万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

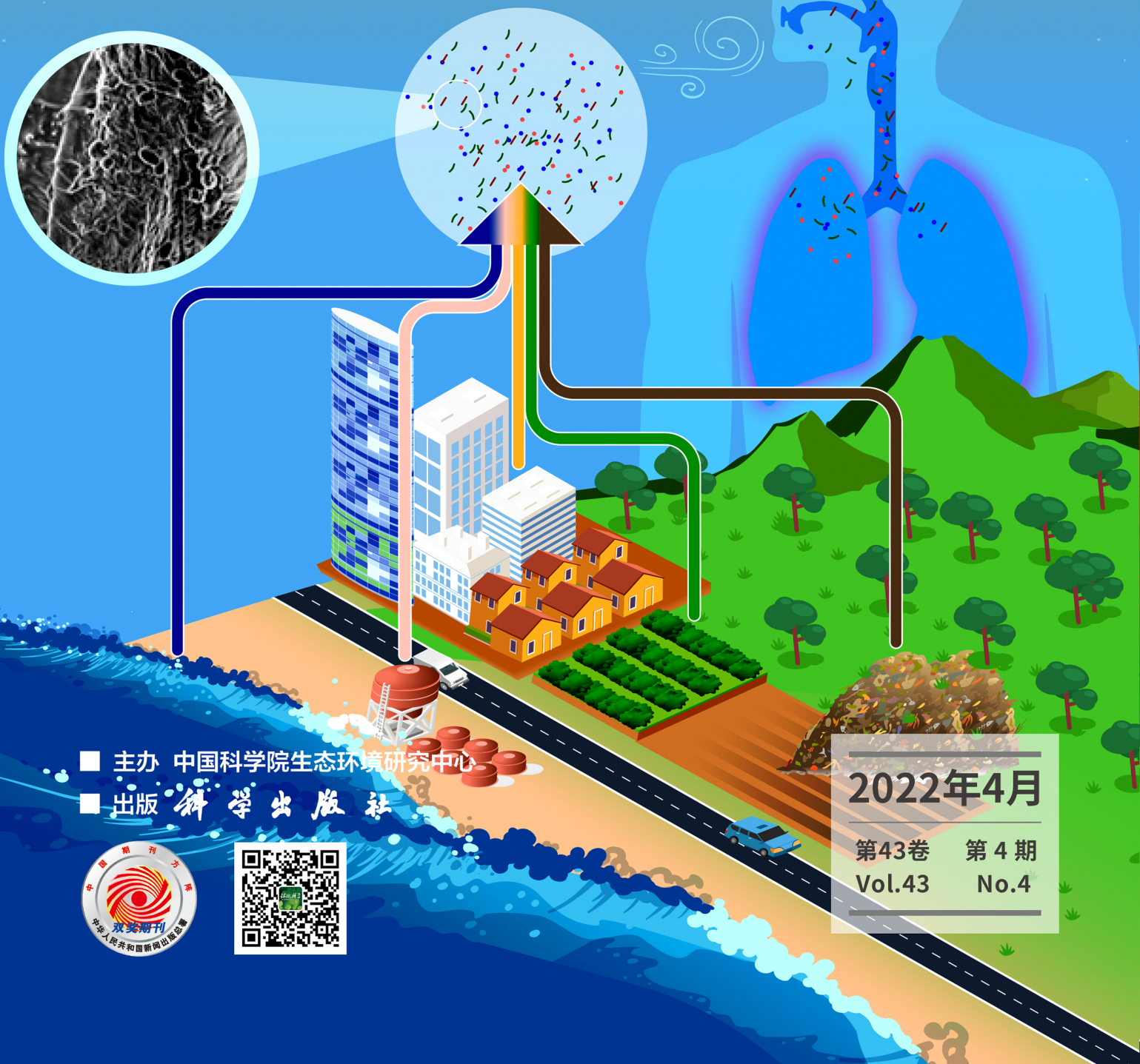
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨，田媛，刘颖，张馨宁，骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年4月
第43卷 第 4 期
Vol.43 No.4

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第4期
2022年4月15日

目 次

2015~2019年河南省$PM_{2.5}$时空特征与驱动因素分析 …… 葛岂序，刘岩，杨洪，郭恒亮（1697）
郑州市大气$PM_{2.5}$中重金属的污染特征、来源及健康风险评估：基于高分辨数据 …… 曲光辉，孙俊苹，王申博，姜楠，李利萍，刘洋，陈红阳，马双良（1706）
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 …… 杨梦蓉，潘勇，黄仲文，张晶晶，黄显军，何萌萌，肖航（1716）
上海城区$PM_{2.5}$中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 …… 庄旻，马英歌，程玉璜，周敏，戴海夏，黄成，郁建珍，朱书慧，乔利平，童张法（1725）
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 …… 陈美娟，钱姿合，顾陈娟，张书萌，刘智艺，王新锋，盖鑫磊（1738）
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 …… 江明，袁鸾，温丽容，张莹，方洪波，杨满芽，李成柳（1747）
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 …… 李陵，李振亮，方维凯，王晓宸，蒲茜，汪凌韬，袁睿，张卫东，翟崇治（1756）
珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价 …… 张雪驰，沙青娥，陆梦华，王毓铮，饶思杰，明桂英，李勤勤，吴淑珠，郑君瑜（1766）
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 …… 刘鑫会，朱仁成，金博强，梅慧，祖雷，尹沙沙，张瑞芹，胡京南（1777）
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 …… 韦啸，张永杰，王沛涛，洪燕，夏瑞，高伟（1788）
基于SOA和O_3生成潜势的杭州市$PM_{2.5}$和O_3协同控制 …… 林旭，严仁嫦，金嘉佳，许凯儿（1799）
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 …… 王鹏程，袁畅，梁胜文，蒋鹭翔，成海容，许睿光，庹晓晗，王祖武（1808）
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 …… 王秀茹，樊灏，范洁，沈振兴（1814）
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 …… 涂晨，田媛，刘颖，张馨宁，骆永明（1821）
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 …… 高宗源，徐昶，倪远之，沈根祥，苗文亮，王振旗，付侃，钱晓雍，曹国民（1829）
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 …… 杨益，姬亚芹，高玉宗，林孜，林宇，马妍（1844）
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 …… 廖雅，侯晓姝，任晓红（1853）
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 …… 秦宁，阿依博塔·吐尔逊别克，刘运炜，侯荣，徐翔宇，官家丞，段小丽（1863）
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 …… 雷米，周金龙，张杰，陈亚鹏，滕杰，吴彤，徐东升，孙英，纪媛媛（1873）
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 …… 涂春霖，尹林虎，和成忠，寸得欣，马一奇，令狐昌卫（1885）
河套灌区浅层地下水NO_3^--N时空变化及驱动因素 …… 袁宏颖，杨树青，张万锋，王波，韩天凯，丁雪华（1898）
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 …… 王建，张华兵，许君利，李永山（1908）
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 …… 王雨山，尹德超，祁晓凡，徐蓉桢（1920）
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 …… 陈丽丽，肖启涛，俞晓琴，陈慧敏，周蕾，周永强，韩龙飞（1930）
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 …… 程云轩，赵可，张越，张渝婷，焦立新（1941）
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 …… 高静，蒲晓，张玉虎，程红光，张瑞宁，刘训良，董雪，许新瑶（1950）
南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 …… 朱俊羽，彭凯，李宇阳，俞晓琴，陈慧敏，周蕾，周永强，丁艳青（1958）
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价 …… 弥启欣，国晓春，卢少勇，邓义祥，卢洪斌，李响，刘晓贺，陈金明（1966）
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 …… 靳郑海，涂成琪，王书航，陈俊伊，卢昶雨，黄威（1976）
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 …… 李果，孙光，赵梓伊，刘冬梅，肖能文，赵志平，罗遵兰（1988）
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 …… 张晶晶，王玉珏，李凡，刘珂，王英，于洋，高彦洁，肖晓彤，吕振波（1997）
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 …… 王飞鹏，黄亚玲，张瑞瑞，岳琛，李飞翔，张超月，穆景利（2007）
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 …… 岳桢锷，李一平，周玉璇，郑可，于珊，伍彬（2018）
老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 …… 王俊杰，陈晓晨，李权达，金成俊，黄艺佳，范露健，张剑宇，刘宪华，徐开钦（2030）
碳化泡沫负载Co_3O_4活化过硫酸盐降解罗丹明B …… 王渊源，阎鑫，艾涛，李卓，牛艳辉（2039）
低总氮浓度下Fe^{2+}促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 …… 郑旭文，秦嘉富，汪晓军，陈浩川，朱梓键，陈振国（2047）
污水管道增强通风作用下氧气气液传质特性 …… 杨洲，张志强，杨静，卢金锁（2055）
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 …… 张义，周心劝，曾晓敏，冯娇，刘玉荣（2062）
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 …… 王祖伟，刘雅明，王子璐，苗钰婷（2071）
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素 …… 张富贵，彭敏，贺灵，马宏宏（2081）
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 …… 王雪雯，刘鸿雁，顾小凤，涂宇，于恩江，吴攀（2094）
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 …… 王海洋，韩玲，谢丹妮，胡慧娟，刘志恒，王祯（2104）
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价 …… 朱迪，张朝晖，王智慧（2115）
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 …… 陈清霞，陆晓辉，涂成龙（2124）
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 …… 任超，任彧仲，李竞天，王浩，朱利文，肖建辉，赵瑞，杜倩倩（2133）
伯克氏菌Y4对水稻幼苗镉损伤和镉吸收的影响 …… 张雅荟，刘月敏，王常荣，刘雅萍，庞杰，黄永春，刘仲齐，张长波（2142）
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 …… 刘硕，甄晓杰，刘钢，冯兆忠（2151）
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N_2O排放的影响 …… 胡剑，江长胜，陈鑫童，熊艳芳，郝庆菊（2163）
氮肥运筹对稻田CH_4和N_2O排放的影响 …… 郑梅群，刘娟，姜培坤，吴家森，李永夫，李松昊（2171）
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 …… 王露莹，孙慧珍，杨雪（2182）
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 …… 周永学，陈静，李远，侯振安，闵伟（2192）
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 …… 马瑞，赵永鹏，王智慧，蒋先军（2204）
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 …… 张健乐，曾小英，史东梅，倪书辉，夏蕊，王荣浩（2209）
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 …… 林仕芳，王小利，段建军，皮义均，郭琴波，龙大勇，徐彬，杨宏伟（2219）
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 …… 黄小清，仝川，罗敏，杨洋，谭凤凤，潘哲妍，刘娜，陈欣，黄佳芳（2226）
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 …… 刘祥宏，阎永军，刘伟，黄占斌（2237）
《环境科学》征订启事(1929)　《环境科学》征稿简则(1975)　信息(1996，2029，2080)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第43卷第4期 2022年4月
Vol.43, No.4 Apr., 2022

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义

王雨山[1], 尹德超[1], 祁晓凡[2], 徐蓉桢[1]
(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051; 2. 中国地质调查局地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 为深入认识白洋淀湿地水文循环过程,于2020年开展大气降雨、河水、湖水和地下水样品采集和测试,揭示了不同水体氢氧稳定同位素特征及其对蒸发、水动力条件、地表水和地下水交互作用的指示意义. 结果表明,白洋淀不同水体氢氧同位素特征差异较大, δD和δ^{18}O均值存在如下关系:6月湖水 > 10月湖水 > 上层地下水 > 河水 > 中层地下水 > 下层地下水. 蒸发作用导致了湖水同位素相对富集, 6月和10月蒸发造成的水量损失分别为18.8%~42.3%和2.7%~30.3%. 湖水同位素的空间分布受到水动力条件影响,总体上河流入淀口和补水口同位素贫化,远离入河口的淀区同位素富集,航道等水动力条件好的区域同位素分布较为均匀. 湖水渗漏对地下水的贡献率为0~91.7%,水平向上空间变异较大,垂向上影响深度约为20 m. 渗漏强度和地下水埋深、离湖距离呈负相关,和地下水水力梯度相关性不明显. 研究结果可为白洋淀水资源保护和生态保护修复提供基础依据.

关键词: 氢氧同位素; 蒸发; 水动力; 地表水和地下水作用; 白洋淀
中图分类号: X142 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)04-1920-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202108202

Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake

WANG Yu-shan[1], YIN De-chao[1], QI Xiao-fan[2], XU Rong-zhen[1]
(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China; 2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to better understand the water cycle processes in Baiyangdian Lake, samples for precipitation, river water, lake water, and groundwater were collected in 2020 via the analysis of oxygen and hydrogen isotopes and the total dissolved solids. A combined approach including correlation analysis, end-member modeling, and evaporation modeling was used to identify hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water types and their indicative significance to evaporation, hydrodynamics, and lake-groundwater interactions. The results showed that the compositions of hydrogen and oxygen isotopes in surface water and groundwater differed from each other. The average values of δD and δ^{18}O were the highest in samples from lake water in June, secondary for lake water in October, and the lightest in groundwater. The slope of the lake water line was lower than that of the local meteoric water line, which could be attributed to a greater evaporative enrichment in lake water. The water loss ratio was estimated to be 18.8%-42.3% in June and 2.7%-30.3% in October by applying an evaporation model using deuterium excess. Lake water isotopes exhibited highly spatial heterogeneity, which indicated that Baiyangdian Lake was a poor-mixed lake controlled by the complex hydrodynamic conditions. The values of δD and δ^{18}O were lighter around the estuary area and higher in the district far from the estuary. Although the main water isotopes in areas such as channels had a short residence time, the spatial differences in lake water isotopes were not remarkable, which suggested that the well-mixed conditions of the lake water contributed to reducing the heterogeneity of the lake water isotopic compositions on a spatial scale. The contribution ratios of lake leakage to groundwater were 0-91.7% and varied spatially. It had a negative relationship with the buried depth of groundwater and the distance to the lakeshore. No obvious relationship was found between lake leakage magnitude and groundwater level gradient. This study could provide a theoretical basis and technical support for the sustainable development of water resources and ecological environment protection in Baiyangdian Lake.

Key words: hydrogen and oxygen isotopes; evaporation; hydrodynamics; lake-groundwater interactions; Baiyangdian Lake

水是组成湿地的核心要素,湿地水文循环过程制约着湿地的形成和演化[1~3],不同水文要素及其时空变化对湿地生态系统结构和功能有着重要影响[4,5]. 在气候变化和人类活动的共同作用下,湿地-流域水循环及其伴生的物理-化学-生物过程发生了深刻改变,引起了一系列生态问题,深入认识湿地水文过程对生态保护修复意义重大[6~8]. 氢氧同位素作为水分子的天然组成,标记了水循环过程[9,10],被广泛用于湿地补给、蒸发、水动力以及地表水和地下水交互作用的研究中. 李静等[11]和Wu等[12]通过研究长江中下游干流河水和湖水氢氧同位素特征,探讨了不同区段河湖关系. 徐敬争等[13]对太湖同位素开展了长期连续监测,揭示了湖水氢氧稳定同位素的时间变化和影响因素. Bam等[14]建立了北美大平原典型湖泊同位素水平衡模型,评价了渗漏和蒸发量. 杨婷等[15]和Gao等[16]基于同位素时空分布特征,分析了人工湿地氢氧同位素分异规律及其水力学表征意义.

白洋淀是河北平原上最大的淡水湿地,对雄安新区的生态安全具有极端重要作用[17]. 受天然因素和人类活动影响,湿地内村庄、芦苇台地和水域相间分布,生态格局较为破碎[18]. 近年来,随着生态补

收稿日期: 2021-08-19; **修订日期**: 2021-09-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(4170021290); 中国地质调查局项目(DD20190300)
作者简介: 王雨山(1984~),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为流域水循环和同位素生态水文,E-mail: cug_wys@sina.com

水措施的加强，白洋淀受外源水影响明显，形成了降雨、河流和生态调水多源补给的局面. 在此背景下，白洋淀蒸发、水动力、湖水和地下水相互作用等水循环过程趋于复杂. 目前，针对白洋淀水体氢氧同位素已有相关研究. 袁富强等[19]和何明霞等[20]分析了地表水和地下水氢氧同位素特征，并初步识别了地表水渗漏范围. Zhao 等[21]研究了生态补水前后地表水和地下水体同位素的变化规律. 以上研究尽管对白洋淀水体同位素分布和成因取得了一定认识，但在同位素对白洋淀蒸发、水动力和湖水-地下水交互作用等水循环过程的指示意义方面关注较少. 通过分析不同季节白洋淀大气降雨、地表水、河水和不同深度地下水样品氢氧同位素特征和分布差异，揭示白洋淀蒸发、水动力以及湖水和地下水作用规律，并深入理解复杂生态格局和人类活动影响下的白洋淀水循环过程，以期为白洋淀水资源管理和生态保护修复提供依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

白洋淀位于雄安新区，大清河南部支流潴龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河和白沟引河等 8 条河流汇入白洋淀（图 1），形成了湖泊湿地[22]. 目前大部分河流已干涸，仅有府河和孝义河接纳城市中水后注入白洋淀. 雄安新区成立后，通过南水北调、引黄济淀和山区水库放水定期补给白洋淀，人工调水成为白洋淀的主要水源. 白洋淀形成于河流的差异堆积作用，湖盆由一系列扇间洼地和河间洼地构成，主要淀泊包括藻苲淀、烧车淀、小白洋淀、捞王淀、池鱼淀和泛鱼淀等[23]. 在 7.0 m 水位条件下，水深一般为 1 ~ 3 m，部分村庄附近可达 10 m. 白洋淀位于温带大陆性季风性气候区，平均气温为 7 ~ 12℃，年均降雨量为 550 mm，蒸发量为 1 637 mm[24]. 淀区和周边地层以第四系粉黏和粉土为主，浅层地下水（<50 m）主要赋存于不连续分布的粉砂、细砂层中，垂向结构复杂，分布数个含水层，单层厚度一般不超过 5 m. 浅层地下水埋深一般 0 ~ 20 m，由淀区向远离淀区方向逐渐增加，总体上浅层地下水由白洋淀流向周边，补给来源包括大气降雨和白洋淀渗漏，以蒸发和侧向径流为主要排泄方式.

1.2　研究方法

2020 年在白洋淀淀区和周边采集大气降雨、河水、湖水和地下水样品，共计 163 组，用于测试 ^{18}O、^{2}H 同位素和总溶解固体（TDS）. 其中，河水和湖水样品在 6 月和 10 月采集 2 期，共 104 组. 河水采自孝义河和府河入淀口，10 月根据人工补水情况于瀑河入淀口和大树刘枢纽分别采集南水北调和引黄

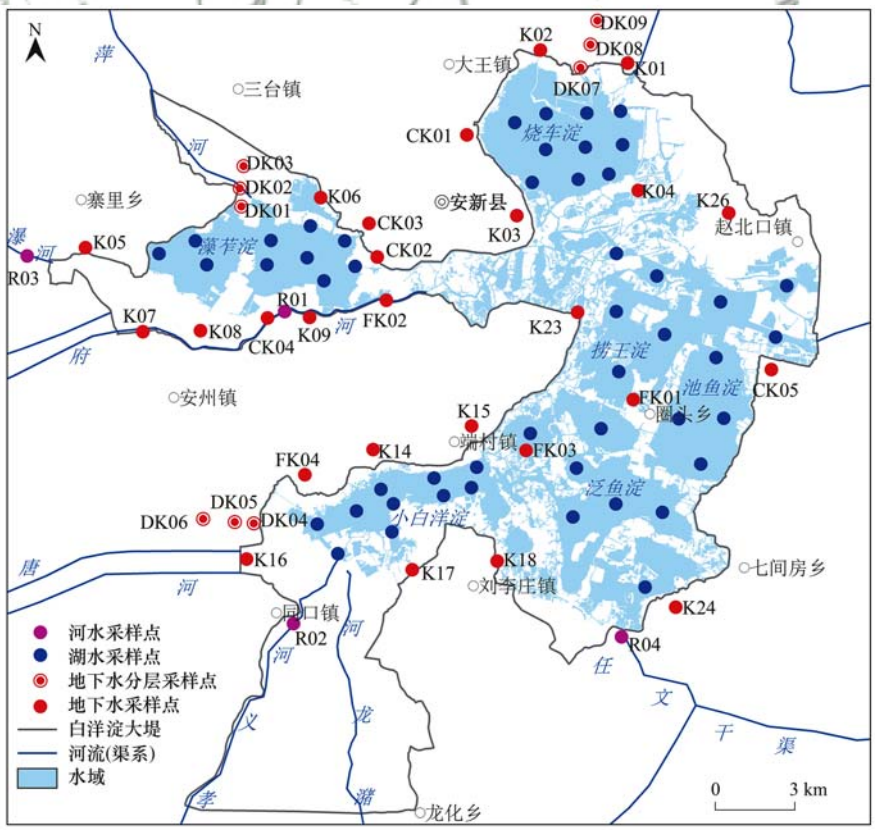


图 1　研究区位置和采样点分布示意

Fig. 1　Location map of study area and sampling sites

济淀补水水源. 湖水取自藻苲淀、小白洋淀、烧车淀、捞王淀、池鱼淀和泛鱼淀这6个主要淀泊,根据水域空间分布大致均匀布点. 地下水样品在6月采集,共53组. 为研究不同深度地下水同位素特征,选择9个分层监测井采集上层(0~20 m)、中层(20~35 m)和下层(35~50 m)不同深度地下水样品,包括上层地下水35组、中层9组和下层9组. 大气降雨样品在7~8月雨季采集,共6组.

地表水和地下水采样时均避开降雨事件,各期采样工作在2 d内完成. 河水和湖水采自水面以下0.2 m,采样时同时用水深计测量水深(仪器型号Hondex PS-7),精度为±0.1 m. 地下水样采自监测井,采样时先抽水20 min再采集新鲜水样,大气降雨用雨量筒采集,并进行改装以避免蒸发. 所有样品经0.45 μm滤膜过滤后置于清洗过的30 mL高密度聚乙烯瓶中保存,在1~2 d内送至中国地质调查局水文地质环境地质调查中心实验室完成测试. δ^2H和δ^{18}O采用波长扫描光强衰荡光谱技术测试(仪器型号Picarro L2130-i),精度分别为0.1‰和0.025‰,分析结果采用VSMOW标准. TDS采用干燥-重量法(误差<0.5%),样品检测合格率为100%.

2 结果与分析

根据测试结果,2020年雨季大气降雨δD变化范围为-69.09‰~-32.61‰,均值为-45.28‰,δ^{18}O变化范围为-8.99‰~-5.16‰,均值为-6.48‰. 因降雨样品数量较少,且采样时段集中,不作深入分析. 6月河水δD和δ^{18}O变化范围分别为-65.30‰~-52.44‰和-8.43‰~-7.18‰,10月河水变化范围分别为-59.4‰~-50.56‰和-8.01‰~-6.69‰. 府河和孝义河主要接纳城市污水处理后的中水,δD和δ^{18}O值较为接近. 生态补水水源中以黄河水同位素最为贫化,南水北调水次之. 6月湖水δD和δ^{18}O变化范围分别为-48.8‰~-18.7‰和-5.84‰~-0.27‰,10月湖水δD和δ^{18}O变化范围分别为-57.25‰~-22.96‰和-7.58‰~-0.82‰. 可以看出,无论是6月还是10月,湖水同位素较降雨和河水更为富集,显示出湖水经历了蒸发作用. 10月湖水同位素较6月贫化,推测为雨季后期接受贫同位素的降雨和外源水补给所致. 水深是影响湖水氢氧稳定同位素分布的重要因素[25],相关性分析表明,湖水δ^{18}O值和水深负相关(6月和10月的R^2分别为0.246和0.161). 湖水δ^{18}O值随着水深增加呈降低趋势,表明深度较浅的水体蒸发更为强烈.

20 m以浅地下水δD和δ^{18}O变化范围分别为-66.93‰~-35.09‰和-8.84‰~-3.35‰,20~35 m地下水分别为-73.39‰~-52.28‰和-9.84‰~-6.6‰,35~50 m地下水分别为-79.83‰~-59.79‰和-10.84‰~-7.79‰. 不同水体δ^{18}O均值存在如下关系:6月湖水>10月湖水>上层地下水>河水>中层地下水>下层地下水(图2). 根据地下水δ^{18}O和埋深关系(图3),随着深度增加地下水氢氧同位素趋于贫化,表明垂向上由浅到深,地下水接受大气降雨和湖水补给的作用逐渐减弱,受侧向径流的影响增加. 初步认为,湖水渗漏主要影响上层地下水,对中层和下层地下水影响较小.

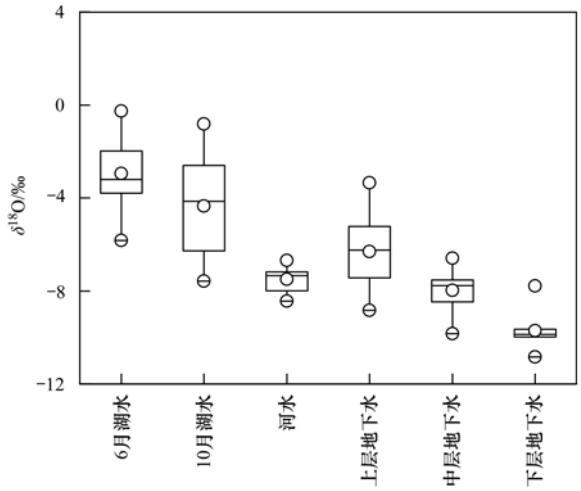


图2 地下水δ^{18}O和水位埋深关系

Fig. 2 Distributions of δ^{18}O in different buried depth

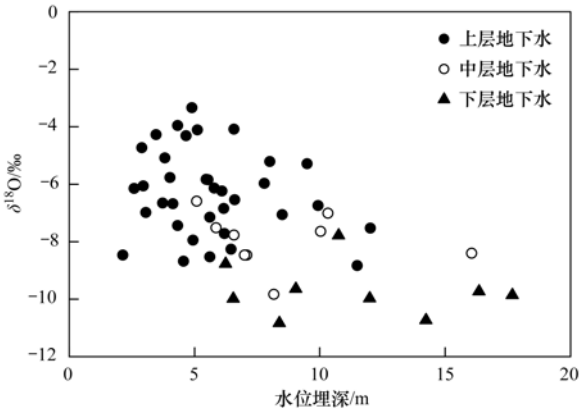


图3 地下水δ^{18}O和水位埋深关系

Fig. 3 Relationship plot of groundwater δ^{18}O vs. buried depth

由于未能系统采集降雨同位素样品,当地大气降雨线(LMWL)采用前人在该地区研究成果[26],方程:$\delta D = 6.54\delta^{18}O - 2.71$. 根据δD-$\delta^{18}$O关系(图4),不同水体氢氧同位素呈现出分带性规律. 大气降雨沿着当地降雨线分布,河水、湖水和地下水有所偏离,分布于当地降雨线下方. 以湖水δD和δ^{18}O

的线性回归线作为湖水蒸发线，6 月湖水线方程为 $\delta D = 5.18\delta^{18}O - 18.56$（$R^2 = 0.980$），10 月为 $\delta D = 4.79\delta^{18}O - 18.9$（$R^2 = 0.963$）. 不同季节湖水蒸发线斜率较为相近，均低于当地大气降雨线斜率，表明湖水氢氧稳定同位素的富集受控于蒸发作用. 这是由白洋淀水文特征所决定的，白洋淀入淀河流中仅有府河和孝义河常年有水补给，湿地水位和面积的维持主要依靠不定期的人工补水. 淀泊内部围埝围堤分布，生态格局破碎，地表水水动力微弱，循环交替较差，蒸发较为强烈. 从图 4 可知，6 月湖水同位素偏离大气降雨线的程度要大于 10 月，表明 6 月蒸发作用对湖水同位素富集的影响更大.

同湖水相比，地下水样品分布在湖水蒸发线左侧，但更为靠近当地降雨线. 表明大气降雨对地下水具有补给作用，下层地下水同位素较大气降雨贫化，表明可能有其它补给来源[27]. 大部分地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值较地表水明显偏负，表明两者之间尽管有水力联系，但作用强度较弱，特别是下层地下水和地表水样品分布于不同区间，两者具有不同的补给来源且几乎无水力联系.

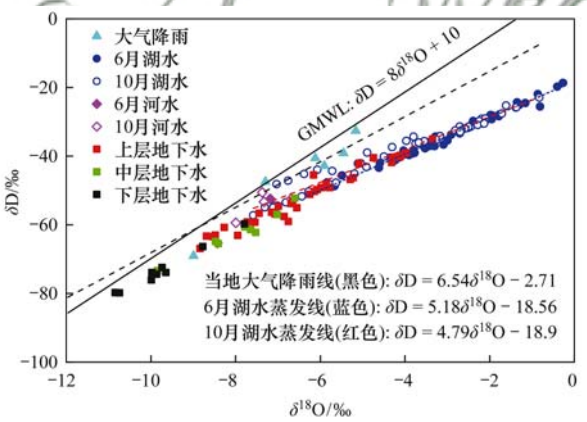


图 4　不同水体 δD-$\delta^{18}O$ 关系

Fig. 4　The δD-$\delta^{18}O$ plot for different water types

3　讨论

3.1　对蒸发的指示意义

长期以来，氢氧稳定同位素水量平衡法被广泛用于湖水蒸发量的定量计算. 该方法需要系统的水均衡观测数据，并且对湖水同位素的空间非均质性进行概化，多适用于水体混合均匀、具备完善水文气象监测系统的湖泊和水库[28]. 目前，白洋淀湿地尚未建立系统的水文气象监测网络，且湖水同位素空间变异较大，利用同位素水平衡法估算蒸发会导致较大误差. 由于蒸发过程中的同位素分馏作用会引起水体中重同位素富集，在 δ^2H-$\delta^{18}O$ 关系中样品会偏离大气降雨线，偏离程度越高，蒸发作用越强，这种偏离程度可以用氘盈余（d）指征[29]. 6 月湖水 d 值为 −19.16‰~ −1.03‰，远低于全球平均氘盈余值，表明经历了较强的蒸发作用. 10 月湖水 d 值为 −16.37‰~8‰，蒸发作用弱于 6 月. 河水 d 值为 1.06‰~8.38‰，与湖水存在较大差异，显示出天然情况下河水对白洋淀的补给程度和范围有限. 上层、中层和下层地下水 d 值分别为 −8.32‰~6.18‰、−2.08‰~5.32‰和 2.52‰~6.97‰，显示出随着深度增加，地下水 d 值增加，受蒸发的影响逐渐减弱.

天然条件下，白洋淀水量主要消耗于蒸发，水体氢氧同位素组成服从瑞利分馏模型，可利用氢氧同位素组分估算蒸发程度. 考虑到湖水氢氧同位素的初始值通常难以准确获取，根据前人研究成果[30~32]，建立蒸发程度和氘盈余 d 的定量关系.

根据同位素丰度定义和瑞丽分馏方程：

$$\delta = (R/R_{VSMOW} - 1) \times 1\,000 \tag{1}$$

$$R = R_0 \times f^{(\alpha-1)} \tag{2}$$

因此：

$$\delta = (\delta_0 + 1\,000) \times f^{(\alpha-1)} - 1\,000 \tag{3}$$

所以：

$$f^{(\alpha-1)} = \frac{\delta + 1\,000}{\delta_0 + 1\,000} \tag{4}$$

两边同时取对数：

$$(\alpha - 1)\ln f = \ln\frac{\delta + 1\,000}{\delta_0 + 1\,000} = \ln\left(1 + \frac{\delta - \delta_0}{\delta_0 + 1\,000}\right) \tag{5}$$

由于 $|\delta_0| \leqslant 1\,000$，$\frac{\delta - \delta_0}{\delta_0 + 1\,000} \longrightarrow 0$，所以：

$$(\alpha - 1)\ln f \approx \frac{\delta - \delta_0}{\delta_0 + 1\,000} \approx \frac{\delta - \delta_0}{1\,000} \tag{6}$$

得出：

$$\delta = 1\,000(\alpha - 1)\ln f + \delta_0 \tag{7}$$

$$\begin{aligned} d &= \delta^2H - 8\delta^{18}O \\ &= 1\,000(\alpha_1 - 8\alpha_2 + 7)\ln f + 10 \end{aligned} \tag{8}$$

$$f = \exp\left[\frac{d - 10}{1\,000(\alpha_1 - 8\alpha_2 + 7)}\right] \tag{9}$$

式中，f 为蒸发度（剩余水和初始水体积比）；α_1 和 α_2 为开放系统非平衡分馏条件下气态相对液态的 ^2H 和 ^{18}O 分馏系数.

公式（9）中的参数 α_1 和 α_2 与温度和相对湿度有关[33]，根据同期气象监测数据，白洋淀 6 月和 10 月平均相对湿度是 73.9% 和 62.1%，平均温度为 24.3℃和 14.1℃，求得 $\alpha_1 = 0.908$，$\alpha_2 = 0.983$. 根据公式（9）计算蒸发度 f，得出 6 月白洋淀蒸发损失为 18.8%~42.3%，均值为 31.6%，10 月白洋淀蒸发损失为 2.7%~30.3%，均值为 18.2%. 从图 5（a）可

知,随着湖水 d 值的降低,蒸发损失增加, 10 月湖水蒸发较 6 月为弱,这与中国多数东部湖泊的研究结果一致[34,35],均表现为夏季蒸发强,秋冬蒸发弱. 需要注意的是,利用氘盈余估算蒸发比适用于封闭水域持续蒸发的理想条件,湖泊同位素受多种复杂水文过程影响,不仅受到蒸发影响,还和补给、蒸腾、渗漏和排泄有关. 对于白洋淀来说, 6 月计算结果可以较好地指示该时期蒸发程度,而 10 月湖水接受降雨和生态调水补给,水体氢氧同位素特征是蒸发和多水源混合共同作用的结果,由于未能考虑混合作用,对蒸发损失的估算存在一定误差. 另外,根据湖水 TDS 和 d 的关系[图 5(b)],两者呈弱相关,随着蒸发作用增强, d 降低,湖水 TDS 增加,表明白洋淀水质可能受到蒸发作用的影响.

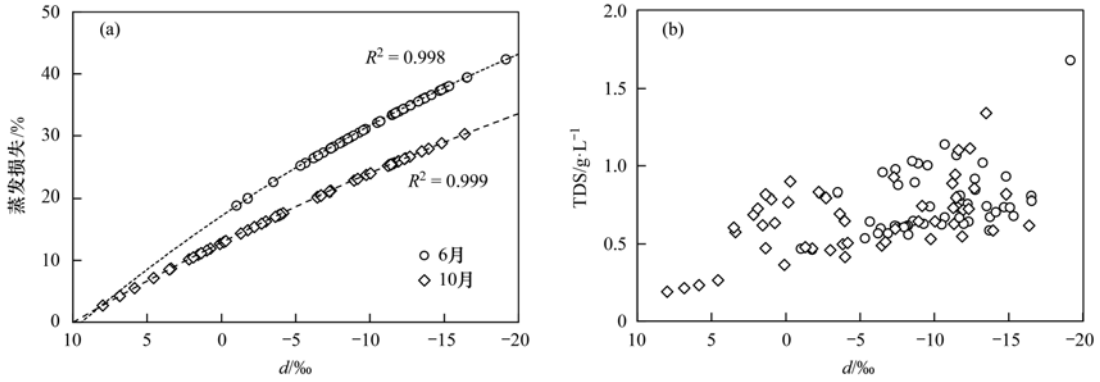


图 5 湖水蒸发损失、TDS 和氘盈余关系

Fig. 5 Relationship plots of lake water loss, TDS vs. deuterium excess

3.2 对水动力的指示意义

水动力是影响湖水同位素分布的又一因素,氢氧同位素的时空变化可以指示流速、流向和补给来源等水动力条件[36~38]. 白洋淀不同淀泊或同一淀泊内部,同位素均存在较大的空间变异, 6 月和 10 月湖水 $\delta^{18}O$ 变异系数分别为 -0.447 和 -0.449. 这和鄱阳湖、洞庭湖等水动力较强的湖泊差异较大,有研究表明,在水循环条件好、更新时间短的湖泊,同位素空间变异较小[12,39~41]. 白洋淀湖盆形态呈浅碟形,补给不畅,内部生态格局复杂,人为改造频繁,造成了不同淀泊和淀泊内部水动力循环条件较差. 从同位素空间分布上看(图 6),河流入淀口和补水口 $\delta^{18}O$ 值最低,沿着水流方向,从入河口到远离入河口, $\delta^{18}O$ 呈富集趋势. 由于河水和生态补水水源同位素均较湖水贫化,表明补水口区域主要受到混合作用影响,而远离补水口的淀区主要受蒸发作用影响.

受补给水源和补给量影响,不同淀泊湖水同位素具有差异, $\delta^{18}O$ 均值存在如下关系(图 7):6 月,捞王淀 < 小白洋淀 < 烧车淀 < 池鱼淀 < 泛鱼淀 < 藻苲淀; 10 月,小白洋淀 < 泛鱼淀 < 藻苲淀 < 捞王淀 < 烧车淀 < 池鱼淀. 6 月,白洋淀主要由府河和孝义河补给,河水直接补给的小白洋淀和捞王淀 $\delta^{18}O$ 值较低,东部池鱼淀、捞王淀和泛鱼淀远离补给区,循环交替缓慢,主要受到蒸发作用影响,导致同位素富集. 藻苲淀位于西北部,和其它淀区仅靠数条航道

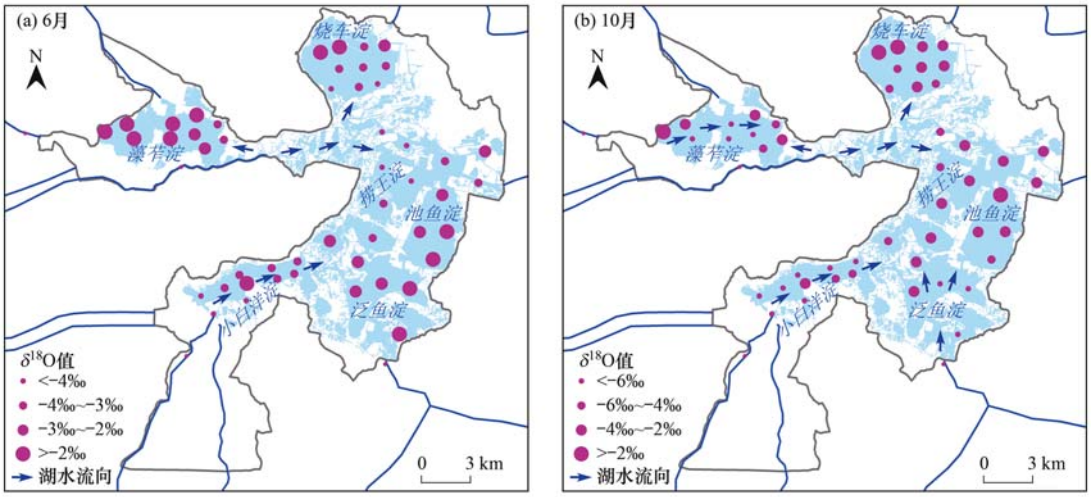


图 6 6 月和 10 月河水和湖水 $\delta^{18}O$ 空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of $\delta^{18}O$ for river water and lake water in June and October

连通，处于相对封闭状态，蒸发作用强烈，同位素最为富集. 10 月，南水北调和引黄济淀等生态补水分别从瀑河和大树流枢纽进入藻苲淀和泛鱼淀，同时孝义河流量较 6 月增加，这些因素导致了补水口附近淀区同位素显著贫化. 小白洋淀、泛鱼淀和藻苲淀 $\delta^{18}O$ 值较低，池鱼淀位于淀区最东部，处于湖水径流末端，同位素最为富集. 另外，即使是同一淀区，同位素分布也存在显著的空间变异，这是由于白洋淀复杂的水动力条件所致. 沿着主要航道等水动力条件好的区段，同位素分布较为均匀，形成了径流优势通道. 在围埝围堤分布水域，水动力条件极差，同位素明显富集.

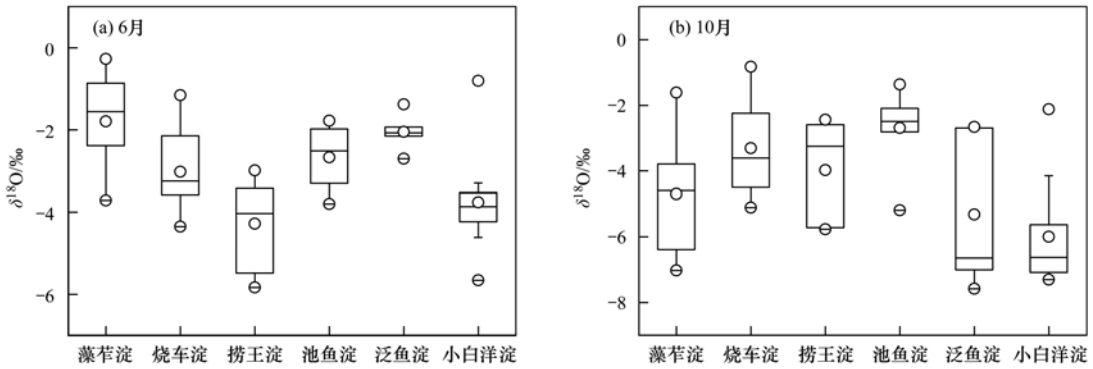


图 7　6 月和 10 月不同淀区湖水 $\delta^{18}O$ 对比

Fig. 7　Distributions of lake water $\delta^{18}O$ in major districts in June and October

在时间尺度上，泛鱼淀、藻苲淀和小白洋淀变化较大，10 月 $\delta^{18}O$ 均值较 6 月分别降低了 3.27‰、2.9‰和 2.23‰，烧车淀、捞王淀和池鱼淀基本无变化，表明生态补水对白洋淀水体的影响范围到达了泛鱼淀、藻苲淀和小白洋淀，而其它淀区尚未受到明显影响. 这种特征在湖水 δD-$\delta^{18}O$ 关系表现得较为明显（图 8），6 月不同淀区湖水均分布在蒸发线两侧，表明水体补给来源较为单一稳定. 10 月部分淀区偏离蒸发线，藻苲淀明显受到瀑河补水影响，湖水同位素由蒸发和混合作用共同控制.

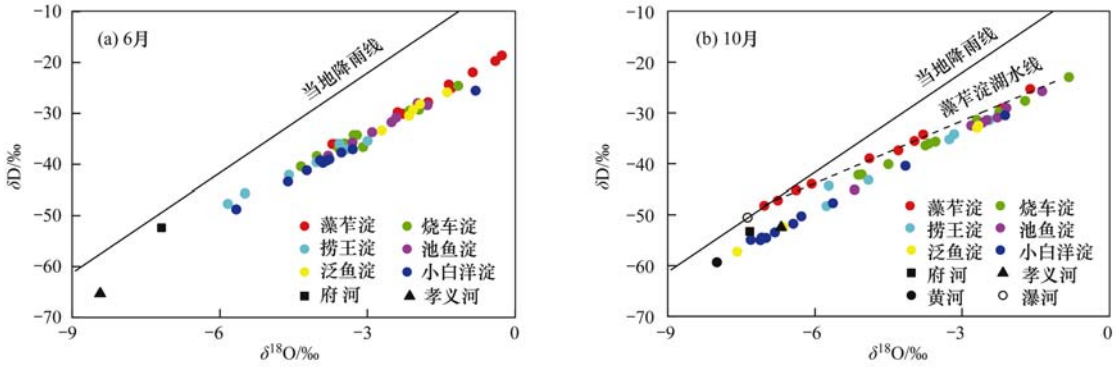


图 8　6 月和 10 月不同淀区湖水 δD-$\delta^{18}O$ 关系

Fig. 8　The δD-$\delta^{18}O$ plots for lake water in June and October

3.3　对湖水渗漏的指示意义

根据地下水动力场特征，白洋淀淀区和周边地下水水位低于湖水水位，地表水和地下水转化关系表现为湖水渗漏补给地下水[42]. 垂向上，由浅到深地下水水位降低，表明不存在来自深层地下水的越流补给. 这种水文地质条件决定了上层地下水以大气降雨和湖水为主要补给来源，δD-$\delta^{18}O$ 关系也显示，多数地下水样品分布于大气降雨线和湖水样品之间，表明地下水由大气降雨和湖水混合补给. 采样点地下水埋深 2.15 ~ 17.7 m，多位于华北平原潜水极限蒸发埋深 4.0 m 以下[43]，表明地下水氢氧同位素受蒸发作用影响较小. 由此，可以根据同一时段湖水和地下水同位素特征的差异评价渗漏强度.

基于以上分析，通过建立氧同位素二元混合模型计算湖水渗漏对地下水的贡献比例. 由于大气降雨端元难以准确获取，一般利用分布在降雨线上的地下水样品平均值近似代替[44]，研究区为 −8.48‰. 考虑湖水 $\delta^{18}O$ 值空间变异较大，二元模型中湖水端元取不同淀区样品平均值，6 月，藻苲淀、烧车淀、池鱼淀、捞王淀、泛鱼淀和小白洋淀分别为 −1.8‰、−2.88%、−2.67%、−3.72%、−2.05% 和 −3.55%，根据各地下水样品所在淀区分别进行评价. 结果表明，上层地下水样品中湖水渗漏的贡献率为 0 ~ 91.7%，平均值为 38.3%. 中层地

下水样品为 0 ~ 29.6%,平均值为 11.6%. 下层地下水样品除 1 个点位为 12.3% 外,其它均为 0. 可以看出,湖水渗漏对地下水的影响范围主要集中在上层,垂向影响深度约为 20 m,对 20 ~ 35 m 深度的中层地下水影响较小,对 35 m 深度以下的地下水基本无影响. 从分布来看,湖水渗漏强度也存在较大的空间变异. 其中,K01 等 10 个样品湖水贡献比例大于 50%,表明渗漏较强,地表水和地下水关系密切,该类样品多数取自埋藏较浅的粉砂、细砂含水层. 根据同位素指示,湖水强渗漏带分布在藻苲淀东北、烧车淀以北和池鱼淀周边地区,其它地区渗漏较弱.

根据湖水渗漏强度和 $\delta^{18}O$ 关系[图 9(a)],两者相关性较好($R^2 = 0.948$),随着湖水渗漏补给地下水的比例增加,地下水中氧同位素也更为富集,表明同位素特征对湖水渗漏有着较好的指示意义. 同位素特征是含水层对湖水渗漏补给的外在响应,而水文-水文地质条件则是控制地表水和地下水补排关系的内在因素[45],白洋淀湖水渗漏强度主要和地下水埋深、离湖距离和水力梯度等条件有关. 根据分析结果(图 9),湖水渗漏强度和地下水埋深、离湖距离呈负相关(R^2 分别为 0.166 和 0.123),和地下水水力梯度相关性不明显. 由于白洋淀湖床多为湖相沉积的粉土和粉黏土,构成了地下水上部的相对隔水层,从动力学机制来说,埋深较浅的地下水更易获取湖水的渗漏补给. 下层地下水埋深多大于 10 m,湖水需要渗透多个相对隔水层才能补给地下水,两者之间补排关系极弱. 地下水离湖距离同样对湖水渗漏强度有着重要影响,在其它水文-水文地质条件一致的情况下,离湖距离越近,地下水接受湖水渗漏补给的比例也越大,这在上层地下水中表现较为明显[图 9(c)]. 需要注意的是,地表水和地下水补排关系是多因素综合作用的结果,地层岩性、结构和渗透性等因素较为关键[46]. K03 等 4 个样品取自湖滨带,但湖水基本无渗漏,表明所在区段渗透条件极差,即使距离较近,湖水也难以对地下水形成补给. 水力梯度是影响白洋淀和地下水补排关系的又一因素,一般来说,水力梯度越大,地下水循环交替越强,越利于地表水和地下水交互作用[47]. 但在白洋淀地区,这种关系不明显,推测是由于白洋淀浅部地层岩性非均质性较强,含水层空间上分布不连续,地表水和地下水补排关系主要由湖床渗透条件决定.

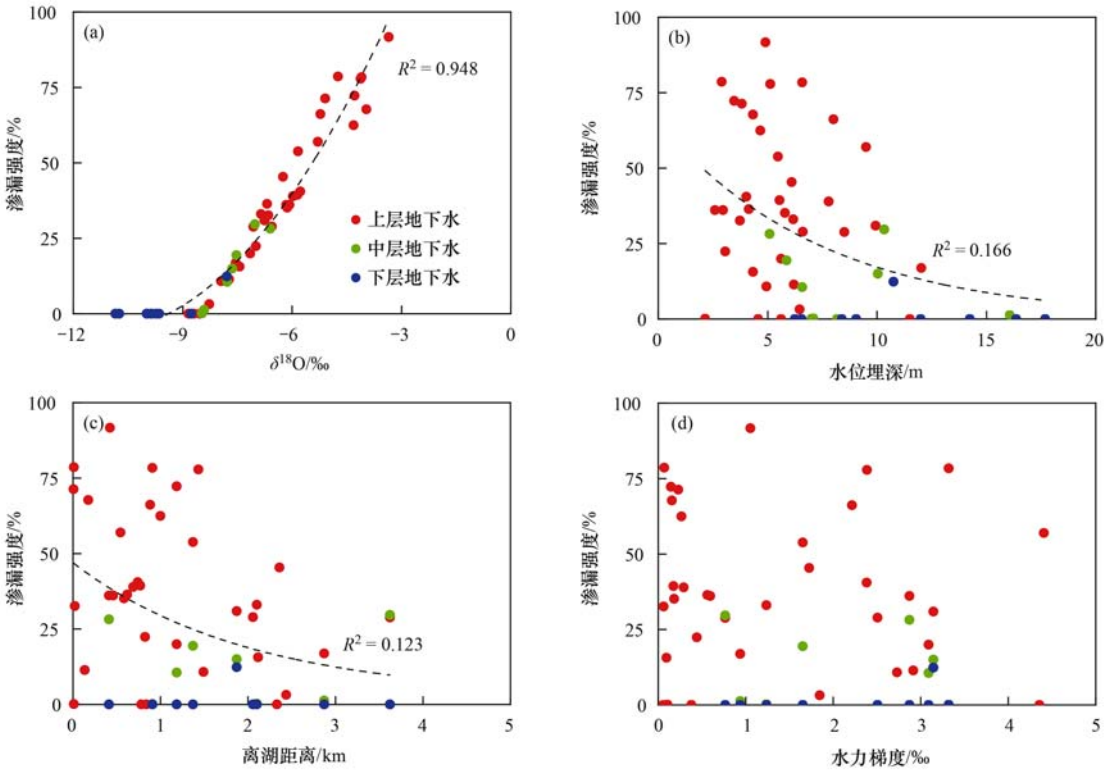


图 9 湖水渗漏强度与地下水 $\delta^{18}O$、水位埋深、离湖距离和水力梯度关系

Fig. 9 Relationship plots of lake leakage contribution ratio vs. groundwater $\delta^{18}O$, the buried depth, the distance from the lakeshore, and groundwater level gradient

4 结论

(1)白洋淀不同水体氢氧同位素特征存在差异. 湖水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 −57.25‰~ −18.7‰和 −7.58‰~ −0.27‰, 6 月较 10 月富集; 地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 −79.83‰~

－35.09‰和－10.84‰～－3.35‰，δD 和 $\delta^{18}O$ 值随深度增加而降低. 河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为－65.30‰～－50.56‰和－8.43‰～－6.69‰，时空变化相对较小.

(2)湖水同位素相对富集主要受蒸发作用影响，6 月和 10 月白洋淀蒸发损失分别为 18.8%～42.3%和 2.7%～30.3%. 湖水 TDS 和氘盈余呈弱相关，随着蒸发作用增强，氘盈余降低，TDS 增加.

(3)受水动力条件影响，湖水同位素空间变异较大. 总体上从入河口到远离入河口同位素呈富集趋势，航道等水动力条件好的区段同位素分布较为均匀. 生态补水对白洋淀的影响范围到达了泛鱼淀、藻苲淀和小白洋淀，对其它淀区无明显影响.

(4)湖水渗漏对地下水的贡献率为 0～91.7%，水平向上存在较大的空间变异，垂向上对地下水的影响深度约为 20 m. 渗漏强度与地下水埋深、离湖距离呈负相关，和地下水水力梯度相关性不明显.

参考文献：

[1] 章光新，武瑶，吴燕锋，等. 湿地生态水文学研究综述[J]. 水科学进展，2018，**29**(5)：737-749.
Zhang G X, Wu Y, Wu Y F, *et al*. A review of research on wetland ecohydrology[J]. Advances in Water Science, 2018, **29**(5): 737-749.

[2] Walton C R, Zak D, Audet J, *et al*. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: Impacts of soil type, hydrology and vegetation[J]. Science of the Total Environment, 2020, **727**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138709.

[3] Bertassello L E, Rao P S C, Jawitz J W, *et al*. Wetlandscape hydrologic dynamics driven by shallow groundwater and landscape topography[J]. Hydrological Processes, 2020, **34**(6): 1460-1474.

[4] 严思睿，刘强，孙涛，等. 湿地生态水文过程及其模拟研究进展[J]. 湿地科学，2021，**19**(1)：98-105.
Yan S R, Liu Q, Sun T, *et al*. Research progress in wetland ecohydrological processes and their simulation[J]. Wetland Science, 2021, **19**(1): 98-105.

[5] Lee S, McCarty G W, Moglen G E, *et al*. Seasonal drivers of geographically isolated wetland hydrology in a low-gradient, Coastal Plain landscape[J]. Journal of Hydrology, 2020, **583**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124608.

[6] 许秀丽，李云良，谭志强，等. 鄱阳湖典型湿地地下水—河湖水转化关系[J]. 中国环境科学，2021，**41**(4)：1824-1833.
Xu X L, Li Y L, Tan Z Q, *et al*. Groundwater, river water and lake water transformations in a typical wetland of Poyang Lake[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(4): 1824-1833.

[7] Zhang Z Q, Bianchette T A, Meng C H, *et al*. Holocene vegetation-hydrology-climate interactions of wetlands on the Heixiazi Island, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140777.

[8] Fossey M, Rousseau A N. Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **184**: 327-339.

[9] 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.

[10] 刘鑫，向伟，司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. 环境科学，2021，**42**(4)：1739-1749.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River basin and indicative significance[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1739-1749.

[11] 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.

[12] Wu H W, Huang Q, Fu C S, *et al*. Stable isotope signatures of river and lake water from Poyang Lake, China: implications for river-lake interactions[J]. Journal of Hydrology, 2021, **592**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125619.

[13] 徐敬争，肖薇，肖启涛，等. 湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因子分析[J]. 环境科学，2016，**37**(7)：2470-2477.
Xu J Z, Xiao W, Xiao Q T, *et al*. Temporal dynamics of stable isotopic composition in Lake Taihu and controlling factors[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2470-2477.

[14] Bam E K P, Ireson A M. Quantifying the wetland water balance: a new isotope-based approach that includes precipitation and infiltration[J]. Journal of Hydrology, 2019, **570**: 185-200.

[15] 杨婷，王阳，徐静怡，等. 河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征[J]. 环境科学，2021，**42**(8)：3695-3708.
Yang T, Wang Y, Xu J Y, *et al*. Differentiation of hydrogen and oxygen isotopes in the water source treatment wetlands of stream networks[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3695-3708.

[16] 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.

[17] 杨薇，赵彦伟，刘强，等. 白洋淀生态需水：进展及展望[J]. 湖泊科学，2020，**32**(2)：294-308.
Yang W, Zhao Y W, Liu Q, *et al*. A systematic literature review and perspective on water-demand for ecology of Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(2): 294-308.

[18] 李悦昭，陈海洋，孙文超. 白洋淀流域氮、磷、COD 负荷估算及来源解析[J]. 中国环境科学，2021，**41**(1)：366-376.
Li Y Z, Chen H Y, Sun W C. Load estimation and source apportionment of nitrogen, phosphorus and COD in the basin of Lake Baiyang[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 366-376.

[19] 袁瑞强，宋献方，王鹏，等. 白洋淀渗漏对周边地下水的影响[J]. 水科学进展，2012，**23**(6)：751-756.
Yuan R Q, Song X F, Wang P, *et al*. Impacts of percolation in Baiyangdian Lake on groundwater[J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(6): 751-756.

[20] 何明霞，张兵，王义东，等. 白洋淀地表水和地下水的稳定

氢氧同位素特征[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, **40**(6): 62-67.
He M X, Zhang B, Wang Y D, *et al*. Stable hydrogen and oxygen isotopic characteristics of surface water and underground water in Baiyangdian Lake[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2020, **40**(6): 62-67.

[21] Zhao Y, Han J Y, Zhang B, *et al*. Impact of transferred water on the hydrochemistry and water quality of surface water and groundwater in Baiyangdian Lake, North China[J]. Geoscience Frontiers, 2021, **12**(3), doi: 10.1016/j.gsf.2020.09.015.

[22] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2016, **36**(15): 4780-4791.
Zhang M, Gong Z N, Zhao W J, *et al*. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(15): 4780-4791.

[23] 张婷, 刘静玲, 王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(2): 261-267.
Zhang T, Liu J L, Wang X M. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(2): 261-267.

[24] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 白洋淀湿地生态功能评价及分区[J]. 生态学报, 2020, **40**(2): 459-472.
Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, *et al*. Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(2): 459-472.

[25] Newman C P, Poulson S R, Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, **210**, doi: 10.1016/j.gexplo.2019.106445.

[26] Wang S Q, Tang C Y, Song X F, *et al*. The impacts of a linear wastewater reservoir on groundwater recharge and geochemical evolution in a semi-arid area of the Lake Baiyangdian watershed, North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2014, **482-483**: 325-335.

[27] Li Z, Chen X, Liu W Z, *et al*. Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 827-835.

[28] Li Y K, Tian L D, Bowen G J, *et al*. Deep lake water balance by dual water isotopes in Yungui Plateau, southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2021, **593**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125886.

[29] 潘峰, 张清寰, 何建华. 甘肃董志塬地区第四系地下水补给环境与水化学特征演化[J]. 干旱区地理, 2014, **37**(1): 9-18.
Pan F, Zhang Q H, He J H. Groundwater recharge environment and geochemistry evolution of the Quaternary aquifer in the Dunzhiyuan region, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2014, **37**(1): 9-18.

[30] Huang T M, Pang Z H. The role of deuterium excess in determining the water salinisation mechanism: a case study of the arid Tarim River Basin, NW China[J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(12): 2382-2388.

[31] 王雨山, 郭媛. 干旱区地下水咸化机制的区域氘盈余解析[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(6): 29-35.
Wang Y S, Guo Y. A study of groundwater salinization mechanism in arid areas using regional deuterium excess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, **42**(6): 29-35.

[32] 王雨山, 李戍, 李海学, 等. 海原盆地地下水咸化特征和控制因素[J]. 水文地质工程地质, 2019, **46**(4): 10-17, 57.
Wang Y S, Li S, Li H X, *et al*. Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, **46**(4): 10-17, 57.

[33] Tan H B, Huang J Z, Zhang W J, *et al*. Fractionation of hydrogen and oxygen isotopes of gypsum hydration water and assessment of its geochemical indications[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2014, **61**(6): 793-801.

[34] 高宏斌, 李畅游, 孙标, 等. 呼伦湖流域氢氧稳定同位素特征及其对水体蒸发的指示作用[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 211-219.
Gao H B, Li C Y, Sun B, *et al*. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in Lake Hulun Basin and its indicative function in evaporation[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 211-219.

[35] 詹泸成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. 水科学进展, 2014, **25**(3): 327-335.
Zhan L C, Chen J S, Zhang S Y. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region[J]. Advances in Water Science, 2014, **25**(3): 327-335.

[36] Cotte G, Vennemann T W. Mixing of Rhône River water in Lake Geneva: Seasonal tracing using stable isotope composition of water[J]. Journal of Great Lakes Research, 2020, **46**(4): 839-849.

[37] Zhao Y Y, Zheng B H, Wang L J, *et al*. Characterization of mixing processes in the confluence zone between the Three Gorges Reservoir mainstream and the Daning River using stable isotope analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(18): 9907-9914.

[38] Jiang D J, Li Z, Luo Y M, *et al*. River damming and drought affect water cycle dynamics in an ephemeral river based on stable isotopes: The Dagu River of North China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143682.

[39] Li Y L, Yao J, Zhang L. Investigation into mixing in the shallow floodplain Poyang Lake (China) using hydrological, thermal and isotopic evidence[J]. Water Science & Technology, 2016, **74**(11): 2582-2598.

[40] Li Y L, Zhang Q, Yao J. Investigation of residence and travel times in a large floodplain lake with complex lake-river interactions: Poyang Lake (China)[J]. Water, 2015, **7**(5): 1991-2012.

[41] Kumar U S, Jacob N, Navada S V, *et al*. Environmental isotope study on hydrodynamics of Lake Naini, Uttar Pradesh, India[J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(3): 425-439.

[42] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2624-2631.
Kong X L, Wang S Q, Ding F, *et al*. Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2624-2631.

[43] 邵景力, 赵宗壮, 崔亚莉, 等. 华北平原地下水流模拟及地下水资源评价[J]. 资源科学, 2009, **31**(3): 361-367.
Shao J L, Zhao Z Z, Cui Y L, *et al*. Application of groundwater modeling system to the evaluation of groundwater resources in North China Plain[J]. Resources Science, 2009, **31**(3): 361-367.

[44] 李文宝, 杜蕾, 王旭阳, 等. 内蒙古达里诺尔湖水体稳定同位素空间分布特征指示的区域补给差异[J]. 湖泊科学,

2019, **31**(5): 1334-1343.
Li W B, Du L, Wang X Y, *et al*. Regional groundwater recharges based on the characteristics of stable isotope distribution in Dali-nor Lake in Inner Mongolia [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1334-1343.

[45] Saito L, Christian B, Diffley J, *et al*. Managing groundwater to ensure ecosystem function [J]. Groundwater, 2021, **59**(3): 322-333.

[46] Liao F, Wang G C, Yi L X, *et al*. Identifying locations and sources of groundwater discharge into Poyang Lake (eastern China) using radium and stable isotopes (deuterium and oxygen-18) [J]. Science of the Total Environment, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140163.

[47] Das P, Mukherjee A, Hussain S A, *et al*. Stable isotope dynamics of groundwater interactions with Ganges river [J]. Hydrological Processes, 2021, **35**, doi: 10.1002/hyp.14002.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 4
Environmental Science (monthly) Apr. 15, 2022

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of $PM_{2.5}$ in Henan Province from 2015 to 2019 ····· GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, *et al.* (1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in $PM_{2.5}$ in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data ····· QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, *et al.* (1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo ····· YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, *et al.* (1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in $PM_{2.5}$ in Urban Area of Shanghai ····· ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, *et al.* (1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing ····· CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, *et al.* (1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta ····· JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, *et al.* (1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing ····· LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, *et al.* (1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region ····· ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, *et al.* (1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study ····· LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, *et al.* (1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System ····· WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, *et al.* (1788)
Coordinated Control of $PM_{2.5}$ and O_3 in Hangzhou Based on SOA and O_3 Formation Potential ····· LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, *et al.* (1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants ····· WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, *et al.* (1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an ····· WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, *et al.* (1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn ····· TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, *et al.* (1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors ····· GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, *et al.* (1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City ····· YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, *et al.* (1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning ····· LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong (1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight ····· QIN Ning, Ayibota Tuerxunbieke, LIU Yun-wei, *et al.* (1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang ····· LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, *et al.* (1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River ····· TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, *et al.* (1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District ····· YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, *et al.* (1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area ····· WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, *et al.* (1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake ····· WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, *et al.* (1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China ····· CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, *et al.* (1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment ····· CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, *et al.* (1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source ····· GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, *et al.* (1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors ····· ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, *et al.* (1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China ····· MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, *et al.* (1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria ····· JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, *et al.* (1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity ····· LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, *et al.* (1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay ····· ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, *et al.* (1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands ····· WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, *et al.* (2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City ····· YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, *et al.* (2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms ····· WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Quan-da, *et al.* (2030)
Carbonized Foam Supported Co_3O_4 Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation ····· WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, *et al.* (2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe^{2+} Under Low Nitrogen Concentration ····· ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, *et al.* (2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation ····· YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, *et al.* (2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt ····· ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, *et al.* (2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China ····· WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, *et al.* (2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China ····· ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, *et al.* (2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background ····· WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, *et al.* (2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment ····· WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, *et al.* (2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-*Sphagnum* System and Ecological Risk Assessment ····· ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui (2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City ····· CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long (2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize ····· REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, *et al.* (2133)
Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings ····· ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, *et al.* (2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China ····· LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, *et al.* (2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N_2O Emission from a Vegetable Field ····· HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, *et al.* (2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH_4 and N_2O Emissions in Paddy Field ····· ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, *et al.* (2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River ····· WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue (2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation ····· ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, *et al.* (2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox *Nitrospira* in Paddy Soils ····· MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, *et al.* (2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area ····· ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, *et al.* (2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil ····· LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, *et al.* (2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary ····· HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, *et al.* (2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy ····· LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, *et al.* (2237)