

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曹辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收锕钍沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义

李广^{1,2}, 章新平², 张立峰¹, 王跃峰¹, 邓晓军¹, 杨柳¹, 雷超桂¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要: 分析不同水体中的环境同位素变化特征是应用同位素示踪技术进行区域水循环研究的必要基础。根据2012年1月至2013年12月对长沙地区大气降水、地表水(河水)及地下水(泉水、井水)的跟踪取样, 分析了不同水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化特征。结果表明, 由于水汽来源的季节差异, 长沙地区降水中D、 ^{18}O 的组成呈现出明显的季节变化, 降水中 $\delta^{18}O$ 变化与气温、降水量等气象要素之间存在显著负相关, 当地大气水线(LMWL)特征揭示了长沙地区湿润多雨的气候; 地表水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的波动小于降水, 其稳定同位素值的季节变化相对于降水存在延迟特征, 冬夏半年河水线(RWL)的差异表明地表水在不同季节的主要补给源有所不同; 地下水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的波动幅度最小, 并且泉水、井水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的变化范围以及平均值都非常接近, 说明这两种水体间存在较密切的水力联系, 干旱月份地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 持续偏低, 可能与树根对地下水的吸取加强有一定的关系。研究结果对于合理利用本地区水资源有一定指导意义。

关键词: 稳定同位素; 不同水体; 水循环; 大气水线; 长沙地区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2094-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.06.024

Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle

LI Guang^{1,2}, ZHANG Xin-ping², ZHANG Li-feng¹, WANG Yue-feng¹, DENG Xiao-jun¹, YANG Liu¹, LEI Chao-gui¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Resources and Environment Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Analysis of the variation characteristics of different water bodies is the basis of applying isotopic tracer technique in regional water cycle research. Based on the samples of atmospheric precipitation, surface water (river water) and groundwater (spring water and well water) in Changsha from January 2012 to December 2013, the study analyzed the variation characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in different water bodies. The results showed that the values of D and ^{18}O in precipitation of Changsha showed obvious seasonal variation because of the seasonal difference of the water vapor source, and it showed significant negative correlation between $\delta^{18}O$ in precipitation and some meteorological factors such as the temperature and the amount, the local meteoric water line revealed the climatic characteristic of humid and rainy in Changsha; the fluctuation of δD and $\delta^{18}O$ in surface water was more moderate than those in precipitation, and the seasonal variation of stable isotope value showed lagging characteristic compared with that in precipitation, the difference of river water line (RWL) indicated that the main supply sources of surface water were changing in different seasons; the fluctuation of δD and $\delta^{18}O$ in groundwater was the least, the variation ranges and mean values of δD and $\delta^{18}O$ in spring water and well water were very close, it showed that there were some hydraulic connections in the two water bodies, the values of δD and $\delta^{18}O$ in groundwater were constantly lower during drought months, this phenomenon might have a certain relationship with the increasing absorbency of tree roots from groundwater. The results of the study have certain guiding significance for rational utilization of water resources in the region.

Key words: stable isotope; different water bodies; water cycle; meteoric water line; Changsha

不同于溶于水中的其他同位素, D、 ^{18}O 本身就是水分子的构成部分^[1]。尽管自然界水体中的D、 ^{18}O 等稳定同位素所占比例很小^[2], 但是它们对环境变化的响应十分迅速, 是天然的示踪剂, 因而在水循环及各类水文过程研究具有重要意义。大气降水是水循环过程中的一个重要环节, 降水中稳定同位素丰度的涨落与产生降水的气象过程、水汽源区的初始状态以及大尺度环流形势存在密切的联系^[3~5], 并随着时空的变化而变化。径流, 是水循环中不同水体之间相互作用的纽带, 对地表及地下水体中的

稳定同位素分布具有重要影响。降水、地表径流、壤中流与地下径流是河流主要的补给源^[6~8], 然而由于所在流域的地理、地质、气象和水文要素不同, 其水体中稳定同位素的时空分布及变化特征也存在差异, 加之河流与所在流域的地下水体存在密切水力联系, 从而间接影响到地下水体中稳定同位

收稿日期: 2014-11-28; 修订日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171035, 51309076); 水利部水利公益性行业科研专项(201301075-03); 湖南省研究生科研创新项目(CX2013B223)

作者简介: 李广(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水文与水资源, E-mail: liguangda1988@163.com

素的变化. 因此, 稳定同位素方法被广泛应用于地表水与地下水转化研究中^[9~13], 并很好解释地表水与地下水之间相互作用的关系^[14~20].

自 1961 年以来, 国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)在全球范围内启动对降水中稳定同位素观测的计划(GNIP), 为确定全球或区域的水循环机制提供了基础资料. 同时, GNIP 也倡导对不同水体中的稳定同位素开展相应研究. 近年来, 国内一些学者对我国的洞庭湖流域^[20]、黑河流域^[6]、北京地区^[7]、内蒙古河套平原^[21]等流域或地区的不同水体中的稳定同位素特征进行了深入分析, 通过其稳定同位素的变化探讨了各区域的水循环特征. 长沙地处湘江中下游, 自然条件下, 该地区的降水、地表水、地下水与植被生态用水之间的相互转换过程比较复杂; 加之长沙作为湖南省的省会, 人口密集, 经济发达, 各产业对水资源的需求量不断攀升, 从而导致人类活动对区域的水循环影响日益加剧, 水安全形势受到威胁. 因此, 迫切需要对本地区的水文循环规律进行深入研究.

本研究自 2012 年 1 月至 2013 年 12 月对长沙地区大气降水、地表水(河水)以及地下水(泉水、井水)进行了连续取样, 获得了比较丰富的稳定同位素数据, 通过深入分析该地区不同水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化特征, 可以揭示大气降水、地表水与地下水之间的水力联系, 从而分析其水循环路径, 以期水污染治理、地表水的时空调配以及防渗工程提供一定指导, 也可为中低纬度季风区古气候、古环境的重建提供来自稳定同位素的证据.

1 研究区概况

长沙地区位于 $111^{\circ}53' \sim 114^{\circ}15'E$, $27^{\circ}51' \sim 28^{\circ}41'N$, 总面积约为 $1.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地处湘中丘陵与洞庭湖平原的过渡地带, 湘浏盆地西南缘. 地貌分为剥蚀构造丘陵及河流堆积 V 级阶地两类. 地层主要为第四系全新统人工填土层, 基岩以白垩系碎屑岩以及震旦系板岩居多. 地下水主要为松散岩类孔隙水以及基岩分化裂隙水, 大气降水是地下水的主要补给来源, 每年 4~9 月为地下水补给期, 10 月至翌年 3 月为地下水消耗期与排泄期.

长沙地区受亚热带季风气候影响, 气候温暖潮湿, 春夏多雨, 秋冬干旱, 年平均气温 17.2°C , 年均降水量达 1361.6 mm . 湘江由南往北贯穿全境, 对本地区水域起控制作用, 河床坡降小, 洪峰延时长, 径流量大, 与地下水之间存在双重关系, 即少雨时节

成为地下水的排泄通道, 多雨季节反补地下水. 岳麓山为本地区主要山脉, 南北长 4 km , 东西宽 $1.5 \sim 2 \text{ km}$, 山体面积 6 km^2 , 主峰海拔 300.8 m , 主要土壤类型为红壤、山地黄红壤, 山体植被茂盛, 隶属亚热带常绿阔叶林, 地下水资源丰富. 湘江与岳麓山毗邻, 使其成为探讨区域水循环的一个天然试验场. 基于此, 本研究在湘江橘子洲以及岳麓山进行了不同水体的采样.

2 研究方法

2.1 水样采集

整个水样采集工作始于 2012 年 1 月 1 日, 止于 2013 年 12 月 31 日, 包括对本地区降水、地表水(河水)、地下水(泉水、井水)的取样(图 1).

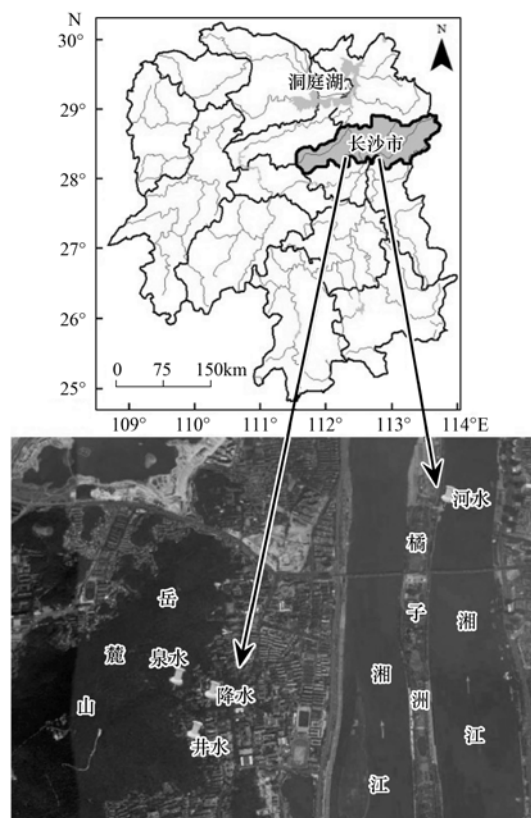


图 1 长沙地区取样点位置示意

Fig. 1 Sampling sites in Changsha

在岳麓山下的湖南师范大学气象园进行了大气降水的采集工作. 对降水量 $\geq 1 \text{ mm}$ 的降水事件, 在每次降水停止时通过集雨器人工收集. 其中, 对于液态降水, 直接倒入 30 mL 聚乙烯塑料瓶中密封, 而对于固态降水(雪、冰雹), 则用密封性好的塑料袋收集, 置于室温环境待其融化, 然后再倒入塑料瓶中密封, 所有降水样放入冰箱冷藏室低温保存. 每次降水事件的起止时间、站点降水量、站点气温、站

点水汽压等气象要素均通过自动气象站记录. 在 2 个完整水文年里,共收集到各类降水样 181 个(对于一日多次降水,其水体中氢氧稳定同位素值进行了加权处理,故只算作一个降水样.)

在湘江橘子洲中部河堤进行了地表水(河水)的采样工作. 对河水的取样要求在河流水面以下 10 cm,以确保水体充分融合并避免水体表面蒸发引起的同位素分馏影响. 地下水的采样工作分别在岳麓山下的赫石坡(泉水)、向阳村(井水)进行,泉水由天然泉眼流出,井水采集于一口深 2 m 左右、直径 50 cm 的圆形井. 对地表水、地下水的采集始于每月 1 日,止于每月 26 日,每隔 5 d 进行一次取样,每次所采水样用 30 mL 聚乙烯塑料瓶装满并密封保存至冰箱冷藏室,2 年时间内共收集到河水样 144 个、泉水样 144 个、井水样 144 个.

2.2 水样分析

以上所有水样中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的测定分析均采用美国 Los Gatos Research (LGR) 公司研发的液态水同位素分析仪 (DLT-100, 型号: 908-0008), 原理是通过红外激光技术测定光腔内水汽中 $H_2^{18}O$ 、 $HD^{16}O$ 分子的浓度,得出水样与标样中 $^{18}O/^{16}O$ 与 D/H 的比值. 所有分析结果用相对于维也纳标准平均海洋水 (V-SMOW) 的千分差 (‰) 表示:

$$\delta X = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表水样和 V-SMOW 中氘或氧稳定同位素比率 $R(^{18}O/^{16}O, D/H)$, 本仪器测试 δD 、 $\delta^{18}O$ 精度分别为 $\pm 2\text{‰}$ 、 $\pm 0.3\text{‰}$.

为了进行日变化的分析,对于一日多次降水,进行了日加权平均计算:

$$\overline{\delta X} = \sum P_i \delta X_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中, δX_i 与 P_i 分别为 ^{18}O 、 D 稳定同位素比率以及相应降水量.

3 结果与讨论

3.1 大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 特征及其指示意义

根据长沙地区降水中氢氧稳定同位素以及温度、降雨量的日变化可知(图 2),降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 存在一定程度的波动; δD 的变化范围在 -133.02‰ ~ -27.51‰ 之间,平均值为 -28.15‰ , $\delta^{18}O$ 的变化范围在 -18.07‰ ~ -0.96‰ 之间,平均值为 -5.46‰ ,可以看出,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的波动范围远大于其他水体,并且其平均值也要大于其他水体(表 1). 降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 存在比较明显的季节变化,在夏半年(4

~9 月),降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 整体偏负,而在冬半年(10 月 ~ 翌年 3 月),降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 却整体偏正,这是中低纬度季风区存在的一个普遍特点^[22,23],原因在于冬夏半年降水的水汽来源以及蒸发条件有所不同^[24],长沙地区夏半年降水的水汽主要来源于热带海洋气团的输送,此种气团沿途不断形成降水,加之轻(H 、 ^{16}O)重(D 、 ^{18}O)同位素之间存在分馏速率差异,从而导致降水气团中重同位素在沿途不断被“冲刷”,最终到达长沙地区降水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 要更加偏负;长沙地区冬半年的降水主要受西风带携带的大陆气团以及局地再循环水汽影响,此种气团比较稳定,沿途不易形成降水,“冲刷”作用弱,水汽中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的初始值也要偏高,因此冬半年长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 偏正. δD 、 $\delta^{18}O$ 的日变化与温度、降水量等气象要素的日变化存在明显的反位相关关系(图 2),长沙地区夏半年气温高、降水充沛,雨热同期,降水中稳定同位素值整体偏负,冬半年反之,对此分析了降水中 $\delta^{18}O$ 与温度 (T)、降水量 (P) 的线性相关关系:

$$\delta^{18}O = -0.10T - 3.8 \quad (3)$$

$$(r = -0.24, \alpha = 0.01, n = 181)$$

$$\delta^{18}O = -0.04P - 4.9 \quad (4)$$

$$(r = -0.19, \alpha = 0.01, n = 181)$$

由此看出,降水中 $\delta^{18}O$ 变化存在显著的反温度效应、降水量效应,这与同处中低纬度的腾冲^[5]、桂林^[25] 的研究结果是一致的. 温度影响着降水过程中的同位素分馏,从而使得降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化具有温度效应,而中低纬度地区由于受海洋性气团的深刻影响,降水过程中的强对流现象使得降水量效应表现突出,从而在某种程度上掩盖了温度效应. 同时值得注意的是,在某些连续性降水事件中,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 变化却没有遵循降水量效应,这也说明降水量的大小并不是影响降水中 D 、 ^{18}O 含量变化的决定性因素,降水量效应很可能只是一种外部表现形式,本地区降水的水汽来源与水汽团运移过程中稳定同位素的分馏程度才是影响降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 变化的决定性因素.

Craig^[26] 通过分析大约 400 个来自不同地理位置的河水、湖水、雨水与雪水样,提出 δD 、 $\delta^{18}O$ 之间的线性方程: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$, 后来被定义为全球大气水线 (GMWL), 被广泛地用以识别起源于大气降水的地表水、地下水之间的相互联系. 根据获得的长沙地区 2 a 降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 资料,利用最小二乘法求得长沙地区大气水线方程 LMWL(图 3):

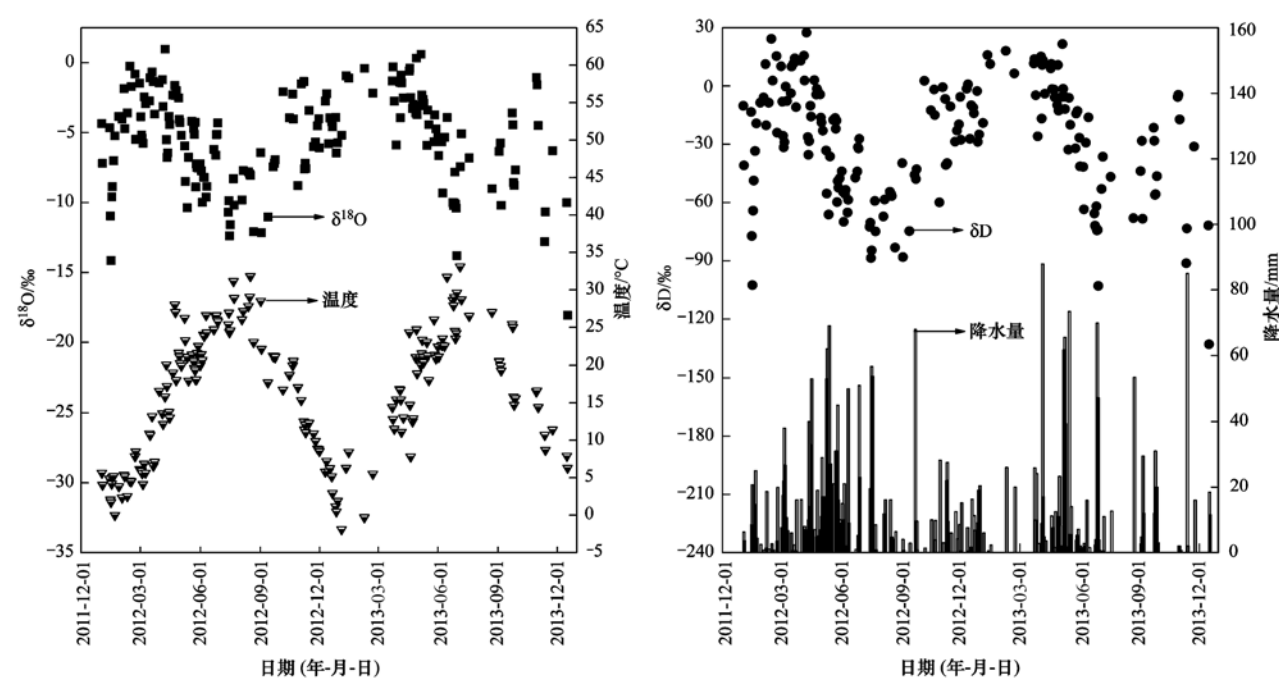


图2 长沙地区大气降水中 D、¹⁸O 与近地面气象要素的日变化

Fig. 2 Daily variations of D, ¹⁸O in precipitation and near-surface meteorological factors in Changsha

表1 不同水体中 δD 与 δ¹⁸O 的变化

水体	大气降水		地表水(河水)		地下水(泉水)		地下水(井水)	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
δD/‰	-133.02 ~ 27.51	-28.15	-63.66 ~ -25.08	-37.14	-52.48 ~ -22.41	-36.62	-55.82 ~ -29.47	-38.18
δ ¹⁸ O/‰	-18.07 ~ 0.96	-5.46	-9.91 ~ -4.61	-6.10	-8.81 ~ -5.17	-6.56	-8.26 ~ -5.28	-6.55

$$\delta D = 8.84 \delta^{18} O + 20.1, \quad (5)$$

$(r = 0.98, \alpha = 0.001, n = 181)$

该大气水线方程与 GMWL 相比,其斜率与截距都要偏大,这是由于在瑞利平衡条件下,D 的分馏效应为¹⁸O 分馏效应的 8 倍,温度越低,分馏效应之比越大,而湿润多雨是长沙地区的主要气候特征,这对应了雨滴在冷凝过程中的温度偏低,并且雨滴在下降过程中所经历的蒸发并不强烈,从而使得本地区大气水线方程的斜率与截距偏大.长沙地区大气水线与桂林^[27]、南京^[27]地区的大气水线差别不大,则表明这些地区在降水水汽来源、受季风影响程度等方面具有相似性.利用相同的方法求得长沙地区冬、夏半年的水线方程(图 3),与中高纬内陆地区不同,长沙地区冬、夏半年水线方程的斜率与截距相差不大,这与区域气候特征有很大的关系.

3.2 地表水中 δD、δ¹⁸O 特征及其指示意义

长沙地区地表水(河水)中 δD 的变化范围在 -63.66‰ ~ -25.08‰ 之间,平均值为 -37.14‰, δ¹⁸O 的变化范围在 -9.91‰ ~ -4.61‰ 之间,平均

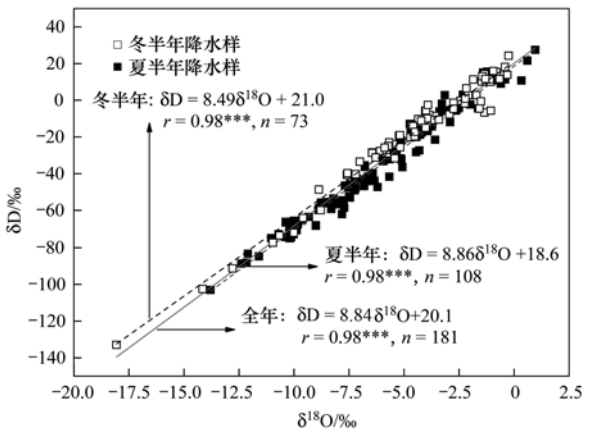


图3 长沙地区大气水线方程

Fig. 3 Local meteoric water line in Changsha

值为 -6.10‰(表 1),可以看出,地表水中 δD、δ¹⁸O 的波动幅度与平均值要小于降水但大于地下水.由于河水是在地表流动的水体,并且与大气降水密切接触,其水面也时刻存在着蒸发,所以影响河水中 D 与¹⁸O 的组成因素比较复杂.

长沙地处湘江流域中下游,其河川径流来源主

要有大气降水、上游来水、地下水以及其他途径,并且这些补给源在不同季节的稳定同位素组成与对河水的补给比例均有所差别,最终表现为河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化. 上文根据长沙地区降水以及气温的变化特征,将每年4~9月定义为夏半年,其他月份被定义为冬半年,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化呈现出良好的季节变化,但是通过对长沙地区2 a河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化资料分析发现,长沙地区河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化响应时段并没有与降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化时段完全重合. 应该说相对于降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化,河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化存在延迟特征,具体表现为每年6月初,长沙地区河水中D、 ^{18}O 组成含量开始降低,其河流水位明显升高,直到每年11月初,河水中D、 ^{18}O 的组成含量才开始升高,其河流水位也随之下降. 为了证明河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化存在延迟特征,可以与降水资料进行对比分析,①长沙地区在2012年与2013年5月的降水量分别高达431 mm、287.6 mm,此时降水中氢氧稳定同位素的含量已迅速降低(河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值直到6月初才开始降低),而在2012年与2013年10月的降水量已急剧减少,分别只有25.1 mm、4 mm,此时降水中氢氧稳定同位素含量也开始升高(河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值直到11月初才开始升高);②2013年8月23日发生了一次较大降雨事件,此次降水量为53.5 mm,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分别为-68.08‰、-9.01‰,期间于2013年8月26日采集了一个河水样,但是该河水样中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分别为-52.91‰、-7.29‰,明显高于此次降水中氢氧稳定同位素值,直到2013年9月1日的河水样 δD 、 $\delta^{18}O$ 值才降低至-63.66‰、-9.91‰. 以上两个事例证明了河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化响应存在延时性,也表明大气降水补给河水存在一个汇流阶段,河水水位变化对降水响应延迟,从而表现为6~10月湘江水位处于一个整体较高水平, δD 、 $\delta^{18}O$ 值整体偏低,并且该时段的河水在一定程度上补给地下水;而每年11月后,湘江流域长沙段进入枯水期,水位下降,降水减少,大气湿度降低,水面蒸发加强,地下水对河流的侧向补给处于主要地位,其低水位一直持续到翌年5月,但本时段河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值整体偏高.

因此,利用稳定同位素方法判别河水在不同季节补给源的变化是很有效的,通过对长沙地区冬、夏半年的河水线(RWL)与本地区大气水线(LMWL)的对比分析也可以验证河水在不同季节的

主要补给源存在差异. 由于长沙地区河水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化存在延迟特征,因此将每年6~10月划分为河水的夏半年,其他月份定义为河水的冬半年. 图4(a)显示,长沙地区冬、夏半年RWL的斜率与截距均小于LMWL,这说明本地区河水最终的补给来自大气降水,夏半年RWL很接近LMWL则表明夏半年河水受降水的补给更加直接,而冬半年RWL斜率与截距小于夏半年则表明冬半年河水的补给除了降水与上游来水外,地下水的径流补给成为了一种重要方式,并且河水经历了一定程度的

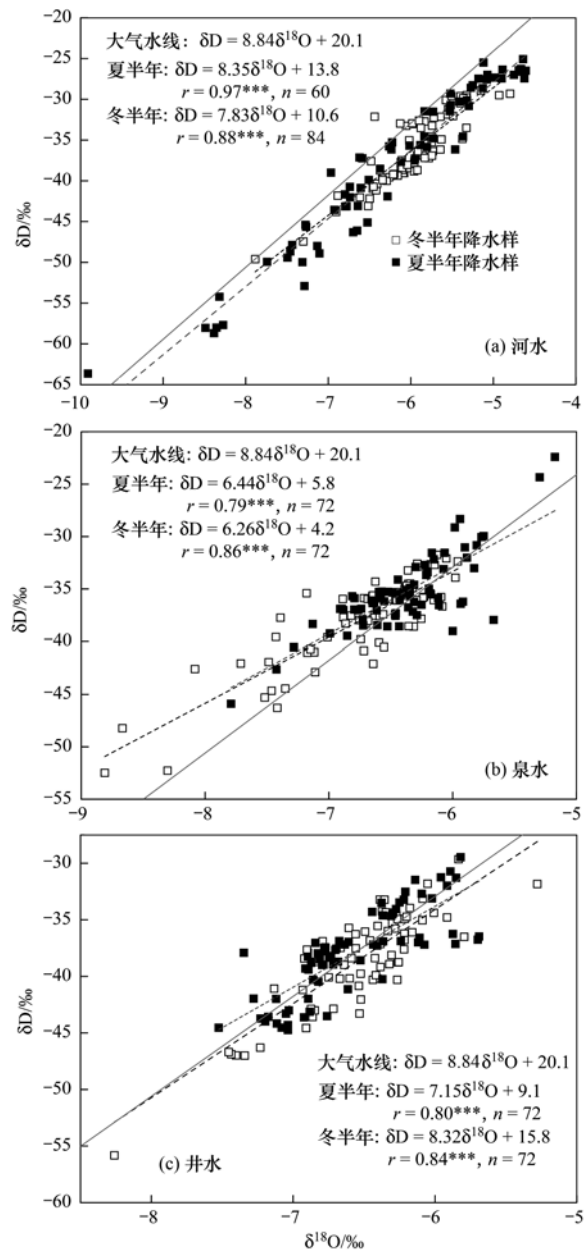


图4 长沙地区河水、泉水、井水中 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 4 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ of river water, spring water, well water in Changsha

蒸发分馏。由于条件所限,本研究对河水的采集只选择了橘子洲一个点,建议在往后的研究中对河流的不同地段进行相关采样,这可为揭示河水与降水、地下水之间的水力联系提供更加有力的证据。

3.3 地下水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 特征及其指示意义

对长沙地区地下水的采集包括泉水与井水,这两种水体均属于浅层地下水,与当地大气降水、地表水有着比较密切的补排关系。长沙地区泉水中 δD 的变化范围在 $-52.48‰ \sim -22.41‰$ 之间,平均值为 $-36.62‰$, $\delta^{18}O$ 的变化范围在 $-8.81‰ \sim -5.17‰$ 之间,平均值为 $-6.56‰$; 井水中 δD 的变化范围为 $-55.82‰ \sim -29.47‰$, 平均值为 $-38.18‰$, $\delta^{18}O$ 的变化范围为 $-8.26‰ \sim -5.28‰$, 平均值为 $-6.55‰$ (表 1)。可以看出,长沙地区泉水、井水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的变化幅度与平均值均小于本地降水与地表水,并且泉水、井水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的变化范围与平均值都非常接近,这表明泉水与井水之间存在较密切的水力联系,区内地下水径流的连通条件良好^[7]。

由于长沙地区泉水、井水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的波动幅度比较平缓,在研究中发现这两种水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化没有降水与地表水那么明显,这是湿润地区地下水存在的一个普遍规律。但是在采样过程中发现泉水流量、流速与井水水位对本地区较大降水事件的响应度非常灵敏,同时也反映在这两种水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化上。例如在 2013 年 5 月 16 日长沙地区泉水、井水中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 出现了高值,通过对比本时段的降水资料分析发现,2013 年 5 月 14 日本地区发生了一次较大降水事件,其降水量达 25

mm, 降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分别高达 $-6.10‰$ 、 $-3.38‰$, 远高于同时段其他降水事件中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值,时隔两天后(2013 年 5 月 16 日)对本地区泉水、井水进行了采样,其水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的变化得到良好响应,这表明大气降水尤其是强降水事件对本地区地下水的补给十分重要,也说明本地区地下径流的连通条件良好。此外,对长沙地区泉水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 资料分析发现(表 2),2012 年 1 月 6 日至 2012 年 3 月 6 日共 13 个泉水样中的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值持续偏低,并且长沙地区泉水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的最低值均出现在本时段内(2012 年 2 月 11 日),对照该时段长沙地区的降水资料发现,该时段长沙地区降水事件比较少,降水量偏少,降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值整体偏高,但是为何该时段泉水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值持续偏低? 通过查阅 2011 年降水资料,发现 2011 年长沙地区年降水量只有 908 mm,属于贫水年,并且 2011 年 11 月至 12 月总降水量只有 51.8mm,本研究的泉水取样点位于岳麓山下,岳麓山树木繁密茂盛,树木的生长对水的需求量很大,而自 2011 年 11 月后长沙地区降水严重偏少,树根对地下水的吸取加强,泉水流量不断减少,泉水中 D、O 不断贫化; 对比同时段井水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化发现,2012 年 1 月 11 日至 2012 年 2 月 21 日共 9 个井水样中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值同样偏低,其他 3 个井水样(W145、W156、W157) δD 、 $\delta^{18}O$ 值偏高可能与人为影响有关;井盖被人为打开,混入了偏高 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的降水;同时,井盖的打开促进了井内空气流通,并且该时段空气相对湿度较低,加速了表层井水的蒸发,从而引起水体中重同位素的蒸发富集效应。

表 2 长沙地区 2012-01-06 至 2012-03-06 泉水样与井水样稳定同位素值

Table 2 Stable isotope values of spring water and well water from 2012-01-06 to 2012-03-06 in Changsha						
采样日期	泉水样			井水样		
	编号	$\delta D/‰$	$\delta^{18}O/‰$	编号	$\delta D/‰$	$\delta^{18}O/‰$
2012-01-06	S145	-40.87	-6.72	W145	-34.25	-6.01
2012-01-11	S146	-40.90	-6.68	W146	-40.30	-6.80
2012-01-16	S147	-48.22	-8.67	W147	-40.39	-7.01
2012-01-21	S148	-52.26	-8.30	W148	-44.56	-7.74
2012-01-26	S149	-46.28	-7.42	W149	-46.99	-7.34
2012-02-01	S150	-42.57	-8.08	W150	-46.98	-7.40
2012-02-06	S151	-40.78	-6.84	W151	-46.88	-7.44
2012-02-11	S152	-52.48	-8.81	W152	-46.69	-7.45
2012-02-16	S153	-44.65	-7.46	W153	-42.29	-7.13
2012-02-21	S154	-42.05	-7.71	W154	-41.08	-7.02
2012-02-26	S155	-45.30	-7.52	W155	-42.39	-7.12
2012-03-01	S156	-42.08	-7.12	W156	-36.04	-6.49
2012-03-06	S157	-44.44	-7.35	W157	-36.88	-6.79

长沙地区冬夏半年的泉水线(SWL) [图 4 (b)]、井水线(WWL) [图 4 (c)] 均小于本地区大

气降水线(LMWL),表明大气降水是这两种水体的重要补给源,泉水线在冬夏半年区别不大,并且其斜

率、截距偏小,说明大气降水在下渗补给泉水过程中经历了比较强烈的蒸发分馏,而井水线在冬半年存在一些差别可能与人为因素的影响有一定关系,在往后的研究中将会继续采集本地区井水样,分析其 δD 、 $\delta^{18}O$ 特征变化是否受人为因素干扰。

4 结论

(1)长沙地区大气降水中稳定同位素值存在明显的季节变化,表现在夏半年降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值偏低,冬半年降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值偏高,这主要归因于不同时期降水的水汽来源不同;降水中 $\delta^{18}O$ 变化具有显著的降水量效应以及反温度效应;长沙地区大气水线方程(LWML)反映出本地区湿润多雨的气候特征。

(2)地表水(河水)中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化存在一定波动幅度,明显小于降水,其水体中稳定同位素值也存在季节变化,6~10月 δD 、 $\delta^{18}O$ 值偏低,10月~翌年5月 δD 、 $\delta^{18}O$ 值偏高,相对于降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的季节变化具有延迟效应,冬夏半年的河水线(RWL)存在差异,表明地表水在不同季节的主要补给源有所不同。

(3)地下水(泉水、井水)中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化更加趋于稳定,季节变化不明显,其水体中 δD 、 $\delta^{18}O$ 平均值小于降水与地表水;地下水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化对于强降水事件的响应非常灵敏,而在于干旱少雨季节,泉水、井水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值持续偏低可能与树根对地下水的吸取加强有关;冬夏半年的泉水线(SWL)差异很小,并且其斜率、截距偏小说明大气降水在下渗补给泉水过程中经历了比较强烈的蒸发分馏。

(4)通过分析长沙地区各水体稳定同位素变化特征,表明大气降水对地表水、地下水的补给非常重要,地表水与地下水之间存在密切的水力联系,并且本地区的径流连通条件良好,因此要加强对本地区水土、植被的保护。由于本地区降水主要发生在夏半年,在不影响区域水循环的基础上,建设水利工程调蓄水资源,可以缓解城区冬半年用水紧张局面。

致谢:感谢南京大学许有鹏教授对本文框架设计的建议以及湖南师范大学黄煌同学对水体样品的测试分析。

参考文献:

- [1] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 105.
- [2] 李广, 章新平, 吴华武, 等. 云南大气降水中 $\delta^{18}O$ 与气象要

素及水汽来源之间的关系[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(6): 1403-1052.

- [3] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **103**(D22): 28721-28742.
- [4] 李小飞, 张明军, 马潜, 等. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2924-2931.
- [5] 李广, 章新平, 张新主, 等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(11): 1458-1465.
- [6] 张应华, 作彦卿. 黑河流域不同水体中 $\delta^{18}O$ 的变化[J]. 水科学进展, 2007, **18**(6): 864-870.
- [7] 翟远征, 王金生, 滕彦国, 等. 北京市不同水体中 D 和 ^{18}O 组成的变化及其区域水循环指示意义[J]. 资源科学, 2011, **33**(1): 92-97.
- [8] Dutton A, Wilkinson B H, Welker J M, et al. Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}O/^{16}O$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA[J]. Hydrological Processes, 2005, **19**(20): 4121-4146.
- [9] Guay B E, Eastoe C J, Bassett R, et al. Identifying sources of groundwater in the lower Colorado River valley, USA, with $\delta^{18}O$, δD , and 3H ; implications for river water accounting [J]. Hydrogeology Journal, 2006, **14**(1-2): 146-158.
- [10] McCarthy K A, McFarland W D, Wilkinson J M, et al. The dynamic relationship between ground water and the Columbia River: using deuterium and oxygen-18 as tracers[J]. Journal of Hydrology, 1992, **135**(92): 1-12.
- [11] Zhang Y, Wu Y, Su J, et al. Groundwater replenishment analysis by using natural isotopes in Ejina Basin, Northwestern China[J]. Environmental Geology, 2005, **48**(1): 6-14.
- [12] Fórizs I, Berecz T, Molnár Z, et al. Origin of shallow groundwater of Csepel Island (south of Budapest, Hungary, River Danube): isotopic and chemical approach [J]. Hydrological Processes, 2005, **19**(17): 3299-3312.
- [13] Song X F, Kayane I, Tanaka T, et al. A study of the groundwater cycle in Sri Lanka using stable isotopes [J]. Hydrological Processes, 1999, **13**(10): 1479-1496.
- [14] 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.
- [15] 宋献方, 李发东, 于静洁, 等. 基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征[J]. 地理研究, 2007, **26**(1): 11-21.
- [16] 田立德, 姚檀栋, 沈永平, 等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. 水科学进展, 2002, **13**(2): 206-210.
- [17] Peng T R, Huang C C, Wang C H, et al. Using oxygen, hydrogen, and tritium isotopes to assess pond water's contribution to groundwater and local precipitation in the pediment tableland areas of northwestern Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2012, **450**: 105-116.
- [18] 章新平, 中尾正义, 姚檀栋, 等. 青藏高原及其毗邻地区降

- 水中稳定同位素成分的时空变化[J]. 中国科学: D 辑, 2001, **31**(5): 353-361.
- [19] 刘光生, 王根绪, 孙向阳, 等. 多年冻土区风火山流域降水河水稳定同位素特征分析[J]. 水科学进展, 2012, **23**(5): 621-627.
- [20] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 等. 湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(5): 540-546.
- [21] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, **35**(4): 104-112.
- [22] 徐振, 刘玉虹, 王中生, 等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1007-1013.
- [23] 郑琰明, 钟巍, 彭晓莹, 等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 637-643.
- [24] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, **23**(1): 32-41.
- [25] 吴夏, 朱晓燕, 张美良, 等. 大气降水中稳定同位素组成的高分辨率记录——以桂林地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(2): 182-188.
- [26] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [27] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, **53**(4): 356-364.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行