz T, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry mediate sensitivity of carbon stabilization mechanisms along with surface layers of a Mollisol after long-term fertilization in Northeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, **21**(2): 705-723.
- [11] 张友, 徐刚, 高丽, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义 [J]. *地球与环境*, 2016, **44**(6): 647-653.
Zhang Y, Xu G, Gao L, *et al.* Distribution characteristics of soil C, N and P in newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China and their stoichiometry implications [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(6): 647-653.
- [12] Hussain T, Koyro H W, Zhang W S, *et al.* Low salinity improves photosynthetic performance in *Panicum antidotale* under drought stress [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**, doi: 10.3389/fpls.2020.00481.
- [13] Li X F, Hou L J, Liu M, *et al.* Biogeochemical controls on nitrogen transformations in subtropical estuarine wetlands [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114379.
- [14] 刘玥, 杨继松, 于洋, 等. 辽河口不同类型湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(9): 3011-3020.
Liu Y, Yang J S, Yu Y, *et al.* Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of soil in the Liaohe Estuary wetlands [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(9): 3011-3020.
- [15] 孙一萍, 罗敏, 刘育秀, 等. 盐分和淹水增加对河口潮汐淡水沼泽湿地土壤磷形态和磷酸酶活性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(12): 5150-5160.
Sun Y P, Luo M, Liu Y X, *et al.* Effects of increasing salinity and flooding on soil phosphorus speciation and phosphorus-acquiring enzyme activities in the tidal freshwater wetland soils of the Min River Estuary, southeast China [J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*, 2021, **41**(12): 5150-5160.
- [16] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 895-904.
Mo X, Chen F J, You C, *et al.* Characteristics and factors of soil enzyme activity for different plant communities in Yellow River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 895-904.
- [17] Bai J H, Yu L, Ye X F, *et al.* Dynamics of phosphorus fractions in surface soils of different flooding wetlands before and after flow-sediment regulation in the Yellow River Estuary, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **580**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124256.
- [18] 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3241-3252.
Sun D B, Li Y Z, Yu J B, *et al.* Spatial distribution and eco-stoichiometric characteristics of soil nutrient elements under different vegetation types in the Yellow River Delta wetland [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3241-3252.
- [19] 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): 1090-1103.
- [20] 杨云斐, 杨继松, 刘学, 等. 黄河口沼泽土壤中三种形态还原性无机硫含量及其影响因素研究 [J]. *湿地科学*, 2022, **20**(2): 205-215.
Yang Y F, Yang J S, Liu X, *et al.* Contents of three forms of reduced inorganic sulfur in soil in marshes of the Yellow River estuary and their influencing factors [J]. *Wetland Science*, 2022, **20**(2): 205-215.
- [21] 谭龙, 韦昌富, 田慧会, 等. 土体持水特性及孔隙水分布特性的试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2017, **25**(1): 73-79.
Tan L, Wei C F, Tian H H, *et al.* Experimental study on characteristics of pore water distribution and water-holding capacity of soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(1): 73-79.
- [22] Yu X Y, Xin P, Hong L. Effect of evaporation on soil salinization caused by ocean surge inundation [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **597**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126200.
- [23] Yang J S, Liu Y, Shen Z, *et al.* Short-term effects of NaCl and Na₂SO₄ on nitrogen mineralization in the soil in three marshes of the Liaohe River estuary [J]. *Catena*, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104828.
- [24] 李文琦, 项琦, 解雪峰, 等. 互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2735-2745.
Li W Q, Xiang Q, Xie X F, *et al.* Effect of *Spartina alterniflora* Invasion on Soil C: N: P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2735-2745.
- [25] Yang J S, Zhan C, Li Y Z, *et al.* Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River Estuary, Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 946-953.

- [26] 胡伟芳, 曾从盛, 张美颖, 等. 盐度和水淹对短叶荇茎枯落物分解和二氧化碳释放的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(10): 4011-4018.
Hu W F, Zeng C S, Zhang M Y, *et al.* Effect of salinity and inundation on the decomposition of *Cyperus malaccensis* litter and carbon dioxide release[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(10): 4011-4018.
- [27] Liu X, Sun D D, Qin J F, *et al.* Spatial distribution of soil iron across different plant communities along a hydrological gradient in the Yellow River Estuary wetland[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, **10**, doi: 10.3389/fevo.2022.979194.
- [28] Churchman G J, Singh M, Schapel A, *et al.* Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils[J]. Clays and Clay Minerals, 2020, **68**(2): 135-143.
- [29] Singh M, Sarkar B, Bolan N S, *et al.* Decomposition of soil organic matter as affected by clay types, pedogenic oxides and plant residue addition rates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **374**: 11-19.
- [30] Barber A, Brandes J, Leri A, *et al.* Preservation of organic matter in marine sediments by inner-sphere interactions with reactive iron[J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-00494-0.
- [31] 韩广轩. 潮汐作用和干湿交替对盐沼湿地碳交换的影响机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8170-8178.
Han G X. Effect of tidal action and drying-wetting cycles on carbon exchange in a salt marsh: progress and prospects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(24): 8170-8178.
- [32] 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.
Tong C, Jia R X, Wang W Q, *et al.* Spatial variations of carbon, nitrogen and phosphorus in tidal salt marsh soils of the Minjiang River estuary[J]. Geographical Research, 2010, **29**(7): 1203-1213.
- [33] Cheng X L, Chen J Q, Luo Y Q, *et al.* Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* invasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes[J]. Geoderma, 2008, **145**(3-4): 177-184.
- [34] 金宝石, 闫鸿远, 王维奇, 等. 互花米草入侵下湿地土壤碳氮磷变化及化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(5): 1541-1549.
Jin B S, Yan H Y, Wang W Q, *et al.* Changes of soil carbon, nitrogen and phosphorus and stoichiometry characteristics in marsh invaded by *Spartina alterniflora* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(5): 1541-1549.
- [35] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937-3947.
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- [36] Ai Z M, Zhang J Y, Liu H F, *et al.* Soil nutrients influence the photosynthesis and biomass in invasive *Panicum virgatum* on the Loess Plateau in China[J]. Plant and Soil, 2017, **418**(1-2): 153-164.
- [37] Jiang Y F, Guo X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(10): 3476-3488.
- [38] Guo X, Jiang Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(1): 263-274.
- [39] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2016, **53**(5): 1160-1169.
Zhang Z S, Lu X G, Xue Z S, *et al.* Is there a redfield-type C:N:P ratio in Chinese wetland soils? [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(5): 1160-1169.
- [40] Wright A L, Inglett P W. Soil organic carbon and nitrogen and distribution of carbon-13 and nitrogen-15 in aggregates of everglades histosols[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(2): 427-433.
- [41] 周正虎, 王传宽. 微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(6): 620-630.
Zhou Z H, Wang C K. Responses and regulation mechanisms of microbial decomposers to substrate carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, **40**(6): 620-630.
- [42] Sinsabaugh R L, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2012, **43**: 313-343.
- [43] Hessen D O, Elser J J, Sterner R W, *et al.* Ecological stoichiometry: an elementary approach using basic principles [J]. Limnology and Oceanography, 2013, **58**(6): 2219-2236.
- [44] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, *et al.* Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling[J]. Ecology Letters, 2013, **16**(7): 930-939.
- [45] Vyrives I, Stuckey D C. Compatible solute addition to biological systems treating waste/wastewater to counteract osmotic and other environmental stresses: a review [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, **37**(7): 865-879.
- [46] Oren A. Thermodynamic limits to microbial life at high salt concentrations[J]. Environmental Microbiology, 2011, **13**(8): 1908-1923.
- [47] Bloor J M G, Niboyet A, Leadley P W, *et al.* CO₂ and inorganic N supply modify competition for N between co-occurring grass plants, tree seedlings and soil microorganisms[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, **41**(3): 544-552.
- [48] Chen P F, Mo C Y, He C, *et al.* Shift of microbial turnover time and metabolic efficiency strongly regulates rhizosphere priming effect under nitrogen fertilization in paddy soil[J]. Science of the Total Environment, 2021, **800**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149590.
- [49] Xiao L, Min X X, Liu G B, *et al.* Effect of plant-plant interactions and drought stress on the response of soil nutrient contents, enzyme activities and microbial metabolic limitations [J]. Applied Soil Ecology, 2023, **181**, doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104666.
- [50] Knobloch A L J, Reay W G, Canuel E A. Carbon pools differ in source and temporal patterns in a tidal marsh creek system of the York River, VA Estuary[J]. Estuaries and Coasts, 2021, **44**(7): 1848-1865.
- [51] Hu Y, Wang L, Fu X H, *et al.* Salinity and nutrient contents of tidal water affects soil respiration and carbon sequestration of high and low tidal flats of Jiuduansha wetlands in different ways[J]. Science of the Total Environment, 2016, **565**: 637-648.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)