

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

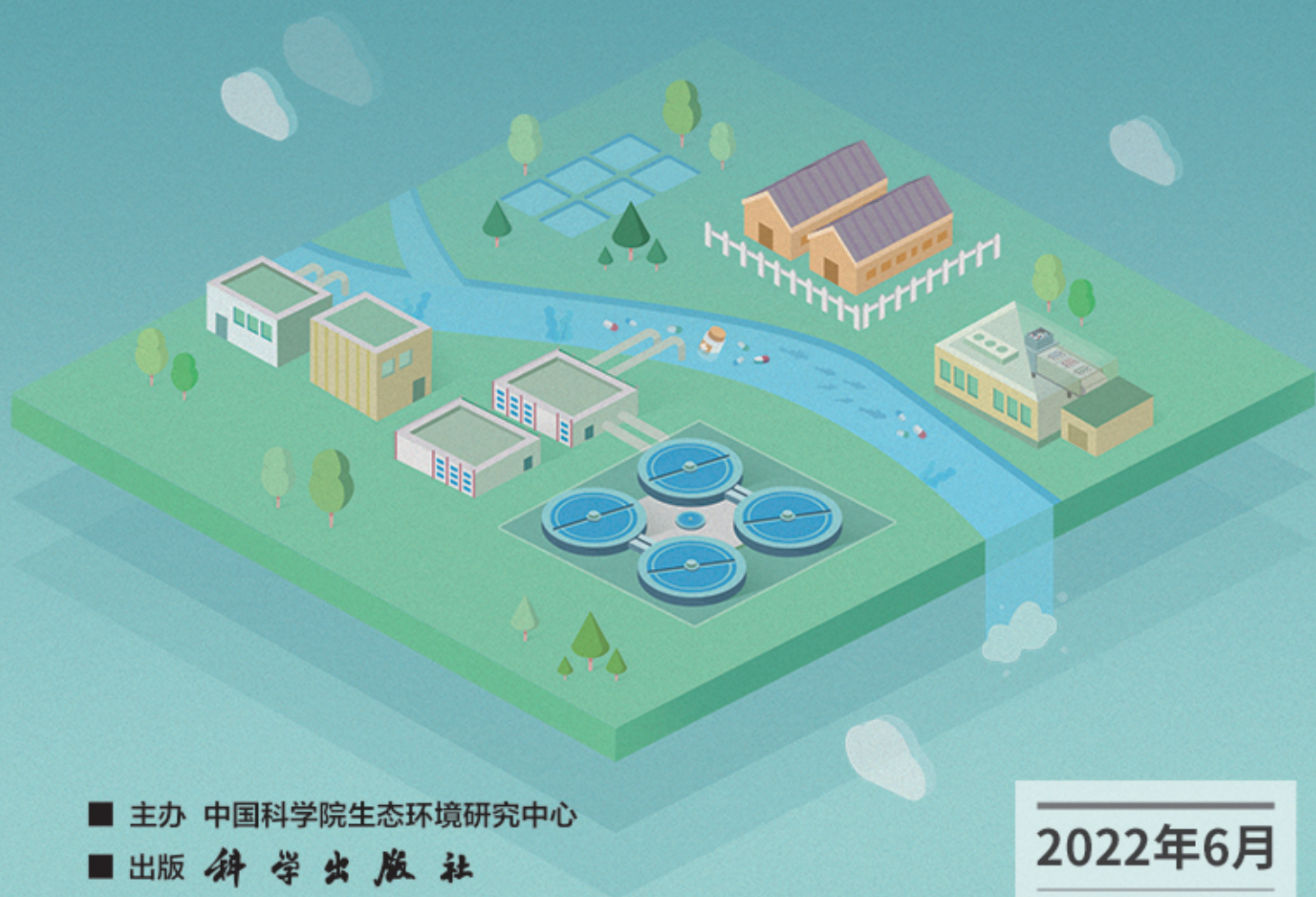
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铨, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中铜的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
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学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

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

孙德斌¹, 栗云召¹, 于君宝^{1*}, 杨继松^{1*}, 杜朝红¹, 孙丹丹¹, 凌越¹, 马元庆², 周迪¹, 王雪宏¹, 赵佳怡¹

(1. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 烟台 264025; 2. 山东省海洋资源与环境研究院, 烟台 264006)

摘要: 选取黄河三角洲芦苇湿地、柽柳湿地、盐地碱蓬湿地和光滩这4种典型自然湿地及农垦地棉花田作为研究对象, 阐明不同植被类型自然湿地土壤营养元素分布特征和生态化学计量学特征, 并进行农垦地同自然湿地的对比研究。结果表明, 自然湿地内土壤总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量总体表现为: 芦苇湿地、柽柳湿地 > 盐地碱蓬湿地 > 光滩, TOC和TN含量同土壤电导率值(EC)和pH值呈显著负相关($P < 0.05$); 棉花田TOC、TN和全磷(TP)含量显著高于自然湿地($P < 0.05$), 其中硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)含量为自然湿地的9.4~11.4倍, 但棉花田碳、氮和磷含量同EC值和pH值无显著相关性($P > 0.05$)。相关分析表明, 自然湿地土壤碳氮比(C/N)主要受控于TN含量($P < 0.05$), 棉花田土壤C/N显著低于自然湿地($P < 0.05$)。自然湿地及棉花田土壤碳磷比(C/P)和氮磷比(N/P)均值较低, 且与土壤TOC和TN含量变化趋势一致。对比分析发现, 整体上棉花田土壤营养元素含量、C/N、C/P和N/P差异显著($P < 0.05$), 说明农垦过程可显著改变湿地营养元素的空间分布。对于深入揭示滨海湿地土壤营养元素生物地球化学过程和农垦活动对土壤营养元素分异影响具有重要意义。

关键词: 黄河三角洲湿地; 植被类型; 土壤营养元素; 生态化学计量学特征

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3241-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109011

Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland

SUN De-bin¹, LI Yun-zhao¹, YU Jun-bao^{1*}, YANG Ji-song^{1*}, DU Zhao-hong¹, SUN Dan-dan¹, LING Yue¹, MA Yuan-qing², ZHOU Di¹, WANG Xue-hong¹, ZHAO Jia-yi¹

(1. Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China)

Abstract: To clarify the distribution characteristics and the ecological stoichiometric characteristics of nutrient elements in soils under different vegetation types, four typical natural wetlands, i.e., *Phragmites australis* wetland, *Tamarix chinensis* wetland, *Suaeda salsa* wetland, and *Tidal flat* wetland, as well as *Gossypium* spp. fields that were reclaimed from natural wetlands, were selected as study sites in the Yellow River Delta, and comparisons between the agricultural reclamation land and natural wetlands were conducted. The results showed that the soil total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) contents in the natural wetlands were as follows: *P. australis* wetland and *T. chinensis* wetland > *S. salsa* wetland > *Tidal flat*, and the contents of TOC and TN were significantly negatively related to electrical conductivity (EC) and pH values ($P < 0.05$). The contents of TOC, TN, and total phosphorus (TP) in *Gossypium* spp. fields were significantly higher than those in natural wetlands ($P < 0.05$), especially the contents of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) in *Gossypium* spp. fields, which were 9.4–11.4 times that of natural wetlands. However, no significant correlations between TOC, TN, and TP and EC and pH values ($P > 0.05$) were observed in *Gossypium* spp. fields. The results of correlation analysis showed that the C/N of natural wetlands were mainly controlled by the contents of TN ($P < 0.05$), and the C/N of the *Gossypium* spp. fields were significantly lower than those of natural wetlands ($P < 0.05$). The soil C/P and N/P of natural wetlands and *Gossypium* spp. fields in the Yellow River Delta were low, and the variation trends were consistent with those of soil TOC and TN. Comparative analysis revealed, on the whole, that there were significantly different soil nutrient element contents, C/N, C/P, and N/P in *Gossypium* spp. fields compared to those of natural wetlands ($P < 0.05$). The process of reclamation could significantly change the spatial distribution of nutrient elements in wetlands. Our results should be of importance in revealing the biogeochemical process of soil nutrient elements in coastal wetland and the influence of agricultural reclamation activities on the differentiation of soil nutrient elements.

Key words: the Yellow River Delta wetland; vegetation type; soil nutrient elements; eco-stoichiometric characteristics

湿地作为全球三大生态系统之一, 是碳、氮、磷和硫等营养元素的“源”/“汇”与“转换器”, 在全球气候变化过程中扮演重要角色^[1,2]。滨海湿地作为介于海洋和陆地生态系统间的自然交错带, 其具有湿地各种生态功能的同时, 又是一个高度动态和复杂的脆弱系统^[3,4]。作为系统养分循环的主要调节者, 湿地土壤对植物生长和系统稳定具有重要影响^[5]。其中, 湿地土壤有机碳含量对湿地生态系统

生产力具有显著影响; 湿地土壤氮是影响湿地初级生产力的重要限制元素, 特别是铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)作为重要的有效氮, 是植物氮类养

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1806218, 41871087); 山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目

作者简介: 孙德斌(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学过程, E-mail: sundebin69@qq.com

* 通信作者, E-mail: yu.junbao@gmail.com; yangjiesong@ldu.edu.cn

分的重要来源^[6-11]. 碳、氮、磷和硫等营养元素含量是衡量湿地土壤养分状况和系统功能情况的重要指标,其生态化学计量学特征可用于揭示土壤养分的可获得性,反映土壤的养分循环和平衡机制,对于掌握土壤质量状况和系统内土壤养分转化情况具有重要意义^[12-14].

黄河三角洲湿地是中国暖温带面积最大的新生湿地生态系统^[14]. 由于黄河中上游水土流失严重,大量沉积物由河水携带至河口区沉降,经年累积形成太平洋沿岸典型滨海湿地^[15]. 芦苇 (*Phragmites australis*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*) 和盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 等为黄河三角洲自然湿地内典型植被类型,此外自然湿地内光滩面积广大,多位于潮间带,植被覆盖率低^[16,17]. 各植物群落多以某一物种占优,伴生种少,形成如芦苇湿地、怪柳湿地、盐地碱蓬湿地和光滩湿地等结构简单的单一植被类型自然湿地. 受海洋、陆地和河流综合作用影响,各类型自然湿地由陆至海呈带状依次分布,土壤碳、氮、磷和硫等营养元素在湿地生态系统的转化、分布同水文过程和植被类型等因素密切相关^[18]. 且黄河三角洲湿地位于海陆交界带,对环境变化响应敏感,当前面临一系列生态问题,自然湿地面积大量减少,生态系统逐渐退化,其中土地开垦为人类活动侵占湿地的主要方式^[19]. 近代,黄河三角洲湿地大面积被开垦为农田,据统计仅 2000~2009 年,自然湿地开垦面积已达 207.1 km²,其中开垦自芦苇湿地面积约 37.60 km²,怪柳湿地面积约 124.69 km²,二者占自然湿地开垦为旱田总面积的 78% 以上,其余部分则由各类盐沼湿地和光滩等贡献^[20]. 由于棉花 (*Gossypium* spp.) 具有耐盐碱的生物特性而被广泛种植,成为农垦地的主要作物类型 (2018 年区域内棉花种植面积达 50 253.3 hm²)^[21,22]. 开垦活动也可强烈改变湿地土壤养分的分布状况和转化过程,进而影响湿地系统稳定性,使原有的生态功能发生改变^[23,24].

当前关于湿地土壤营养元素的研究除集中于其储量、空间分布特征和生态化学计量学特征等方面外,不同植被类型湿地土壤营养元素空间分异变化研究和其对人类开垦活动的响应亦备受关注^[25-28]. 黄河三角洲内不同植被类型自然湿地广布,湿地开垦历史久远,农垦面积广大,但相关研究较少,其自然湿地内土壤营养元素分异情况和其对农垦过程的响应尚不明晰. 因此,本文以黄河三角洲自然湿地和农垦湿地 (以自然湿地转化的棉花田为代表) 为研究对象,分析不同植被类型下湿地土壤碳、氮、磷和硫等营养元素的分异规律和其生态化学计量学特

征; 探讨土壤盐碱性、植被类型和开垦活动等因素对滨海湿地土壤营养元素分布的影响,以期揭示黄河三角洲自然湿地土壤营养元素分布特征、化学计量学特征和对开垦活动的响应提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概括

黄河三角洲 (37°34'~38°09' N, 118°31'~119°18' E) 属北温带半湿润大陆性季风气候,年均温 11.7~12.6℃,年均降水量 530~630 mm,年均蒸发量 750~2 400 mm,光照充足、四季分明,降水主要集中在夏秋两季^[29,30]. 研究区内水源主要为大气降水、河水和潮水,因受海洋、陆地和河流综合作用的影响,环境条件复杂多变,各类型自然湿地由陆至海呈带状依次分布. 受海水及潮汐影响,黄河三角洲湿地土壤多存在不同程度的盐渍化现象. 其中芦苇湿地主要分布于黄河岸边及潮上带 (图 1),水分补给依靠大气降水和河水,属季节性淹水,面积占比 16.91%,土壤类型多为沼泽土^[31]. 怪柳湿地主要分布于潮上带,大潮高潮时可被海水短暂淹没,水分补给依靠大气降水和海水,占比为 6.14%,土壤类型为盐渍土^[32]. 盐地碱蓬湿地和光滩主要分布于潮间带,海水周期性淹没,占比分别为 7.98% 和 18.93%,土壤类型为盐渍土. 农垦地主要分布于三角洲内部区域和黄河岸边,距海较远,多由各类自然湿地开垦而来,水分补给依靠灌溉和大气降水,占比为 35.23%^[16,24,33].

1.2 样品采集

利用 2018 年 Landsat Thematic Mapper (TM) 数字图像 (空间分辨率为 30 m×30 m) 对研究区的土地利用和土地覆被进行目视解译,后通过实地调查进行校准,制作黄河三角洲土地利用分类图. 参考土地利用类型图,依据网格布点法,在各类型自然湿地及棉花田内设置采样点. 于 2019 年 8 月中旬,基于已设采样点,同现场实地情况相结合,选取研究区内典型芦苇湿地 (22 样点)、怪柳湿地 (15 样点)、盐地碱蓬湿地 (12 样点) 和光滩 (17 样点) 这 4 种自然湿地及农垦地棉花田 (16 样点) 为采样地,共布置 82 个土壤采样点 (图 1),每点设 3 个平行处理. 采样时,去除土壤表面凋落物,用土钻采集 0~10 cm 土壤样品,现场剔除植物根系与凋落物,各样点随机采集 3 个土壤样品,样品混合均匀后自封袋密封,带回实验室,置于阴凉通风处晾干,研磨过筛,待测.

1.3 样品分析测试

取过筛后样品,土壤总有机碳 (TOC) 测定采用

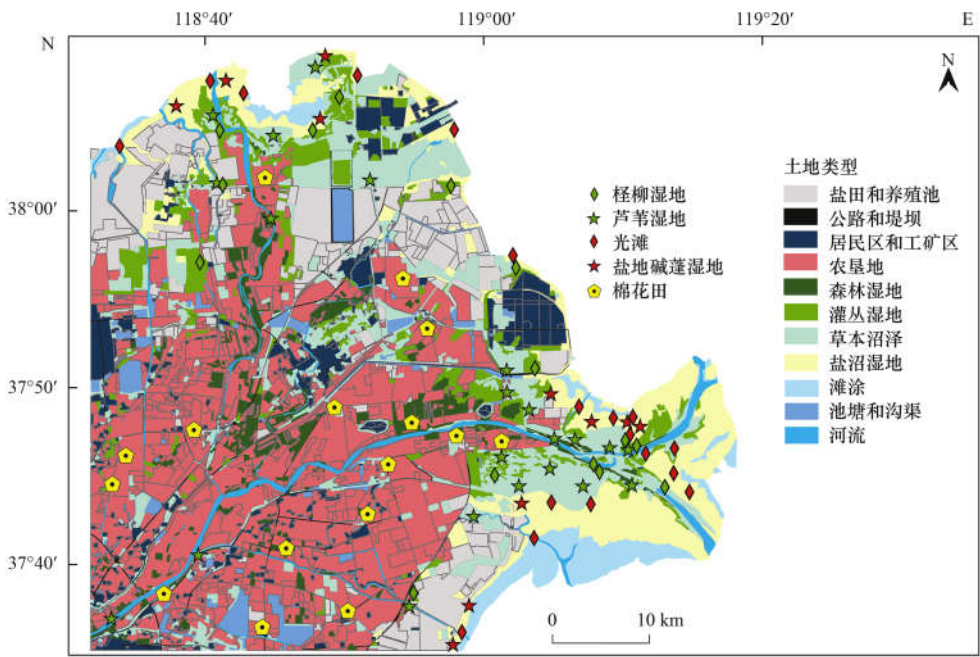


图 1 研究区位置及采样点分布示意
Fig. 1 Map of study area and sampling sites

高温外热重铬酸钾氧化-容量法；总氮 (TN) 和总磷 (TP) 含量采用高温消煮 (消煮温度为 380℃), 后经连续流动分析仪测定 (AMS France-Alliance Instruments, A16786)^[34]；总硫 (TS) 含量采用硫酸钡比浊法测定；铵态氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量取过筛干土样品用 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 浸提后通过连续流动分析仪测定；pH 值 (水: 土 = 2.5: 1) 和电导率 (EC) (水: 土 = 5: 1) 分别用 pH 计 (Mettler Toledo, FE28-Standard) 和电导率仪 (Mettler Toledo, FE38) 测定。

1.4 数据处理

利用 Excel 2018 进行数据整理, 计算各类营养元素含量的均值及标准误差；采用 SPSS 24.0 进行数据统计分析, 计算不同植被类型土壤各类营养元素含量的变异系数, 差异性采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 计算, 所有数据均采用最小显著差异 (least significant difference, LSD) 法进行多重比较 ($\alpha = 0.05$), 采用 Pearson 法进行相关性分析 (correlation analysis). 采用 ArcGIS 10.8 进行数据正态分布检验、异常值剔除、插值方法选取、趋势效应分析和空间分布图绘制. 具体采用经验贝叶斯克里金法 (empirical bayes kriging, EBK) 进行空间插值分析. 利用 Origin 9.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤营养含量

黄河三角洲不同植被类型下土壤 ω (TOC)、

ω (TN)、 ω (TP) 和 ω (TS) 的变化范围分别为 1.76 ~ 8.18、0.13 ~ 0.89、0.49 ~ 0.73 和 0.42 ~ 1.92 g·kg⁻¹, 均值分别为 4.24、0.39、0.58 和 0.84 g·kg⁻¹, 变异系数 (CV) 分别为 38.81%、42.71%、8.42% 和 36.89% (表 1). 土壤 TOC 平均含量的峰值出现在棉花田土壤 (5.75 g·kg⁻¹), 显著高于 4 种自然湿地 ($P < 0.05$, 图 2 和表 1), 之后依次为柽柳湿地 (4.12 g·kg⁻¹)、芦苇湿地 (3.91 g·kg⁻¹) 和盐地碱蓬湿地 (3.49 g·kg⁻¹), 最低为光滩 (2.96 g·kg⁻¹) (图 2). 土壤 ω (TN) 平均值: 棉花田 (0.61 g·kg⁻¹) 显著高于芦苇湿地 (0.40 g·kg⁻¹)、柽柳湿地 (0.38 g·kg⁻¹) 和盐地碱蓬湿地 (0.31 g·kg⁻¹) ($P < 0.05$), 最低为光滩 (0.27 g·kg⁻¹), TN 变化趋势同 TOC 大致相同. 土壤 ω (TP) 平均值棉花田 (0.63

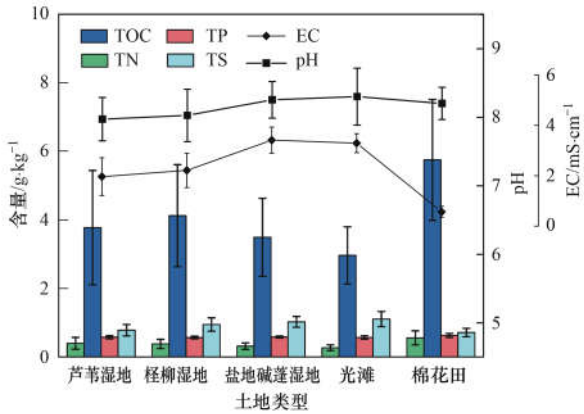


图 2 黄河三角洲典型自然湿地与棉花田土壤 TOC、TN、TP、TS 含量和土壤 pH、EC 值

Fig. 2 Soil TOC, TN, TP, TS contents, pH, and EC values of typical natural wetlands and cotton fields in the Yellow River Delta

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于4种自然湿地($P<0.05$),自然湿地多分布在 $0.55\sim0.65\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,整体上内部间无显著性差异($P>0.05$).土壤 ω (TS)平均值光滩最高($1.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次为盐地碱蓬湿地(1.02

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、怪柳湿地($0.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和芦苇湿地($0.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),棉花田最低($0.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).从变异系数来看,土壤碳、氮和硫的空间变异性远高于磷,土壤磷在不同类型间分布较均匀.

表1 研究区土壤理化性质描述性统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of soil physicochemical properties in the study area

土地类型	项目	TOC	TN	TP	TS	pH	EC
芦苇湿地 ($n=22$)	差异性	BC	B	B	C	B	B
	变异系数/%	38.69	42.14	7.46	21.39	5.22	86.48
怪柳湿地 ($n=15$)	差异性	B	BC	B	B	AB	B
	变异系数/%	36.16	35.53	6.63	20.64	6.00	59.55
盐地碱蓬湿地 ($n=12$)	差异性	CD	C	B	AB	A	A
	变异系数/%	32.56	30.37	4.78	15.41	6.89	44.53
光滩 ($n=17$)	差异性	D	C	B	A	A	A
	变异系数/%	25.78	30.63	8.63	20.03	6.69	37.27
棉花田 ($n=16$)	差异性	A	A	A	C	A	C
	变异系数/%	25.07	26.34	9.38	17.24	4.08	56.84
自然湿地 ($n=66$)	极小值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.76	0.13	0.49	0.56	6.85	0.25
	极大值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.85	0.89	0.67	1.65	8.87	6.86
	变异系数/%	38.3	40.35	7.12	23.77	6.36	56.47
全部类型 ($n=82$)	极小值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.76	0.13	0.49	0.42	6.85	0.25
	极大值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	8.18	0.89	0.73	1.65	8.87	6.86
	变异系数/%	38.82	42.71	8.42	25.37	6.03	73.62

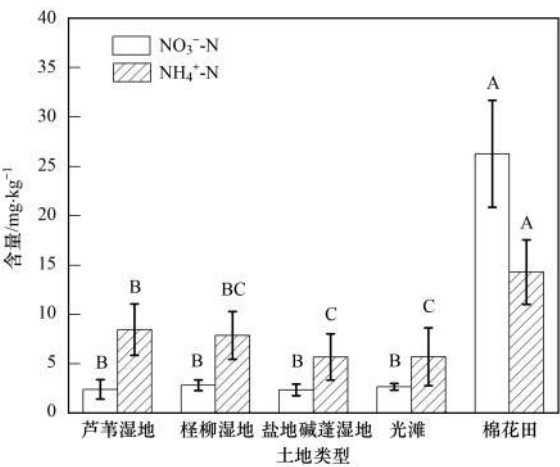
1) 不同大写字母表示不同土地类型间同一土壤理化性质差异显著($P<0.05$)

土壤 $\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\omega(\text{NO}_3^--\text{N})$ 平均值最高都出现于棉花田土壤,分别为 $14.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $26.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3),为自然湿地土壤平均值的 $1.7\sim2.5$ 倍和 $9.4\sim11.4$ 倍,具显著差异($P<0.01$).自然湿地中,芦苇湿地土壤 NH_4^+-N 含量显著高于盐地碱蓬湿地和光滩($P<0.05$),怪柳湿地土壤 NH_4^+-N 含量与盐地碱蓬湿地和光滩之间无显著性差异($P>0.05$).4种自然湿地土壤 $\omega(\text{NO}_3^--\text{N})$ 差异性不显

著($P>0.05$),范围在 $1.8\sim3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间.

对不同类型土壤碳(TOC)、氮(TN)和磷(TP)的线性回归分析发现,区内土壤TOC含量和TN含量存在显著的线性拟合关系($P<0.05$,图4),整体来看不同类型土壤TOC和TN含量变化同步.TOC与TN的线性拟合中自然湿地土壤线性拟合程度较高,棉花田土壤拟合程度相对较低.从点的分布也可看出,自然湿地中芦苇湿地和怪柳湿地的土壤TOC和TN含量高于盐地碱蓬湿地与光滩,棉花田土壤TOC和TN含量整体高于自然湿地,区内土壤TP含量较为稳定.

运用Arcgis的地统计板块(geostatistical analysis)中的经验贝叶斯克里金法(EBK)对各土壤营养元素进行全域范围的空间插值,并提取土壤营养元素的空间分布(图5).同时提取各采样点距海岸线垂直距离,分析各营养元素含量同距海距离间的变化关系(图6).其中,棉花田主要位于三角洲中心区域及黄河沿岸,距海较远;芦苇湿地主要分布于黄河沿岸及潮上带;怪柳湿地主要分布于潮上带,大潮高潮时受海洋潮汐影响;盐地碱蓬湿地和光滩主要分布于潮间带,被潮水周期性淹没^[17,28](图1).结果表明,研究区内土壤TOC和TN分布呈现出由内陆至沿海边缘,由黄河沿岸至海岸,由农垦地至光滩,随植被类型变化逐渐下降的趋势;土壤TP分布总体上也呈此变化规律,但数值差异较小;



不同大写字母表示不同土地类型间 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量差异显著($P<0.05$)

图3 黄河三角洲典型自然湿地与棉花田土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量

Fig. 3 Soil NH_4^+-N and NO_3^--N contents of typical natural wetlands and cotton fields in the Yellow River Delta

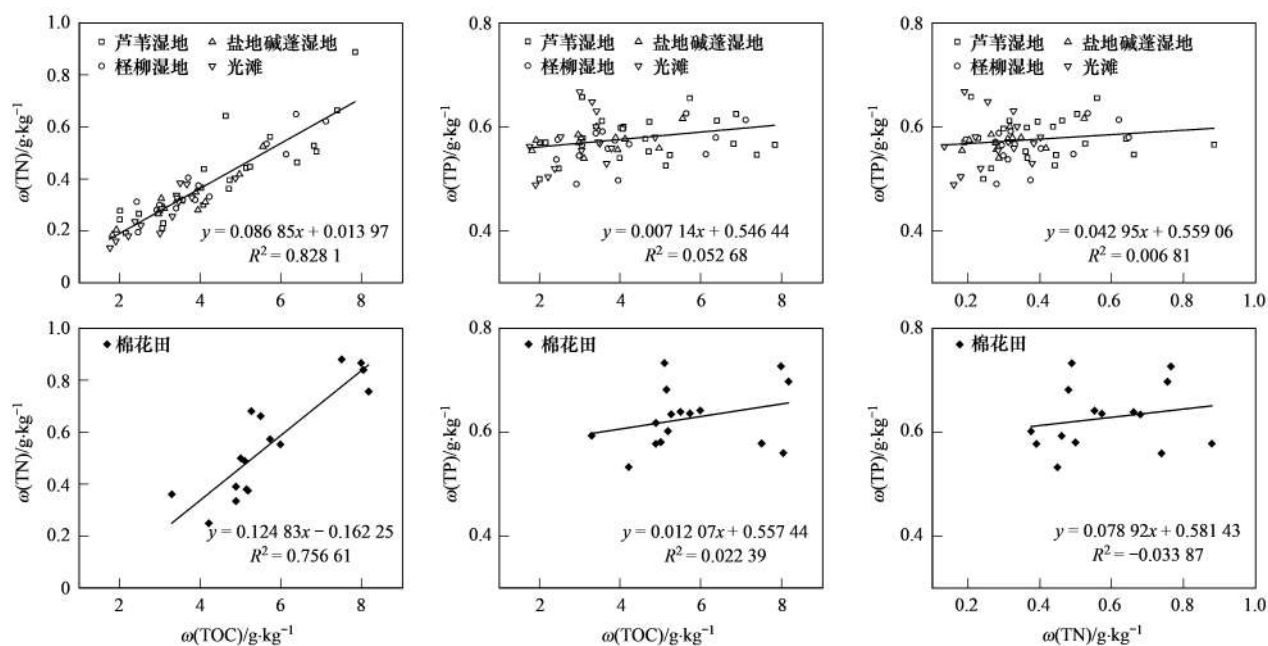


图4 黄河三角洲典型湿地与棉花田土壤碳、氮和磷相关性

Fig. 4 Correlation of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of typical natural wetlands and cotton fields in the Yellow River Delta

土壤 TS 由陆至海逐渐上升,农垦区域含量明显低于自然湿地,空间分布上整体呈与之相反的变化趋势(图 5 和图 6). 土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 在农垦区显著高于自然湿地,且多有高值区呈团状分布.

2.2 不同植被类型下土壤生态化学计量比

研究区内自然湿地土壤 C/N 均值范围为 11.40~13.13,棉花田 C/N 均值为 10.84,其中芦苇湿地和光滩土壤 C/N 均值显著高于棉花田($P < 0.05$,图 7). 自然湿地 C/P 均值范围为 13.82~20.31,棉花田 C/P 均值为 23.58,其中 4 种自然湿地 C/P 均值呈:芦苇湿地 > 柽柳湿地 > 盐地碱蓬湿地 > 光滩,且棉花田显著高于柽柳湿地、盐地碱蓬湿地和光滩($P < 0.05$),整体上与区内土壤 TOC 变化趋势相似. 自然湿地 N/P 均值范围为 1.06~1.53,棉花田 N/P 均值为 2.18,棉花田显著高于自然湿地($P < 0.05$),整体上与 TN 变化趋势相似.

对各土壤营养元素化学计量比进行全域范围的空间插值(图 8),结果表明,研究区内土壤 C/N 整体较低,黄河新旧入海口处比值明显高于其他区域,自然湿地高于农垦地. C/N 和 N/P 分布呈现由陆至海逐渐下降,由黄河沿岸至海岸逐渐下降的变化趋势,整体上同 TOC 和 TN 空间分布情况极相似(图 5 和图 6).

2.3 土壤营养元素含量及生态化学计量比的相关性分析

土壤营养元素含量的相关性分析表明(表 2),自然湿地土壤 TOC 与 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 极显著相关($P < 0.01$),与 TP 显著相关($P < 0.05$);土壤

TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 三者极显著相关($P < 0.01$);土壤 TN 和 NO_3^- -N 与 pH 值极显著负相关($P < 0.01$);土壤 TOC 和 TN 与 EC 值极显著负相关($P < 0.01$), NH_4^+ -N 与 EC 值显著负相关($P < 0.05$). 棉花田土壤 TOC 与 TN 极显著相关($P < 0.01$),与 NH_4^+ -N 显著相关($P < 0.05$);土壤 TN 与 NH_4^+ -N 显著相关($P < 0.05$). 总的来看自然湿地土壤多种营养元素含量与 pH 和 EC 值具有强负相关性,而棉花田土壤二者整体间相关性不强.

生态化学计量比的相关性分析表明(表 2),自然湿地土壤 C/N 与 pH 值极显著相关($P < 0.01$),C/P 与 EC 值极显著负相关($P < 0.01$),N/P 与 pH 和 EC 值呈极显著负相关($P < 0.01$). 棉花田土壤 C/N 和 C/P 与 pH 和 EC 值无显著相关性($P > 0.05$),N/P 与 EC 值显著负相关($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素分布特征

本研究涉及黄河三角洲 4 种自然湿地和一种农垦地. 自然湿地土壤 $\omega(\text{TOC})$ 与珠江口红树林湿地(10.93~26.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、闽江口芦苇及互花米草湿地(15.86~41.61 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、长江三角洲芦苇湿地(12.21~15.55 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和辽河口芦苇及碱蓬湿地(6.28~25.11 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比处于低位,此外土壤 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\omega(\text{NO}_3^--\text{N})$ 也普遍偏低^[6,35~38]. 其主要原因为黄河三角洲成土时间短且潜育化程度低,同时自然湿地植物生物量小,植物残

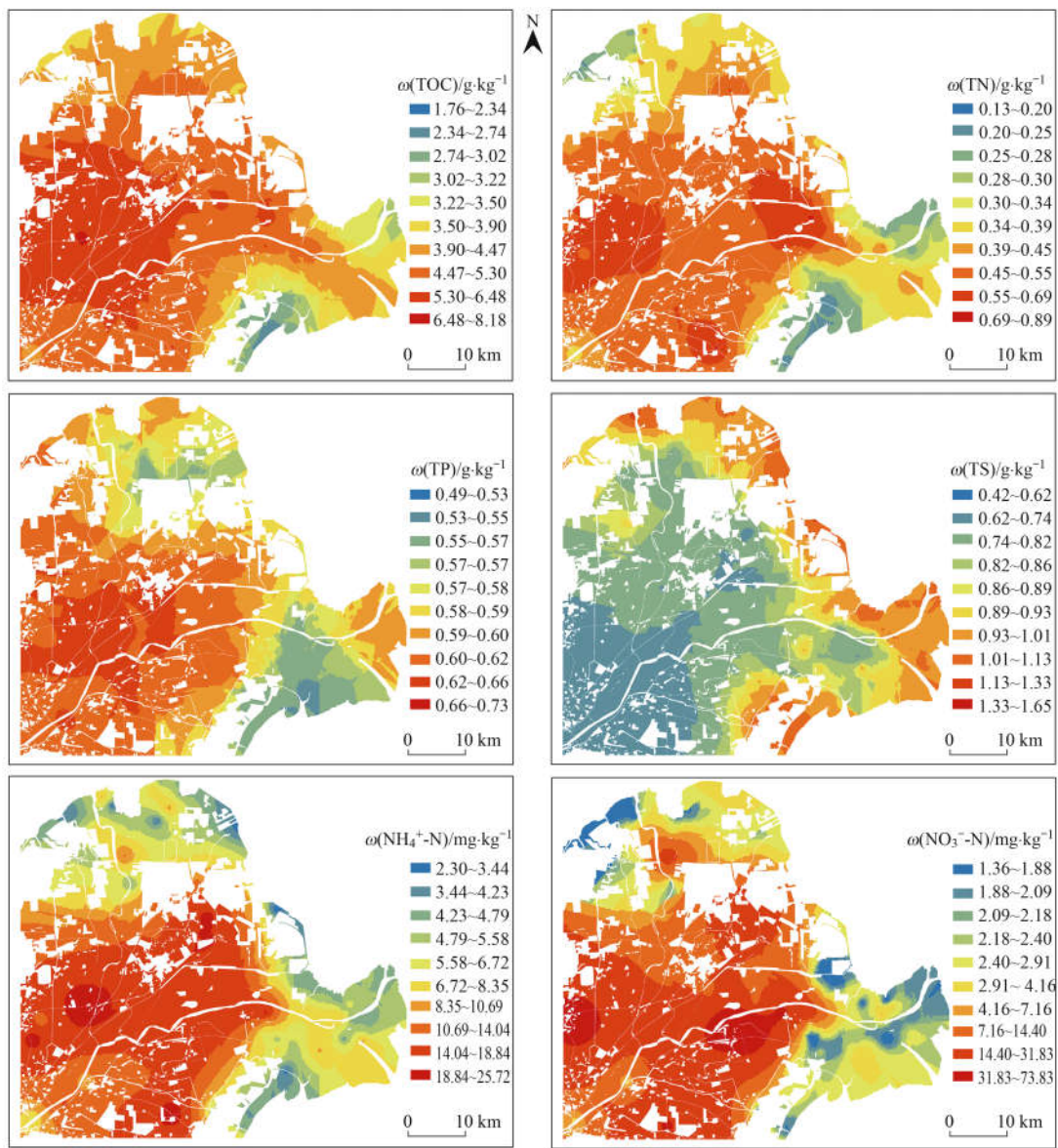


图 5 黄河三角洲典型湿地与棉花田土壤营养元素空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of soil nutrients of typical natural wetlands and cotton fields in the Yellow River Delta

表 2 土壤理化性质及生态化学计量比的相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson analysis of soil physicochemical properties and ecological stoichiometric ratio

		TOC	TN	TP	TS	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	pH	EC
自然湿地	TOC	1.00						-0.21	-0.41 **
	TN	0.91 **	1.00					-0.33 **	-0.42 **
	TP	0.26 *	0.15	1.00				0.08	-0.09
	TS	-0.14	-0.07	0.02	1.00			0.18	0.38 **
	NH ₄ ⁺ -N	0.64 **	0.68 **	0.04	-0.20	1.00		-0.30 *	-0.28 *
	NO ₃ ⁻ -N	0.40 **	0.48 **	-0.01	0.23	0.36 **	1.00	-0.38 **	-0.16
	C/N	0.13	-0.25 *	0.36 **	-0.11	-0.18	-0.31 *	0.35 **	0.03
	C/P	0.98 **	0.91 **	0.09	-0.16	0.64 **	0.41 **	-0.23	-0.42 **
	N/P	0.88 **	0.99 **	-0.01	-0.09	0.68 **	0.49 **	-0.35 **	-0.44 **
棉花田	TOC	1.00						-0.02	-0.34
	TN	0.83 **	1.00					0.21	-0.52 *
	TP	0.30	0.20	1.00				-0.09	0.31
	TS	0.09	-0.01	0.38	1.00			0.17	0.06
	NH ₄ ⁺ -N	0.53 *	0.66 **	0.03	-0.23	1.00		0.19	-0.48
	NO ₃ ⁻ -N	0.04	0.04	-0.04	-0.47	-0.21	1.00	-0.21	0.10
	C/N	0.18	-0.38	0.07	0.20	-0.26	-0.05	-0.44	0.34
	C/P	0.92 **	0.78 **	-0.09	-0.07	0.56 *	0.05	-0.01	-0.44
	N/P	0.73 **	0.93 **	-0.15	-0.16	0.66 **	0.05	0.22	-0.60 *

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关

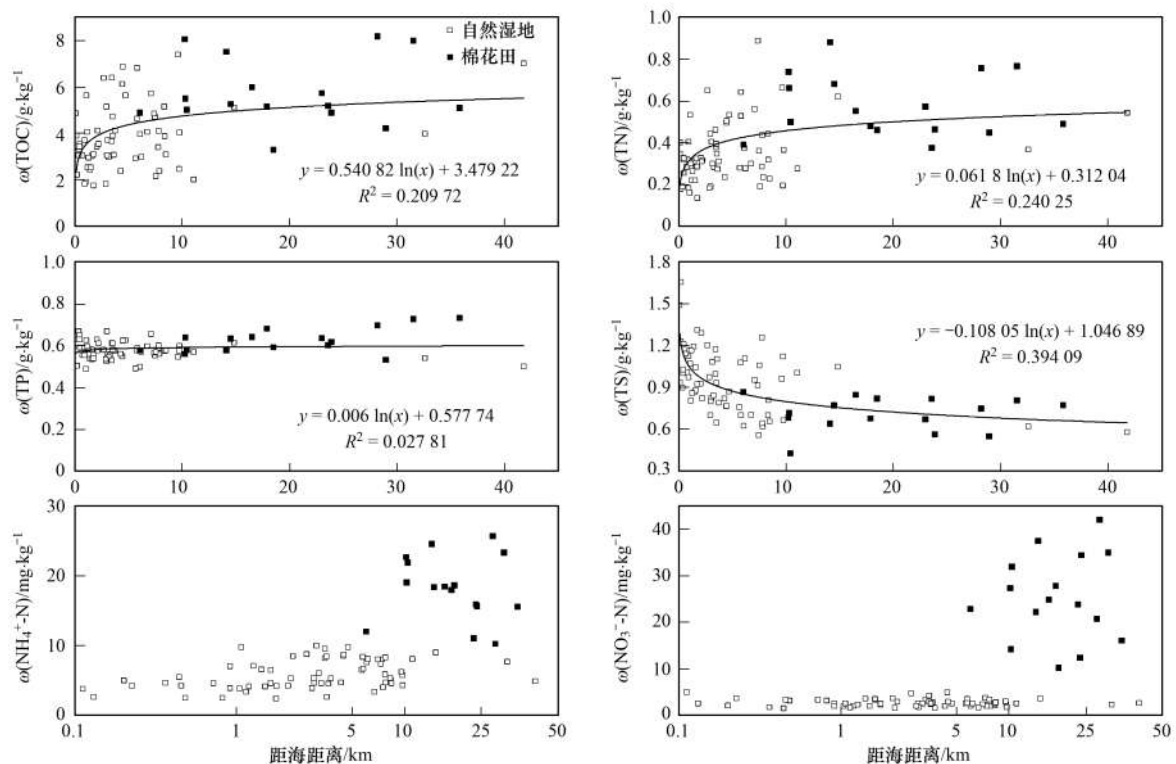


图 6 黄河三角洲土壤营养元素在距海岸线垂直距离上的变化趋势

Fig. 6 Trends of soil nutrient elements on vertical distance from coastline in the Yellow River Delta

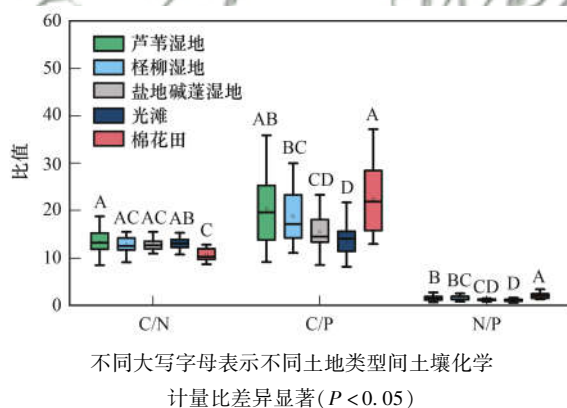


图 7 黄河三角洲典型湿地与棉花田土壤生态化学计量比
Fig. 7 Soil ecological stoichiometric ratios of typical natural wetlands and cotton fields in the Yellow River Delta

体分解速度快,不利于有机物的积累^[14,15]. 自然湿地土壤 $\omega(\text{TP})$ 低于长江三角洲湿地 ($0.69 \sim 1.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和闽江口湿地 ($0.66 \sim 0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 等滨海湿地,这可能是由于区内自然湿地土壤有机质含量低且分解速度快,固磷能力低所致^[35,39]. 相关性分析表明土壤 TP 与 TOC 显著正相关 ($P < 0.05$),且土壤化学计量比表明,区内自然湿地 C/P 均值范围为 $13.82 \sim 20.31$ (图 7),净矿化程度较高,都可佐证上述观点. 自然湿地土壤 $\omega(\text{TS})$ 高于江苏盐城滨海湿地 ($0.38 \sim 0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和三江平原淡水湿地 ($0.30 \sim 0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[40,41]. 有研究表明,湿地土壤硫含量的差异与可获得的铁源有关,黄河口自然湿

地为新生湿地,发育程度低,土壤含铁量较高 ($22.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),是导致土壤 TS 含量较高的主要原因^[42].

自然湿地中土壤 TOC、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量整体都呈现芦苇湿地和柽柳湿地高于盐地碱蓬湿地、高于光滩 ($P < 0.05$) 的变化规律. 说明植被类型是影响土壤 TOC、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的重要因素. 一方面不同植物群落对土壤养分的吸收和固定存在差异,另一方面生产力的差别导致其对土壤的养分归还量不同^[38,43,44]. 芦苇作为黄河三角洲优势植物群落,生产力高、生物量大,枯枝落叶经分解归还土壤,导致芦苇湿地土壤碳、氮类养分含量高于其它自然湿地. 本研究中土壤 TP 含量在 4 种自然湿地间无显著差异 ($P > 0.05$),这可能是因为黄河三角洲湿地土壤磷主要源于黄河输入,其同泥沙沉积而保留于沉积物中,土壤磷化学性质相对稳定,受植被的影响较少^[14]. 自然湿地土壤 TS 含量大小为:光滩、盐地碱蓬湿地 > 柽柳湿地 > 芦苇湿地,由海至陆呈下降趋势. 黄河三角洲自然湿地土壤硫主要源于海水,光滩及盐地碱蓬湿地受潮水周期性淹没,铁和锰等元素富集,土壤中 铁元素和硫元素易于结合,从而导致其含量高于柽柳湿地和芦苇湿地^[9,45]. 棉花田土壤与自然湿地土壤营养元素含量的对比研究表明,棉花田土壤 TOC、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量都显著高于自然湿地土壤 (表 1 和图 3, $P < 0.05$),其中

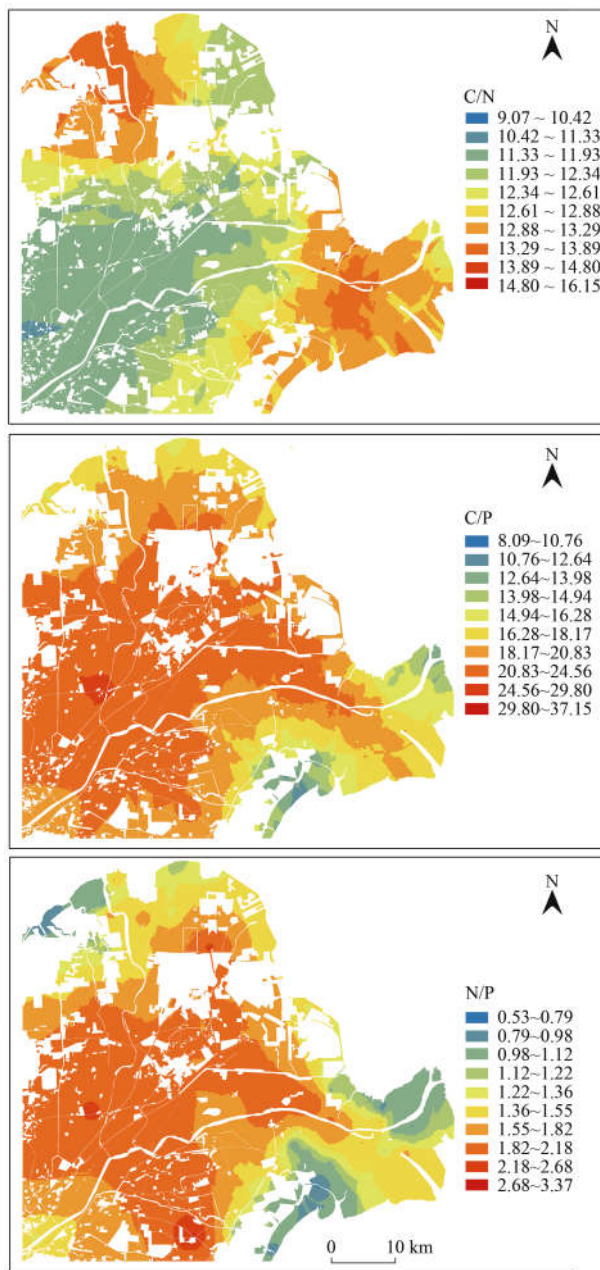


图8 黄河三角洲典型湿地与棉花田土壤化学计量比空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of soil stoichiometric ratios of typical natural wetlands and cotton fields in the Yellow River Delta

NO_3^- -N含量为自然湿地的9.4~11.4倍. 由于棉花田的超量施肥, 外源氮和磷类养分大量存留于土壤中, 土壤 NO_3^- -N等累积明显. 但棉花田土壤TS含量显著低于自然湿地, 说明农垦过程会引起土壤中碳元素的流失^[46].

3.2 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤生态化学计量学特征

生态化学计量比是衡量土壤养分组成和营养平衡的重要指标^[47]. 黄河三角洲自然湿地土壤与其它地区湿地土壤的C、N和P化学计量比的比较表明, 研究区C/N、C/P和N/P均值都小于国内其它范围湿地均值(18.22、245.22和13.60), 这可能是

因为研究区土壤碳和氮类养分含量较低所致^[48].

土壤有机质分解的最适C/N为25, 通常当比值小于25时有机质分解过程碳受限, 比值大于25时分解过程氮受限, 同时, 有机质分解速率与C/N呈反比^[49]. 研究区自然湿地C/N均值范围为11.40~13.13(图7), 表明黄河口自然湿地土壤有机质分解快, 养分累积少. C/P小于200时, 指示土壤有机磷净矿化, 比值大于300时, 指示土壤有机磷净固定^[50]. 区内自然湿地C/P均值范围为13.82~20.31, 土壤有机磷净矿化程度较高. N/P小于14时指示土壤氮素供应不足. 区内自然湿地N/P均值范围为1.06~1.53, 表明黄河三角洲自然湿地植物生长氮受限程度高于磷, 为氮限制系统, 这同辽河口湿地、闽江河口湿地和珠江口湿地的研究结果具有一致性^[8,26,38]. 棉花田土壤同自然湿地土壤生态化学计量比的对比研究表明, 棉花田土壤C/N均值为10.84, 显著低于芦苇湿地和光滩(图7, $P < 0.05$), 整体上低于自然湿地. 目前耕作方式下棉花秸秆等地上生物量多被收割而从系统移除, 还田率较低, 加之大量氮肥的施加, 是产生以上差异的主要原因^[51]. C/N低于自然湿地表明其土壤有机质累积少且分解快, 碳源作用更强. C/P和N/P均值分别为23.58和2.18, 整体上高于自然湿地($P < 0.05$). 相较于C/N, C/P和N/P在不同植被类型间的变化同土壤TOC和TN含量变化相似, 整体上都呈现出棉花田>芦苇湿地>怪柳湿地>盐地碱蓬湿地>光滩的变化趋势. 这一方面与碳氮元素间紧密的联系和其对环境同步的响应有关(图4), 另一方面则是由于黄河三角洲湿地土壤 $\omega(\text{TP})$ 多在0.55~0.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内(表1), 不同植被类型间差异较小所致.

3.3 黄河三角洲湿地土壤营养元素分布特征及生态化学计量学特征的影响因素分析

土壤营养元素含量及生态化学计量比除受植被类型的影响而呈现出一定的分布特征外, 还与土壤基本理化性质密切相关(表2)^[52]. 本研究中黄河三角洲自然湿地土壤多种营养元素含量与其pH值和EC值呈显著负相关($P < 0.01$), 对胶州湾滨海湿地、辽河口湿地和闽江河口湿地的研究也得到了相似的结果^[7,53,54]. 且上述研究与本研究中土壤pH值与EC值具显著正相关($P < 0.05$), 这是由于土壤在反复积盐和脱盐的过程中其碱性逐渐提高, 是滨海湿地不同于淡水湿地的显著特征之一. 区内自然湿地由分布于河岸和潮上带的芦苇湿地至潮间带的光滩, 受海洋潮汐影响逐渐增强, 土壤盐度逐渐上升, 由于土壤盐度与碱度的强相关性, 土壤碱性也呈

上升趋势(图2).不同植物群落依据其对土壤盐碱性的适应能力占据不同的生态位,由陆地向海洋呈带状依次发育芦苇湿地、柽柳湿地、盐地碱蓬湿地直至光滩.同时由于不同植物群落对土壤养分的吸收、利用、固定和归还能力不同,因而在水文过程、土壤基本理化性质和生物因素的共同作用下形成了黄河三角洲自然湿地土壤养分含量由内陆至沿海边缘,由黄河沿岸至海岸,由芦苇湿地至光滩随植被类型变化逐渐下降的趋势(图5和图6).受此影响,区内自然湿地土壤生态化学计量比随碳氮类营养元素含量的下降也表现出相似的下降趋势(图8).但在棉花田土壤中未观察到土壤营养元素含量与pH值和EC值的显著相关性(表2, $P > 0.05$),说明农垦过程能显著改变土壤性质和营养元素分布特征.

三江平原小叶章湿地和毛果苔草湿地的开垦研究表明,开垦后土壤TOC、TN、TP和TS含量分别下降60.7%、58.7%、6.8%和62.1%;对长江中下游淡水湿地的研究表明开垦致其土壤TOC含量下降58%;对湖泊芦苇湿地的研究表明农垦土壤TN和 NH_4^+-N 含量分别下降54.9%和41.3%,TP含量增加16.4%^[35,40,46,50].本研究中,棉花田土壤多种营养元素含量与自然湿地差异性显著($P < 0.05$,表1),表明人类活动过程能显著改变研究区土壤营养元素分布情况.本文研究结果同上述淡水湿地有所差异,可能是因为黄河三角洲自然湿地多为盐沼湿地,土壤养分偏低,原有地力差,农垦过程中超量施加外源氮类和磷类养分所致.目前的高投入高产出农业种植模式下,黄河三角洲作为主要产棉区,化肥单位面积施用量大(达 $418.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),主要为氮磷类肥料.其净施用强度明显高于全国平均水平,且有效利用率低,导致土壤氮磷元素累积,这是本研究中棉花田土壤氮、磷类养分特别是 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 显著高于自然湿地的主要原因(图3, $P < 0.01$).受外源氮施加影响棉花田土壤C/N显著小于自然湿地($P < 0.05$),湿地开垦导致土壤有机质累积能力下降(图8).此外高强度施肥极可能导致土壤养分残留高和水体富营养化,进而导致水土污染等一系列生态问题.但也有研究表明,盐碱地植棉可显著提升植被覆盖面积,避免因地表裸露水土流失而造成的肥力消耗,同时农垦过程可帮助实现表层土壤疏松,夏季压盐抑盐效果明显^[21,23].本研究中棉花田土壤EC值显著低于自然湿地(表1),且EC值和pH值与各类营养元素含量相关性低于自然湿地(表2).因此盐沼湿地垦殖虽显著改变了原有自然湿地土壤营养元素的分布特征,但其也可在一定程度上增加土壤肥力,降低土壤盐度,对盐碱地具有一

定的改良效果.

4 结论

(1)黄河三角洲湿地土壤碳、氮类营养元素分布呈现出由内陆至沿海边缘,由黄河沿岸至海岸,由农垦地棉花田至光滩随植被类型变化逐渐下降的趋势,土壤硫含量整体上呈现与之相反的变化趋势,土壤磷含量较为稳定.

(2)黄河三角洲棉花田土壤C/N显著小于自然湿地,而C/P和N/P大小表现为:棉花田 > 芦苇湿地 > 柽柳湿地 > 盐地碱蓬湿地和光滩,同土壤TOC和TN含量变化趋势相似.

(3)黄河三角洲盐沼湿地垦殖为棉花田后虽显著改变原有自然湿地土壤营养元素分布特征,但同时也能在一定程度上增加土壤肥力,降低土壤盐度,对盐碱地具有一定的改良效果.

参考文献:

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting[J]. *Ecological Economics*, 2000, **35**(1): 25-33.
- [2] Huang J, Yuan Z N. Ecological stoichiometric characteristics of soil SOC, TN, and TP under different restoration methods in Qixing River wetland[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, **33**(4), doi: 10.1016/j.jksus.2021.101407.
- [3] 黄桂林, 何平, 侯盟. 中国河口湿地研究现状及展望[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(9): 1751-1756.
- [4] Huang G L, He P, Hou M. Present status and prospects of estuarine wetland research in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(9): 1751-1756.
- [5] Xie R R, Zhu Y C, Li J B, et al. Changes in sediment nutrients following *Spartina alterniflora* invasion in a subtropical estuarine wetland, China[J]. *CATENA*, 2019, **180**: 16-23.
- [6] 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.
- [7] Yue J J, Zhao S, Cheng H D, et al. Distribution of micro-plastics in the soil covered by different vegetation in Yellow River Delta wetland[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 204-210.
- [8] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展[J]. *生态学报*, 2013, **33**(17): 5141-5152.
- [9] Cao L, Song J M, Li X G, et al. Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(17): 5141-5152.
- [10] 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*, 2010, **40**(12): 97-104.
- [11] Luo X X, Zhang S S, Dun M. Spatial Distribution and seasonal dynamics characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in the Liaohe Estuary wetlands[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, **40**(12): 97-104.
- [12] 牛安逸, 马娇娇, 杨文槐, 等. 土壤理化性质对珠江口红树林湿地土壤氮磷质量分数的影响[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, **51**(2): 86-94.

- Niu A Y, Ma J J, Yang W H, *et al.* Effects of soil physical and chemical properties on the mass fractions of nitrogen and phosphorus in soil of mangrove wetland in the Pearl River Estuary [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, **51**(2): 86-94.
- [9] 沈育伊, 滕秋梅, 张德楠, 等. 湿地土壤硫组分特征及其影响因素的研究进展[J]. *生态科学*, 2021, **40**(1): 182-191.
- Shen Y Y, Teng Q M, Zhang D N, *et al.* Review on soil sulfur fractions and influence factors in wetlands [J]. *Ecological Science*, 2021, **40**(1): 182-191.
- [10] 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 等. 环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 728-733.
- Song J W, Xu G, Zhang Y, *et al.* Phosphorus storage capacity and loss risk in coastal reed wetland surrounding Bohai Sea [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 728-733.
- [11] Wang W Q, Sardans J, Wang C, *et al.* The response of stocks of C, N, and P to plant invasion in the coastal wetlands of China [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(2): 733-743.
- [12] 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*, 2020, **21**(2): 705-723.
- [13] 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 等. 降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤 C:N:P 生态化学计量特征的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 977-987.
- Gao J P, Zhao R F, Zhang L H, *et al.* Effects of precipitation changes on plant community diversity and soil C:N:P ecological stoichiometric characteristics in a desert steppe of China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 977-987.
- [14] 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.
- [15] 陶舒琴. 黄河颗粒态及渤、黄海现代沉积有机质的组成和同位素分布特征及源项解析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Tao S Q. The composition, isotopic characteristics and sources of organic matter in the Yellow River suspended particulates and adjacent Bohai and Yellow Sea surface sediments [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [16] 刘兴华, 公彦庆, 陈为峰, 等. 黄河三角洲自然保护区植被与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2018, **26**(11): 1720-1729.
- Liu X H, Gong Y Q, Chen W F, *et al.* C, N and P stoichiometry of typical plants and soils in the Yellow River Delta Natural Reserve [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(11): 1720-1729.
- [17] 安乐生, 周葆华, 赵全升, 等. 黄河三角洲植被空间分布特征及其环境解释[J]. *生态学报*, 2017, **37**(20): 6809-6817.
- An L S, Zhou B H, Zhao Q S, *et al.* Spatial distribution of vegetation and environmental interpretation in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(20): 6809-6817.
- [18] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1594-1599.
- Dong H F, Yu J B, Sun Z G, *et al.* Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River Estuary tidal flat wetland [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1594-1599.
- [19] 朱纹君, 韩美, 孔祥伦, 等. 1990-2018 年黄河三角洲人类活动强度时空格局演变及其驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(5): 287-292, 300.
- Zhu W J, Han M, Kong X L, *et al.* Spatiotemporal characteristics of human activity intensity and its driving factors in the Yellow River Delta from 1990 to 2018 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(5): 287-292, 300.
- [20] 于君宝, 王永丽, 董洪芳, 等. 基于景观格局的现代黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳储量估算[J]. *湿地科学*, 2013, **11**(1): 1-6.
- Yu J B, Wang Y L, Dong H F, *et al.* Estimation of soil organic carbon storage in coastal wetlands of modern Yellow River Delta based on landscape pattern [J]. *Wetland Science*, 2013, **11**(1): 1-6.
- [21] 朱伟, 杨劲松, 姚荣江, 等. 黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规律研究[J]. *土壤*, 2021, **53**(4): 817-825.
- Zhu W, Yang J S, Yao R J, *et al.* Soil water and salt transport in medium and heavy saline soils of Yellow River Delta [J]. *Soils*, 2021, **53**(4): 817-825.
- [22] 王桂峰, 王安琪, 秦都林, 等. 山东省棉花产业发展情况调研报告[J]. *棉花科学*, 2019, **41**(4): 3-15.
- [23] 王艺璇. 黄河三角洲盐碱地棉花种植生态价值评估及补偿研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- Wang Y X. Ecological value assessment and compensation of cotton planting in saline-alkali land of the Yellow River Delta [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.
- [24] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(4): 824-833.
- Hu Q, Chen W F, Song X L, *et al.* Effects of reclamation/cultivation on soil quality of saline-alkali soils in the Yellow River Delta [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(4): 824-833.
- [25] Zhao Y J, Liu B, Zhang W G, *et al.* Effects of plant and influent C:N:P ratio on microbial diversity in pilot-scale constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **36**(4): 441-449.
- [26] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2012, **32**(13): 4087-4093.
- Wang W Q, Wang C, Zeng C S, *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(13): 4087-4093.
- [27] 周婷, 马姣娇, 徐颂军. 2003~2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2496-2504.
- Zhou T, Ma J J, Xu S J. Spatial patterns and spatial autocorrelations of wetland changes in China during 2003-2013 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2496-2504.
- [28] 路景钊, 石洪华, 孙辉, 等. 黄河三角洲湿地不同景观类型影响下植被与土壤因子的空间分布特征[J]. *生态科学*, 2021, **40**(2): 157-166.
- Lu J F, Shi H H, Sun H, *et al.* Spatial characteristics of vegetation and soil factors under different landscape types in the Yellow River Delta wetland [J]. *Ecological Science*, 2021, **40**(2): 157-166.
- [29] 宋德彬, 于君宝, 王光美, 等. 1961~2010 年黄河三角洲湿地地区年平均气温和年降水量变化特征[J]. *湿地科学*, 2016, **14**(2): 248-253.
- Song D B, Yu J B, Wang G M, *et al.* Change characteristics of average annual temperature and annual precipitation in costal wetland region of the Yellow River Delta from 1961 to 2010 [J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(2): 248-253.

- [30] 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.
- [31] 孙万龙, 孙志高, 田莉萍, 等. 黄河三角洲潮间带不同类型湿地景观格局变化与趋势预测[J]. 生态学报, 2017, **37**(1): 215-225.
- Sun W L, Sun Z G, Tian L P, *et al.* Variation and prediction of different marsh landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(1): 215-225.
- [32] 王青, 骆梦, 邱冬冬, 等. 滨海盐沼水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响[J]. 自然资源学报, 2019, **34**(12): 2569-2579.
- Wang Q, Luo M, Qiu D D, *et al.* Effect of hydrological characteristics on the recruitment of *Suaeda salsa* in coastal salt marshes[J]. Journal of Natural Resources, 2019, **34**(12): 2569-2579.
- [33] Yu J B, Zhan C, Li Y Z, *et al.* Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in coastal wetland soil related land use in the modern Yellow River Delta[J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep37940.
- [34] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [35] 全为民, 韩金娣, 平先隐, 等. 长江口湿地沉积物中的氮、磷与重金属[J]. 海洋科学, 2008, **32**(6): 89-93.
- Quan W M, Han J D, Ping X Y, *et al.* Distribution and accumulation of nutrients and heavy metals in the sediment of Changjiang Estuary wetlands[J]. Marine Sciences, 2008, **32**(6): 89-93.
- [36] 何涛, 孙志高, 李家兵, 等. 闽江河口芦苇与短叶蒲芒空间扩展植物-土壤系统硫含量变化特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(5): 1607-1618.
- He T, Sun Z G, Li J B, *et al.* Variations in total sulfur content in plant-soil systems of *Phragmites australis* and *Cyperus malaccensis* in the process of their spatial expansion in the Min River Estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(5): 1607-1618.
- [37] 高照琴, 白军红, 温晓君, 等. 珠江河口不同类型湿地土壤有机磷矿化过程及其影响因素研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, **54**(1): 131-136.
- Gao Z Q, Bai J H, Wen X J, *et al.* Processes and influencing factors of organic phosphorus mineralization in various wetland soils in the Pearl River Estuary, China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, **54**(1): 131-136.
- [38] 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 Liaohu Estuary wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(9): 3011-3020.
- [39] 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.
- [40] 王振芬. 三江平原湿地不同土地利用方式对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(2): 43-48.
- Wang Z F. Characteristics of soil nutrients and enzyme activity under different types of land use in wetland of Sanjiang Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(2): 43-48.
- [41] 万斯昂. 江苏盐城滨海湿地土壤-植物系统硫的分布和转化研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2019.
- Wan S A. Distribution and transformation of sulfur in soil-plant system of coastal wetland in Yancheng, Jiangsu Province[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [42] 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): 559-565.
- Yu J B, Chu L, Ning K, *et al.* Distribution characteristics of sulfur content in soils in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. Wetland Science, 2014, **12**(5): 559-565.
- [43] Zhang X L, Zhang Z H, Wang W, *et al.* Vegetation successions of coastal wetlands in southern Laizhou Bay, Bohai Sea, northern China, influenced by the changes in relative surface elevation and soil salinity[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **293**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112964.
- [44] Yao L, Adame M F, Chen C R. Resource stoichiometry, vegetation type and enzymatic activity control wetlands soil organic carbon in the Herbert River catchment, North-east Queensland[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **296**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113183.
- [45] 幸颖, 刘常宏, 安树青. 海岸盐沼湿地土壤硫循环中的微生物及其作用[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(4): 577-581.
- Xing Y, Liu C H, An S Q. Microbes and their functions in sulfur cycle of coastal salt marsh sediments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26**(4): 577-581.
- [46] 李新华, 刘景双, 孙志高. 三江平原不同土地利用方式下土壤硫含量变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2006, **22**(4): 80-82.
- Li X H, Liu J S, Sun Z G. Changes in soil sulfur under different land use in Sanjiang Plain[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, **22**(4): 80-82.
- [47] Zhang Z S, Lu X G, Song X L, *et al.* Soil C, N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, **12**(9): 1309-1315.
- [48] 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, Lü X G, Xue Z S, *et al.* Is there a redifield-type C: N: P ratio in Chinese wetland soils? [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(5): 1160-1169.
- [49] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, *et al.* Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13**(6): 1043-1051.
- [50] 赵海燕, 张剑, 刘冬, 等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(3): 618-626.
- Zhao H Y, Zhang J, Liu D, *et al.* Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different marsh wetlands[J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(3): 618-626.
- [51] 朱奕豪, 陈为峰, 宋希亮, 等. 黄河三角洲废弃盐田复垦土壤质量动态演变分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021,

- 29(3): 545-561.
- Zhu Y H, Chen W F, Song X L, *et al.* Reclaimed soil quality dynamic evolution of abandoned salt field in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, **29**(3): 545-561.
- [52] Zuo X Y, Cui L J, Li W, *et al.* *Spartina alterniflora* leaf and soil eco-stoichiometry in the Yancheng coastal wetland[J]. *Plants*, 2021, **10**(1), doi: 10.3390/plants10010013.
- [53] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(6): 216-221, 227.
- Gao D Z, Zeng C S, Zhang W L, *et al.* Spatial distributions of soil organic carbon and active composition along a hydrologic gradient in Min River Estuarine wetland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(6): 216-221, 227.
- [54] 李萍, 谢文霞, 王志强, 等. 互花米草入侵对胶州湾潮滩湿地硫素时空分布的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 870-879.
- Li P, Xie W X, Wang Z Q, *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* invasion on sulfur content temporal and spatial variation in tidal flat wetland of Jiaozhou Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 870-879.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2021年12月27日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续20次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, GONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)