Eco-Environmental Knowledge Web

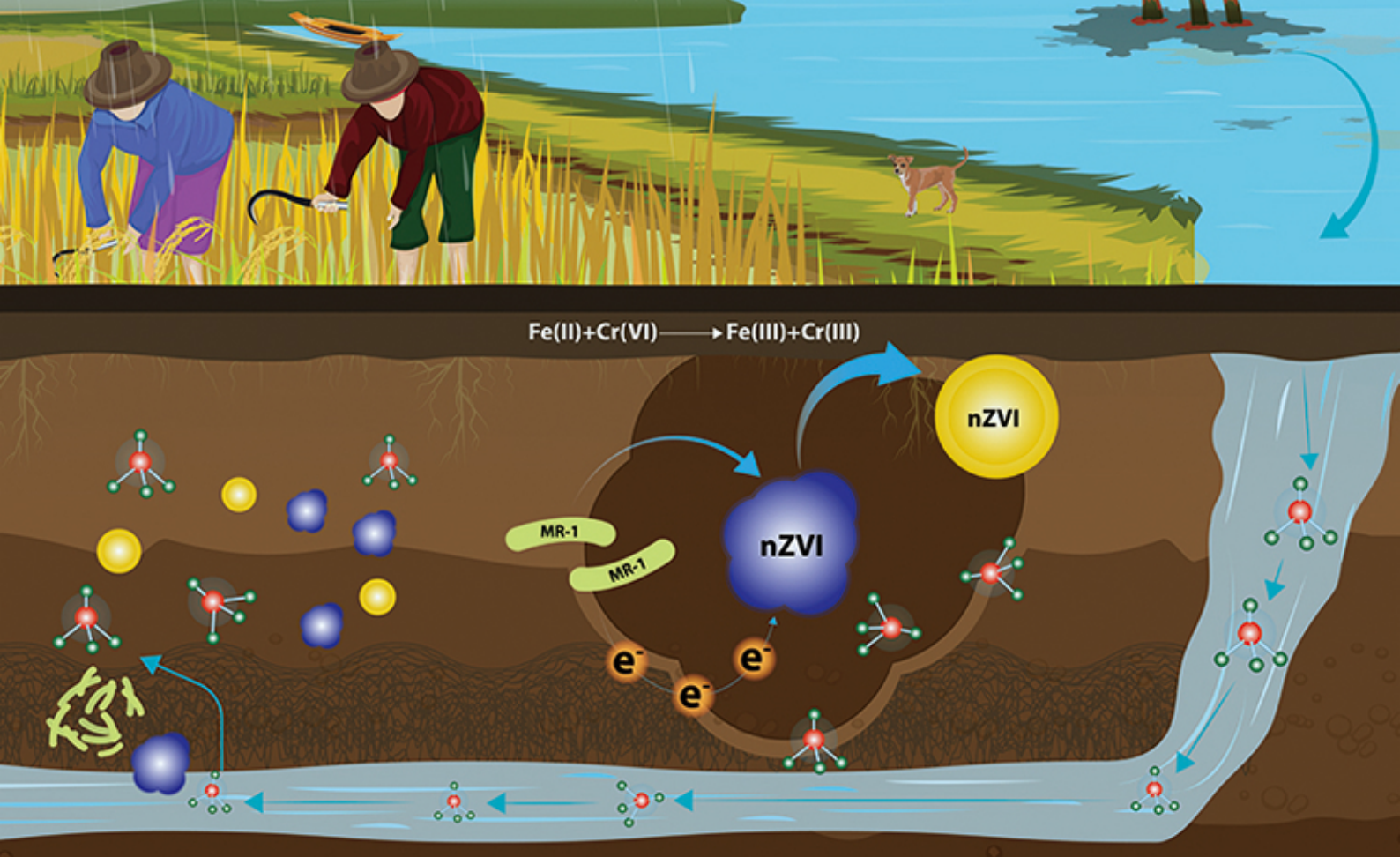
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚，赵晓蕾，刘凯，钟松雄，李芳柏，方利平，叶挺进，石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年9月
第42卷 第9期
Vol.42 No.9

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷　第 9 期
2021 年 9 月 15 日

目　次

北京市 2014～2020 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 时空分布与健康效应评估 …… 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化模拟与分析 …… 杨晓辉,宋春杰,范丽行,张凌云,魏强,李夫星,王丽艳,王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 $PM_{2.5}$ 污染影响 …… 邵玄逸, 王晓琦, 钟嶷盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 …… 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 …… 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峥 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 …… 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 $PM_{2.5}$ 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 …… 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 …… 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 …… 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 …… 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 …… 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 …… 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 …… 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 …… 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 … 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 …… 张婉军,辛存林,于爽,刘齐,曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 …… 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 …… 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 …… 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 …… 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 …… 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 …… 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除 …… 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除镉污染底泥的应用效果 …… 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 …… 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 …… 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 …… 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)生长的拮抗效应及其作用机制 …… 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 …… 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 …… 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 …… 池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 …… 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性 …… 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 …… 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 …… 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 …… 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 …… 杜昊霖, 王萼, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 …… 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 …… 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 …… 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳炜, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 …… 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 …… 庞杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应 …… 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 …… 刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 …… 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 …… 马寰菲, 胡汗, 李益, 郭垚鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(Ⅵ)及机制 …… 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 …… 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N_2O 排放的影响 …… 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载NH_4^+-N生物炭对土壤 N_2O-N 排放和 NH_3-N 挥发的影响 …… 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘刈, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 …… 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985～2019 年中国全氟辛烷磺酰基化合物的动态物质流分析 …… 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201)　《环境科学》征稿简则(4340)　信息(4382, 4537, 4565)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第9期 2021年9月
Vol.42, No.9 Sep., 2021

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别

拜亚红[1], 钱晨歌[1], 袁思静[1], 谢子嫣[1], 来凌子[1], 张敏[1], 刘颖[1,2*], 苗春林[3]

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 中央民族大学北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081; 3. 包头市南海湿地管理处, 包头 014040)

摘要: 采用钼锑抗分光光度法和连续提取法对包头南海湿地和南海湿地沿黄河边的水体和表层沉积物中总磷(TP)及各形态磷的含量进行测定,以分析其生物可利用性及释放风险,并采用 APCS-MLR 受体模型结合相关性分析(CA)和主成分分析(PCA)等方法进行污染源的识别并量化. 结果表明:① 研究区水体和表层沉积物中磷都处于不同程度的污染水平,其中南海湿地水体中溶解性无机磷(DIP)对水体总磷(WTP)的贡献最低,表层沉积物中钙结合态磷(HCl-P)对表层沉积物总磷(STP)的贡献最大,南海湖(L 区)和湿地植物区(P 区)的表层沉积物具有较高的生物可利用性以及向水体释放磷的可能性,更容易发生富营养化,应引起关注. ② APCS-MLR 受体模型表明,研究区水体和表层沉积物中磷的主要污染来源为工业废水及生活污水(29.07%)和农药化肥(29.00%). 此外动植物残体的降解(18.49%)也对研究区具有一定贡献.

关键词:磷形态; 生物可利用性; 释放风险; 定量源分析; 南海湿地

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)09-4275-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202101207

Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou

BAI Ya-hong[1], QIAN Chen-ge[1], YUAN Si-jing[1], XIE Zi-yan[1], LAI Ling-zi[1], ZHANG Min[1], LIU Ying[1,2*], MIAO Chun-lin[3]

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Food Environment and Health, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 3. Baotou Nanhai Wetland Management Office, Baotou 014040, China)

Abstract: In this study, total phosphorus (TP) and the phosphorus (P) fractions in the water and surface sediments of the Baotou Nanhai wetland in China were determined using molybdenum blue/ascorbic acid spectrophotometry and continuous extraction methods. An APCS-MLR receptor model was combined with correlation analysis (CA) and principal component analysis (PCA) to identify and quantify the pollution sources. The results showed ① differences in the pollution level of phosphorus between the surface sediments and water. The contribution of dissolved inorganic phosphorus (DIP) to TP in the water (WTP) was the lowest, while the contribution of calcium-bound phosphorus (HCl-P) to TP in the surface sediments (STP) was the largest in the study area. The surface sediments of the Nanhai Lake (L area) and the wetland plant area (P area) exhibited high bioavailability and the potential for releasing phosphorus into the water, which could result in eutrophication and is therefore of concern. ② The APCS-MLR receptor model indicated that the main pollution sources of phosphorus were industrial wastewater and domestic sewage (29.07%), and pesticides and fertilizers (29.00%). In addition, the degradation of animal and plant residues (18.49%) also contributed to pollution in the study area.

Key words: phosphorus fraction, bioavailability, release risk, quantitative source identification, Nanhai wetland

湿地作为地球上重要的三大系统之一,是由陆地和水系统相互作用而形成的生态系统,在防洪,保护生物多样性以及净化水质等方面有着重要的作用[1~3],然而湿地富营养化污染却最为严重[4]. 磷作为细胞生长的许多结构和生活功能组件的重要组成部分,在生态系统中起着重要作用[5]. 过量的磷,尤其是能够被植物和藻类直接吸收的溶解态无机磷是导致富营养化的关键原因和限制因子[6],因此,对于湿地磷进行研究进而采取有效地治理方法就显得尤为重要. 外源和内源磷都会导致地表水的污染,控制外源磷是降低湖泊富营养化的第一步,因此,对于湖泊外源磷污染的来源贡献进行识别,可有效管理和控制外源磷的污染,调节水体富营养化. 主成分分析、聚类分析和相关系数分析等多元统计方法[7]已被广泛地应用于沉积物和地表水中的重金属和氮磷等污染物的来源分析. 这些统计技术可以定性地描述污染物的来源,并被证明有助于区分污染物的来源. 但是,无法得出有关各种污染来源对每种污染物的贡献的定量结果. 目前,关于污染源定量识别的研究很多. 其中,绝对主成分得分-多元线性回归(APCS-MLR)受体模型是一种统计分析技术,可以

收稿日期: 2021-01-22; **修订日期**: 2021-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177163); 中央民族大学校级青年教师科研能力提升计划项目(2021QNPY82); 中央民族大学硕士自主科研项目(2020, 硕士, SSZZKY-2020017); 中央民族大学大学生创新训练计划(BEIJ2018110034); 中央民族大学校级交叉学科研究专项(2020MDJC18)

作者简介: 拜亚红(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境化学, E-mail:1261517795@qq.com

* 通信作者,E-mail:liuying4300@163.com

从每个已识别的污染源[8~10]获得定量信息,主要用于大气污染的识别和分析消息来源. 近年来,该技术在土壤和水环境污染源分配中的应用越来越多,主要用于估算重金属和多环芳烃等污染物的来源和贡献[11~13],而在磷污染来源的识别应用较少.

当外源磷得到有效控制后,内源磷则成为富营养化的主导因子. 由于沉积物颗粒对磷具有很强的亲和力,因此可作为磷的重要载体和内部来源,对磷的循环和传递有着重要影响[14~16],其释放的磷会影响水体的水质[17,18]. 但并不是所有的磷都能够释放,因此采用沉积物中总磷浓度来评估磷释放风险并不总是足够的[19]. 沉积物中磷的生物利用度是评估淡水生态系统富营养化风险的重要因素[20],根据 Hupfer 等[21]和 Psenner 等[22]的连续提取法,弱吸附态磷、可还原态磷和金属氧化物结合态磷之和为生物可利用性磷,是能够被植物所吸收和利用的磷,能够在一定条件下释放出来,对水中的磷和富营养化水平产生重要影响.

因此,本研究选取内蒙古包头南海湿地为对象:① 测定采样区水体和表层沉积物中形态磷含量,分析其生物可利用性以及研究区的高释放风险区域;② 采用 APCS-MLR 受体模型以及相关性分析(CA)、主成分分析(PCA)对研究区磷污染进行定量源识别,以期为研究区中磷的污染防治以及监管提供更加详细全面的参考.

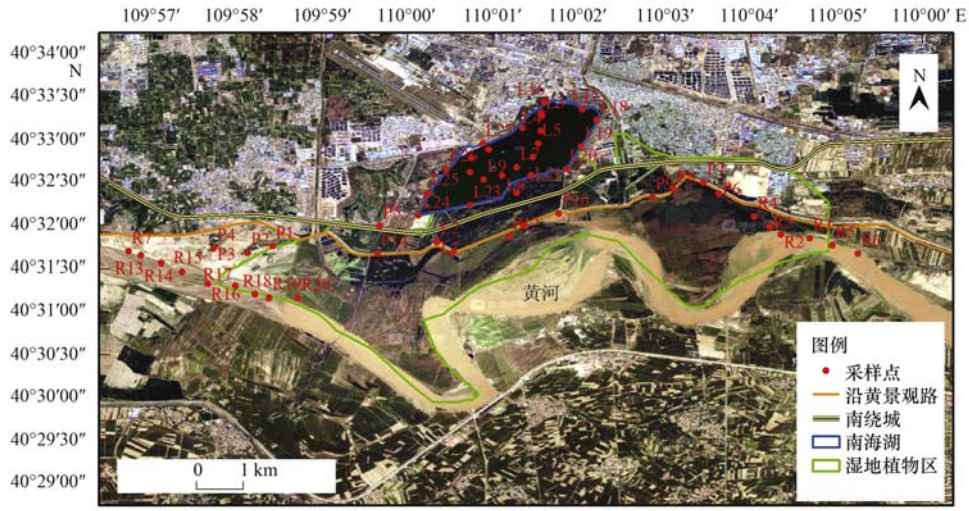
1 材料与方法

1.1 研究区

南海湿地位于内蒙古的"草原钢城,稀土之都"包头,是黄河改道南移后形成的湖泊和滩涂[23]. 湿地总面积约1 664 hm^2,水域面积 513 hm^2,东西长 3.5 km,南北宽 1.3 km,湖深 0.9 ~ 3.5 m[24]. 包括水域、沼泽、农田、灌丛和草地等类型. 水源主要为黄河水,其次为地下水和大气降水[23]. 其从北向南依次分布着南海湖、二海子和疏林草地,是包头市城区内最大、最集中的生态空间,在调节气候、旅游休闲和保障包头市生态安全等方面发挥着重要作用. 包头市东河区东部产生的工业废水和多数的生活污水达标后都通过东河和二道沙河排入南海湿地. 由于水量较大,超过了湿地自身的再次净化能力,造成湖水水质恶化,水体富营养化,水体总磷超标[25]. 近年来由于城市工厂的外迁,农田面积的增大和旅游人数的增多,南海湿地受到的污染越来越严重,水体富营养化问题也日益突出.

1.1.1 样品采集及预处理

2018 年 6 月采集南海湖(L 区)、湿地植物区(P 区)和黄河沿岸(R 区)水样、表层沉积物样品以及芦苇样品共 131 份,其中 R 区所采集的水体、表层沉积物和芦苇样品共 54 份, P 区共采集 30 份样品, L 区共采集 47 份样品. 采样点如图 1 所示.



R 是沿黄河的采样点(其中 R1 ~ R44 是黄河水溢流到湿地植物区的点); L3 ~ L15 是南海湖中心的采样点,仅采集水样; L16 ~ L27 是南海湖边缘的采样点; P 是湿地植物区的采样点

图 1 南海湿地采样点示意

Fig. 1 Nanhai wetland sampling sites

水样冷冻保存待测,沉积物样品烘干研磨过筛备用. 植物样品清洗干净,分为根、茎和叶, 105℃杀青烘干,研磨过筛待用.

1.1.2 样品分析

水体总磷(WTP)用 $K_2S_2O_8$ 消解后采用钼锑抗分光光度法测定(GB 11893-1989),将水样过 0.45 μm 滤膜,过滤后的滤液一部分采用和 TP 同样的方法得到总溶解性磷 (TDP),另一部分直接用钼锑抗分光光度法测定得到溶解性无机磷(DIP),过滤后的滤膜经盐酸浸提后采用钼锑抗分

光光度法测得颗粒态无机磷(PIP). 总颗粒态磷(TPP)、溶解态有机磷(DOP)和颗粒态有机磷(POP)通过差值法得到.

表层沉积物总磷(STP)马弗炉煅烧后用 HCl 浸提,各形态磷采用文献[21,22]的磷提取方法,沉积物中依次加入浸提液 NH_4Cl、$Na_2S_2O_4$-$NaHCO_3$、NaOH 和 HCl 浸提后用钼锑抗分光光度法测定浸提液,依次得到弱吸附态磷(Ex-P)、可还原态磷(BD-P)、金属氧化物结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(HCl-P)的含量. 植物总磷(PTP)测定的方法同 STP.

采用国标检测认证有限公司和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所的 GSB 04-1741-2004(a)、GBW 07307a 和 GBW 10020 等认证标准物质对水样、沉积物和芦苇进行精密度和准确度的验证,其回收率依次为 98.6%~101.1%、93.7%~96.5%和 90.0%~92.0%,变异系数均小于 10%. 具体的测定步骤如图 2 所示.

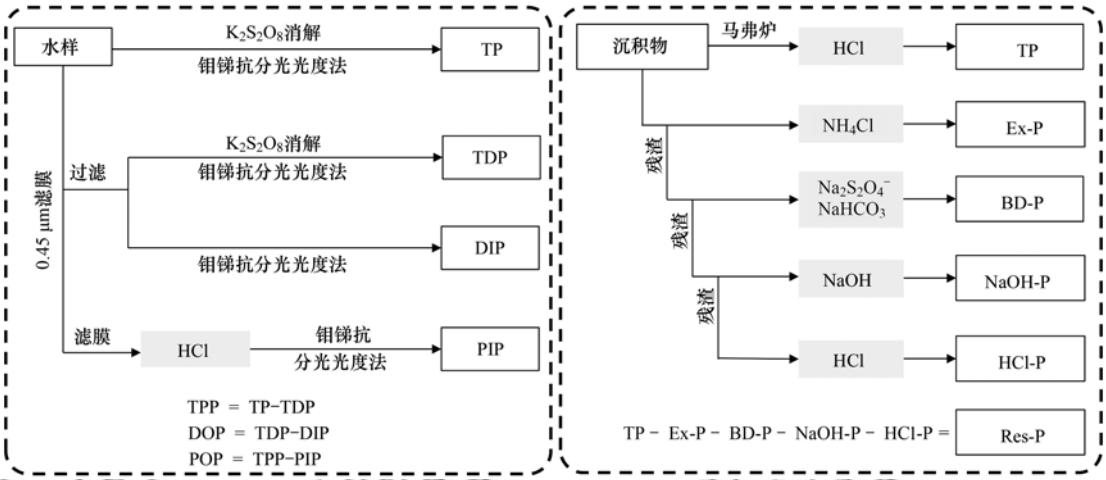


图 2　水样和表层沉积物 TP 和形态磷的测定

Fig. 2　Determination of TP and P fractions concentrations in water samples and surface sediments

1.2　转运系数(TC)和生物累积系数(BBC)

TC 和 BBC 的计算公式如下:

$$TC = C_a/C_r$$

$$BCC = C_a/C_s$$

式中,C_a 表示植物地上部分磷含量($\mu g \cdot g^{-1}$);C_r 表示植物根系磷含量($\mu g \cdot g^{-1}$);C_s 表示土壤有效磷含量($\mu g \cdot g^{-1}$).

当 TC>1,表明磷优先分配到植物地上部分,BBC 可用于评价植物对磷的积累能力[26],其中本研究以 Ex-P 为土壤有效磷含量.

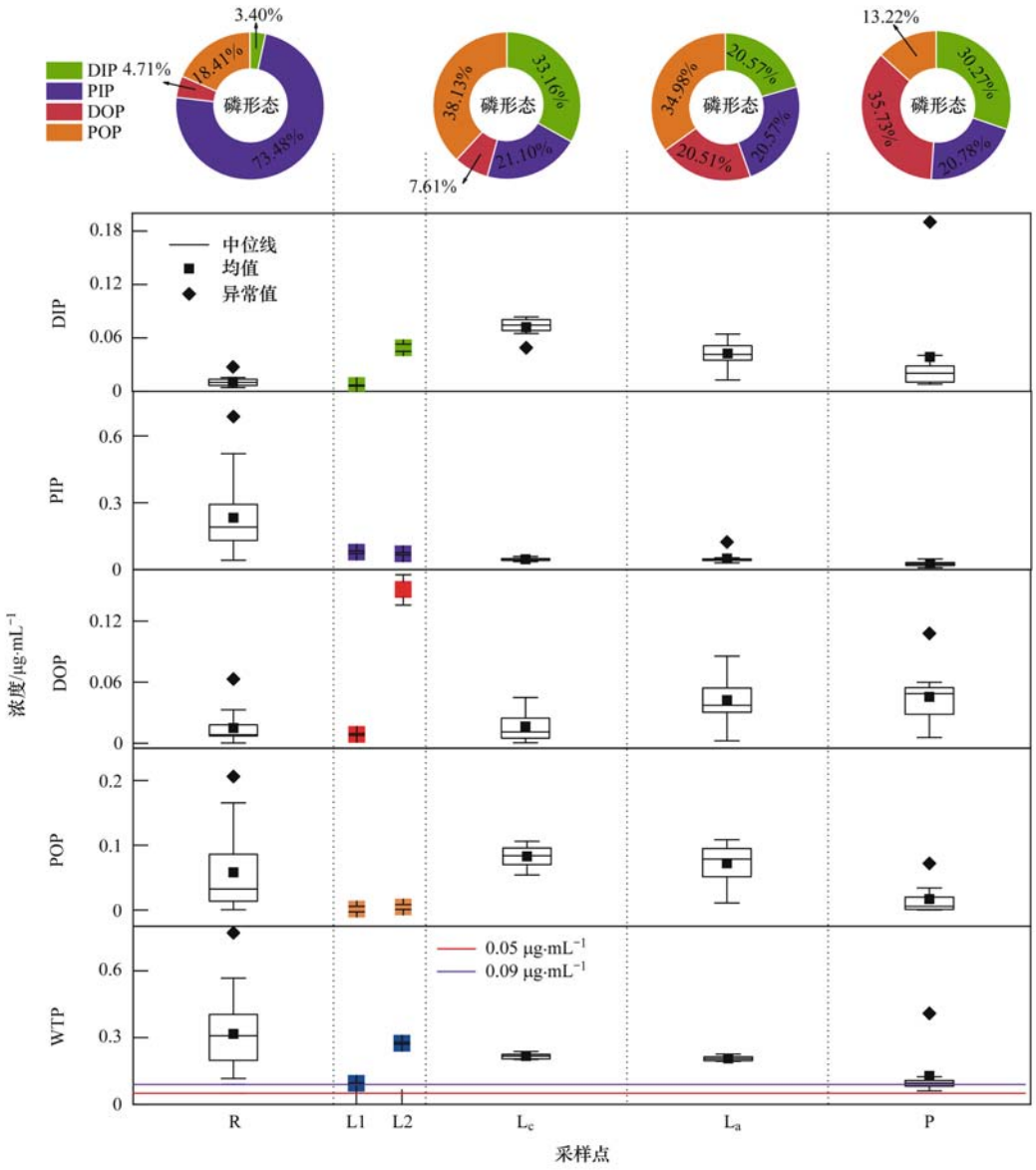
1.3　数据处理及统计分析

采用 APCS-MLR 结合主成分分析(PCA)、相关性分析(CA)和 GIS 分析对研究区水体和表层沉积物中不同形态磷的污染源进行研究. 所用软件为 SPSS 22.0、OriginPro 2018 和 ArcMap 10.4.

2　结果与分析

2.1　水体形态磷浓度分布特征及污染水平

研究区水体各形态磷浓度分布特征如图 3 所示,从中可以看出,R 区各采样点的 WTP 浓度差异较大,在 0.116~0.770 $\mu g \cdot mL^{-1}$范围内,其中 R7~R20 点位于湿地上游,其平均值为 0.321 $\mu g \cdot mL^{-1}$,大于 L 区和 P 区. R1~R6 点位于黄河的下游,其中 R1~R4 点处于黄河水漫至湿地区域,且旁边有农田,所以浓度都偏高,R5 和 R6 采样点的浓度分别为 0.219 $\mu g \cdot mL^{-1}$和 0.154 $\mu g \cdot mL^{-1}$,明显低于湿地上游磷浓度的平均值,可见湿地对黄河水中的磷具有一定的净化作用,而黄河水作为湿地的主要水源,也是南海湿地磷的一个重要来源. 另外,L 区各采样点磷浓度的差异较小,除去 L1 点和 L2 点,其浓度在 0.193~0.237 $\mu g \cdot mL^{-1}$范围内. 其中 L1 点位于南海湖引黄入水口,通过引黄入水渠将黄河水引至南海湖,其浓度为 0.094 $\mu g \cdot mL^{-1}$,显著低于湿地上游 R 区采样点的浓度,这是由于引黄渠横穿湿地植物区,由于 L1 点 PIP 和 POP 的浓度(0.076 $\mu g \cdot mL^{-1}$和 0.002 $\mu g \cdot mL^{-1}$)显著低于 R 区各采样点的浓度,而 DIP 和 DOP 的浓度与 R 区各采样点浓度接近,可以推测是由于在引水过程中 PP 的沉降,导致 TP 浓度偏低. L2 点为南海湿地引黄入水口旁边的沼泽地,浓度为 0.275 $\mu g \cdot mL^{-1}$,而 L 区其它采样点浓度都明显高于 L1 点,推测南海湖具有一定的内源污染. P 区的 WTP 浓度在 0.060~0.409 $\mu g \cdot mL^{-1}$范围,其中 P5 采样点 WTP 浓度高(0.409 $\mu g \cdot mL^{-1}$),这是由于该点靠近包头市南绕城高速,受交通影响比较严重,而且该点也靠近二道沙河,包头市东河区工业废水和生活污水主要由二道沙河和



R 表示沿黄河边的采样点(R 区), L_c 表示南海湖湖中心的采样点(L_c 区), L_a 表示南海湖湖周围的采样点(L_a 区), P 表示南海湿地植物区的采样点(P 区); 0.05 μg·mL^{-1} < WTP < 0.09 μg·mL^{-1} 为富营养型, WTP > 0.09 μg·mL^{-1} 为重富营养型

图 3 南海湿地水体各形态磷浓度分布特征及其污染评价

Fig. 3 P fractions concentrations distribution and the pollution evaluation in Nanhai wetland

东河排放至南海湿地. 而 P 区其他采样点 WTP 浓度均较低. 对比文献[27]可以看出, R 区和 L 区 WTP 浓度都处于重富营养型, P 区的 P1、P3、P5、P6 和 P8 这 5 个采样点处于重富营养型,其余点处于富营养型. 3 个区 WTP 的浓度为 R 区 > L 区 > P 区.

众所周知,水中磷可分为溶解性无机磷(DIP)、溶解性有机磷(DOP)、颗粒态无机磷(PIP)和颗粒态有机磷(POP)这 4 种形态. 其中 DIP 为藻类最容易吸收的磷,是限制藻类生长的营养物质[28], DOP 是可被胞外水解酶转化为 DIP[29, 30], PIP 主要存在于矿物相中[31],而 POP 是由生物有机分子组成,主要来源于动植物残体降解[32]. 由图 4 可以看出, R 区 DIP 和 DOP 浓度都比较低,而且各采样点的浓度接近,但每个点 PIP 和 POP 浓度差异较大. 4 种形态浓度的平均值大小顺序为 PIP(0.232 μg·mL^{-1}) > POP(0.058 μg·mL^{-1}) > DOP(0.015 μg·mL^{-1}) > DIP(0.011 μg·mL^{-1}). 其中, PIP 浓度显著高于其它形态浓度,这是由于黄河水中含有大量泥沙颗粒,其中含具有很高亲和力的氧化铁/氢氧化铁很容易吸附水中的 DIP 形成 PIP[31]. L 区的 PIP 浓度和 POP 浓度相对于 R 区都偏低,而且每个采样点的浓度接近. 但 DIP 和 DOP 在各采样点呈现出不同的规律,其中 L_c 区为南海湖湖中心未种植植物的区域, 4 种形态的浓度为 POP(0.083 μg·mL^{-1}) > DIP(0.072 μg·mL^{-1}) > PIP(0.046 μg·mL^{-1}) > DOP(0.017 μg·mL^{-1}), L_a 区为南海湖湖周围种有大量

植物的区域，4 种形态的浓度为 POP（0.072 μg·mL^{-1}）> PIP（0.049 μg·mL^{-1}）> DIP（0.042 μg·mL^{-1}）= DOP（0.042 μg·mL^{-1}），其能够被植物所吸收的总溶解性磷（TDP）浓度占 WTP 比值小于同位于内蒙古的达里诺尔湖（86%）[33]、岱海（75.14%）[34]和乌梁素海（43.5%）[35]，大于呼伦湖（35.9%）[36]. L_c 区和 L_a 区的 POP 和 PIP 浓度接近，L_c 区的 DIP 浓度显著高于 L_a 区，这是由于 L_a 区域种植大量芦苇、香蒲等植物，可以有效地吸收水中的 DIP. P 区 4 种形态的大小排序为 DOP（0.046 μg·mL^{-1}）> DIP（0.039 μg·mL^{-1}）> PIP（0.026 μg·mL^{-1}）> POP（0.017 μg·mL^{-1}），DOP 浓度最高，其主要来源于农业、动物粪便和农药化肥[37]. 由于 P 区含有大量农田[23]，因此推测 P 区高浓度 DOP 的主要来源是农药化肥的使用. 此外，P 区其它各形态的浓度都显著低于 R 区和 L 区. 总之，水体 4 种形态中，PIP 的浓度为 R 区 > L_a 区 > L_c 区 > P 区，POP 的浓度为 L_c 区 > L_a 区 > R 区 > P 区，DIP 浓度为 L_c 区 > L_a 区 > P 区 > R 区，而 DOP 浓度为 P 区 > L_a 区 > L_c 区 > R 区.

南海湿地水体各形态磷的浓度空间分布如图 4 所示. 从中可以看出，WTP、DIP 和 POP 的浓度均呈现从北向南递减的趋势，表明湿地对 WTP 具有净化作用，且 DIP 从北到南递减的趋势更具有特点，从侧面印证了湿地对 WTP 的净化一部分是湿地植物对 DIP 的吸收. 在种植植物的区域内 DOP 浓度较高，而 PIP 则是沿着黄河边的区域具有较高的浓度，这是因为 PIP 是黄河水中 WTP 的主要贡献者.

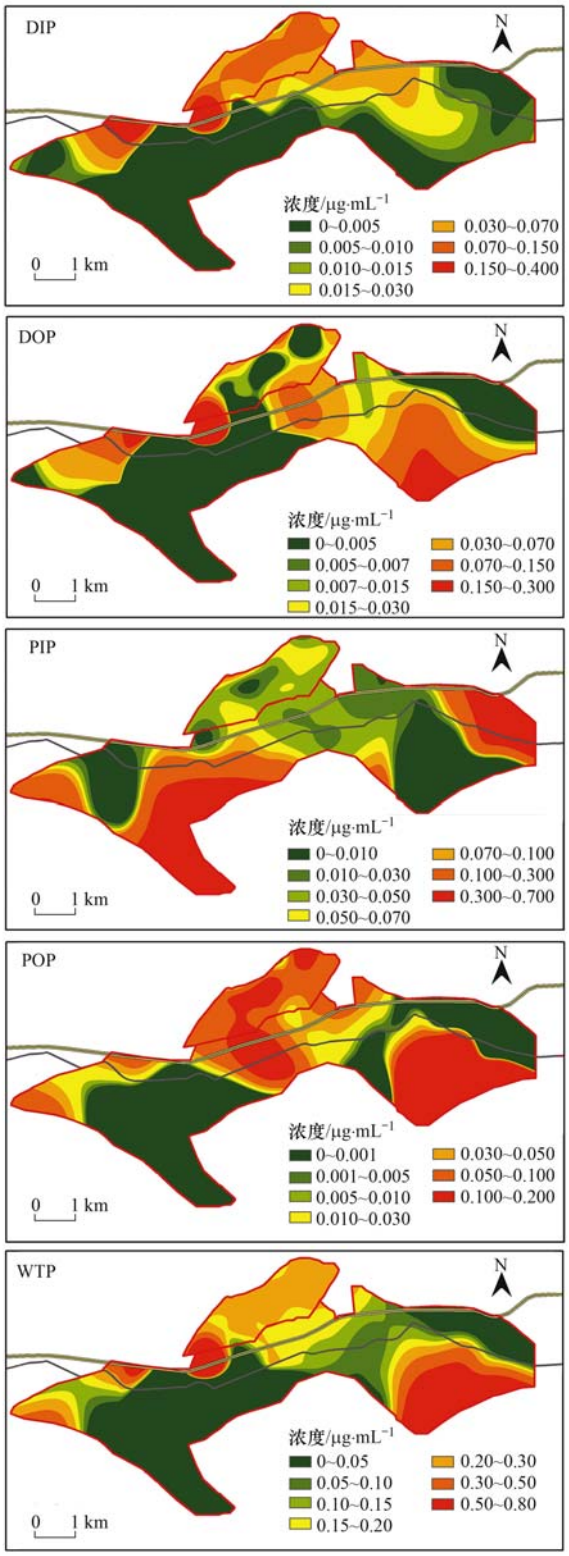


图 4　南海湿地水体不同磷形态空间分布特征

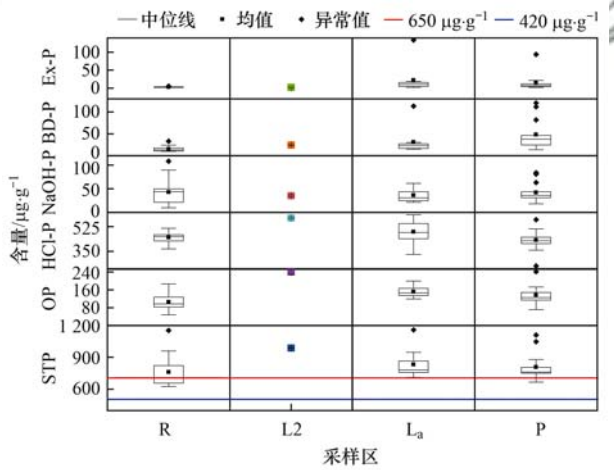
Fig. 4　Spatial distribution of different P fractions concentrations in the water of Nanhai wetland

2.2　表层沉积物形态磷含量分布特征及污染水平

研究区表层沉积物总磷 STP 含量如图 5 所示，其中 R 区、L_a 区和 P 区的 STP 含量分别为 585.45 ~ 859.67、649.46 ~ 11 52.32 和 600.48 ~ 1 096.92 μg·g^{-1}，其平均值分别为 659.44、802.65 和 757.62 μg·g^{-1}. 与美国环保署（US EPA，1977）的标准[38]进行比较，发现 R 区有 9 个采样点（R16、R4、R14、R2、R12、R3、R17、R18 和 R10）的 STP 处于重度污染，其余 11 个采样点处于中度污染. L_a 区和 P 区除 L19、P11、P12 和 P13 点外，其余各点的 STP 均处于重度污染水平. 3 个区的 STP 大小排序为：L_a 区 > P 区 > R 区.

沉积物中 P 的形态主要有弱吸附态磷（Ex-P）、可还原态磷（BD-P）、金属氧化物结合态磷（NaOH-P）、钙结合态磷（HCl-P）和残渣态磷（Res-P），其中 Ex-P 是与表层沉积物的颗粒松散结合的磷，是表层沉积物活性最大的磷，可直接参与生态系统循环[39]，极易受环境影响而释放到水体中[40]. BD-P 是与铁锰氧化物、氢氧化物结合的磷，对氧化还原条件敏感，为沉积物中潜在的活性磷[41, 42]. NaOH-P 是与铁、铝氧化物结合的磷，被认为是藻类可利用性磷的指标[13]，在厌氧条件下可释放至水体中，而且随着 pH 的增加，也容易释放到水体中. Ex-P、BD-P 和 NaOH-P 的总和可以用来估算潜在有效磷，称为生

物有效磷(BAP)[43]. 由图 5 各形态磷含量可以看出, R 区的 Ex-P 和 BD-P 的含量非常低,分别为 2.77 μg·g^{-1} 和 15.30 μg·g^{-1}, NaOH-P 的含量较高,为 43.04 μg·g^{-1},对 R 区 BAP 具有较大贡献量. 其中 R3 点和 R4 点的 BAP 含量最高,分别为 110.34 μg·g^{-1}和 144.46 μg·g^{-1},这是由于这两个采样点位于黄河水漫至湿地处,该区域有大量农田,农药化肥的施用和一些农业措施会改变土壤理化性质和环境因子,从而影响土壤中磷的转化[44~46],因此对表层沉积物的生物活性具有一定影响. L_a 区的 Ex-P、BD-P 和 NaOH-P 的含量分别为 1.68 ~ 133.96、15.25 ~ 113.46 和 21.50 ~ 61.31 μg·g^{-1}. 其中, L16 点位于南海湖码头,受到的人为影响和水体扰动较大,其 Ex-P、BD-P 和 NaOH-P 含量均高于其它采样点,分别为 133.96、113.46 和 61.31 μg·g^{-1}. 由此可见, L16 点的表层沉积物较其他点具有较高的磷释放风险和生物可利用性. P 区的 Ex-P、BD-P 和 NaOH-P 的含量分别为 1.89 ~ 93.74、13.94 ~ 120.70 和 18.23 ~ 83.71 μg·g^{-1}. 其中 P14 点的 Ex-P、BD-P 和 NaOH-P 含量均高于其它采样点,分别为 93.74、120.70 和 83.71 μg·g^{-1}. 因此可知该点具有较高的磷释放风险和生物可利用性, P14 点接近二道沙河, BD-P 和 NaOH-P 主要受到工业废水和生活污水的影响.



R 表示沿黄河边的采样点(R 区), L_a 表示南海湖湖周围的采样点(L_a 区), P 表示南海湿地植物区的采样点(P 区); 420 μg·g^{-1} < STP < 650 μg·g^{-1}为中度污染, STP > 650 μg·g^{-1}为重度污染

图 5 南海湿地表层沉积物各形态磷含量分布特征及污染评价

Fig. 5 P fractions concents distribution and the pollution evaluation in sediments areas of Nanhai wetland

综上可知, 3 个采样区 Ex-P 含量高低顺序为 L_a 区 > P 区 > R 区, BD-P 含量排序为 P 区 > L_a 区 > R 区, NaOH-P 的含量为 R 区 > P 区 > L_a 区,其总的 BAP 含量与 BD-P 排序相同,为 P 区 > L_a 区 > R 区. 可见 P 区和 L_a 区较 R 区的表层沉积物更容易向水体释放磷,并且具有较高的生物可利用磷,更容易发生富营养化. 此外, R 区、L_a 区和 P 区的 HCl-P 含量接近(448.52、498.16 和 429.97 μg·g^{-1}),但是 L_a 区和 P 区 OP 含量 (159.71 μg·g^{-1} 和 136.22 μg·g^{-1})比 R 区(105.38 μg·g^{-1})较高,这是由于 L_a 区和 P 区都有鱼塘.

图 6 为南海湿地表层沉积物中 STP 和 BAP 含量的空间分布特征,可以看出 STP 的空间分布为从北向南含量逐渐递减,与 WTP 含量的空间分布具有相同的趋势,因此可以推测南海湿地 WTP 的减少还有一部分是由于表层沉积物的吸附作用所致,随着表层沉积物对 WTP 的不断吸附, WTP 的含量不断降低,随之表层沉积物能够吸附的磷含量减少,因而 STP 含量也不断减少. 而 Ex-P 含量的空间分布主要是受到人为活动的影响, BD-P 和 NaOH-P 分别在二道沙河和东河具有较高含量,说明这两个形态磷主要受到生活污水和工业废水的影响.

2.3 芦苇根茎叶中 TP 含量、转运系数和生物累积系数

图 7 为研究区芦苇根、茎和叶中 TP 的含量分布、转运系数和生物累积系数. 从中可以看出, R 区芦苇根、茎和叶中 TP 含量分别为 0.53 ~ 2.34、0.71 ~ 3.78 和 0.97 ~ 3.65 mg·g^{-1}, 其含量分布表现出茎(1.95 mg·g^{-1}) > 叶(1.89 mg·g^{-1}) > 根(1.12 mg·g^{-1})的特征,且茎和叶含量相近. L_a 区芦苇根、茎和叶中 TP 含量分别为 0.56 ~ 1.61、0.80 ~ 2.72 和 1.29 ~ 2.47 mg·g^{-1},且含量分布表现出叶(2.00 mg·g^{-1}) > 茎(1.70 mg·g^{-1}) > 根(1.03 mg·g^{-1})的特征. P 区的芦苇根、茎、叶中 TP 含量分别为 0.83 ~ 2.44、1.01 ~ 3.95 和 1.96 ~ 4.31 mg·g^{-1},其含量大小排序为叶(2.47 mg·g^{-1}) > 茎(1.91 mg·g^{-1}) > 根(1.46 mg·g^{-1})特征. 可以看出, 3 个区域芦苇茎和叶中 TP 含量相较根都较高,表明地上部分的茎和叶具有较高的磷储量. 通常植物通过根吸收沉积物中的营养物质,茎作为通道将根所吸收的营养物质传输给叶,因此根具有较高营养物质的累积[47]. 但是本研究采样时间正处夏季,是芦苇的生长时期,叶片是植物光合作用和呼吸作用的主要场所,在能量制造、储存中发挥着重要作用[48],因此,本研究芦苇的叶片表现出较高程度的累积特征. 茎虽是营养传输的主要通道,但也有贮藏营养物质的功能[49]. 此外,有研究表明在生长季节结束时,芦苇会将营养物质转移到地下根和茎系统[50],而本研究中芦苇的地上部分含有较高的 TP 含量,因此,可在芦苇生长

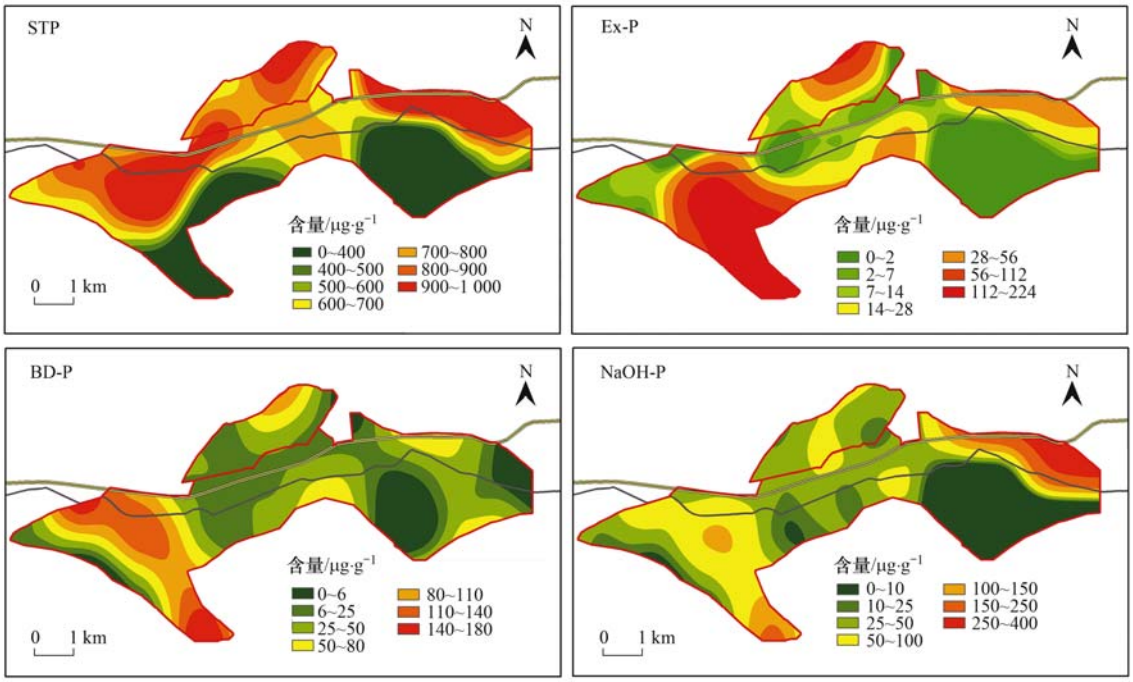


图 6　南海湿地表层沉积物不同磷形态空间分布特征

Fig. 6　Spatial distribution of different P fractions concentrations in surface sediments of Nanhai wetland

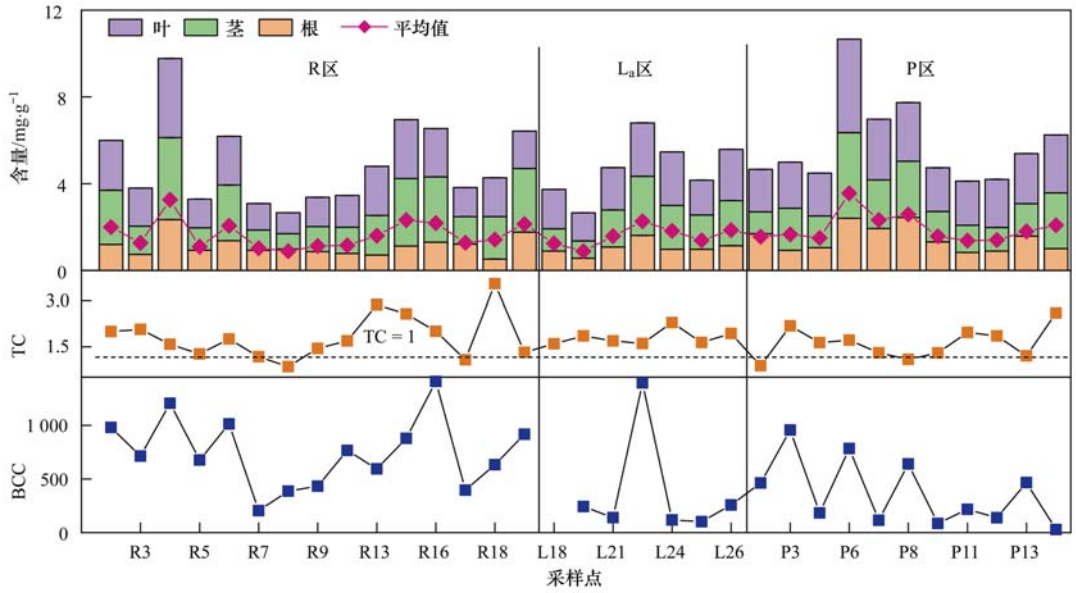


图 7　研究区芦苇 TP 含量、转运系数和生物累积系数

Fig. 7　TP content, TC, and BCC of reed in the study

季节结束之前去除地上部分以减少芦苇地上部分磷再次转移至地下根和茎系统中，导致芦苇所在环境中磷含量超标，引起水体的富营养化. 图 8 为研究区芦苇根、茎和叶的空间分布，可以看出在南海湿地范围内的采样点（L 区和 P 区，包括采样点 R1 ~ R4），芦苇具有更高的 TP 含量. 结合图 4 中 WTP 和 PIP 的空间分布可以看出，WTP 和 PIP 含量在湿地区域内都特别低，这主要是由于沉积物的吸附（前文已描述）和芦苇的截留作用. 另一方面，R 区的水体进入湿地后，受到水体理化性质等环境因素的影响，会转化为其他形式的磷[51]. 由前文研究可知，L_a 区和 P 区的 DIP 含量较 L_c 区要低，这是因为这两个区域都种植了大量的芦苇植物，它主要对 DIP 具有较好的吸收作用.

由图 7 可以看出，3 个区芦苇的转运系数（translation coefficient，TC）都大于 1（除 R8 点和 P2 点），其平均转运系数为 R 区（1.82）> L_a 区（1.81）> P 区（1.61），可见采样期 3 个区芦苇中磷都优先分配到地上部分，因此可在芦苇生长后期通过对芦苇地上部分的收割去除被芦苇吸收的磷. 另外，3

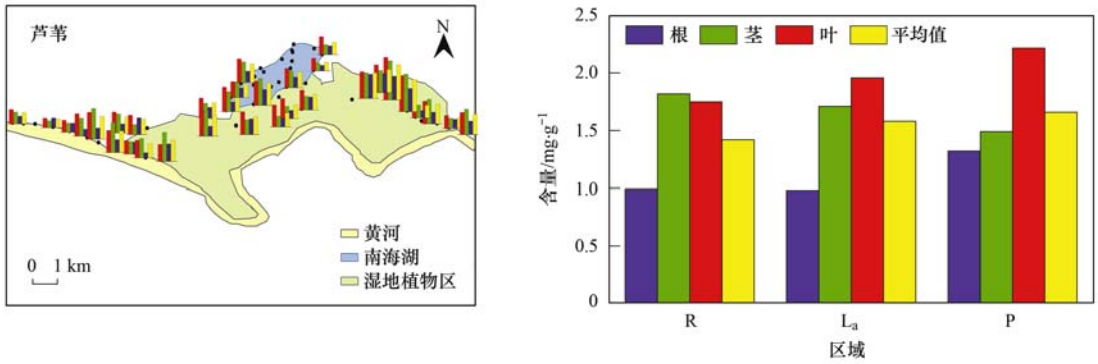


图 8 研究区芦苇根、茎和叶的空间分布

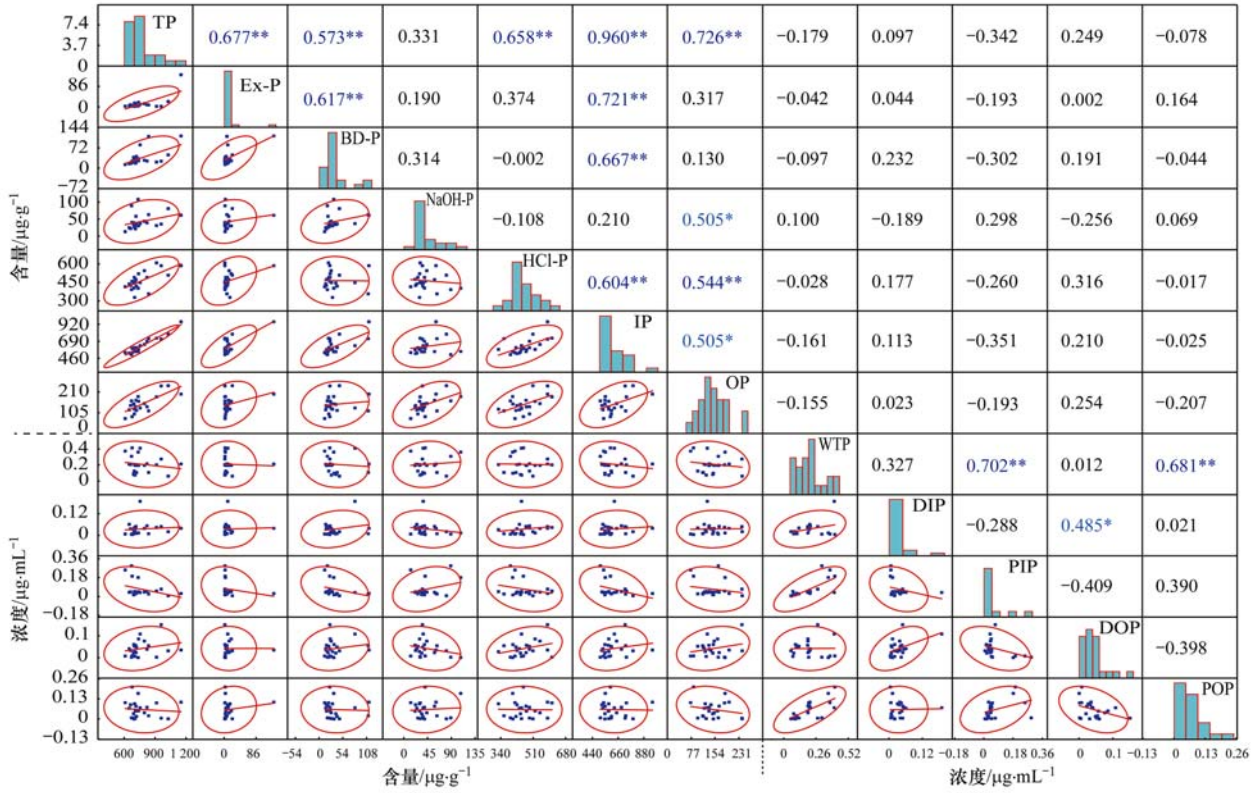
Fig. 8 Spatial distribution of reed roots, stems and leaves in the study area

个区芦苇的生物累积系数(bioaccumulation coefficient, BCC)差异较大,其平均生物累积系数为 R 区(747.85) > L_a 区(376.35) > P 区(370.88), R 区的生物累积系数为 L_a 区和 P 区 2 倍,这是由于 R 区表层沉积物中 Ex-P 的含量显著低于 L_a 区和 P 区的 Ex-P 含量.

3 讨论

3.1 相关性分析

对南海湿地范围内采样点(L 区和 P 区,包括采样点 R1 ~ R4)的水体和表层沉积物各形态磷进行相关性分析(CA),结果如图 9 所示,其中包括各形态磷之间的相关性系数(右上方)、直方图(对角线)和矩阵散点图(左下方). 由相关系数和矩阵散点图可以看出, STP 和 Ex-P、BD-P、HCl-P 和 OP 都具有显著相关性($P = 0.01$),说明 STP 主要是由 Ex-P、BD-P、HCl-P 和 OP 贡献. Ex-P 和 BD-P 具有显著相关性($P = 0.01$),说明这两种形态磷具有相同的来源. NaOH-P 与 OP 具有一定的相关性($P = 0.05$), NaOH-P 主要受工业废水和生活污水等点源污染的影响较大[52, 53], OP 主要来源于农业面源污染的影响[54],两者具有一定的相关性可能是由于研究区受到一定外源污染所致. WTP 与 PIP 和 POP 呈显著相关,说明 PIP 和 POP 是 WTP 的主要贡献者. 其中



** 表示相关性在 0.01 水平上显著, * 表示相关性在 0.05 水平上显著;椭圆为置信范围,直线为线性拟合直线;对角线柱状图为磷含量分布直方图

图 9 利用散布矩阵分析法分析研究区不同 P 组分含量之间的关系

Fig. 9 Analysis of the relationship between different P fractions concentrations in the study area using scatter matrix analysis

PIP 主要来源于黄河，说明黄河也是南海湿地磷的主要来源. 此外，DIP 和 DOP 具有一定的相关性，说明这两种形态具有相同的来源，而且 DOP 在一定条件下也能转化为 DIP.

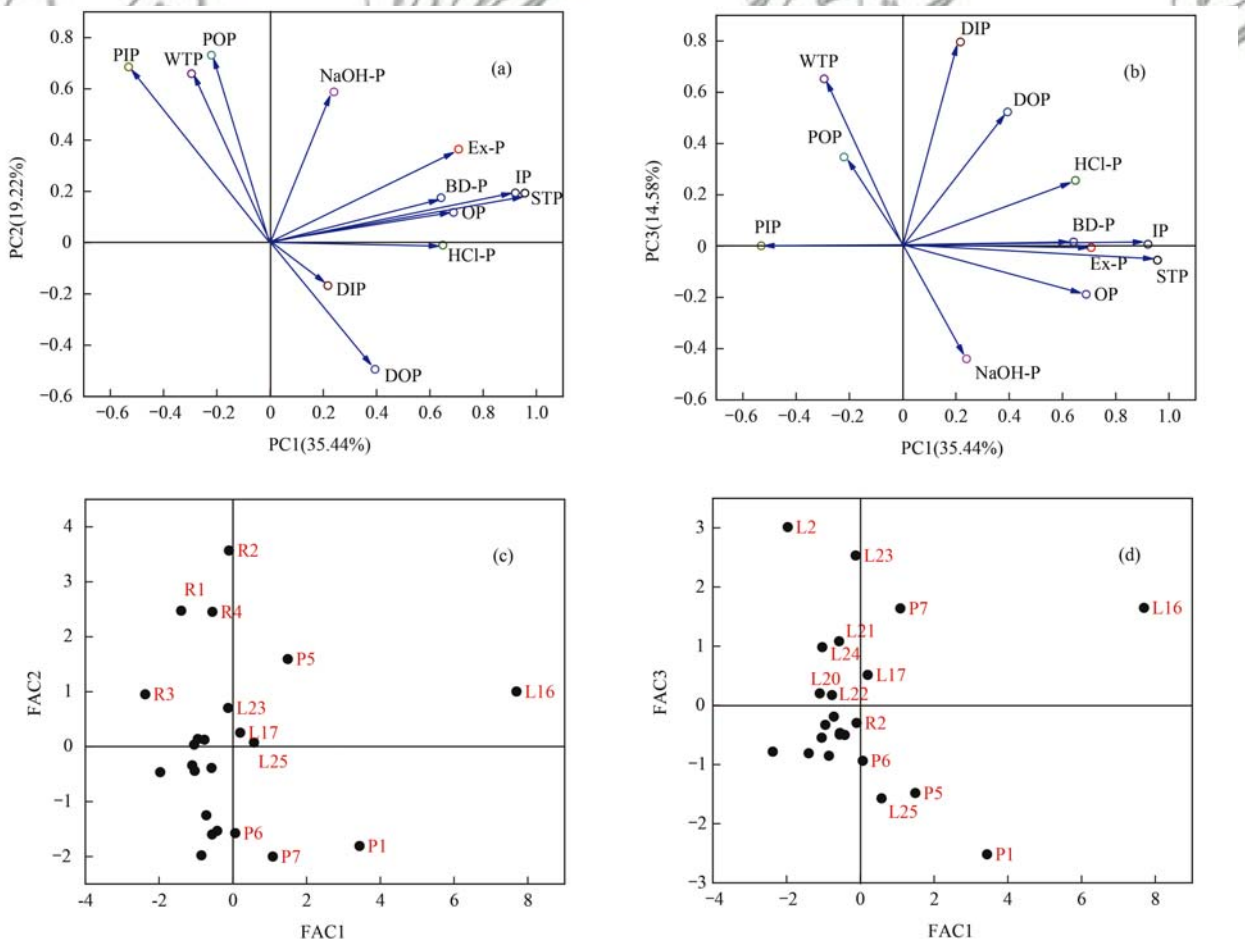
3.2　主成分分析

对南海湿地范围内的采样点（L 区和 P 区，包括采样点 R1 ~ R4）的水体和表层沉积物的各形态磷进行主成分分析（PCA），结果如图 10 所示. 从图 10（a）和图 10（b）可以看出，5 个组分占总方差的 88.85%，其中前 3 个主成分可以解释 69.24% 的总数据方差，从图 10（a）和图 10（b）可知：① PC1（35.44%）与 STP、IP、Ex-P 和 OP 的值密切相关，OP 主要来源于农业面源的污染，研究区存在大量农田，每年使用的磷肥超过5 000 t[55]，而且研究区存在大量牛、羊等放牧现象[25]，此外，南海湿地也是众多野生动物栖息、繁殖的优良场所[56]，畜禽和野生动物等产生的粪便也会增加 OP 的含量. 因此第一主成分推测来自农业面源污染；② PC2（19.22%）与 POP、PIP、WTP 和 NaOH-P 的值相关性高，南海湿地周围有铜厂和铝厂[57]，而且随着黄河水量的减少，南海湿地依靠东河补水，东河又接纳了周边的工业废水和生活污水，NaOH-P 是与铁、铝氧化物结合的磷，因此第二主成分推测是来自周边工厂排放的工业废水和生活污水；③ PC3（14.58%）与 DIP、WTP 和 DOP 的值具有较高的相关性，DOP 主要来源是动植物残体的降解，因此推测第三主成分为动植物残体的降解.

图 10（c）和图 10（d）表明，L16 点与第一主成分具有较高的系数，表明 L16 点主要受农业面源的污染，实际上 L16 点位于南海湖码头，受到人为活动影响较大. R1、R2、R4 和 P5 点第二主成分的系数较高，表明这 4 个点主要来源是工业废水和生活污水，R1、R2、R4 和 P5 点位于东河入南海湿地的附近，而东河和二道沙河接收了包头市东河区的工业废水和生活污水. L2 点和 L23 点在第三主成分系数较大，主要是受种植的植物影响.

3.3　绝对主成分得分-多元线性回归（APCS-MLR）受体模型

利用 APCS-MLR 受体模型对南海湿地范围内的采样点（包括采样点 R1 ~ R4）的水体和表层沉积



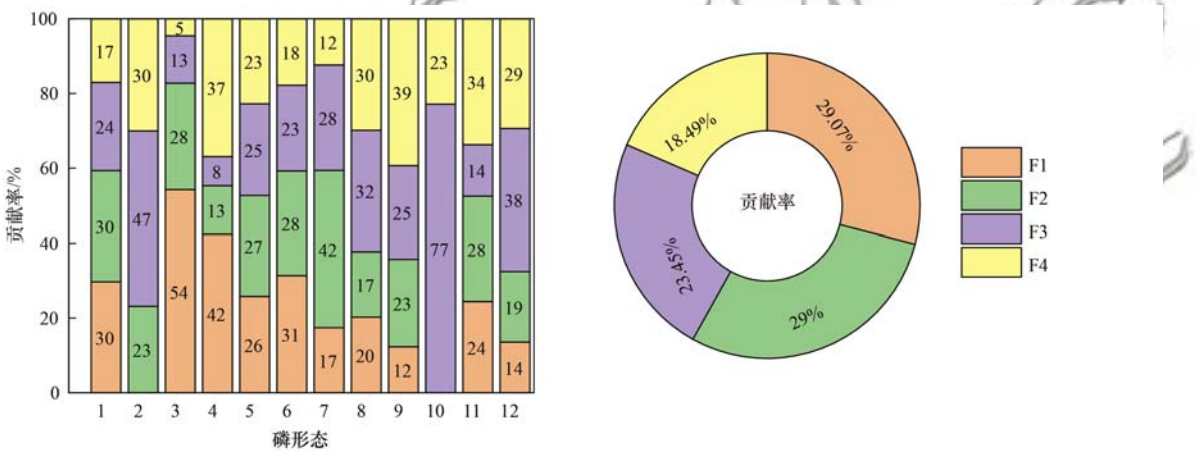
（a）和（b）是基于主成分分析的 P 形态平面散点负荷，（c）和（d）是采样点负荷

图 10　研究区 TP 和形态磷的主成分分析

Fig. 10　PCA of TP and P fractions concentrations in this study

物的各形态磷进行模型解析,r^2 分别为 STP(0.926)、Ex-P(0.824)、BD-P(0.729)、NaOH-P(0.594)、HCl-P(0.899)、IP(0.916)、OP(0.777)、WTP(0.840)、DIP(0.549)、PIP(0.820)、DOP(0.638)和 POP(0.767),除 NaOH-P 和 DIP 的 r^2 偏低,其它形态磷的相关性均较高,磷的污染源结果分析如图 11 所示.

因子 1(F1)对 STP、BD-P、NaOH-P 和 IP 的贡献较高,且因子 1 对 BD-P 和 NaOH-P 的贡献显著高于其它形态磷,结合前文的描述, BD-P 和 NaOH-P 主要来源于通过二道沙河和东河排入的工业废水和生活污水,因此,确定因子 1 为工业废水和生活污水,其贡献率为 29.07%. 因子 2 (F2)对 STP 和 OP 的贡献较高,尤其是对 OP 的贡献显著高于其它各形态,而 OP 结合前文的描述,主要来自于农业面源污染,而研究区内又有大量农田,农药化肥的施用会使得湿地 OP 含量较高,因此,确定因子 2 为农药化肥,其贡献率为 29.00%. 因子 3 (F3)对 Ex-P、WTP、PIP 和 POP 具有较高的贡献,尤其对 PIP 的贡献显著. 根据前文的研究可以发现,沿着黄河边所采集的水体中 PIP 含量最高,是黄河水体 TP 的主要贡献者,而水中的 TPP 的沉降是沉积物中磷的主要来源,而 Ex-P 最容易从表层沉积物中解吸形成 PIP,黄河的不断冲刷会对 TPP 的沉降和 Ex-P 的释放造成一定影响,因此,确定因子 3 位黄河引水,其贡献率为 23.45%. 因子 4(F4)对 Ex-P、NaOH-P、WTP、DIP、DOP 和 POP 具有较高的贡献, NaOH-P、DIP 和 DOP 都是能被植物和藻类利用的磷, DOP 通常是来源于动植物残体的降解,而 DOP 又能在胞外水解酶的作用下转化成 DIP. 南海湿地的植物在冬天凋零后,不仅会减少对磷的吸收,使得能被植物吸收的磷含量占比增加,还会重新释放出所吸收的磷. 因此,可确定因子 4 为动植物残体的降解,其贡献率为 18.49%.



1. STP, 2. Ex-P, 3. BD-P, 4. NaOH-P, 5. HCl-P, 6. IP, 7. OP, 8. WTP, 9. DIP, 10. PIP, 11. DOP, 12. POP

图 11 基于 APCS-MLR 受体模型的不同污染源贡献

Fig. 11 Contribution of different pollution sources based on APCS-MLR receptor model

4 结论

本文研究了包头南海湿地磷形态对污染源、生物利用度和富营养化的影响,并通过 APCS-MLR 受体模型结合多个源解析的方法对磷污染来源进行定量识别,发现 R 区、L 区和 P 区的水体和表层沉积物中磷都处于不同程度的污染水平,水体中 TP 的主要贡献者分别是 PIP、POP 和 DOP,而表层沉积物中主要是 HCl-P. BAP 的含量为 P 区 > L_a 区 > R 区, P 区和 L_a 区较 R 区的表层沉积物更容易向水体释放磷,并且具有较高的生物可利用磷,更容易发生富营养化. R 区、L 区和 P 区的芦苇均具有一定的积累磷的能力,其地上部分 TP 含量均大于地下部分,且 3 个区域的芦苇均有将 TP 优先分配到地上部分的能力,这更利于后期对于磷的去除. 对研究区进行污染源识别的结果表明,南海湿地磷的污染来源主要为工业废水和生活污水(29.07%)、农药化肥(29.00%)、黄河引水(24.45%)、动植物残体的降解(18.49%),这 4 种污染来源均对南海湿地的磷具有较高的贡献.

参考文献:

[1] Zedler J B, Kercher S. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2005, **30**: 39-74.

[2] Kim K G, Lee H, Lee D H. Wetland restoration to enhance biodiversity in urban areas: a comparative analysis [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2011, **7**(1): 27-32.

[3] Tiner R. NWIPlus: geospatial database for watershed-level functional assessment[J]. National Wetlands Newsletter, 2010, **32**(3): 4-7.

[4] Dash S, Borah S S, Kalamdhad A S. Study of the limnology of wetlands through a one-dimensional model for assessing the eutrophication levels induced by various pollution sources[J].

Ecological Modelling, 2020, **416**, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108907.

[5] Dorich R A, Nelson D W, Sommers L E. Availability of phosphorus to algae from eroded soil fractions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1984, **11**(3): 253-264.

[6] Lund J W. Eutrophication[J]. Nature, 1967, **214**(5088): 557-558.

[7] Duan W L, He B, Nover D, *et al*. Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang Lake Basin using multivariate statistical methods[J]. Sustainability, 2016, **8**(2), doi: 10.3390/su8020133.

[8] Chen C F, Ju Y R, Chen C W, *et al*. Vertical profile, contamination assessment, and source apportionment of heavy metals in sediment cores of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Chemosphere, 2016, **165**: 67-79.

[9] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston[J]. Atmospheric Environment, 1985, **19**(1): 9-25.

[10] Zhuang W, Wang Q, Tang L B, *et al*. A new ecological risk assessment index for metal elements in sediments based on receptor model, speciation, and toxicity coefficient by taking the Nansihu Lake as an example[J]. Ecological Indicators, 2018, **89**: 725-737.

[11] Chen H Y, Teng Y G, Yue W F, *et al*. Characterization and source apportionment of water pollution in Jinjiang River, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(11): 9639-9650.

[12] Fisher J I, Mustard J F. High spatial resolution sea surface climatology from Landsat thermal infrared data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, **90**(3): 293-307.

[13] Mustaffa N I H, Latif M T, Ali M M, *et al*. Source apportionment of surfactants in marine aerosols at different locations along the Malacca Straits[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(10): 6590-6602.

[14] Withers P J A, Jarvie H P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: a review[J]. Science of the Total Environment, 2008, **400**(1-3): 379-395.

[15] Pan G, Krom M D, Zhang M Y, *et al*. Impact of suspended inorganic particles on phosphorus cycling in the Yellow River (China)[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(17): 9685-9692.

[16] Krasa J, Dostal T, Jachymova B, *et al*. Soil erosion as a source of sediment and phosphorus in rivers and reservoirs-watershed analyses using WaTEM/SEDEM[J]. Environmental Research, 2019, **171**: 470-483.

[17] Paytan A, Roberts K, Watson S, *et al*. Internal loading of phosphate in Lake Erie Central Basin[J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 1356-1365.

[18] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere, 2001, **42**(2): 221-225.

[19] Katsaounos C Z, Giokas D L, Leonardos I D, *et al*. Speciation of phosphorus fractionation in river sediments by explanatory data analysis[J]. Water Research, 2007, **41**(2): 406-418.

[20] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(2): 261-266.

[21] Hupfer M, Gächter R, Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis[J]. Aquatic Sciences, 1995, **57**(4): 305-324.

[22] Psenner R, Pucksko R, Sager M. Fractionation of organic and inorganic phosphorus compounds in lake sediments. An attempt to characterize ecologically important fractions[J]. Archiv fur Hydrobiologie, 1984, **70**(1): 111-155.

[23] 李卫平, 王非, 杨文焕, 等. 包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(11): 1977-1984.
Li W P, Wang F, Yang W H, *et al*. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in Nanhai wetland soil of Baotou City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(11): 1977-1984.

[24] 于玲红, 王铭浩, 李卫平, 等. 包头南海湖沉积物有机碳空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(3): 538-545.
Yu L H, Wang M H, Li W P, *et al*. Spatial distribution characteristics of the organic carbon insediments of Nanhai Lake in Baotou City[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(3): 538-545.

[25] 隋小娜, 高崇. 关于南海黄河湿地保护中存在的问题和发展建议[J]. 科技展望, 2014, (18): 290.

[26] Xiao G L, Li T X, Zhang X Z, *et al*. Uptake and accumulation of phosphorus by dominant plant species growing in a phosphorus mining area[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 542-550.

[27] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[28] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. Science, 1977, **195**(4275): 260-262.

[29] Lin P, val Klump J, Guo L D. Dynamics of dissolved and particulate phosphorus influenced by seasonal hypoxia in Green Bay, Lake Michigan[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 1070-1082.

[30] 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 等. 环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1404-1412.
Gao Y X, Song Y Z, Yu J H, *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of different forms of phosphorus in three sorts of rivers around Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1404-1412.

[31] Froelich P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism[J]. Limnology and Oceanography, 1988, **33**(4): 649-668.

[32] Paytan A, McLaughlin K. The oceanic phosphorus cycle[J]. Chemical Reviews, 2007, **107**(2): 563-576.

[33] 杨旭, 李畅游, 李文宝, 等. 达里诺尔湖磷赋存特征及底泥释放影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(4): 92-97, 102.
Yang X, Li C Y, Li W B, *et al*. Characteristics of phosphorus occurrence and influence factors of sediment release in Dali-Nor Lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(4): 92-97, 102.

[34] 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 等. 岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1676-1683.
Zhao L, Chen J Y, Jiang X, *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of nitrogen and phosphorus in Daihai Lake[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1676-1683.

[35] Wang X L, Wei J X, Bai N, *et al*. The phosphorus fractions and adsorption-desorption characteristics in the Wuliangsuhai Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(21): 20648-20661.

[36] 张博, 郭云艳, 王书航, 等. 呼伦湖水体磷的时空演变及其

影响因素[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(4): 824-830.
Zhang B, Guo Y Y, Wang S H, *et al*. Spatial-temporal changes of phosphorus and its influential factors in Lake Hulun[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(4): 824-830.

[37] Fang T H, Wang C W. Dissolved and particulate phosphorus species partitioning and distribution in the Danshuei River Estuary, northern Taiwan[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **151**, doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110839.

[38] U.S. EPA. Guidelines for the pollutional classification of great lakes harbor sediments[R]. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency, 1977.

[39] Jing L D, Liu X L, Bai S, *et al*. Effects of sediment dredging on internal phosphorus: a comparative field study focused on iron and phosphorus forms in sediments[J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 267-271.

[40] Liu Q, Liu S L, Zhao H D, *et al*. The phosphorus speciations in the sediments up-and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River[J]. Chemosphere, 2015, **120**: 653-659.

[41] Ribeiro D C, Martins G, Nogueira R, *et al*. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal)[J]. Chemosphere, 2008, **70**(7): 1256-1263.

[42] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(7): 958-962.

[43] Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Phosphorus fractionation and bio-availability in Taihu Lake (China) sediments[J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, **17**(3): 384-388.

[44] Zamuner E C, Picone L I, Echeverria H E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices[J]. Soil and Tillage Research, 2008, **99**(2): 131-138.

[45] Peters K, Hjorth M, Jensen L S, *et al*. Carbon, nitrogen, and phosphorus distribution in particle size-fractionated separated pig and cattle slurry[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, **40**(1): 224-232.

[46] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 522-537.

[47] 印婧婧, 郭大立, 何思源, 等. 内蒙古半干旱区树木非结构性碳、氮、磷的分配格局[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, **45**(3): 519-527.
Yin J J, Guo D L, He S Y, *et al*. Non-structural carbohydrate, N, and P allocation patterns of two temperate tree species in a Semi-Arid region of Inner Mongolia[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, **45**(3): 519-527.

[48] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, *et al*. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants[J]. American Naturalist, 2006, **168**(4): E103-E122.

[49] Li L P, Zerbe S, Han W X, *et al*. Nitrogen and phosphorus stoichiometry of common reed (*Phragmites australis*) and its relationship to nutrient availability in northern China[J]. Aquatic Botany, 2014, **112**: 84-90.

[50] Berthold M, Karstens S, Buczko U, *et al*. Potential export of soluble reactive phosphorus from a coastal wetland in a cold-temperate lagoon system: Buffer capacities of macrophytes and impact on phytoplankton[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 46-54.

[51] 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.

[52] Bai X L, Ding S M, Fan C X, *et al*. Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China[J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(8-9): 2507-2513.

[53] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al*. Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 216-223.

[54] Pu J, Ni Z K, Wang S R. Characteristics of bioavailable phosphorus in sediment and potential environmental risks in Poyang Lake: the largest freshwater lake in China[J]. Ecological Indicators, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106409.

[55] 包头市统计局. 包头统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

[56] 智颖飙, 王玉文, 王燕, 等. 包头南海湿地水体环境季节性变化与生态功能货币化评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(2): 124-128.
Zhi Y B, Wang Y W, Wang Y, *et al*. An assessment for water environment and ecosystem functions-a case study for Nanhai wetland of Baotou City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, **28**(2): 124-128.

[57] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1139-1146.
Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al*. Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1139-1146.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 9

Sep. 15, 2021

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of $PM_{2.5}$ and O_3 in Beijing, from 2014 to 2020 ····· CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)

High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in $PM_{2.5}$ Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, *et al.* (4083)

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter ····· SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, *et al.* (4095)

Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols ····· WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, *et al.* (4104)

Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan ····· ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, *et al.* (4116)

Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm ····· WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, *et al.* (4126)

Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of $PM_{2.5}$-bound Metals in Xinxiang ····· LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, *et al.* (4140)

Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea ····· YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, *et al.* (4151)

Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin ····· LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, *et al.* (4158)

Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China ····· HE Chao, MU Hang, YANG Lu, *et al.* (4168)

Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai ····· ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, *et al.* (4180)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta ····· YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, *et al.* (4191)

Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin ····· KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, *et al.* (4202)

Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years ····· CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, *et al.* (4211)

Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province ····· ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, *et al.* (4222)

Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin ····· ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, *et al.* (4234)

Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula ····· SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, *et al.* (4246)

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area ····· XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, *et al.* (4257)

Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes ····· REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, *et al.* (4267)

Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou ····· BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, *et al.* (4275)

Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park ····· LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)

Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism ····· QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, *et al.* (4296)

Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands ····· MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, *et al.* (4304)

Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment ····· TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, *et al.* (4311)

Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period ····· ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, *et al.* (4319)

Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff ····· MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)

Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone ····· WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, *et al.* (4341)

Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of *Scenedesmus obliquus* ····· WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)

Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment ····· WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, *et al.* (4358)

Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation ····· LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, *et al.* (4366)

Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process ····· CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, *et al.* (4374)

Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System ····· ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, *et al.* (4383)

Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System ····· YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, *et al.* (4390)

Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration ····· LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, *et al.* (4399)

Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage ····· WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, *et al.* (4406)

Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China ····· ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, *et al.* (4414)

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau ····· DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, *et al.* (4422)

Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area ····· ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)

Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter ····· WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, *et al.* (4441)

Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System ····· ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, *et al.* (4452)

Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium ····· WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)

Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in *Solanum nigrum* L. ····· PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, *et al.* (4471)

Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions ····· LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, *et al.* (4481)

High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau ····· LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)

Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area ····· SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, *et al.* (4500)

Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities ····· MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, *et al.* (4510)

Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms ····· LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, *et al.* (4520)

Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland ····· HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, *et al.* (4527)

Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N_2O Emission from Potted Maize ····· FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, *et al.* (4538)

Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH_4^+-N Loaded Biochar ····· MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, *et al.* (4548)

Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard ····· ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, *et al.* (4558)

Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China: 1985-2019 ····· WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, *et al.* (4566)