

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM_{2.5} 化学组分及来源分析 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹磊, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征

李静¹, 吴华武^{2*}, 周永强², 赵中华², 王晓龙², 蔡永久², 贺斌², 陈雯², 孙伟²

(1. 九江学院旅游与地理学院, 九江 332005; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008)

摘要: 稳定同位素技术在示踪水体的来源、演化及不同水体间相互转化关系、污染源已被广泛地应用. 基于2018年7月对长江中下游地区长江干流河水和湖水同位素样品收集, 本文分析了长江中下游地区丰水期河水和湖水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 组成特征, 在此基础上进一步揭示了其空间上演化特征及其影响因素. 结果表明长江干流 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值自三峡库区向下游地区呈逐渐增大的变化趋势, 这与降水同位素变化密切相关. 在三峡库区段与宜昌-城陵矶段河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值无显著差异, 而河水 *d-excess* 值波动范围较小. 在洞庭湖-江汉和华阳-鄱阳湖湖泊群中湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值要贫于太湖-三角洲湖泊群, 且太湖-三角洲湖泊群湖水中 *d-excess* 值为负值, 这主要是太湖-三角洲地区受同位素较为富集的降水和强烈的蒸发作用的影响. 在淀山湖和大通湖同位素值最大, 洞庭湖和鄱阳湖同位素值偏小, 这主要是由于长江与鄱阳湖、洞庭湖直接相通, 两湖的水情直接受制于长江影响, 水位较高, 鄱阳湖和洞庭湖同位素组成受长江水补给影响明显. 因此, 开展长江中下游河湖同位素的调查研究, 这将对充分认识了解长江中下游地区大气降水-河水-湖水的相互联系与探讨其水资源合理利用和管理提供科学依据.

关键词: 氢氧稳定同位素; 大气降水线; 河水; 湖水; 长江中下游

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1176-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908160

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

LI Jing¹, WU Hua-wu^{2*}, ZHOU Yong-qiang², ZHAO Zhong-hua², WANG Xiao-long², CAI Yong-jiu², HE Bin², CHEN Wen², SUN Wei²

(1. College of Tourism and Geography, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Stable isotope tracers have been widely applied to water sources and evolution, transforming relations, and pollution sources of various water bodies. This study analyzed the spatial variations of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in river and lake waters during flooding season, and revealed the factors underlying their variations along the middle and lower reaches of the Yangtze River based on a field sampling campaign in July 2018. Our results showed that $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the Yangtze River water were enriched from the Three Gorges reservoir region to the lower reaches of the Yangtze River, which was closely linked to isotopic variations in precipitation. There was no significant difference in $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in the mainstream river waters between the Three Gorges Reservoir Region and Yichang-Chenglingji. However, *d-excess* values in river water displayed a small variation range. In contrast, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in the lake group from Dongting to Jiangnan and Huayang to Poyang Lake were lower than in the lake group from Taihu to the Yangtze Delta. Negative *d-excess* values were observed in lake water from Taihu to the Yangtze Delta, suggesting the combined influence of enriched isotopic compositions in precipitation and strong evaporative enrichment. Of the lakes, the highest isotopic values were found in Dianshan Lake and Datong Lake, whereas the lowest isotopic values were recorded in Dongting Lake and Poyang Lake because of their direct connection with the Yangtze River. The water regimes of Dongting Lake and Poyang Lake were influenced by the Yangtze River, especially when a high water level of the Yangtze River occurred, and thus altered the isotopic compositions of Dongting Lake and Poyang Lake water. Hence, these findings will provide scientific data revealing the precipitation-river-lake interactions and investigating the rational utilization and management of water resources in the middle and lower reaches of the Yangtze River regions.

Key words: stable isotopes; local meteoric water line; river water; lake water; middle and lower reaches of Yangtze River

长江中下游平原是我国浅水湖泊分布最集中的地区,也是中国淡水湖泊最为集中的区域. 据统计发现该地区湖泊面积在 1 km^2 以上的共有 651 个,其中面积大于 100 km^2 的有 18 个,这些湖泊具有洪水调蓄和纳污消减功能^[1]. 然而,在人类活动(如建造大坝)和气候变化(如干旱)综合影响下长江中下游地区湖泊功能和江湖关系发生了剧烈变化,其与中游江湖水系的洪旱灾害间的互馈作用备受关注 and 争议^[2]. 长江中下游地区江湖关系变化直接影响着湖

泊(如洞庭湖和鄱阳湖)水文情势和水环境容量. 因

收稿日期: 2019-08-20; 修订日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861022, 41701036); 中国科学院流域地理学重点实验室开放基金项目(WSGS201706); 江西省教育厅青年项目(GJJ170972); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23020102); 江苏省自然科学基金项目(BK20161612); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-011); 长江经济带地质资源环境综合评价项目(DD20190260)

作者简介: 李静(1984~),女,博士,讲师,主要研究方向为同位素生态水文、生态系统服务, E-mail: xiaofengxue86@163.com

* 通信作者, E-mail: wuhuawu416@163.com

此,长江与其沿岸湖泊构成的复杂江湖复合生态系统对维持江湖水生生态系统结构、功能的稳定性和生物多样性等具有重要作用^[3].

长江中下游地区湖泊污染、富营养化和江湖关系等热点问题已引起了国内外广泛的关注,较早研究系统地对该地区湖泊富营养化演变过程与机理分析^[4,5],明确了浅水湖泊富营养化的治理不仅要控制外源性营养盐控制,还要依赖于湖泊内源营养盐的治理,如水生植被恢复、底泥动力悬浮物营养盐释放控制^[6,7]. 稳定同位素技术在示踪水体的来源、演化及不同水体间相互转化关系及污染源方面得到了广泛地应用^[8-12]. 丁梯平等^[8]开展了长江水氢氧同位素组成的时空格局及揭示了环境指示意义;梁越等^[9]基于碳氮稳定同位素组成分析较好地识别了鄱阳湖流域蚌湖丰水期的氮污染;徐敬争等^[10]对太湖湖水同位素开展了长期连续地观测,并揭示了太湖湖水同位素演变机制;詹泸成等^[11]的研究发现长江干流九江段河水与鄱阳湖湖水同位素具有明显的季节变化,其中4月水体中同位素值最大,8月同位素值最小. 尽管过去的研究针对长江流域大气降水-河水-湖水中稳定水同位素及其影响因素开展了大量的研究,但这些研究主要聚焦于长江中下游某个湖泊或长江干流水同位素变化研究^[8,11,12],而综合研究长江中下游地区多个湖泊和长江干流水同位素的时空变化特征及其控制因素还尚缺. 因此,本文通过对长江中下游丰水期河水和湖水中同位素组成特征及其影响因素分析,对充分认识研究区大气降水-河水-湖水的相互联系,以及探讨其水资源状况及其演变趋势具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江是我国第一大河,两岸沃野千里,湖泊星罗

棋布. 长江中下游地区(26°N ~ 34°N, 105°E ~ 122°E)的面积约为 $8 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占整个长江流域的 44.5%. 长江中下游地区以浅水湖泊分布为主,据统计,1 km²以上的湖泊有 651 个,其总面积为 16 558 km²,占全国淡水湖泊面积的 60%,其中湖泊大多属于河间洼地湖(如洪湖)、雍塞湖(如龙感湖)、沉溺湖(如网湖)等,也有构造断陷形成的湖泊(如鄱阳湖),形成了长江中下游典型的洞庭-江汉、华阳-鄱阳和太湖-三角洲三大湖群,是世界上独一无二的浅水湖泊群地区. 这些湖泊历史上均与长江自然连通,形成了自然的江、河、湖复合生态系统,湖泊水体主要受长江各支流汇集补给,然后又注入长江,湖泊的换水周期都比较短. 这些湖泊具有共同的水文特征:①受长江水位和降水影响,湖泊水位在年内变化大,丰水位和枯水位期间湖面发生明显扩展和缩小;②湖泊水位在很大程度上受长江水位的控制,长江洪水对湖泊出水有明显的顶托作用,甚至于长江洪水及营养物质向湖泊倒灌;③湖底淤泥深厚,有机质含量高,主要为近现代的湖相沉积,淤泥厚度大多在 1 ~ 2 m.

长江中下游地处亚热带季风气候区,夏季湿热、冬季干冷,年均温度为 15 ~ 20°C,年降水量大于 1 000 mm,降水主要集中在夏季,约占全年降水的一半. 流域 7 月年均降水量自流域上游向下游有逐渐降低的趋势,降雨中心主要分布在四川盆地[图 1(a)]; 7 月年均温度自上游向下游呈现逐渐升高的趋势,长江中下游地区年均气温高于 24°C [图 1(b)].

1.2 样品采集与分析方法

基于长江中下游干流特征,将干流分成三峡库区、宜昌-城陵矶、城陵矶-湖口和湖口-长江口这 4 个部分. 2018 年 7 月对长江中下游地区进行水土环境综合考察并收集水体样品,在长江干流自湖北省

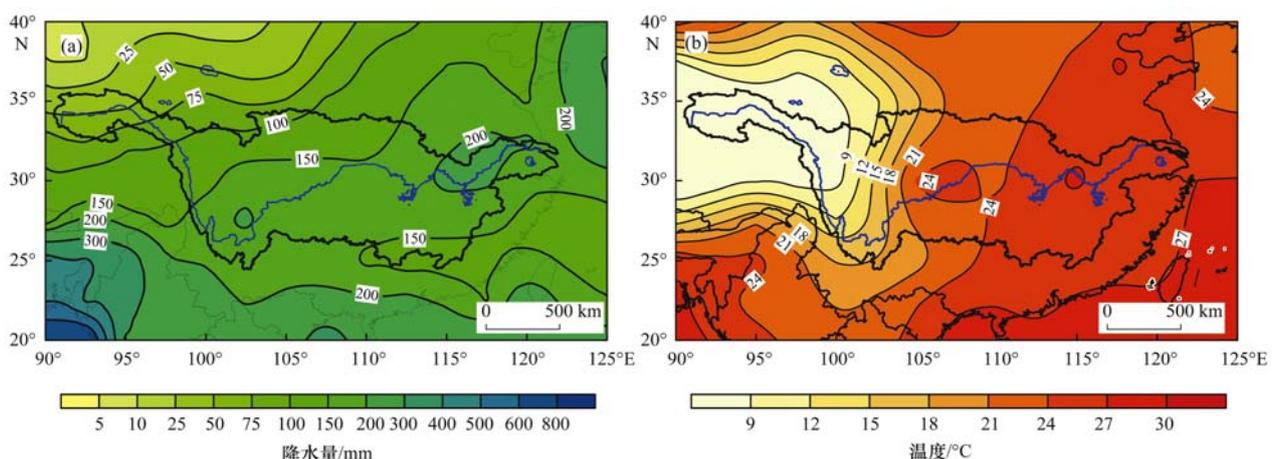


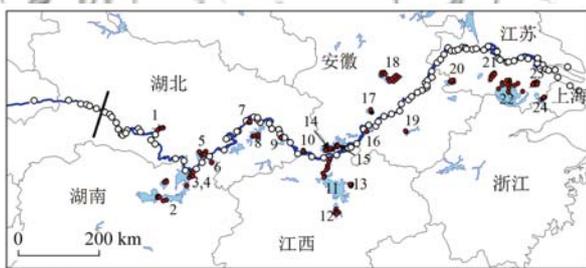
图1 长江流域7月年均降水量和气温变化(1960~2018年)

Fig. 1 Annual variations of air temperature and precipitation in July across the Yangtze River watershed from 1960 to 2018

巴东县至上海入海口浦东区共收集了 103 个河水样品,对长江中下游 24 个湖泊进行了水样收集,共 135 个(图 2),同时现场采用美国哈希(Hydrolab Datasond 5)便携式多参数分析仪(YSI)测定湖泊温度和 pH,温度和 pH 的精度分别为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 和 ± 0.1 ; 水体透明度采用塞氏盘法测定,其精度为 $\pm 2\text{ cm}$,表 1 中给出了每个湖泊面积、深度和海拔等信息.所有河水和湖水均采用 30 mL 高密度聚乙烯(HDPE)塑料瓶进行收集保存,取样前用河水或湖水冲洗样品瓶 3 次,水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,迅速装满样品瓶,并进行冷藏保存(4°C).

所有水样的稳定氢氧同位素组成均在北京师范大学地理学部水文土壤学重点实验室用 LGR 液态同位素分析仪(DLT-100,型号:908-0008)进行测试分析其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 组成,测量的结果均以 V-SMOW 作为参考标准,每个样品重复 6 次,为了避免记忆效应,取后 4 次的平均值,其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 测试的误差分别为 $\delta^2\text{H} \leq 1\text{‰}$ (1σ), $\delta^{18}\text{O} \leq 0.3\text{‰}$ (1σ).

过量氧($d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$)是水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 组成的重要指标,降水中 $d\text{-excess}$ 值大小与形成降水水汽源地气象条件(温度、相对湿度和风速)、雨滴在降落过程中蒸发富集作用等有关,而地表水中 $d\text{-excess}$ 值可较直观地反映水体蒸发富集程度和 水体间补给来源^[13].



图例
● 湖泊水采样点 ○ 长江水采样点 — 三峡大坝
— 长江 □ 湖泊

1. 长湖; 2. 洞庭湖; 3. 大通湖; 4. 岳阳南湖; 5. 洪湖; 6. 黄盖湖; 7. 武昌东湖; 8. 梁子湖; 9. 磁湖; 10. 武山湖; 11. 鄱阳湖; 12. 军山湖; 13. 珠湖; 14. 龙感湖; 15. 黄湖; 16. 升金湖; 17. 菜子湖; 18. 巢湖; 19. 太平湖; 20. 石臼湖; 21. 漏湖; 22. 太湖; 23. 阳澄湖; 24. 淀山湖

图 2 研究区和采样点分布示意

Fig. 2 Map of study region and spatial sampling sites

2 结果与讨论

2.1 长江干流河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 变化

长江中下游地区复杂的河湖系统,水体交换关系多变,水利工程兴建对流域水文过程产生了较大的影响,三峡大坝的建立影响了江湖的补排关系与泥沙交换,明显改变了长江沿岸湖泊的水情.然而,

河水中同位素组成时空变化在一定程度上能较好地指示地下水和降水同位素组成变化^[14,15],河水同位素时空变化往往受不同水源的补给和蒸发富集作用共同影响.从图 3 可以看出,长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 $-11.8\text{‰} \sim -5.2\text{‰}$,平均值为 -9.4‰ ,且自三峡库区至下游呈现逐渐增大[图 3(a)],这与前期研究结果较为一致^[8,16].张亚男等^[16]同样发现丰水期长江水同位素含量沿着径流方向逐渐增加,而丁梯平等^[8]基于多年长江水氢氧同位素组成变化具有相似的变化规律.中国大气降水同位素组成变化由内陆地区向沿海地区、由高原地区向平原地区呈不断富集趋势,而降水是流域丰水期河水主要来源之一,因此长江干流河水同位素空间变化与降水同位素变化密切相关.

长江水中 $d\text{-excess}$ 值的波动范围为 $7.6\text{‰} \sim 18.3\text{‰}$,平均值为 12.3‰ ,而 $d\text{-excess}$ 值自三峡库区至下游地区变化规律不明显[图 3(b)],有些河段河水 $d\text{-excess}$ 值呈现高低值相间的变化特征,这可能与不同河段河水受不同程度的蒸发富集和 水体交换的共同影响.长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 极大值和 $d\text{-excess}$ 的极小值主要分布在长江三角洲地区,这也表明该水域水体中同位素蒸发富集效应较为明显.

三峡库区和宜昌-城陵矶段长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值差异不显著,在宜昌-城陵矶段河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值变化受三峡大坝调蓄方式影响,因此该河段长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值与三峡库区长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值具有相对一致性.在长江中下游湖泊密布,分布着三大湖泊群(洞庭-江汉湖群、鄱阳-华阳湖群及太湖-长江三角洲湖群)^[7,17],这些湖泊水补给长江,而往往湖水中同位素值大于长江水(图 4 和图 5),吴敬禄等^[17]研究长江中下游水体同位素发现湖泊水同位素 δ 值明显偏高于长江水,这可能是直接导致城陵矶-湖口段($\delta^{18}\text{O}_{\text{平}} = -9.6\text{‰}$ 和 $\delta^2\text{H}_{\text{平}} = -64.7\text{‰}$)及湖口-长江口段($\delta^{18}\text{O}_{\text{平}} = -8.8\text{‰}$ 和 $\delta^2\text{H}_{\text{平}} = -57.6\text{‰}$)长江河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值差异明显主要原因之一.河水 $d\text{-excess}$ 平均值在不同河段中差异性不明显(图 4),表明各河段河水中 ^{18}O 和 ^2H 分馏速率的相对差异较小^[18].

2.2 长江中下游地区湖泊水同位素变化

长江中下游地区主要以浅水湖泊分布为主(表 1),其中太平湖和鄱阳湖深度 $> 10\text{ m}$,丰水期不同湖泊间透明度差异明显,以太平湖透明度最好(925 cm),该地区湖水温度均在 $27.9 \sim 33.2^\circ\text{C}$ 之间,以鄱阳-华阳湖群中黄湖、龙感湖等湖泊水体温度偏高;长江中下游湖泊 pH 值在空间上没有明显差异,均在 $7.6 \sim 8.8$ 之间,属中性水.这些调查结果与刘瑞

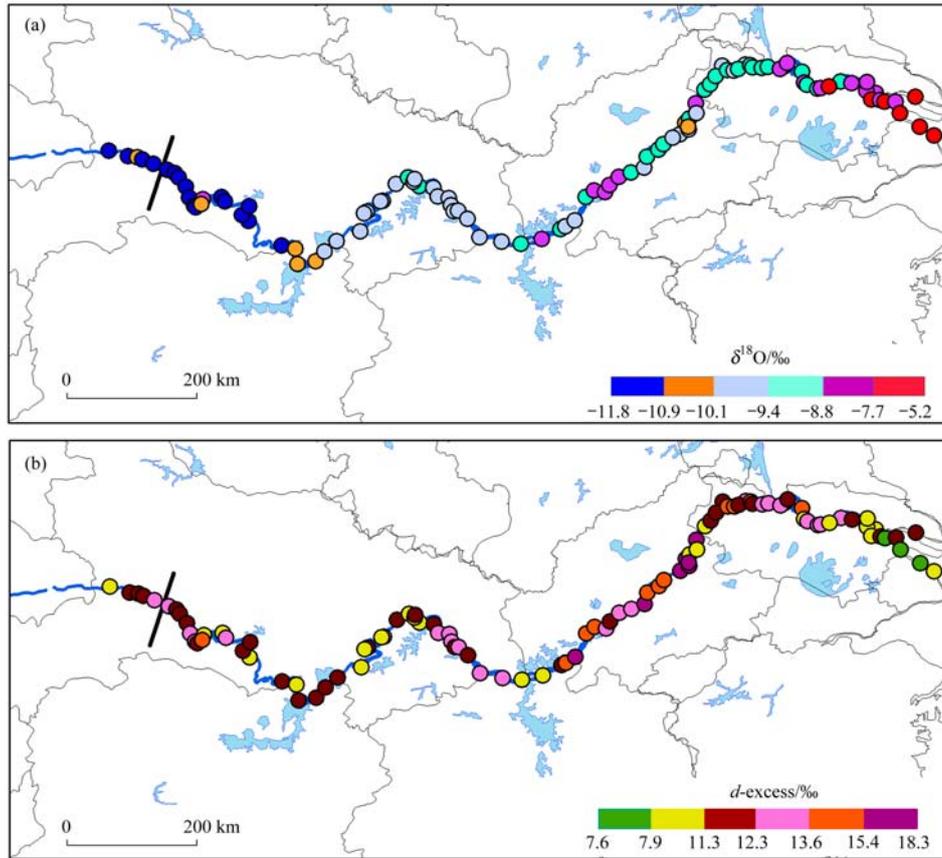
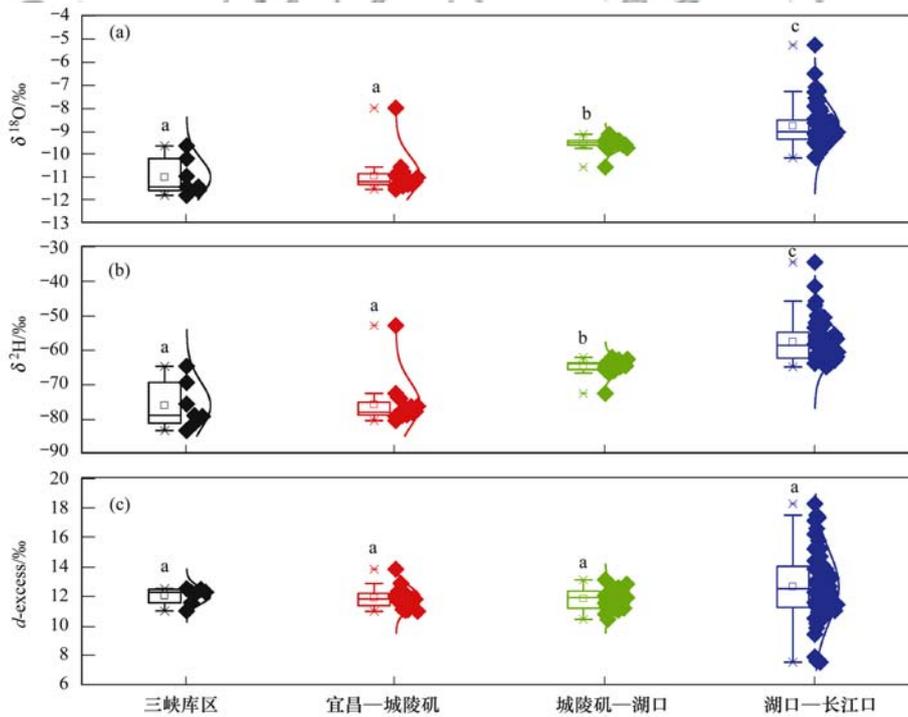


图3 长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 值的空间变化

Fig. 3 Spatial variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$ values in the Yangtze River



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图4 不同河段长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和 $d\text{-excess}$ 值变化

Fig. 4 Variations of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $d\text{-excess}$ in Yangtze River water between different river segments

秋等^[19]对长江中下游地区湖泊水质调查结论较为一致。

长江中下游地区湖水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值具有较大波动范围(图5), $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $-7.5\text{‰} \sim$

表 1 长江中下游地区湖泊属性调查

Table 1 Investigation of lake properties across the middle and lower reaches of the Yangtze River region

湖泊	深度/m	面积/km ²	海拔/m	温度/℃	pH	透明度/cm
淀山湖	2.1	63.7	2.5	29.9	8.2	67.5
溇湖	2.5	146.5	3.2	29.6	8.7	19.5
石臼湖	3.4	210	9.3	31.9	8.8	41
阳澄湖	2.0	119	2.8	29.6	8.2	46.9
太湖	2.4	2 425	3.1	30.4	8.3	16.5
菜子湖	3.1	172	11	31.1	8.6	28
太平湖	50.6	88.6	107	30.8	8.8	925
升金湖	2.1	78.5	11.2	32.1	8.6	27.5
巢湖	3.5	769.6	6.2	31.3	8.6	13.8
龙感湖	3.0	316.2	10.9	32.5	8.3	61.3
黄湖	2.6	299.2	9	33.2	8.2	133.8
鄱阳湖	11.8	2 933	21.7	31.6	8.0	76.5
军山湖	5.3	192.5	14	32.1	8.6	128.3
珠湖	3.9	80.8	11.2	32.1	7.6	148.8
大通湖	1.8	114.2	28	30.5	8.6	130
洞庭湖	5.9	2 432.5	33	27.9	7.8	48.6
岳阳南湖	5.1	12	25	29.6	8.7	37.5
黄盖湖	2.2	86	28	28.8	8.2	45
长湖	2.7	129.1	28	29.0	8.4	67
洪湖	2.0	344.4	25	29.4	8.7	46.3
武昌东湖	3.4	34	19.8	30.2	8.6	58.3
梁子湖	3.7	304.3	20	31.4	8.6	88.3
磁湖	2.0	10	18	32.7	8.4	40
武山湖	1.8	16	15	30.5	8.4	26.7

-1.8‰, 平均值为 -3.9‰; $\delta^2\text{H}$ 值变化范围为 -48.6‰ ~ -15.2‰, 平均值为 -33.1‰. 在所有湖泊中, 位于长三角的淀山湖和大通湖同位素值最大, 洞庭湖和鄱阳湖同位素值偏小, 吴敬禄等^[17] 同样发现在长江中下游地区所有湖泊水中洞庭湖水中同位素值最小(-8.0‰). 长江与鄱阳湖、洞庭湖直接相通, 两湖的水情直接受制于长江水情变化的影响, 水位较高, 鄱阳湖和洞庭湖同位素组成受长江水补给影响. 过去研究同样发现在雨季鄱阳湖和洞庭湖对长江水同位素组成影响比较明显, 洞庭湖补给长江贡献比例达 83%^[20]. 自鄱阳湖往下游湖水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值偏大, 这表明气温较高, 湖水受到强烈的蒸发作用. 从淀山湖到巢湖湖泊水中 $d\text{-excess}$ 值偏小 (<0‰), 而从龙感湖到武山湖湖水中 $d\text{-excess}$ 值偏大 (>0‰), 这也说明了湖泊水同位素在空间上受到不同强度的蒸发富集作用, 另外还表明从淀山湖到巢湖水体交换受长江影响较小. Yuan 等^[18] 在青藏高原上开展了 30 个湖泊水体同位素调查, 发现湖水中 $d\text{-excess}$ 为负值, Wu 等^[21] 发现由于较强的蒸发作用和较长的滞留时间青海湖湖水中 $d\text{-excess}$ 值也为负值.

基于湖泊水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 值聚类分析将长江中下游地区湖泊分成 2 组(图 6), 第 1 组包括洞庭湖-江汉和华阳-鄱阳湖, 第 2 组是太湖-三角洲湖

群. 第 1 组其位于长江中游地区, 受三峡工程影响明显, 长江与湖泊间水体交换复杂, 丰水期间两湖地区湖泊和长江水位较高, 湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 值要偏小、 $d\text{-excess}$ 值偏大于第 2 组湖水; 第 2 组湖泊群主要位于长江下游地区, 湖泊蒸发强烈, $d\text{-excess}$ 值为负值, 该分组结果与长江中下游湖泊成因划分相一致^[22].

2.3 长江干流河水和湖水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 关系

Craig^[23] 首次通过分析全球不同地理位置的地表水、地下水和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 关系, 并把全球降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 关系称为大气降水线(GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$), 可用来识别地表水和地下水的相互联系. 表 2 给出的长江中下游地区大气降水线斜率和截距在空间上具有明显差异, 主要受制于不同区域的气象条件如温度、水汽来源和蒸发条件. 周毅等^[24] 基于全球降水同位素监测网络(GNIP 网站)降水同位素数据得到了长江流域大气降水线($\delta^2\text{H} = 7.41 \times \delta^{18}\text{O} + 6.04$), 其斜率和截距都要小于 GMWL, 而且要小于基于逐次降水事件单站点大气降水线的斜率和截距, 如宜昌^[25]、武汉^[26]、长沙^[27]和安庆^[28](表 2). 长序列日尺度大气降水同位素数据较好地揭示局域气候环境条件, 跟踪天气尺度下水循环过程, 而在月尺度上这些信息往往被掩盖. 另外, 长江流域区域气象与地貌条件复杂多样, 河湖再蒸发水汽对区域降水的影响也可能直接

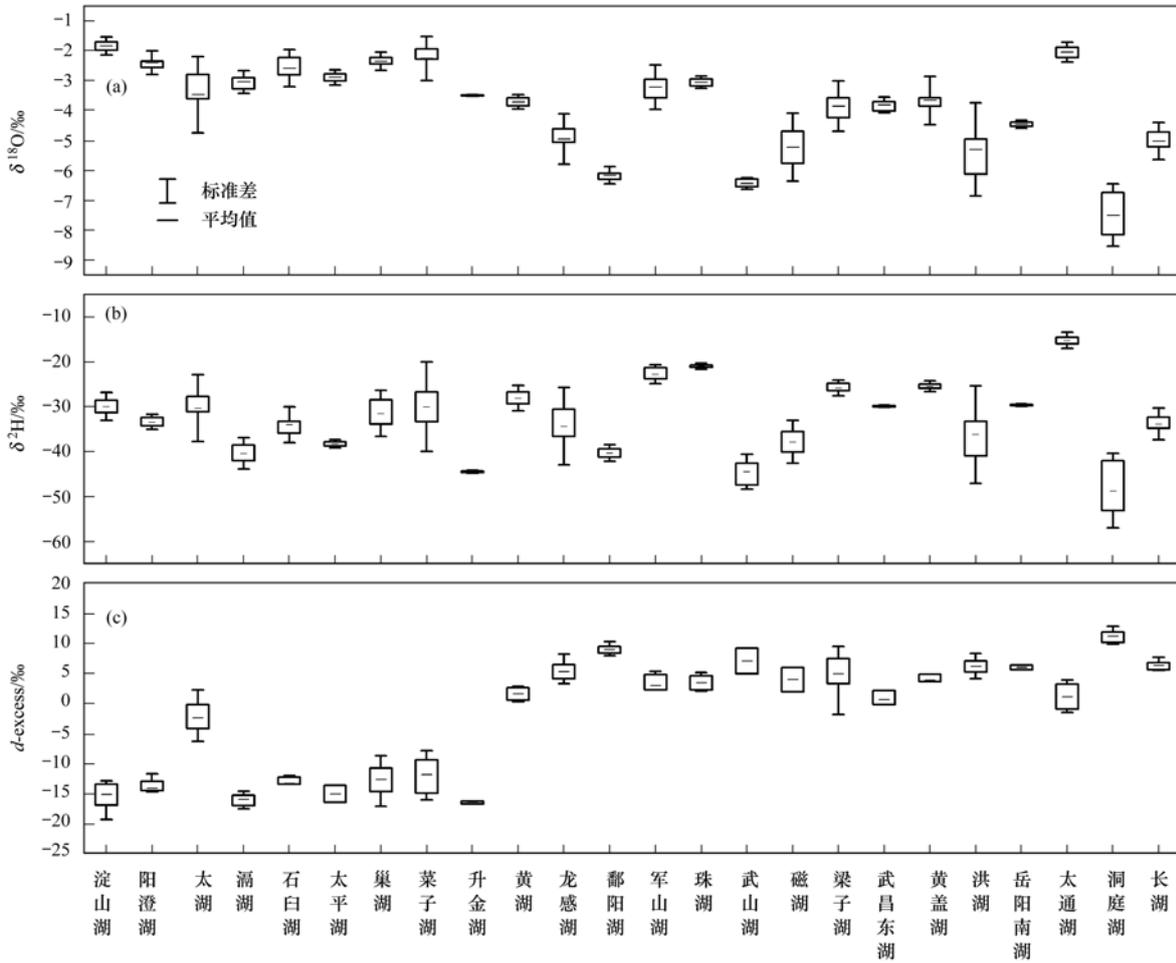


图5 长江中下游地区湖泊水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和 $d\text{-excess}$ 值变化

Fig. 5 Variations of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $d\text{-excess}$ in lake waters across the middle and lower reaches of Yangtze River region

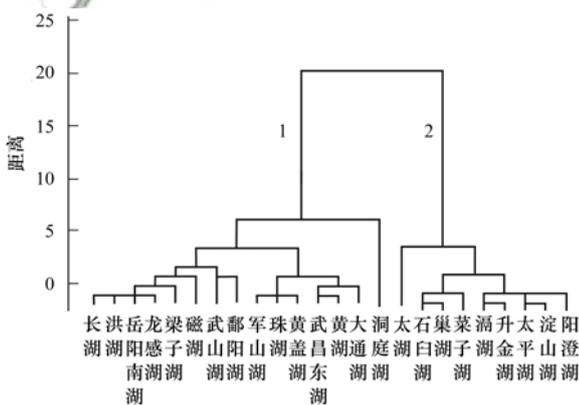


图6 基于长江中下游地区湖泊水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 值聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of lakes based on the $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$ in lake waters across the middle and lower reaches of the Yangtze River region

造成流域大气降水线截距和斜率偏小。

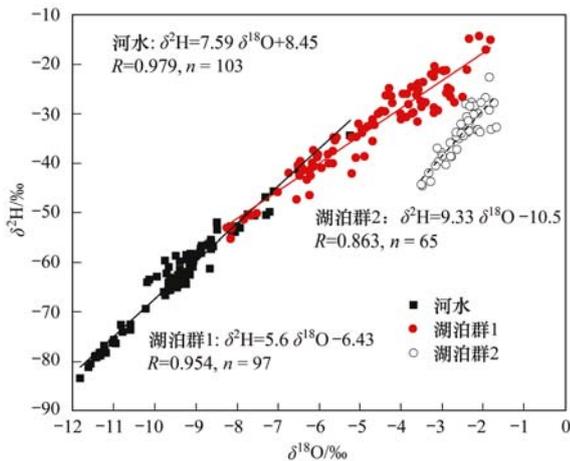
基于河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 分析得到长江中下游河水线方程为 $\delta^2\text{H} = 7.59 \times \delta^{18}\text{O} + 8.45$ (图7),其斜率和截距均偏大于长江流域大气降水线^[24],通常来说,河水线方程的斜率和截距都要小于当地大气降

水线(表2),这主要由于降水补给于河水后,受到不同程度的蒸发富集作用,此研究结果符合水循环过程中同位素变化规律.周毅等^[24]得到的长江流域大气降水线是基于整个流域GNIP月尺度降水同位素数据分析得到,而在月尺度上降水同位素信息掩盖了降水事件同位素变化信息,这也可能是造成大气降水线斜率截距偏低的主要原因.另外,发现湖泊群1(洞庭湖-江汉和华阳-鄱阳湖)的湖水线的斜率要小于湖泊群2(太湖-三角洲湖群),但湖泊群2湖水线的截距要明显小于湖泊群1,这表明长江中下游地区湖泊水中同位素经历了不同程度蒸发富集作用,而湖泊群2中斜率偏大可能是由于湖水中 ^{18}O 和 ^2H 在蒸发富集过程中经历了不成比例动力分馏^[18];另外,湖泊群2处于长江下游地区,河网分布复杂,人类活动影响明显,如跨区域调水工程、“灌江纳苗工程”,改变了河湖的连通性,这也可能直接改变了该地区湖泊水同位素组成.因此,针对该地区河网连通的复杂性,应加强降水-河湖同位素采样研究工作,将更好地揭示该地区长江中下游地区降水-河水-湖水的水力联系。

表 2 长江中下地区大气降水线方程

Table 2 Local meteoric water line in the middle and lower reaches of the Yangtze River region

研究区	大气降水线	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	数据来源	文献
宜昌	$\delta^2\text{H} = 8.45 \times \delta^{18}\text{O} + 11.6$, $R = 0.98$	-7.0	-47.6	降水事件	[25]
武汉	$\delta^2\text{H} = 8.13 \times \delta^{18}\text{O} + 8.18$, $R = 0.97$	-4.6	缺测	降水事件	[26]
长沙	$\delta^2\text{H} = 8.45 \times \delta^{18}\text{O} + 17.7$, $R = 0.99$	-6.6	-38.4	降水事件	[27]
安庆	$\delta^2\text{H} = 8.16 \times \delta^{18}\text{O} + 11.7$, $R = 0.99$	-7.2	-47.6	降水事件	[28]
南京	$\delta^2\text{H} = 8.49 \times \delta^{18}\text{O} + 17.7$, $R = 0.98$	-8.4	-55.0	GNIP	[29]
庐山	$\delta^2\text{H} = 8.4 \times \delta^{18}\text{O} + 14$, $R = 0.98$	-5.0	-28.2	降水事件	[30]



湖泊群 1: 洞庭湖-江汉和华阳-鄱阳湖;
湖泊群 2: 太湖-三角洲湖群

图 7 河水和湖水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 关系Fig. 7 Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in river and lake water

3 结论

(1) 长江水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值自三峡库区向下游长江口逐渐增大,此变化规律与流域大气降水同位素空间变化趋势相一致,湖口至长江口段及城陵矶-湖口段长江水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值与三峡库区和宜昌-城陵矶段河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值具有显著差异,且明显高于三峡库区和宜昌-城陵矶段。

(2) 基于湖泊水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d -excess 值聚类分析的结果,长江中下游湖泊主要分为湖泊群 1(洞庭湖-江汉和华阳-鄱阳湖)及湖泊群 2(太湖-三角洲湖群),且湖泊群 2 的湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值偏大于湖泊群 1。

(3) 在所有湖泊中,淀山湖和大通湖同位素值最大,洞庭湖和鄱阳湖同位素值偏小,这主要由于长江与鄱阳湖、洞庭湖直接相通,两湖的水情直接受制于长江影响,水位较高,鄱阳湖和洞庭湖同位素组成受长江水影响明显。

参考文献:

[1] Ma R H, Duan H T, Hu C M, *et al.* A half-century of changes in China's lakes: global warming or human influence? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37** (24): L24106, doi: 10.1029/2010GL045514.

[2] 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(1): 1-8.

Wan R R, Yang G S, Wang X L, *et al.* Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(1): 1-8.

- [3] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 799-810.
- Yang G S, Ma R H, Zhang L, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 799-810.
- [4] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(3): 193-202.
- Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14**(3): 193-202.
- [5] 成小英, 李世杰. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析[J]. *科学通报*, 2006, **51**(7): 848-855.
- [6] 秦伯强, 朱广伟. 长江中下游地区湖泊水和沉积物中营养盐的赋存、循环及其交换特征[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, **35**(S2): 1-10.
- [7] 王苏民, 窦鸿身. *中国湖泊志* [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. *地质学报*, 2013, **87**(5): 661-676.
- Ding T P, Gao J F, Shi G Y, *et al.* Spacial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River water and their environmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, **87**(5): 661-676.
- [9] 梁越, 肖化云, 刘小真, 等. 碳氮稳定同位素示踪鄱阳湖流域蚌湖丰水期的氮污染[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(4): 957-966.
- Liang Y, Xiao H Y, Liu X Z, *et al.* Carbon and nitrogen stable isotopes tracing nitrogen pollution in major flooding season in Lake Bang, Lake Poyang Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(4): 957-966.
- [10] 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.
- [11] 詹沪成, 陈建生, 黄德文, 等. 长江干流九江段与鄱阳湖不同季节的同位素特征[J]. *水利学报*, 2016, **47**(11): 1380-1388.
- [12] 陈建生, 彭靖, 詹沪成, 等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析[J]. *水资源保护*, 2015, **31**(4): 1-7.
- [13] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [14] Kendall C, Coplen T B. Distribution of oxygen-18 and deuterium

- in river waters across the United States [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1363-1393.
- [15] Yang Q, Xiao H L, Zhao L J, *et al.* Hydrological and isotopic characterization of river water, groundwater, and groundwater recharge in the Heihe River basin, northwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(8): 1271-1283.
- [16] 张亚男, 甘义群, 李小倩, 等. 2013 年长江丰水期河水化学特征及控制因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(4): 645-654.
- Zhang Y N, Gan Y Q, Li X Q, *et al.* Water chemical characteristics and controlling factors of the Yangtze river in the wet season, 2013 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(4): 645-654.
- [17] 吴敬禄, 林琳, 曾海鳌, 等. 长江中下游湖泊水体氧同位素组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, **26**(3): 53-56.
- Wu J L, Lin L, Zeng H A, *et al.* Characteristics of oxygen isotopic composition of the lakes along the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(3): 53-56.
- [18] Yuan F S, Sheng Y W, Yao T D, *et al.* Evaporative enrichment of oxygen-18 and deuterium in lake waters on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2011, **46**(2): 291-307.
- [19] 刘瑞秋, 张水元. 长江中下游地区若干湖泊水质的多元分析与比较[J]. *水生生物学报*, 2000, **24**(5): 439-445.
- [20] Wu H W, Li J, Song F, *et al.* Spatial and temporal patterns of stable water isotopes along the Yangtze River during two drought years [J]. *Hydrological Processes*, 2018, **32**(1): 4-16.
- [21] Wu H W, Li X Y, He B, *et al.* Characterizing the Qinghai Lake watershed using oxygen-18 and deuterium stable isotopes [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(3): 33-42.
- [22] 杨达源, 李徐生, 张振克. 长江中下游湖泊的成因与演化 [J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(3): 226-232.
- [23] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [24] 周毅, 吴华武, 贺斌, 等. 长江水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 时空变化特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(5): 678-686.
- Zhou Y, Wu H W, He B, *et al.* Study on spatial and temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Yangtze River water and its factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(5): 678-686.
- [25] 邓志民, 张翔, 潘国艳. 武汉市大气降水的氢氧同位素变化特征[J]. *长江科学院院报*, 2016, **33**(7): 12-17, 22.
- [26] 武亚遵, 万军伟, 林云. 湖北宜昌西陵峡地区大气降雨氢氧同位素特征分析[J]. *地质科技情报*, 2011, **30**(3): 93-97.
- [27] Wu H W, Zhang X P, Li X Y, *et al.* Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(1): 90-102.
- [28] 张蓓蓓, 徐庆, 姜春武. 安庆地区大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. *林业科学*, 2017, **53**(12): 20-29.
- [29] 董小芳, 邓黄月, 郑祥民, 等. 长江流域降水中氢氧同位素特征及水汽来源[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(4): 78-84.
- [30] 李云良, 姚静, 张小琳, 等. 鄱阳湖水体垂向分层状况调查研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(6): 915-924.
- Li Y L, Yao J, Zhang X L, *et al.* Study on the vertical stratification in Poyang Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(6): 915-924.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
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	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)