

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期

Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)

天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)

重庆市主城区 O₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)

汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)

郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)

上海市 PM_{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)

河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)

广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)

天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)

城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)

微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)

磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)

潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锟, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)

淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)

DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)

市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)

A²/O 与倒置 A²/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)

厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)

活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)

基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)

大气 CO₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的影响 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)

不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)

物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)

米利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)

黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)

秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)

镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)

岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)

锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)

不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)

4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 丁园, 教师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)

叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)

镉对不同生长期籽粒菟植物螯合肽的影响 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)

中国造纸业物质代谢演化特征 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)

《环境科学》征订启事(3651) 《环境科学》征稿简则(3718) 信息(3836, 3885, 3893)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征

杨婷^{1,2}, 王阳^{1,2}, 徐静怡^{1,2,3}, 吴萍⁴, 王为东^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国农业大学资源与环境学院生态系, 北京 100094; 4. 嘉兴市水利水电勘察设计研究院, 嘉兴 314001)

摘要: 为揭示河网水源生态湿地中水力流程沿途和植物床-沟壕系统内部水同位素分异特征, 于2019年8月夏季湿雨期, 沿水力流程梯度采集嘉兴市石臼漾湿地、贯泾港湿地、海宁市市长水塘湿地和泰山港湿地这4个根孔型水源生态湿地上层水样, 于2020年1月冬季干冷期采集泰山港湿地植物床-沟壕系统内部沟壕上层水样和植物床潜水样品. 测定氘(δD)和 $\delta^{18}O$ 丰度, 运用同位素技术和数理统计方法解析湿地水体水同位素分布和组成特征, 并探明植物床-沟壕系统对水同位素分异的影响. 结果表明: ①河网水同位素时空变化很大程度上受到不同水源补给和蒸发富集作用的影响, 湿地敞水区水线与邻近区域大气降水线相比, 湿地区水氢氧同位素呈现富集特征; ②通过多种数理统计手段结合散点图并做模型假设诊断分析, 发现在4个湿地的区域尺度和每个湿地内部的局域尺度, 水氢氧同位素丰度及组成在垂向维度和水平维度大多呈现复杂的非线性变化, 在区域尺度上, 垂向维度的水位高程较水平维度的水力流程长度对水同位素的分布影响更大, 而在局域尺度内, 水力流程驱动的影响往往更大; ③异质性较强的湿地根孔生态净化区相较于其他功能区其水同位素相对更加富集; ④由芦苇等根系发达的植物所形成的地下大孔隙网络、富含粘土的基质土壤和植物床上的植物对湿地水氢氧同位素丰度具有显著影响, 因此在植物床-沟壕系统内部, 出水侧的低位小沟相较于进水侧的高位小沟其水同位素偏轻; ⑤植物床-沟壕系统中水同位素丰度的突变点可能预示着水体净化的拐点; ⑥植物床-沟壕系统潜水中氘盈余(d -excess)明显高于沟水相应值, 且潜水变异系数远大于沟水, 湿地根孔生态净化区的氘盈余呈现夏季湿热雨季偏负、冬季干冷旱季偏正的季节性差异, 反映了湿地水汽来源的季节性差异和内部同位素分馏行为的空间差异. 研究结果为人们认识人工湿地中水同位素分布特征、水力流态及提升湿地运行效果提供参考依据, 并为探索湿地水质提升关键技术提供新思路. 本研究表明水同位素技术在剖析湿地水文学方面具有可靠的巨大潜力.

关键词: 构筑根孔湿地; 植物床-沟壕系统; 氢氧同位素; 水力流程梯度; 潜水; 嘉兴河网地区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3695-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012229

Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks

YANG Ting^{1,2}, WANG Yang^{1,2}, XU Jing-yi^{1,2,3}, WU Ping⁴, WANG Wei-dong^{1*}

(1. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Ecology, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 4. Water Resources & Hydroelectric Prospecting & Design Research Institute of Jiaxing City, Jiaxing 314001, China)

Abstract: To explore the isotopic distribution and differentiation of water along the hydraulic flow gradients and plant-bed/ditch systems in constructed root-channel wetlands, surface and subsurface water samples were collected from four ecological wetlands, namely Shijiuyang and Guanjinggang in Jiaxing, as well as Changshuitang and Taishangang in Haining. All samples were collected along water flow pathways during the wet and rainy summer season in August 2019, except for those from Taishangang, which were collected within the plant-bed/ditch system during the dry and cold winter season in January 2020. The abundance of deuterium (δD) and $\delta^{18}O$ was determined in each functional area of the wetlands to assess the influence of wetlands on water differentiation. Stable isotope technology and mathematical statistics were used to analyze the distribution of δD and $\delta^{18}O$ in constructed root-channel wetlands and to reveal the influence of plant-bed/ditch systems on stable isotopes of water. A variety of data mining methods were used to examine the differentiation of stable isotopes of water, at various dimensions and scales, including nonparametric Kendall's tau-b correlation, stepwise regression, gray relational analysis, and machine learning (random forest) combined with scatter diagrams and model hypothesis diagnosis analysis. The main results were as follows; ① The spatiotemporal variations in water isotopes of stream networks were largely affected by different water supply and evaporation enrichment effects. The slope and intercept of the wetland water line in Jiaxing were both significantly lower than the regional precipitation line of the adjacent Changshu Station (CHNIP). This showed that the wetlands area had undergone hydrogen and oxygen isotope enrichment. The δD values in Shijiuyang wetland water ranged from -52.2‰ to -49.4‰ , and $\delta^{18}O$ values ranged from -7.6‰ to -6.9‰ . In Guanjinggang wetland water samples, δD

收稿日期: 2020-12-24; 修订日期: 2021-02-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201004-002); 中国科学院国际伙伴计划项目(GJHZ2086); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(中国科学院生态环境研究中心)自由申请课题项目(20Z02ESPCR)

作者简介: 杨婷(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地氮矿化过程与水同位素, E-mail: tingyang_st@rcees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wdwang@rcees.ac.cn

ranged from $-48.1‰$ to $-45.1‰$, and $\delta^{18}\text{O}$ ranged from $-6.8‰$ to $-5.8‰$. The δD values in Changshuitang wetland water ranged from $-49.8‰$ to $-48.4‰$, and $\delta^{18}\text{O}$ ranged from $-7.2‰$ to $-6.6‰$. The δD values in Taishangang wetland water ranged from $-55.3‰$ to $-51.6‰$, and $\delta^{18}\text{O}$ ranged from $-7.8‰$ to $-7.2‰$. ② Hydrogen and oxygen isotope abundance and composition of water showed complex nonlinear changes in the vertical and horizontal dimensions at different scales. At the regional scale, water level elevation in the vertical dimension had a greater impact on water isotope distribution than the length of the hydraulic flow pathway in the horizontal dimension. Water isotopes tended to be enriched in low-lying areas with low water levels. At the local scale, the influence of hydraulic process often played a greater role in determining water isotope distributions. The spatial variations of water isotopes were comprehensively determined by the evaporation of regional water and meandering hydraulic processes inside the wetland. ③ Compared with other wetland functional areas, the central constructed root-channel area (middle treatment zone) was more enriched in water isotopes. ④ The underground macropore network formed by plants with developed rhizomes or roots (e.g., *Phragmites communis* Trin. and *Typha orientalis* Presl), mineral-rich substrate soil, and aquatic plants in the plant bed had a significant influence on the abundance of hydrogen and oxygen isotopes in the plant-bed/ditch system. Therefore, when water passed through the plant-bed/ditch system, the values of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in the lower ditch (outlet) were lower than those in the higher ditch (inlet). ⑤ The abrupt change in isotopic contents of the plant-bed/ditch system might indicate an inflection point in water quality purification. ⑥ The deuterium excess (d -excess) in subsurface water of the plant-bed/ditch system was significantly higher than that in ditch water, and the coefficient of variation in subsurface water was considerably greater than that in ditch water. The d -excess in the wetland root-channel ecological purification zone showed significant temporal differences and was negative in the summer and positive in the winter, which reflected the seasonal variation in water vapor sources and the spatial variation in isotope fractionation behavior in wetlands. These results provide some understanding of the distribution of water isotopes in constructed wetlands, which will strengthen their operation and management. This study also provides some ideas regarding new technologies for water quality improvement and shows that water isotope technology may be a reliable method for analyzing wetland hydrology.

Key words: constructed root-channel wetland; plant-bed/ditch system; hydrogen and oxygen isotope; hydraulic flow gradients; subsurface water; Jiaxing stream network area

人工湿地(constructed wetlands, CWs)是一种利用植被、土壤、基质和相关微生物种群相互作用并具有自然清除机制的生态处理技术^[1],继承了湿地的水陆交汇处概念,融入了人为因素,并由人工构筑而成.构建和运行良好的人工湿地不仅是区域水循环中重要的组成部分,还是适合多种生物生存的重要环境,该生态系统利用物理、化学和生物作用相耦联来吸收、吸附和降解污染物并维持区域生态平衡,有着“城市绿肺”美誉^[2,3].近年来被广泛用于处理生活污水、工业废水尾水、暴雨径流、城乡面源污染、富营养化水体和黑臭水体等^[4].仿拟白洋淀自然湿地中苇地-沟壕特殊景观结构和苇地内自然根孔结构,并强化水位波动下的水陆交错带边界过滤效应^[5-7],在嘉兴地区构建了石臼漾、贯泾港、长水塘和泰山港等以生态根孔为核心的水源型人工湿地^[8].人工湿地中水文连通性和水力学特性是其内部能量流动、养分循环和水质净化的重要因素^[9].

湿地水体受到降水、地表径流和地下水等交互作用,它们之间的关系十分复杂,而氢氧稳定同位素作为良好的环境同位素示踪剂,其相变过程中同位素分馏能够对环境变化作出敏感响应,因此常用于揭示湿地与各种环境的水文联系以及剖析湿地中的水循环过程^[10-13].Brooks等^[14]首次利用 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 双同位素和遥感技术对Pipestem Creek流域湿地-河流的同位素组成进行定量分析,并得出该流域以草原坑洼湿地为主. Brock等^[15]借助 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 双同位素示踪和总悬浮物指标测定,对湖泊水文过程进行

剖析,区分了3类不同主导来源的湖泊.有学者根据稳定同位素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 分布对天然泥炭地的流动模式进行准确的评价^[16].刘澄静等^[17]对水稻梯田湿地研究得出其主要补给水源为降水和地下水. Gao等^[18]对人工湿地水体同位素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 组成年际变化进行研究以表征表面流人工湿地水力特性.湿地中水体流态多样,其内部可能会出现滞流和短流现象,局部区域不能被充分利用来进行物理、化学和生物协同作用等,从而较大程度降低湿地的净化功能^[3,19].此外,研究表明演替周期不同的人工湿地,其土壤特性^[20]、水生植物多样性^[21,22]、浮游植物多样性^[23,24]和微生物多样性^[25,26]等存在着显著的差异、梯度或“热区”,但采用水氢氧同位素来反映人工湿地中水分运移、疏导截流和净化过程等方面的研究还比较少^[27].因此,对不易准确把握的人工湿地中水循环过程和相关规律亟需进一步研究.

本文选取在“运河水系”旁路构建的4个人工湿地(石臼漾、贯泾港、长水塘、泰山港)及其核心净化区和结构单元(湿地根孔生态净化区的植物床-沟壕系统)作为研究对象,利用同位素示踪技术对湿地各功能区和植物床-沟壕系统内部氢氧稳定同位素的分布和组成特征进行研究.通过揭示不同运行年限的湿地其不同功能区中水同位素的富集和分馏规律,在植物床-沟壕系统内部的截留和输移机制,以及不同尺度水平维度和垂向维度水同位素的分布特征,以期为人们认识人工湿地中水同位素分布特征、水力流态及提升湿地运行效果提供一定参考

依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

嘉兴市市域水系整体上属长江水系和太湖流域,京杭大运河贯穿该市且与其他主要河道相关联,亦称“运河水系”。京杭运河区包括南湖区、秀洲区、嘉善县、海盐县、平湖市、桐乡市及海宁市大部分地区,面积约 527.79 km²。京杭运河区历经长期演变,至今形成 3 个排水系统:一是京杭运河以西,以京杭运河和澜溪塘为骨干的自西南向东北流经太浦河的排水系统,称“北排区”;二是京杭运河以东、平湖塘和乍浦塘以北至江浙交界的河网地区,以俞汇塘(塘港)、红旗塘、上海塘和广陈塘等骨干河道为主排入黄浦江,称“东泄区”;三是京杭运河以南、1976~2000 年间建设的向钱塘江和杭州湾排水的杭嘉湖南排工程各河道,称“南排区”。

嘉兴市地势平坦,河网密布,湖荡众多,河网率 7.89%,河道分布密度为 3.5 km·km⁻²,形成了典型的江南平原水网地带,其明显的特点是水力坡度小,且大多是感潮河流。嘉兴市属典型的亚热带季风气候,年平均气温为 15.4~16.4℃,1 月最冷,月平均气温 3~4℃,极端最低气温 -11~-12℃,7 月最

热,月平均气温 28~29℃,极端最高气温 39~40℃。嘉兴市平均年降水量为 1 193.2 mm,但时空分布不均,时序上呈“双峰型”特点,5~6 月梅雨集中为“梅雨期”,8~9 月则常有台风和极峰大雨为“台雨期”,并常引发洪涝^[28]。嘉兴地区年平均日照 1 800~2 200 h。嘉兴市平均年蒸发量为 1 324.4 mm,超过平均年降水量约 130 mm。年平均相对湿度均在 80% 以上。嘉兴市整个区域地处杭、嘉、湖东部平原的下游,主干河流及其干网都是平原的排水走廊,河道径流常年自由畅泻,过境水量丰富。归纳总结河网水源地存在的主要问题有:① 水源地污染来源多,有机污染加重,大多数地区没有可替代水源;② 河网地区水文水动力条件多变,边界不清;③ 河网地区往往成为流域污染物积累的“汇”,水质污染严重。近些年来,为了提高水源安全性,嘉兴市积极探索和实践新时期“河长制”和“五水共治”等治水策略,并建设了“双/多水源切换工程”,衍生了石臼漾湿地、贯泾港湿地、长水塘湿地和泰山港湿地等以生态根孔构筑为核心的水源型湿地(表 1)。在表 1 中给出了 4 个水源型湿地的主要进水水源、占地面积、日处理规模、平均水力停留时间、直接水力流程长度、平均水力坡度、湿地内主水流方向、开始(试)运行时间和湿地范围的地理坐标等基础信息。

表 1 4 个水源型湿地基础信息

Table 1 Basic information of four water-source wetlands

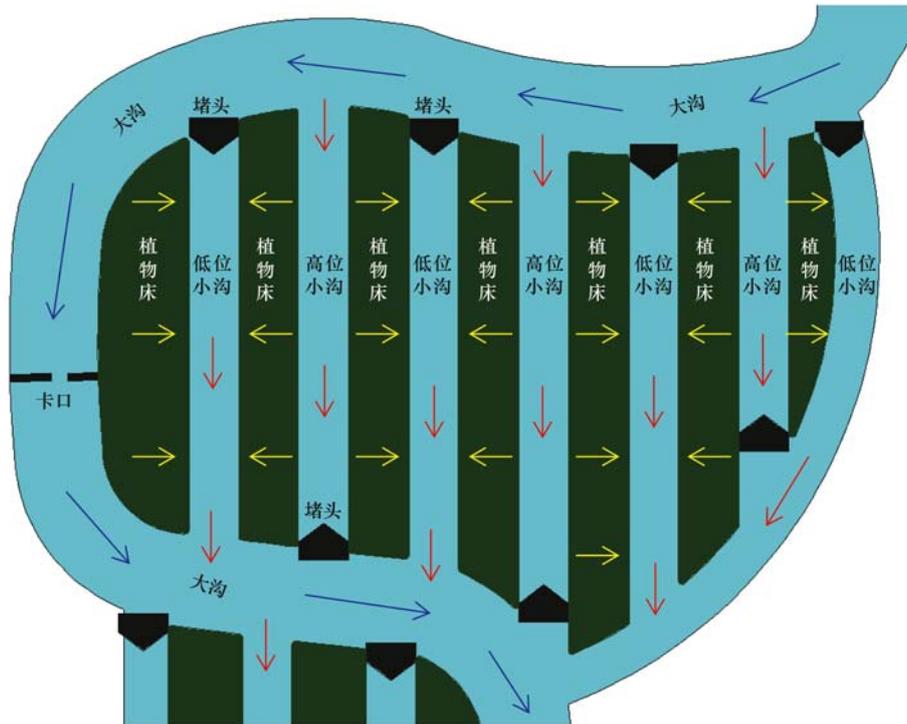
湿地简称	湿地水源	占地面积 /hm ²	处理规模 ×10 ⁴ /m ³ ·d ⁻¹	水力停留 时间/d	水力流程 长度/m	水力坡度 /%	主水流方向	开始(试) 运行时间	地理坐标范围
石臼漾 湿地	新塍塘/ 北郊河	108.67	25	3.43~4.13	西区:2 816 东区:5 314	西区:0.001 8 东区:0.017 9	(水源)南→北→南→ 顶管→东→北→南→ 东(水厂)	2008 年 7 月(东区) 2009 年 5 月(西区)	N 30°46'11.98"~30°47'02.56" E 120°41'50.64"~120°42'41.20"
贯泾港 湿地	海盐塘/ 南郊河	147.13	20~30 (远期 45)	2.17~3.26	8 024	0.023 3	(水源)南→北→南→ 顶管→西(水厂)	2013 年 10 月	N 30°41'40.49"~30°42'44.65" E 120°45'20.12"~120°46'45.57"
长水塘 湿地	长水塘/ 长山河	173.87	30	4.15~4.50	西区:4 416 东区:5 202	西区前段:0.018 5 西区后段:0.064 2 东区前段:0.032 6 东区后段:0.067 9	(水源)北→南(水厂)	2013 年 12 月(西区) 2015 年 6 月(东区)	N 30°32'50.25"~30°35'11.08" E 120°41'35.07"~120°42'27.44"
泰山港 湿地	盐官下河 (泰山港)	101.40	30	3.92~4.30	北区:2 617 南区:4 235	北区:0.012 6 南区:0.007 8	(水源)西→东(水厂)	2016 年 6 月(南区) 2017 年 3 月(北区)	N 30°28'41.00"~30°29'21.99" E 120°25'08.25"~120°25'54.38"

水源型湿地布水和集水方式主要通过泵站和节制闸并借助水力坡度对水流流向和流速进行调控,在重力和动力的作用下使得水流充分接触湿地各功能区区块和微结构单元。其中湿地根孔生态净化区的设计尤为关键,通过卡口、束流装置、叠梁门或节制闸对水进行调控分流,使得经过大沟的水流先流向高位小沟,在植物床和沟壕之间设置不透水或半透水等水工微结构(堵头)来改变并优化水流,而后经过植物床渗透到低位小沟(图 1)。该区对湿地水质净化起到至关重要的作用^[24,29]。水流经湿地根孔

生态净化区的植物床-沟壕系统在沟壕中以表流形式运移,在植物床内部以亚表层潜流形式运移。水源型湿地建成后逐步演替成良性循环并持续稳定发挥作用的生态系统,因此对湿地各功能区的稳定氢氧同位素分布特征及其规律开展研究对指示后续湿地的建设和运行具有重要意义。

1.2 研究方法

于 2019 年 8 月夏季湿热多雨的台雨期,首先对嘉兴地区石臼漾湿地(A)、贯泾港湿地(B)、长水塘湿地(C)和泰山港湿地(D)自进水口至出水口沿水



蓝色箭头:大沟中水流方向,红色箭头:小沟中水流方向,黄色箭头:植物床中水流方向

图1 湿地根孔生态净化区布水和集水方式示意

Fig. 1 Water distribution pattern in the wetland root-channel ecological purification zone

力流程梯度的主要位点进行上层水样品采集。采样点位的设计兼顾到每个功能区。即每个湿地均采集其水源水(红色位点)、预处理区(黄色位点)、湿地根孔生态净化区(绿色位点)和深度净化区(蓝色位点)水样,对石臼漾湿地还采集了提升改造工程区(白色位点)5个水样,共采集样品85个(图2),水源水和湿地各功能区常水位高程(1985国家高程基准高程)、共性样点个数见表2。之后为进一步探究湿地植物床-沟壕系统内部的水同位素分布特征,选取泰山港湿地溢流堰过后一条长约150m的植物床,在植物床上挖掘9个直径约30cm且有约500mL以上潜水渗出的坑。于2020年1月冬季干冷季节对植物床-沟

壕系统9个位点(图2中a、b、c和d部分以及大沟)分别采集湿地沟壕上层水和植物床坑中潜水,共采集样品18个,每个样品分成2份,其中一份用于水同位素测定,另外一份经0.45 μm滤膜过滤后用于铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)测定。湿地水和潜水样品分别用DSC 2500采水器和注射器采集。用于水同位素测定的样品其采集和预处理过程按照标准流程进行。先将15 mL已排空的Labco管润洗3次,然后用注射器套上0.22 μm孔径微孔滤膜的滤头原位进行水样过滤,将水装满Labco管,管中无气泡后用密封膜进行封口,贴好标签并记录好采样点的基本信息,低温冷藏保存至上机测试。

表2 采样点基本信息

Table 2 Basic information of sampling sites

湿地名称	采样日期	水源水		预处理区		湿地根孔生态净化区		深度净化区	
		常水位/m	样点/个	常水位/m	样点/个	常水位/m	样点/个	常水位/m	样点/个
石臼漾湿地	8月30日	1.16	2	1.16~1.11	8	2.41~1.86	6	1.86~1.46	5
贯泾港湿地	8月30日	0.98	3	3.30~2.30	3	2.30~1.69	9	1.69~1.43	3
长水塘湿地	8月28日	1.00	3	0.96~0.86	4	3.66~2.16	9	2.16~1.36	6
泰山港湿地	8月28日	1.16	3	3.98~3.78	5	3.85~3.65	5	3.65~3.55	6

水样中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N在中国科学院生态环境研究中心土壤分析测试中心用连续流动分析仪(SAN plus, Skalar Analytical B. V., Breda, the Netherlands)测定^[30]。氢氧同位素在中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室测定,所用仪器为美国Los Gatos Research(LGR)公司研发

的液态水同位素元素分析仪(型号908-0008)^[31],其测试精度δD≤1‰(1σ),δ¹⁸O≤0.3‰(1σ),所有样品均进行6次测试,为避免记忆效应,去掉前两次结果后取平均值。实验所用标准品信息如表3所示,所有测定结果均以相对于经过国际原子能机构(international atomic energy agency, IAEA)认可的维

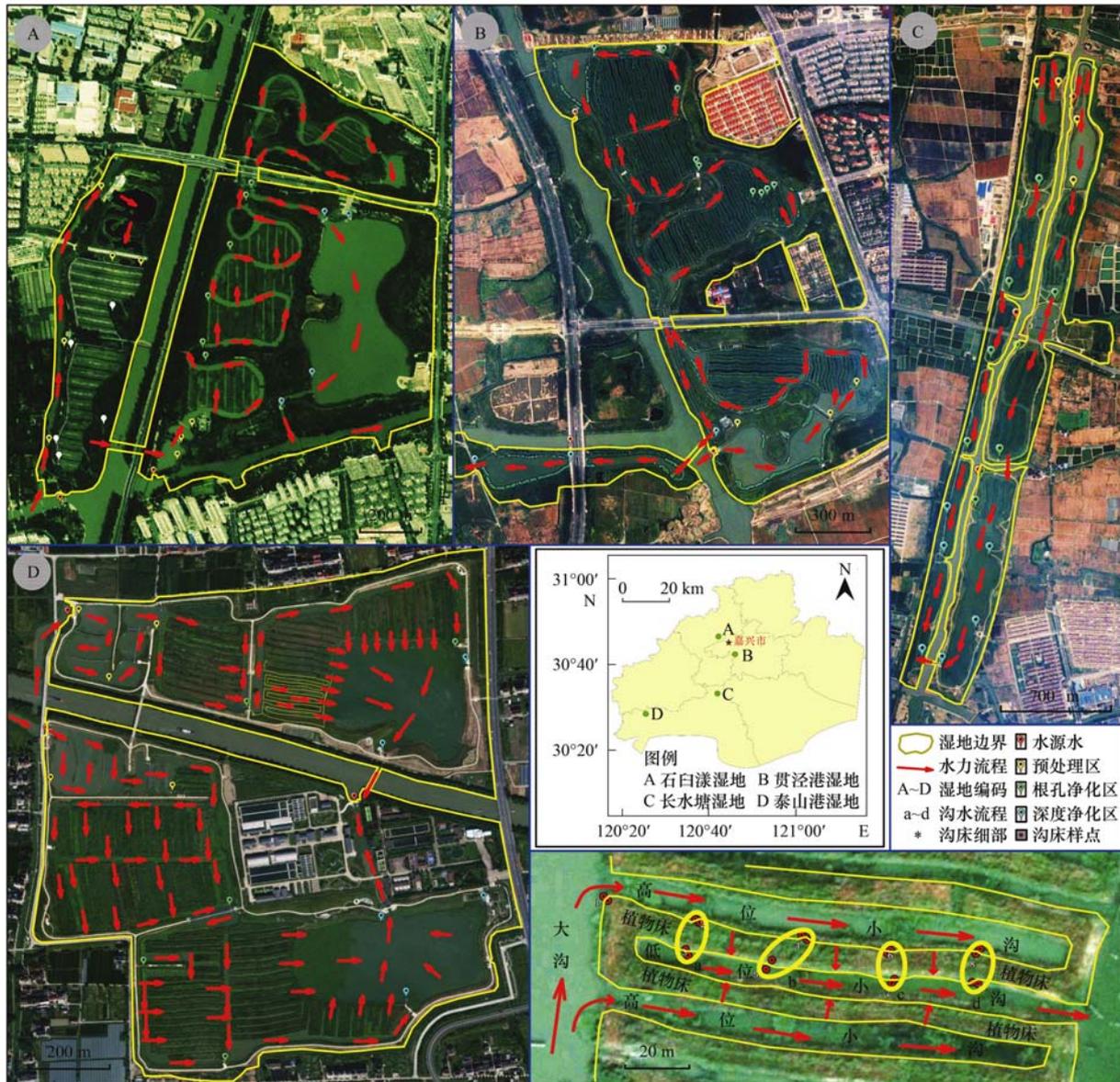
也纳标准海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta D = [(R_{D\text{-sample}}/R_{D\text{-VSMOW}}) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta^{18}O = [(R_{O\text{-sample}}/R_{O\text{-VSMOW}}) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中, $R_{D\text{-sample}}$ 为测试样品中 D 的同位素比率 $R(D/H)$,

$R_{D\text{-VSMOW}}$ 为标准样品中 D 的同位素比率 $R(D/H)$; $R_{O\text{-sample}}$ 为测试样品中 O 的同位素比率 $R(^{18}O/^{16}O)$, $R_{O\text{-VSMOW}}$ 为标准样品中 O 的同位素比率 $R(^{18}O/^{16}O)$.



湿地地图来自 Google Earth

图 2 研究区位置和采样点分布示意

Fig. 2 Location of study area and distribution of sampling points

表 3 氢氧同位素标准品丰度/‰

Table 3 Abundance of hydrogen and oxygen isotope standard/‰

标准名称	δD_{V-SMOW}	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$
1E	-165.7 ± 0.5	-21.28 ± 0.15
2E	-123.8 ± 0.5	-16.72 ± 0.15
3E	-79.6 ± 0.5	-11.04 ± 0.15
4E	-49.2 ± 0.5	-7.81 ± 0.15
5E	-9.9 ± 0.5	-2.99 ± 0.15

根据中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室野外(常熟站)测得的

同位素资料,通过简单线性回归建立大气降水线模型,并将研究区域的湿地水模型与之比较,探讨水同位素在区域降水和湿地区的运移差异.

基于仪器精度以及均数和标准差有效数值修约规则对上机数据进行修约, δD 和 $\delta^{18}O$ 的平均值和标准差均保留一位小数^[32,33]. 使用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理和初步分析,数据的描述性统计、频数分析、单变量分析、相关和回归分析、方差分析等采用国际标准统计分析软件 SAS for Windows 9.4 软件(SAS Institute, Inc., Cary NC,

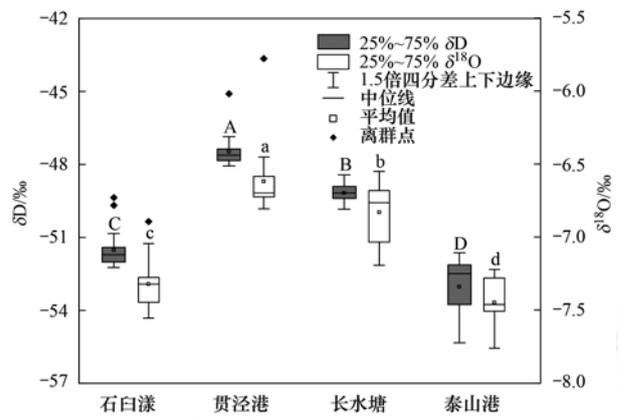
USA) 的 PROC MEANS、FREQ、UNIVARIATE、CORR、REG 和 GLM 等过程进行. 通过散点图研究发现氢氧同位素丰度及组成随水位高程和水力流程长度多呈非线性复杂变化, 在用非参数相关、逐步回归分析、灰色关联度分析等数理统计手段探索性解析这种复杂变化后, 采用机器学习方法中的随机森林回归模型来识别变化特征并对变量重要性进行选择, 随机森林模型的构建分析采用 R 语言^[34] 结合 randomForest^[35]、rPermute^[36] 和 A3^[37] 包实现和相互验证. 配对 *t* 检验采用 SAS PROC TTEST 过程 PAIRED 语句进行, 并预先进行配对的差值是否服从正态分布的假设检验. 多重比较采用新复极差法 (Duncan's new multiple range test, MRT). 若无特别说明, 统计学显著性水平指 α 为 0.05. 文中图形采用 AutoCAD 2018 (Autodesk, Inc., Mill Valley, CA, USA) 和 Origin 2019b (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) 等软件绘制.

2 结果与分析

2.1 4 个湿地氢氧同位素分布

对嘉兴河网地区 4 个水源生态湿地的水源水 (Sour)、预处理区 (PreT)、湿地根孔生态净化区 (MidT) 和深度净化区 (PosT) 上层水氢氧同位素进行测定后, 其结果如图 3 和图 4 所示. 从总体分布来看, δD 和 $\delta^{18}O$ 在 4 个湿地之间存在着显著性差异

(图 3), 其广义线性模型的决定系数 (R^2) 分别为 0.89 和 0.78 ($P < 0.0001$). 泰山港湿地与其它湿地相比 δD 和 $\delta^{18}O$ 最为贫化, δD 丰度为 $-53.0\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$ (均值 \pm 标准差, 下同), $\delta^{18}O$ 丰度为 $-7.5\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$. 贯泾港湿地其 δD 和 $\delta^{18}O$ 相对最为富集, δD 丰度为 $-47.5\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 丰度为 $-6.6\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$. 总体来看, 同处于京杭运河水系下的 4 个水源湿地其水同位素分布并不均匀, δD 变异系数为 -430.2% , $\delta^{18}O$ 变异系数为 -534.9% .

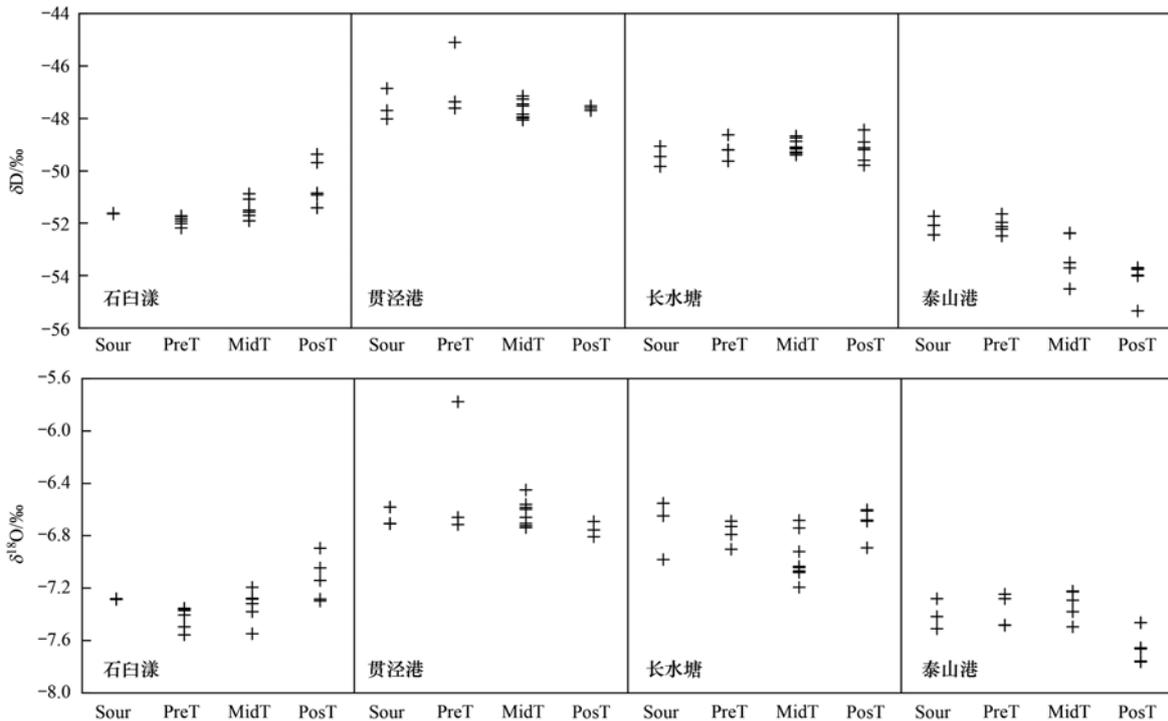


图中不同大写和小写字母分别表示 δD 和 $\delta^{18}O$ 在湿地之间差异显著

图 3 人工湿地 δD 和 $\delta^{18}O$ 总体分布

Fig. 3 Distribution of δD and $\delta^{18}O$ in the CWs

从水源水和不同功能区分布来看, 石白漾湿地和泰山港湿地其水源水 δD 和 $\delta^{18}O$ 偏负, 在经过湿



Sour 表示水源水, PreT 表示预处理区, MidT 表示湿地根孔生态净化区, PosT 表示深度净化区

图 4 4 个湿地水源水和不同功能区 δD 和 $\delta^{18}O$ 分布

Fig. 4 Distribution of δD and $\delta^{18}O$ in source water and functional areas of the CWs

地处理之后,各功能区 δD 和 $\delta^{18}O$ 丰度出现较大差异,而贯泾港湿地和长水塘湿地其水源水 δD 和 $\delta^{18}O$ 相对偏正,各功能区之间差异较小(图 4)。具体分析发现沿水力流程梯度 δD 和 $\delta^{18}O$ 的总体变化趋势呈现以下规律:①石臼漾湿地沿水力流程梯度 δD 和 $\delta^{18}O$ 有偏正趋势,其广义线性模型决定系数分别为 0.62 和 0.46 (P 分别为 0.0007 和 0.0127),在深度净化区(δD 为 $-50.5\% \pm 0.9\%$, $\delta^{18}O$ 为 $-7.1\% \pm 0.2\%$)出现较大的偏正变幅,并显著高于预处理区和湿地根孔生态净化区($P < 0.05$);②贯泾港湿地沿水力流程梯度 δD 和 $\delta^{18}O$ 变幅较小,无统计学显著性差异($P > 0.05$);③长水塘湿地沿水力流程梯度 δD 和 $\delta^{18}O$ 变幅亦较小,仅 $\delta^{18}O$ 在深度净化区显著高于湿地根孔生态净化区($P < 0.05$);④泰山港湿地沿水力流程梯度 δD 和 $\delta^{18}O$ 有偏负趋势,其广义线性模型决定系数分别为 0.70 和 0.56 (P 分别为 0.0003 和 0.0056),在深度净化区(δD 为 $-54.1\% \pm 0.6\%$, $\delta^{18}O$ 为 $-7.6\% \pm 0.1\%$)偏负变幅较大。

为了深度解析水氢氧同位素丰度和组成随水位高程(垂向维度)和水力流程长度(水平维度)的变化特征,采用非参数 Kendall's tau-b(肯德尔)等级相关、逐步回归、灰色关联度等多种数理统计手段结合散点图开展探索性分析,并做模型假设诊断分析(结果从略),发现在 4 个湿地的区域尺度和湿地内部的局域尺度其水氢氧同位素丰度及组成在垂向维度和水平维度大多呈现出复杂的非线性变化。进一步采用机器学习方法中的随机森林回归模型来识别这种变化特征并对变量重要性进行选择(表 4)。随机森林是一种比较新的机器学习模型(非线性基于

树的模型)集成学习方法。随机森林模型有着惊人的准确性,可以替代一般线性模型(线性回归和方差分析等)和广义线性模型(逻辑斯蒂回归和泊松回归)等^[38]。结果表明在 4 个湿地的区域尺度上,响应变量(δD 和 $\delta^{18}O$)均与预测变量(水位高程和水力流程长度)较密切相关,全模型总的方差解释率分别为 52.52% 和 37.31%,响应变量 δD 比 $\delta^{18}O$ 受预测变量的影响更大,而预测变量中水位高程的重要性高于水力流程长度的重要性(表 4)。但在湿地内部的局域尺度上,预测变量对响应变量的影响发生了分异(表 4)。在石臼漾湿地内部,水力流程长度的重要性高于水位高程的重要性, δD 受到 2 个预测变量的共同影响,而 $\delta^{18}O$ 仅受水力流程长度的显著影响。在贯泾港湿地内部,2 个预测变量对 2 个响应变量的影响均较弱,总方差解释率均为负值。在长水塘湿地内部,仅水位高程对 $\delta^{18}O$ 丰度变化产生显著影响。在泰山港湿地内部,2 个预测变量仅对 δD 影响显著,且水力流程长度的重要性高于水位高程的重要性。根据采用 R 语言中 A3 包计算输出的结果,在 4 个湿地的区域尺度上, δD 和 $\delta^{18}O$ 与水位高程之间的平均斜率分别为 -0.133 和 -0.0369 (均为负值),在湿地内部的局域尺度上, δD 和 $\delta^{18}O$ 与水位高程之间的平均斜率范围为 $-0.0534 \sim 0.264$ (有负有正),这说明在区域尺度上水氢氧同位素倾向富集在水势低洼处,换句话说,在较大区域的水势低洼处水中重的氢氧同位素呈现浓缩富集特征,而在局域尺度这种变化趋势并不确切。上述结果暗示在区域尺度上,垂向维度的水位高程较水平维度的水力流程长度对水同位素分布影响更大,而在局域尺度上,水力流程驱动的影响往往更大。

表 4 氢氧同位素与水位高程和水力流程长度关系的随机森林回归模型结果¹⁾

Table 4 Random forest regression of hydrogen and oxygen isotopes with water level elevation and hydraulic flow pathway length

湿地	响应变量	总方差解释率 /%	全模型显著性 P 值	预测变量重要性得分之均方 误差增加/%	预测变量显著性 P 值
4 个湿地	δD	52.52	<0.001	水位高程: 63.99; 水力流程: 20.37	水位高程: 0.001; 水力流程: 0.025
	$\delta^{18}O$	37.31	0.003	水位高程: 48.02; 水力流程: 21.34	水位高程: 0.001; 水力流程: 0.015
石臼漾湿地	δD	59.73	<0.001	水位高程: 20.20; 水力流程: 25.74	水位高程: 0.007; 水力流程: 0.001
	$\delta^{18}O$	32.82	0.002	水位高程: 12.76; 水力流程: 26.21	水位高程: 0.066; 水力流程: 0.001
贯泾港湿地	δD	-27.28	0.288	水位高程: 6.79; 水力流程: 9.06	水位高程: 0.325; 水力流程: 0.169
	$\delta^{18}O$	-34.29	0.265	水位高程: 2.53; 水力流程: -0.34	水位高程: 0.520; 水力流程: 0.677
长水塘湿地	δD	-53.07	0.456	水位高程: -2.16; 水力流程: -6.69	水位高程: 0.631; 水力流程: 0.792
	$\delta^{18}O$	37.61	0.010	水位高程: 33.35; 水力流程: 1.43	水位高程: 0.001; 水力流程: 0.396
泰山港湿地	δD	61.92	0.001	水位高程: 19.70; 水力流程: 29.92	水位高程: 0.015; 水力流程: 0.003
	$\delta^{18}O$	-25.46	0.312	水位高程: 4.93; 水力流程: -0.45	水位高程: 0.306; 水力流程: 0.499

1) 全模型总方差解释率、预测变量重要性得分(标准化后的得分)之均方误差增加百分数和预测变量显著性 P 值由 R 语言 rfPermute 包计算得出,全模型显著性 P 值由 R 语言 A3 包采用生成 500 棵决策树并基于 1 000 次随机置换获得对 P 值的估计得出

2.2 4 个湿地氢氧同位素特征

Craig^[39]首次引入全球大气降水线(GMWL),其

公式为 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ($R^2 > 0.95$),后来被学者们用于研究识别起源于大气降水的地表水和地下水等

的水循环相关过程,大气降水线斜率能够反映氢氧同位素分馏程度大小,截距表示氘相对于平衡状态的偏离程度. 本文研究的区域邻近中国大气降水同位素观测网络(CHNIP)布设的常熟站点,根据中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室野外(常熟站)测得的同位素资料,建立 δD 与 $\delta^{18}O$ 的线性关系式为 $\delta D = 8.8\delta^{18}O + 14.0$ ($n = 21$, 校正 $R^2 = 0.86$), 以此作为当地大气降水线(LMWL), 其斜率和截距均高于全球大气降水线, 表明该区域降水主要来自海洋水汽^[40]. 从图 5 中看出嘉兴研究区 8 月的湿地水同位素关系式为 $\delta D = 5.2\delta^{18}O - 13.8$ ($n = 85$, 校正 $R^2 = 0.81$), 其斜率和截距均小于 GMWL 以及 LMWL, 表明夏季湿地水在河道和沟壕中受到较为强烈的蒸发. 图 6(a) 中石臼漾湿地内部 δD 范围为 $-52.2\text{‰} \sim -49.4\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 范围为 $-7.6\text{‰} \sim -6.9\text{‰}$, 氢氧同位素关系式为 $\delta D = 4.0\delta^{18}O - 22.3$; 贯泾港湿地内部 δD 范围为 $-48.1\text{‰} \sim -45.1\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 范围为 $-6.8\text{‰} \sim -5.8\text{‰}$, 氢氧同位素关系式为 $\delta D = 2.5\delta^{18}O - 31.0$; 长水塘湿地内部 δD 范围为 $-49.8\text{‰} \sim -48.4\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 范围为 $-7.2\text{‰} \sim -6.6\text{‰}$, 氢氧同位素关系式为 $\delta D = 0.048\delta^{18}O - 48.8$; 泰山港湿地内部 δD 范围为 $-55.3\text{‰} \sim -51.6\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 范围为 $-7.8\text{‰} \sim -7.2\text{‰}$, 氢氧同位素关系式为 $\delta D = 2.5\delta^{18}O - 34.3$.

氘盈余(氘过量, d -excess)最早由 Dansgaard 等^[41]提出并定义为: d -excess (‰) = $\delta D - 8\delta^{18}O$, 用于反映氢氧同位素组成偏离全球大气降水线的程度, d 值越大, 反映出蒸发的速率也越大. 石臼漾、贯泾港、长水塘和泰山港湿地内部的氘盈余分别为:

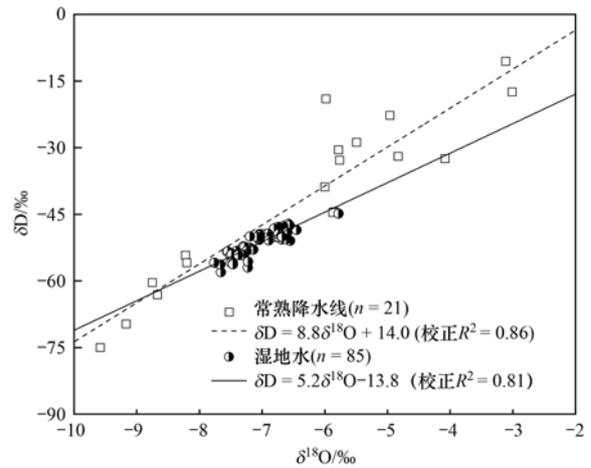


图 5 常熟降水与研究区湿地水的 δD - $\delta^{18}O$ 关系线
Fig. 5 Local meteoric water line (LMWL) and the wetland water line in the study area

$7.1\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$ (中位数 7.3‰ , 四分差 0.9‰)、 $5.4\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$ (中位数 5.9‰ , 四分差 0.9‰)、 $5.6\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$ (中位数 5.2‰ , 四分差 2.8‰) 和 $6.5\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$ (中位数 6.3‰ , 四分差 1.6‰). 湿地的水源水、预处理区、湿地根孔生态净化区和深度净化区的氘盈余均值(中位数)分别为: 5.9‰ (6.2‰)、 6.3‰ (6.6‰)、 6.2‰ (6.3‰) 和 6.0‰ (5.9‰). 氘盈余在湿地内部高于水源水, 且从预处理区至湿地根孔生态净化区再至深度净化区逐步降低. 湿地内部水力流程蜿蜒曲折以及功能区和结构单元串并联形式多样, 通过导流、截留、吸附、混合和沉淀等作用使得水同位素在不同单元的富集程度不等. 整体来说, 嘉兴地区这 4 个水源人工湿地的氘盈余绝对值处于相对较低的水平, 且在湿地内部发生分异.

2.3 湿地植物床-沟壕系统水同位素分布特征

对植物床-沟壕系统中水同位素分布特征的研

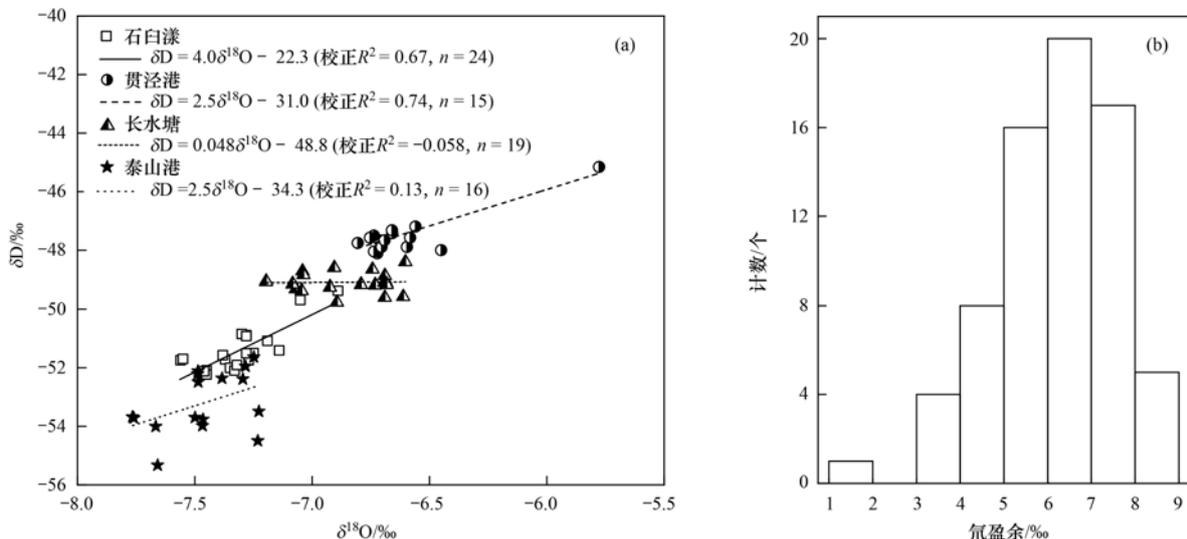


图 6 湿地水氢氧同位素散点图及氘盈余直方图

Fig. 6 Scatter diagram of δD and $\delta^{18}O$ and a histogram of d -excess in wetland water

究重点是在泰山港湿地展开的. 所选植物床-沟壕系统内氮素营养盐配对 t 检验结果显示(表 5), 低位小沟沟水中 NO_3^- -N 质量浓度与高位小沟沟水中 NO_3^- -N 质量浓度无显著差异, 但低位小沟沟水中 NH_4^+ -N 质量浓度却显著低于高位小沟沟水中 NH_4^+ -N 质量浓度(P 为 0.002 0). 在植物床内部, 虽

然统计学上不显著, 但自高位小沟潜水端至低位小沟潜水端, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量浓度仍然呈现降低趋势, 表明沟水在经过植物床过滤渗出的过程中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 等营养盐得以削减. 在现场亦能很清楚地观察到: 与高位小沟相比, 低位小沟沟水更加清澈, 水生动植物更加丰富多样.

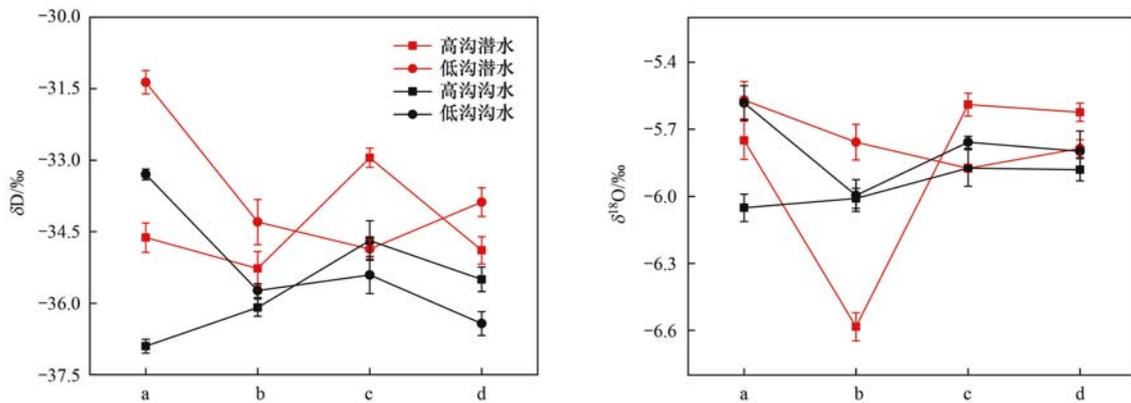
表 5 植物床-沟壕系统 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 质量浓度统计特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 5 Statistical characteristics of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the plant-bed/ditch system/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	位置	均值 \pm 标准差	配对 t 检验		
			差值均值 \pm 标准差	t 值	P 值
NH_4^+ -N	低位小沟沟水/高位小沟沟水	0.16 \pm 0.07/0.28 \pm 0.09	-0.12 \pm 0.02	-10.14	0.002 0
NO_3^- -N	低位小沟沟水/高位小沟沟水	1.77 \pm 0.49/1.66 \pm 0.64	0.12 \pm 0.96	0.24	0.822 9
NH_4^+ -N	低位小沟潜水/高位小沟潜水	0.12 \pm 0.05/0.21 \pm 0.12	-0.09 \pm 0.17	-1.04	0.373 9
NO_3^- -N	低位小沟潜水/高位小沟潜水	1.28 \pm 0.80/1.68 \pm 0.51	-0.40 \pm 1.15	-0.70	0.532 8

所选研究区域的湿地水由溢流堰跌水后其水动力较大和流速较快, 首先流入大沟, 然后沿水力坡度从大沟流入高位小沟再通过植物床渗滤后流入低位小沟, 之后沿 a~d 方向流动(如图 2 中星号所示). 水氢氧同位素在水流动过程中在植物床-沟壕系统各部分呈现出分异态势(图 7). 结果表明在高位小沟中由 a~d 方向沟水中 δD 逐渐偏正, 在低位小沟中由 a~d 方向沟水中 δD 逐渐偏负, 显然水经过植物床-沟壕系统过滤净化后, 流向深度净化区的水中 δD 偏负, 而高位小沟沟水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较低位小沟沟水中

$\delta^{18}\text{O}$ 偏负, 这也表明植物床-沟壕系统对水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响不同. 进一步分析发现在靠近植物床-沟壕系统 b 断面部分水同位素表现出先富集后贫化的态势, 一方面可能在 a~b 这部分水流因离堵头等水工构筑物(如图 1 和图 2 所示)较近, 且植物床后半部分低位小沟一侧出水后, 会造成其水力流动相对缓慢并伴随着水同位素的富集; 另一方面极有可能是人工湿地植物床会出现物理、化学和生物作用的拐点(b 断面前后), 这也成为后期湿地内部水质净化研究需要重点关注的区域.



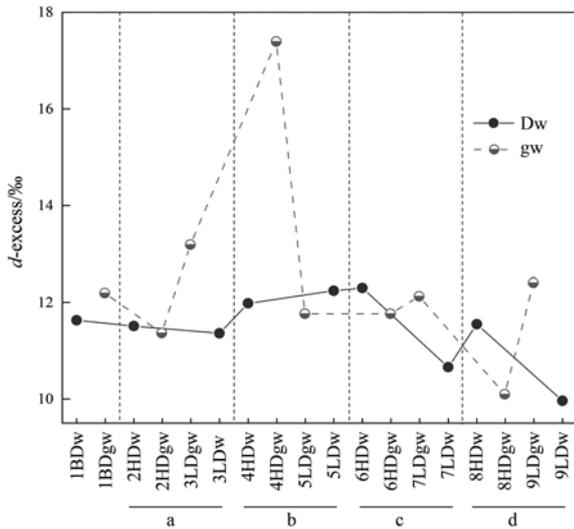
横轴字母 a~d 对应图 2 中星号所示区域采样断面

图 7 湿地根孔生态净化区水同位素分布

Fig. 7 Distribution of hydrogen and oxygen isotopes in the wetland root-channel ecological purification zone

对湿地根孔生态净化区植物床-沟壕系统内的氩盈余进行分析, 结果表明与大沟沟水相比, 自 a~d 断面(如图 2 星号所示区域), 高位、低位小沟沟水中氩盈余呈现出在 a 断面降低、至 b~c 断面升高、再到 c~d 断面降低的趋势(图 8), 在 9 号点低位小沟沟水中氩盈余为 1 号点大沟沟水中相应值的 85.6%. 与沟水相比, 植物床部分其潜水中氩盈余明显高于相邻沟水中的值, 特别是在 4 号点的高沟潜水中, 其次是 3 号点和 9 号点的低沟潜水中(图 8).

这说明在沟壕表流运移系统中氩盈余的主要富集区为 b~c 断面交界处, 即在沟壕中段弧形拐弯处(图 2)发生水流运移和物质沉降行为的空间转折. 而在植物床亚表层潜流运移系统的潜水中氩盈余的富集在 4 个断面交界处、高沟潜水和低沟潜水中均有发生. 植物床内部因为根孔大孔隙系统的各向异性, 其潜水中氩盈余分布呈现较明显的空间异质性, 其氩盈余变异系数高达 1 622.4%, 而在沟壕系统中氩盈余变异系数为 655.5%.



d-excess 表示氘盈余;横轴字母 a~d 对应图 2 中星号所示区域采样断面;横轴数字 1~9 对应图 2 中星号所示区域采样点编号;Dw 表示沟水,gw 表示潜水,BDw 表示大沟沟水,BDgw 表示大沟潜水,HDw 表示高沟沟水,HDgw 表示高沟潜水,LDw 表示低沟沟水,LDgw 表示低沟潜水

图 8 湿地根孔生态净化区氘盈余分布

Fig. 8 Distribution of *d*-excess in the CWs root-channel ecological purification zone

3 讨论

3.1 4 个湿地氢氧同位素分异机制

本文聚焦以根孔为核心构筑的人工湿地和植物床-沟壕系统水同位素的分布特征.结果初步揭示了 δD 和 $\delta^{18}O$ 在 4 个湿地以及不同功能区之间存在着显著性差异(图 3 和图 4),影响水同位素丰度因素

很多,如:水汽源、温度效应、大陆效应、高度效应、纬度效应和雨量效应^[41].从以新塍塘和北郊河作为水源水的石臼漾湿地到以海盐塘和南郊河作为水源水的贯泾港湿地,其水同位素逐渐偏正,由北向南呈现富集特征;从以长水塘作为水源水的长水塘湿地到以盐官下河(泰山港)作为水源水的泰山港湿地,其水同位素表现为由西向东逐渐富集的特征(图 2、图 3 和图 9).从空间距离来看(图 9),石臼漾湿地与泰山港湿地相距最远(直线距离约为 40~44 km),但相较于另外两个湿地其水同位素丰度更为接近,极可能是此两处湿地离京杭大运河主干流距离较近,其水源水引入了京杭大运河的流量很大的主干流河网水.石臼漾湿地与贯泾港湿地相距较近(直线距离约为 9~12 km),但因贯泾港湿地距离京杭运河主干流较远,且引入了经南湖等城区河湖水系混合后较重的河网水,所以两湿地水同位素丰度相差很大.此外,湿地引入的水源水中来源于京杭运河主干流的水经过多次分流和混合后,水中重同位素增加,所以图 3 中“泰山港-长水塘-贯泾港”湿地水同位素丰度呈现逐渐增加趋势.综合分析认为,河网水同位素时空变化很大程度上受到不同水源补给以及蒸发富集作用的影响,大致符合我国大气降水同位素组成变化由内陆向沿海地区呈富集趋势的变化规律^[31].

图 5 中湿地水同位素大体分布于 LMWL 线上,表明降水对水同位素有一定的影响,但是对于永久性湿地其影响程度十分弱^[14],且由于湿地面积相对

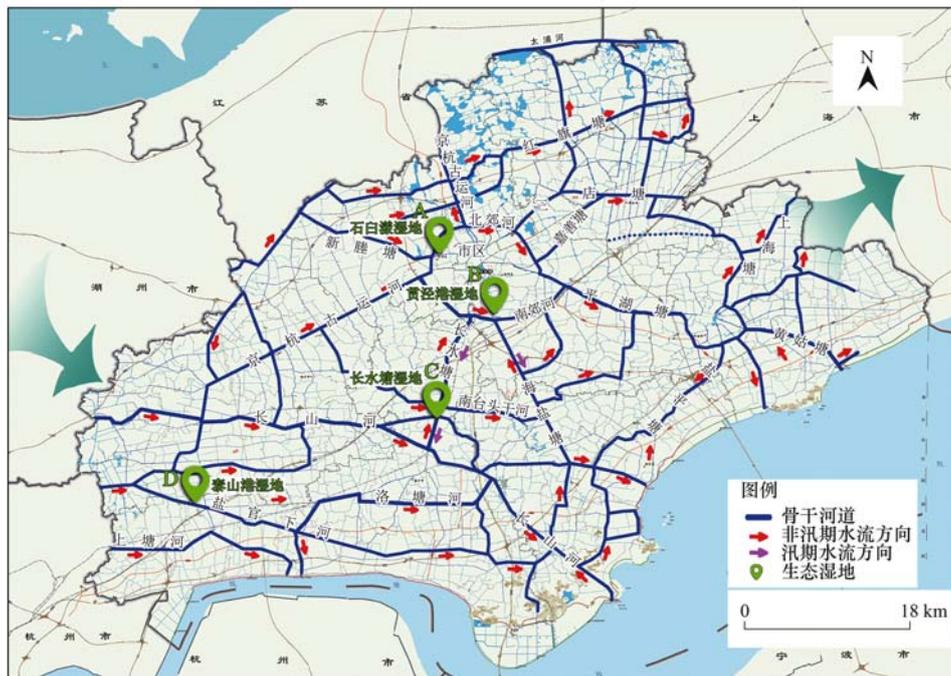


图 9 研究区人工湿地所处水系

Fig. 9 Stream system of the CWs

于水系流域面积较小,降水对其各个功能区的影响几乎是一致的^[16].在人工湿地停滞区和死水区,由于水停留时间较长,相对地蒸发会变高,重同位素会有所富集,但是在短流区,累积蒸发量低,重同位素相对贫乏^[27].通过探究湿地各个功能区(图6)水同位素特征来进一步了解湿地水流流态.石臼漾湿地和长水塘湿地其深度净化区的面积占比较大,水体开阔且水面无明显植被覆盖,水流较缓慢,进而蒸发作用较其他功能区强,湿地出水同位素相对偏正.贯泾港湿地其深度净化区的面积占比小,但采集水样时该区有浮萍(*Lemna minor* L.)、喜旱莲子草[*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb (*Cucholzia philoxeroides* Mart.)]、凤眼莲(*Eichhornia crassipes* Solms.)和粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc.)等浮水植物漂浮,导致局部缓流^[42,43],重的同位素相对富集,进而水同位素表现偏正.由于泰山港湿地的深度净化区面积相对较小,且海宁市水厂需水量较大,更替快,无缓流,进而深度净化区的水同位素偏负.因此可以通过同位素示踪快速找出湿地阻塞区或缓滞区后,安排人员疏通、清淤或强化水体混合流转等,最大程度发挥湿地生态净化功能.

3.2 植物床-沟壕系统中水同位素分异机制

湿地根孔生态净化区的植物床-沟壕系统分异态势明显(图7).湿地芦苇根孔等庞大的大孔隙网络可以看作是植物床与沟壕系统之间的连通器,可将水分导入植物床床体,使得植物床-沟壕系统内部稳定性高且具有强大的缓冲容量^[29].水分再分配对土壤-植物系统养分循环有极大的影响^[44],根系发达的芦苇组成的地下大孔隙网络会吸收来自不同土层水分并将水分提升至表层,使得表层土壤湿度增加^[8,45],加快了土壤表层干-湿循环,而后地下水和湿地水会对不同土层进行水分补给.土壤水同位素受补给源、交换混合以及蒸发等的影响,水中 δD 随土层深度增加而减小^[46].此外,地形和基岩能够影响水分子流动^[47],富含粘土的基质会增加水的停留时间,使得粘土表面可交换氢与渗入的“新水”中氢充分交换^[48~50],最终从低位小沟一侧流出的水中 δD 值偏负,所以高位小沟沟水中 δD 从a~d方向有逐渐偏正趋势,低沟沟水中 δD 从a~d则逐渐偏负(图7).土壤中的水与碳酸盐会发生氧置换后使得水中 $\delta^{18}O$ 偏正^[51],这与研究中高位小沟的水经植物床流入低位小沟后,水的 $\delta^{18}O$ 表现偏正趋势是一致的.由以上分析可推断出湿地水同位素分布特征主要受水源水的来源、植被覆盖度和水流状态等因素的影响,且流经湿地植物床-沟壕系统后水中 δD 会

偏负.

3.3 植物床-沟壕系统水同位素季节性变化机制

氘盈余主要反映了降水蒸发冷凝的不平衡程度,会受到水汽源、温度、相对湿度以及回返大陆的蒸发蒸汽的影响^[52].由海洋蒸发的水汽形成的降水的氘盈余较低,水同位素偏负;由大陆蒸发水汽形成降水的氘盈余较高,水同位素偏正^[53].从图6(b)可以看出湿地内部沿水力流程梯度,氘盈余主要集中在分布于5‰~8‰,低于全球平均值,一方面是海洋大气团经过长距离传输到内陆其 $\delta^{18}O$ 和 δD 会降低^[41],另一方面处于覆盖率高的水源型湿地内水蒸发速率相对较低.就泰山港湿地植物床-沟壕系统(为统一比较,不含潜水样品)水氢氧同位素和氘盈余绝对值而言,与夏季湿热雨季相比,在冬季干冷时节,湿地根孔生态净化区的 δD 和 $\delta^{18}O$ 均有偏正趋势,其 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别从夏季的 $-53.3‰ \pm 0.9‰$ 和 $-7.3‰ \pm 0.1‰$ (n 为5)升至冬季的 $-35.6‰ \pm 1.1‰$ 和 $-5.9‰ \pm 0.2‰$ (n 为9),从而导致氘盈余从夏季的 $5.3‰ \pm 1.4‰$ 升至冬季的 $11.5‰ \pm 0.8‰$.夏季 δD 与 $\delta^{18}O$ 相关性不显著(Pearson相关系数为 -0.21 , P 为 0.7323),而冬季 δD 与 $\delta^{18}O$ 呈显著正相关(Pearson相关系数为 0.79 , P 为 0.0110),这反映了湿地水氢氧同位素在不同季节其分馏行为产生了显著分异.氘盈余作为确定水分来源的重要因子之一,在季风季和非季风季其水汽来源存在显著差异^[54].就本研究而言,在冬季,湿地根孔生态净化区氘盈余观测值大于10‰,表明非季风季节大陆来源水贡献可能较大.相反地,在夏季,季风季节氘盈余小于10‰,主要反映的是亚热带天气系统形成的夏季风雨特征,亦表明通过蒸散作用的海洋对水分来源贡献率大.

本研究未解析出水同位素(δD 和 $\delta^{18}O$)分异与湿地运行周期(时间跨度大约为2~11a)之间的明显关系,这与水的瞬态性以及这4个水源生态湿地的过水通量($20 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)很大有密切关系.此外,本研究仅是对湿地流态进行一种定性或半定量研究,还需要结合其他方法如acoustic Doppler velocimeters(ADVs)探测技术、理化性质测定和分子技术手段等来量化佐证并进一步重点解析湿地根孔核心区域单元,为水质净化和水质安全保障提供依据和支撑.今后的研究重点将会对该区域的大气降水和其他水域(地下水和河水等)进行空间以及时间序列分析,以期在更大尺度上完善湿地水运行效果以及深度剖析嘉兴平原河网地区的多水转换关系.

4 结论

对以生态根孔技术为核心的水源型人工湿地中水氢氧同位素分异特征开展研究,结果表明:湿地区水体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系为 $\delta\text{D} = 5.2\delta^{18}\text{O} - 13.8$,表明区域性水体蒸发作用较大.从面上,揭示了4个水源生态湿地中水同位素沿水力流程梯度的分布特征,发现湿地根孔生态净化区中氢氧同位素呈现富集偏正趋势;进一步揭示了区域尺度和局域尺度氢氧同位素在垂向维度和水平维度的复杂非线性变化特征,发现在区域尺度上垂向维度的水位高程较水平维度的水力流程长度对水同位素分布的影响更大,而在局域尺度上水力流程驱动则常发挥主导作用.从点上,剖析了湿地植物床-沟壕系统中水同位素的分布特征,阐释了水经过该系统其 δD 会因根孔系统截留吸附、深层低氘水混合和粘土表面氢交换等作用而变得偏负的机制.此外,还探索了湿地氘盈余特征,发现湿地根孔生态净化区氘盈余呈现夏季偏负和冬季偏正的季节性差异,而且植物床-沟壕系统内部存在显著的同位素空间分馏现象.本研究通过稳定同位素技术来揭示湿地水同位素分布特征和影响机制,间接显示稳定同位素技术在剖析湿地水文学方面的稳健潜力.

致谢:本研究得到中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室提供常熟站数据支持,在此表示诚挚谢意! 特别感谢嘉兴和海宁的4个湿地的运营者和管理室工作人员对野外实验和采样工作的大力支持,以及中国科学院生态环境研究中心袁庆科特别研究助理在湿地采样中的帮助和嘉兴求源检测技术有限公司的工作人员对工作的支持.

参考文献:

- [1] Maiga Y, von Sperling M, Mihelcic J. Constructed wetlands [EB/OL]. <http://www.waterpathogens.org/book/constructed-wetlands>, 2017-03-22.
- [2] Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands[M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1996.
- [3] Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment [J]. Ecological Engineering, 2005, 25(5): 478-490.
- [4] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1489-1498.
Cheng S P, Wang Y Y, Wu J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1489-1498.
- [5] Wang W D, Wang D L, Yin C Q. A field study on the hydrochemistry of land/inland water ecotones with reed domination[J]. Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, 2002, 30(2-3): 117-127.
- [6] Wang W D, Yin C Q. The boundary filtration effect of reed-dominated ecotones under water level fluctuations[J]. Wetlands Ecology and Management, 2008, 16(1): 65-76.
- [7] 王为东, 王大力, 尹澄清, 等. 芦苇型湿地生态系统的潜水水质状态研究[J]. 生态学报, 2001, 21(6): 919-925.
Wang W D, Wang D L, Yin C Q, et al. A study on the groundwater quality of the Baiyangdian wetland ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 919-925.
- [8] 王为东, 汪仲琼, 李静, 等. 人工湿地生态根孔技术及其应用[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 43-50.
Wang W D, Wang Z Q, Li J, et al. The constructed root channel technology and its application in constructed wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 43-50.
- [9] Winter T C, LaBaugh J W. Hydrologic considerations in defining isolated wetlands[J]. Wetlands, 2003, 23(3): 532-540.
- [10] 章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 105-115.
Zhang G X, Yin X R, Feng X Q. Review of the issues related to wetland hydrology research[J]. Wetland Science, 2008, 6(2): 105-115.
- [11] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Gu W Z, Pang Z H, Wang Q J, et al. Isotope hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [12] 王亚俊, 宋献方, 马英, 等. 北京东南郊再生水灌区不同水体氢氧同位素特征及成因[J]. 地理研究, 2017, 36(2): 361-372.
Wang Y J, Song X F, Ma Y, et al. Characterizing the hydrogen and oxygen isotopic compositions of different waters at reclaimed water irrigated district in southeast suburb of Beijing [J]. Geographical Research, 2017, 36(2): 361-372.
- [13] Zhao L J, Xiao H L, Zhou M X, et al. Factors controlling spatial and seasonal distributions of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(1): 143-152.
- [14] Brooks J R, Mushet D M, Vanderhoof M K, et al. Estimating wetland connectivity to streams in the prairie pothole region: an isotopic and remote sensing approach [J]. Water Resources Research, 2018, 54(2): 955-977.
- [15] Brock B E, Wolfe B B, Edwards T W D. Characterizing the hydrology of shallow floodplain lakes in the Slave River Delta, NWT, Canada, using water isotope tracers [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2007, 39(3): 388-401.
- [16] Ronkanen A K, Kløve B. Use of stable isotopes and tracers to detect preferential flow patterns in a peatland treating municipal wastewater[J]. Journal of Hydrology, 2007, 347(3-4): 418-429.
- [17] 刘澄静, 角媛梅, 刘歆, 等. 基于氢氧稳定同位素的哈尼水稻梯田湿地水源补给分析[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3092-3099.
Liu C J, Jiao Y M, Liu X, et al. Analysis on water supply of Hani Rice Terrace wetland based on stable hydrogen and oxygen isotopes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 3092-3099.
- [18] Gao H, Lan W, Sun H M, et al. Annual study of hydraulic characteristics in surface flow constructed wetlands using hydrogen and oxygen stable isotope technology [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(23): 29502-29511.
- [19] 杨林, 郭晓爽, 周越, 等. 不同停留时间下复合流人工湿地沿程净化效果的研究[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(6): 1341-1346.
Yang L, Guo X S, Zhou Y, et al. A study on the effect of along

- purification in hybrid flow constructed wetlands under different residence time[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, **35**(6): 1341-1346.
- [20] Nahlik A M, Mitsch W J. Spatial and temporal changes of soil properties in the experimental wetlands in 2003[R]. Olentangy River Wetland Research Park, Environmental Science Graduate Program, The Ohio State University, 2004. 85-92.
- [21] 郑军, 马欣堂, 周岚, 等. 饮用水源人工湿地运行初期水生植物繁衍研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2247-2253. Zheng J, Ma X T, Zhou L, *et al.* Development characteristics of aquatic plants in a constructed wetland for treating urban drinking water source at its initial operation stage [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2247-2253.
- [22] 沈亚强, 魏宏斌, 程旺大, 等. 嘉兴市石臼漾水源生态湿地运行过程中植物多样性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2883-2890. Shen Y Q, Wei H B, Cheng W D, *et al.* Diversity of plant in Jiaying Shijiuyang ecological wetland for drinking water during operation[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2883-2890.
- [23] 张玮, 王为东, 王丽卿, 等. 嘉兴石臼漾湿地冬季浮游植物群落结构特征[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(9): 2431-2437. Zhang W, Wang W D, Wang L Q, *et al.* Phytoplankton community structure in Shijiuyang constructed wetland of Jiaying, Zhejiang Province of East China in winter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(9): 2431-2437.
- [24] 王宝玲, 王丽卿, 张玮, 等. 构筑根孔湿地夏季浮游植物群落结构特征[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(4): 2109-2121. Wang B L, Wang L Q, Zhang W, *et al.* Phytoplankton community structure in constructed root-channel wetlands in summer [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(4): 2109-2121.
- [25] 汪仲琼, 王为东, 祝贵兵, 等. 人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较[J]. *生态学报*, 2011, **31**(16): 4489-4498. Wang Z Q, Wang W D, Zhu G B, *et al.* A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(16): 4489-4498.
- [26] Wang W D, Su Y, Wang B L, *et al.* Spatiotemporal shifts of ammonia-oxidizing archaea abundance and structure during the restoration of a multiple pond and plant-bed/ditch wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **684**: 629-640.
- [27] Sun H M, Hu Z, Zhang J, *et al.* Determination of hydraulic flow patterns in constructed wetlands using hydrogen and oxygen isotopes [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, **223**: 775-780.
- [28] 嘉兴市水利局. 水利概况 [EB/OL]. <http://slj.jiaxing.gov.cn/col/col1506253/index.html>, 2020-05-11.
- [29] 王为东. 芦苇型水陆交错带中根孔结构及其影响下的水化学研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(生态环境研究中心), 2002. Wang W D. Studies on the root channels and hydrochemistry of reed-dominated land/inland water ecotone in Baiyangdian Lake [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Center for Eco-Environmental Sciences), 2002.
- [30] 孙辰, 邓峥, 赵通达, 等. 连续流动分析仪测定水中硝酸盐氮及亚硝酸盐氮[J]. *内蒙古水利*, 2018, (6): 13-14.
- [31] 李静, 吴华武, 周永强, 等. 长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1176-1183. Li J, Wu H W, Zhou Y Q, *et al.* Variations of stable oxygen and deuterium isotopes in river and lake waters during flooding season along the middle and lower reaches of the Yangtze River regions [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1176-1183.
- [32] 张自超, 丁梯平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. *岩矿测试*, 2000, **19**(1): 77-79. Zhang Z C, Ding T P. Data processing and expression for analytical results in isotope geology [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2000, **19**(1): 77-79.
- [33] 赵一鸣, 曾琳, 李楠. 均数和标准差应保留几位小数[J]. *中华眼科杂志*, 2013, **49**(11): 1056.
- [34] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing [EB/OL]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>, 2020-06-22.
- [35] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomForest [J]. *R News*, 2002, **2-3**: 18-22.
- [36] Archer E. rfPermute: estimate permutation *p*-values for random forest importance metrics [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=rfPermute>, 2020-02-23.
- [37] Fortmann-Roe S. Consistent and clear reporting of results from diverse modeling techniques: the A3 method [J]. *Journal of Statistical Software*, 2015, **66**(7): 1-23.
- [38] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. *应用昆虫学报*, 2013, **50**(4): 1190-1197. Li X H. Using "random forest" for classification and regression [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, **50**(4): 1190-1197.
- [39] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [40] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [41] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [42] 马菁, 宋维峰, 吴锦奎, 等. 元阳梯田水源区林地降水与土壤水同位素特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(2): 243-248, 254. Ma J, Song W F, Wu J K, *et al.* Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation and soil water in woodland in water source area of Yuanyang Terrace [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(2): 243-248, 254.
- [43] Zhai L, Wang X, Wang P, *et al.* Vegetation and location of water inflow affect evaporation in a subtropical wetland as indicated by the deuterium excess method [J]. *Ecohydrology*, 2019, **12**(4), doi: 10.1002/eco.2082.
- [44] 苏华, 刘伟, 李永庚. 水分再分配对土壤-植物系统养分循环的生态意义[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(9): 1019-1028. Su H, Liu W, Li Y G. Ecological implications of hydraulic redistribution in nutrient cycling of soil-plant system [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(9): 1019-1028.
- [45] Hawkins H J, Hettasch H, West A G, *et al.* Hydraulic redistribution by *Protea* 'Sylvia' (Proteaceae) facilitates soil water replenishment and water acquisition by an understorey grass and shrub [J]. *Functional Plant Biology*, 2009, **36**(8): 752-760.
- [46] 靳宇蓉, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(4): 792-801. Jin Y R, Lu K X, Li P, *et al.* Research on soil water movement based on stable isotopes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(4): 792-801.
- [47] Cervi F, Dadomo A, Martinelli G. The analysis of short-term

- dataset of water stable isotopes provides information on hydrological processes occurring in large catchments from the northern Italian Apennines[J]. *Water*, 2019, **11**(7), doi: 10.3390/w11071360.
- [48] Niu H, Liang X, Lu G P, *et al.* A study of clay pore water and sporopollens for characterizing paleoenvironments in the Hebei Plain, northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, **143**: 1-10.
- [49] Li J, Liang X, Jin M G, *et al.* Geochemistry of clayey aquitard pore water as archive of paleo-environment, western Bohai Bay [J]. *Journal of Earth Science*, 2015, **26**(3): 445-452.
- [50] Zhang B, Song X F, Zhang Y H, *et al.* The relationship between and evolution of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(12): 8333-8343.
- [51] Meißner M, Köhler M, Schwendenmann L, *et al.* Soil water uptake by trees using water stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$)-a method test regarding soil moisture, texture and carbonate [J]. *Plant and Soil*, 2014, **376**(1-2): 327-335.
- [52] Vodila G, Palesu L, Futó I, *et al.* A 9-year record of stable isotope ratios of precipitation in Eastern Hungary; Implications on isotope hydrology and regional palaeoclimatology [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **400**(1-2): 144-153.
- [53] Harvey F E. Stable hydrogen and oxygen isotope composition of precipitation in northeastern Colorado [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, **41**(2): 447-460.
- [54] Garaga R, Chakraborty S, Zhang H L, *et al.* Influence of anthropogenic emissions on wet deposition of pollutants and rainwater acidity in Guwahati, a UNESCO heritage city in Northeast India [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **232**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104683.



CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i>	(3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin	(3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i>	(3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i>	(3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i>	(3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i>	(3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i>	(3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i>	(3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i>	(3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i>	(3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i>	(3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i>	(3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i>	(3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi	(3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo	(3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i>	(3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i>	(3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan	(3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i>	(3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i>	(3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai	(3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i>	(3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i>	(3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i>	(3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i>	(3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i>	(3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i>	(3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i>	(3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i>	(3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i>	(3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i>	(3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i>	(3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i>	(3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i>	(3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	(4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, <i>et al.</i>	(4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i>	(4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i>	(4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i>	(4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i>	(4061)