

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈雨冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐雨梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义

许琦^{1,2}, 李建鸿², 孙平安², 何师意², 于爽^{2*}

(1. 国家地理信息系统工程技术研究中心, 武汉 430074; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 2014年6月和2015年1月, 在西江各干流和支流分别采集了54个水样, 对水的氢氧同位素组成进行了分析。结果表明, 西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 存在明显的线性关系, 这种相关关系旱季显著于雨季, 西江水体旱、雨季 ^{18}O 、D值均沿大气降水线分布。氘盈余(d)值雨季大于旱季, 主要是由于雨季降水多通过落水洞、竖井、漏斗等岩溶形态直接补给地下河, 与围岩接触的时间较短, 而旱季降雨较少, 地表河系统受储存在岩溶裂隙、孔隙中的地下水体补给。由于受海拔高度及蒸发效应的影响, 西江干流红水河—浔江段和支流右江—郁江段 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值整体上表现为沿流程逐渐偏正的趋势, 而由于桂江支流上游到下游海拔差异不大, 流程简短, 加上桂江支流水量少于西江干流和右江—郁江支流, 桂江支流未出现从上游到下游逐渐偏正现象。通过 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程的关系建立了二者之间的线性回归模型, 揭示了雨季西江水体随高度的变化率为: $-0.44\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 旱季为 $-0.45\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 反映西江流域降水的高度效应, 这对流域水循环过程的研究具有重要的水文地质意义。

关键词: 稳定同位素; 高程效应; 西江流域; 水循环

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2308-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607136

Spatial Variation and Environmental Significance of $\delta^{18}\text{O}$ and δD Isotope Composition in Xijiang River

XU Qi^{1,2}, LI Jian-hong², SUN Ping-an², HE Shi-yi², YU Shi^{2*}

(1. National Engineering Research Center for Geographic Information System, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: The H and O isotope composition of the Xijiang water was investigated on 54 samples collected from the mainstreams and main tributaries in June 2014 and January 2015. It was found that in the Xijiang river, there was a remarkable linear relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD . This relationship was more significant in the dry season. In both seasons, the ^{18}O and D values distributed along the meteoric water line, which indicated that precipitation was the source of the Xijiang River. Due to the direct water recharge through karst forms (i. e. sinkholes, vertical shaft and funnel) to the underground river, the d -excess value was higher in the rainy season. While during the dry season, water recharge came from the storage in fissures and pores. Affected by altitude and evaporation effect, along the mainstream Hongshui River-Xunjiang and tributary Youjiang-Yujiang reach, the $\delta^{18}\text{O}$ and δD values were gradually approaching positive value in general. However, along the short tributary Guijiang reach, the altitude difference was not dramatic, and the discharge was less, the same phenomenon was not observed. By establishing a linear regression model between $\delta^{18}\text{O}$ and altitude, it revealed that the change rate of Xijiang water with altitude was $-0.44\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ in the rainy season, and $-0.45\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ in the dry season. The result reflected the height effect of the precipitation, which has a considerable meaning for the study of hydrological cycle in a river basin.

Key words: stable isotope; elevation effect; Xijiang basin; water cycle

由于氢氧同位素是水分子的直接组成部分, 在水循环的每一阶段, 受大气蒸汽源的同位素组成, 水汽凝结和蒸发过程中的同位素分馏作用、土壤和地表水的蒸发作用及不同水体的混合作用等影响, 因此水中的氢氧稳定同位素具有不同的演化规律和组成特征^[1,2]。自20世纪80、90年代以来, 氢氧同位素组成已被广泛用于指示江河环境变化, 目前已有报道的世界大江大河包括欧洲的莱茵河和多瑙河、印度的恒河、南美的亚马逊河、韩国的汉江以及中国的长江和黄河等^[1~6]。河水中氢氧同位素组成的时空

变化和空间分布, 受流域地形、地貌和人为活动的制约, 是对流域内降水、冰雪融水、地下水等补给源的氢氧同位素特征以及河水所受蒸发影响的综合响应^[7]。根据前人的研究可以将河流氢氧同位素的

收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2017-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402324); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502302); 国家地质调查项目(DD20160305-01); 广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118228); 中国地质科学院所控基金项目(201429)

作者简介: 许琦(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地理信息系统, E-mail: xuqi@karst.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yushi@karst.ac.cn

影响因素归纳如下: ①冰川融水补给的影响. 一般冰川融水补给的河流 $\delta^{18}\text{O}$ 较贫化^[1,8], 如 Mook 等^[1]的研究发现位于西欧的莱茵河主要受瑞士阿尔卑斯山 $\delta^{18}\text{O}$ 较贫化的冰雪融水补给, 而荷兰境内的默兹河则主要接受降水补给, 所以前者 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值明显低于后者. 史晓宜等^[8]的研究发现间接受冰川融水补给的典型温冰川区湖泊 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较贫化. ②降水同位素效应的影响. 大气降水氢氧同位素组成的分布很有规律, 他主要受蒸发和凝结作用所制约, 也就是说, 降水的同位素组成与地理和气候因素存在直接的关系, 这些因素包括温度效应、纬度效应、季节效应、大陆效应、高程效应和降水量效应. Yurtsever 等^[9]研究表明大气降水的同位组成与当地气温的关系密切, 且成正相关变化, 与纬度变化存在明显的负相关关系, 从低纬度到高纬度, 随着温度的降低, 降水的重同位素逐渐贫化. 苏小四等^[10]研究了黄河从上游源头附近的玛多直到入海口 18 个断面的河水在旱雨季的氢氧同位素组成, 研究表明无论旱季还是雨季, 河水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成都从下游到上游趋于贫化, 反映了与降水相似的同位素大陆效应和高程效应. 顾镇南等^[11]对上海、南京、武汉等地长江水的氢氧同位素组成的季节变化进行了调查, 调查表明三城市的长江水中氢氧同位素 5 月偏正, 10 月偏负, 从上游到下游长江水氢氧同位素逐渐偏正. 陆宝宏等^[12]探讨了长江水氢氧同位素的时空分布与降水量和径流量的关系, 研究表明长江干流同位素时程变化主要受降水同位素季节变化的影响. ③地下水补给的影响. 地下水的影响又分为两方面, 一方面是由于地下水和地表水蒸发强度的差异造成的. 与地表水相比, 地下水受到的蒸发作用较小, 其 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比地表水贫化, 当地表河流受到地下水补给后 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变贫化. 有研究发现由于蒸发效应的差异^[13~15], 澳大利亚墨累河、非洲尼罗河、北美洲特拉基河和印度一些河流的沿程河水与地下水氢氧同位素组成存在明显差异, 其联合分析河水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值确定了这些河流地表水和地下水混合的过程. 同样田立德等^[16]通过对那曲水文站 1998 年夏季降水、径流过程及其相应的 $\delta^{18}\text{O}$ 过程的监测, 分析发现由于蒸发效应的差异, 那曲河河水与其周边地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 存在明显差异, 从而确定曲河河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时程变化除了降水因素外还受地下水补给的影响. 另一方面由于地下水与其他物质发生变化同位素交换, 包括与围岩和气体在高温或常温条件下的同位素交换. 碳酸盐分解会产生

CO_2 , 因而地下水参与 CO_2 发生如下同位素交换反应: $\text{C}^{16}\text{O}_2 + 2 \text{H}_2^{18}\text{O} \rightleftharpoons \text{C}^{18}\text{O}_2 + 2\text{H}_2^{16}\text{O}$, 这一交换经常发生, 且速度相当快, 当 CO_2 的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比水的低, 那么 CO_2 将趋于富集 ^{18}O 而水则趋于贫化^[8]. 目前有关围岩、 CO_2 与地下水发生同位素交换的研究还不够深入. ④人类活动的影响. 人类活动对河流氢氧同位素的影响主要表现为大规模筑坝拦截修建水电站和工农业取水使径流量减少. 筑坝拦截减缓了河流流速, 增加河水滞留时间, 形成了“湖泊效应”. 高建飞等^[17]于 2005 年夏季对黄河源头到渤海入海口河水的氢氧同位素组成进行分析, 认为当黄河流域大气降水降至地表成为地表水后, 人类筑坝和工农业取水使径流量减少, 水体受本身的蒸发作用和多次循环使用导致长时间停留地表产生进一步蒸发的双重影响; 徐敬争等^[18]通过对太湖进行长期的监测分析认为湖泊入水量的比重是湖水氢氧稳定同位素富集的主要控制因素; 陆宝宏等^[12]分析认为长江流域湖泊或水库蒸发效应是导致长江干流重同位素沿程富集的主要因素之一.

西江是珠江流域的主要水系, 前人对西江流域的研究主要集中在流域径流演化^[19]、流域碳循环^[20]、流域极端气候^[21,22]等方面, 尚未有有关于西江流域氢氧同位素的研究, 而西江流域岩溶地貌分布广泛, 特殊地质背景是否会对河流氢氧同位素造成影响? 而氢氧同位素示踪法是否能反映岩溶地表河流水文过程? 目前有关岩溶地质背景对河流氢氧同位素影响方面的研究较少, 因此, 对于西江流域氢氧同位素组成及其变化特征还有必要进行深入研究. 2014 年雨季和 2015 年旱季, 本研究在西江主要干流和支流进行系统采样分析, 对河水进行系统的水化学与氢氧同位素研究, 以期为更深入认识西江流域的水文过程及沿程人类活动对江水的影响提供科学依据.

1 材料与方法

西江是珠江流域的主要水系, 发源于云南沾益县马雄山, 流经贵州、广西而入广东, 在广东思贤滘汇入北江, 全长 2 214 km, 河道平均坡降 0.58‰, 集水面积 $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$, 干流自上而下分为南盘江、红水河、黔江、浔江和西江 5 个河段. 西江流域地处典型亚热带季风气候区, 年平均径流总量^[23]约 2 300 亿 m^3 , 年内径流变化大, 4~9 月为汛期, 约占全年径流量的 72%~88%, 多年平均气温 14~22℃, 年际变化较少. 流域内多为高原和山地丘陵,

表 1 采样点的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 $d\text{-excess}$ 值¹⁾
Table 1 The $\delta^{18}\text{O}$, δD and $d\text{-excess}$ of sampling sites, Xijiang River

编号	河流	地名	雨季					旱季			
			取样日期	高程/m	δD/‰	δ ¹⁸ O/‰	d-excess/‰	取样日期	δD/‰	δ ¹⁸ O/‰	d-excess/‰
XJD01	漓江	阳朔水文站	2014-06-19	200	-43.65	-7.04	12.67	2015-01-15	-33.84	-5.53	10.4
XJD02	思勤河	昭平县走马乡森冲电站	2014-06-19	101	-35.13	-7.07	21.43	2015-01-15	-32.83	-5.12	8.13
XJD03	桂江	昭平县昭平大桥	2014-06-19	63	-31.00	-6.75	23.00	2015-01-15	-31.88	-5.27	10.28
XJD04	贺江	贺州市贺州大桥	2014-06-20	108	-32.23	-6.77	21.93	2015-01-17	-33.93	-5.19	7.59
XJD05	贺江	贺州市信都镇信都大桥	2014-06-20	54	-36.56	-6.26	13.52	2015-01-17	-34.07	-5.14	7.05
XJD06	富群河	昭平县富罗林场文潭桥	2014-06-20	99	-38.75	-6.86	16.13	2015-01-16	-32.01	-4.92	7.35
XJD07	桂江	苍梧县京南镇京南大桥	2014-06-20	28	-31.83	-6.64	21.29	2015-01-16	-32.76	-5.14	8.36
XJD08	西江	梧州市梧州水文站断面	2014-06-21	11	-35.4	-6.16	13.88	2015-01-17	-42.01	-6.23	7.83
XJD09	桂江	梧州市桂江出口断面	2014-06-21	51	-30.70	-6.70	22.90	2015-01-17	-34.05	-5.29	8.27
XJD10	西江	广东封开县渡口	2014-06-21	83	-35.26	-6.57	17.30	2015-01-17	-45.82	-6.23	4.02
XJD11	义昌河	岑溪市岑溪大桥	2014-06-21	109	-37.02	-6.60	15.78	2015-01-18	-34.24	-4.89	4.88
XJD12	黄华河	岑溪市南渡大桥	2014-06-22	94	-39.92	-7.42	19.44	2015-01-18	-40.33	-5.97	7.43
XJD13	容江	容县深柳村深柳大桥	2014-06-22	93	-41.14	-6.98	14.70	2015-01-18	-35.49	-5.31	6.99
XJD14	杨梅河	容县杨梅镇杨梅大桥	2014-06-22	116	-37.87	-6.79	16.45	2015-01-18	-32.08	-5.54	12.24
XJD15	北流河	藤县象棋乡大桥	2014-06-22	52	-38.28	-6.63	14.76	2015-01-19	-50.95	-7.30	7.45
XJD16	北流河	梧州市藤县大桥	2014-06-22	31	-36.85	-6.29	13.47	2015-01-19	-43.84	-6.45	7.76
XJD17	蒙江	藤县太平镇健安大桥	2014-06-23	58	-35.71	-6.65	17.49	2015-01-19	-34.40	-5.49	9.52
XJD18	浔江	平南县西江大桥	2014-06-23	34	-36.75	-6.78	17.49	2015-01-20	-50.33	-7.57	10.23
XJD19	黔江	武宣市大桥	2014-06-23	63	-38.92	-6.64	14.20	2015-01-21	-53.22	-7.62	7.74
XJD20	郁江	贵港市西江大桥	2014-06-24	45	-35.13	-7.07	21.43	2015-01-20	-50.55	-7.26	7.53
XJD21	郁江	南宁市清川大桥	2014-06-25	64	-43.65	-7.04	12.67	2015-01-22	-56.05	-7.69	5.47
XJD22	左江	崇左市扶绥县长沙大桥	2014-06-25	91	-54.73	-8.32	11.83	2015-01-23	-37.57	-4.75	0.43
XJD23	左江	崇左市江州区太平大桥	2014-06-25	100	-31.00	-6.75	23.00	2015-01-23	-51.71	-7.20	5.89
XJD24	明江	宁明县宁明大桥	2014-06-25	111	-32.23	-6.77	21.93	2015-01-24	-52.55	-7.14	4.57
XJD25	左江	龙州县龙州大桥	2014-06-26	127	-36.56	-6.26	13.52	2015-01-24	-48.04	-6.88	7
XJD26	黑水河	大新县上利村凯歌渡桥	2014-06-26	189	-38.75	-6.86	16.13	2015-01-23	-56.21	-7.69	5.31
XJD27	右江	平果县龙江大桥	2014-06-27	131	-31.83	-6.64	21.29	2015-01-28	-57.32	-7.84	5.4
XJD28	鉴河	德保县荣华水文站	2014-06-27	251	-38.40	-7.36	20.48	2015-01-26	-58.66	-8.13	6.38
XJD29	右江	百色市右江区拉域大桥	2014-06-28	118	-30.70	-6.70	22.90	2015-01-26	-58.98	-8.22	6.78
XJD30	驮娘江	田林县渭密村旧桥	2014-06-29	424	-54.39	-7.82	8.17	2015-01-24	-60.58	-8.39	6.54
XJX01	灵渠	灵渠水文站	2014-06-19	198	-42.10	-6.51	9.98	2015-01-15	-56.10	-7.79	6.22
XJX02	大溶江	大溶江水文站	2014-06-19	186	-34.42	-5.96	13.26	2015-01-15	-28.82	-5.08	11.82
XJX03	漓江	桂林市净瓶山大桥	2014-06-19	146	-43.61	-6.82	10.95	2015-01-15	-29.98	-5.04	10.34
XJX04	洛清江	鹿寨县黄冕村大桥	2014-06-19	108	-40.69	-6.31	9.79	2015-01-15	-34.16	-4.44	1.36
XJX05	洛清江	鹿寨县对亭乡大桥	2014-06-20	86	-40.49	-6.82	14.07	2015-01-16	-57.97	-8.23	7.87
XJX06	红水河	来宾县迁江镇迁江大桥	2014-06-20	91	-36.34	-5.74	9.58	2015-01-16	-43.56	-6.41	-7.72
XJX07	柳江	柳州水文站广雅大桥	2014-06-20	96	-36.29	-5.49	21.43	2015-01-16	-35.85	-5.87	11.11
XJX08	浪溪河	融安县东潭村大桥	2014-06-21	166	-34.58	-5.67	23.00	2015-01-17	-37.12	-5.08	3.52
XJX09	融江	融安县长安大桥	2014-06-21	127	-35.05	-5.67	21.93	2015-01-17	-39.45	-5.51	4.63
XJX10	贝江	融水县四荣桥	2014-06-21	180	-37.04	-5.81	13.52	2015-01-17	-37.46	-5.45	6.14
XJX11	牛鼻河	罗城县小长安水文站	2014-06-22	110	-34.79	-6.24	16.13	2015-01-18	-42.95	-5.95	4.65
XJX12	天河	罗城县天河水文站	2014-06-22	261	-38.05	-6.62	21.29	2015-01-18	-56.23	-7.65	4.97
XJX13	小环江	宜州市安马乡水文站	2014-06-22	161	-35.94	-6.06	13.88	2015-01-19	-42.91	-5.59	1.81
XJX14	大环江	环江县环江二桥	2014-06-23	275	-35.53	-5.93	22.90	2015-01-19	-40.50	-6.19	9.02
XJX15	龙江	宜州市三岔镇三岔桥	2014-06-23	130	-37.35	-6.12	17.30	2015-01-18	-43.94	-6.98	11.9
XJX16	刁江	都安市乡马陇桥	2014-06-24	161	-40.77	-5.77	15.78	2015-01-20	-43.14	-5.39	-0.02
XJX17	红水河	都安县红渡桥	2014-06-24	153	-50.68	-7.35	19.44	2015-01-20	-56.97	-7.69	4.55
XJX18	红水河	马山县百龙滩电站	2014-06-24	124	-50.56	-7.52	14.70	2015-01-20	-57.28	-8.61	11.6
XJX19	红水河	大化县大化水电站	2014-06-25	159	-52.41	-7.89	16.45	2015-01-20	-60.36	-8.44	7.16
XJX20	红水河	大化县岩滩镇岩滩电站	2014-06-25	367	-47.5	-6.89	14.76	2015-01-21	-61.86	-8.49	6.06
XJX21	红水河	天峨县龙滩电站	2014-06-26	370	-54.52	-7.57	13.47	2015-01-22	-61.98	-8.61	6.9
XJX22	红水河	天峨县龙滩大桥	2014-06-26	889	-58.49	-8.48	17.49	2015-01-22	-61.46	-8.50	6.54
XJX23	红水河	蔗香	2014-06-28	299	-59.31	-7.94	17.49	—	—	—	—
XJX24	驮娘江	田林县弄瓦瑶族乡瓦村	2014-06-29	256	-54.73	-8.32	14.20	2015-01-24	-58.77	-8.17	6.59

1) 2015 年 1 月的 XJX23 水样丢失

显的时空差异. 图2为西江流域的 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系. 其中全大气降水线(GMWL)采用IAEA的全大气降水同位素方程($\delta\text{D} = 8.14 \delta^{18}\text{O} + 10.9$)建立^[24], 区域大气降水线(CLMWL)采用涂林玲^[25]建立的桂林市(1983年1月至1998年12月)大气降水方程($\delta\text{D} = 8.42 \delta^{18}\text{O} + 16.28$). 图2中西江流域旱季、雨季的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值均沿大气降水线分布, 表明西江主要由大气降水补给.

大气降水是地表水的主要来源, 由于大气降水的支配作用, 河水的氢氧同位素组成与其集水区域大气降水的氢氧同位素组成密切相关^[26]. 从西江水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系(图2)可以看出, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 存在明显的线性关系, 这种相关关系旱季显著于雨季. 雨季为 $\delta\text{D} = 9.32 \delta^{18}\text{O} + 23.15$ ($R^2 = 0.61$), 旱季为 $\delta\text{D} = 6.52 \delta^{18}\text{O} + 7.93$ ($R^2 = 0.93$), 均沿大气降水线分布再次证明西江水均来源于大气降水补给. 雨季和旱季的方程线分居全球大气降水线(GMWL)和区域大气降水线(CLMWL)两侧, 它们的斜率和截距大小关系: 雨季 > 全球大气降水线 > 区域大气降水线 > 旱季. 这种现象主要受西江流域岩溶地质和湖泊、水库蒸发效应的影响. 西江流域的地层以浅海相沉积碳酸盐为主, 占流域面积的44%, 主要连片分布于流域中上游地区, 现代地表和地下溶蚀过程非常强烈, 岩溶含水层具有较高的水力联系, 地表裂隙、孔隙发育, 雨季降水多通过落水洞、竖井、漏斗等岩溶形态直接补给地下河, 地下河又快速响应外界降雨, 补给水体基本未发生明显的蒸发或发生蒸发作用强度较低. 而旱季降雨较少, 地下河系统多受储存在岩溶裂隙、孔隙中的地下水补给, 因此西江流域旱季方程线斜率和截距小于雨季, 这现象与蒲俊兵^[27]研究重庆地下河水氢氧同位素组成的现象相同; 另一方面, 西江流域的湖泊、水库水体补给主要集中于夏季, 水体经过夏季的强烈蒸发以及秋季、冬季的蒸发浓缩, 到旱季(1月)补给河水时 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相对较高, 因此旱季方程线的斜率和截距小于雨.

2.2 西江流域地表水氕盈余(d)值

由于各地区大气降水云气形成时, 水汽的来源及降水云气的运移过程中环境条件的变化, 导致气、液相同位素分馏的不平衡程度产生差异, 进而使不同地区大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上均有不同程度的偏离, 这种偏离程度可以用氕盈余($d = \delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$)来量化^[28,29]. 虽然有些地区的 d 值有微小的季节变化, 但就全球范围来看, d 值不

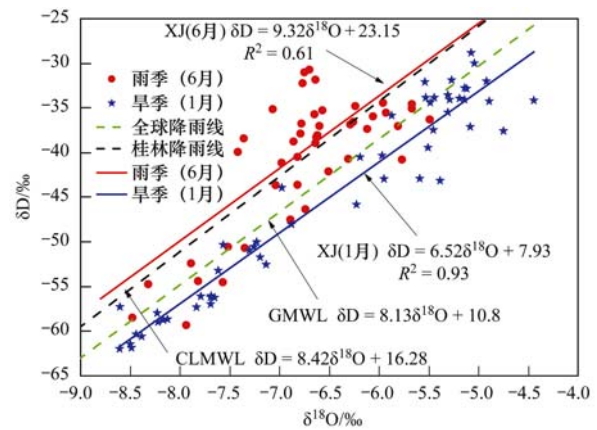
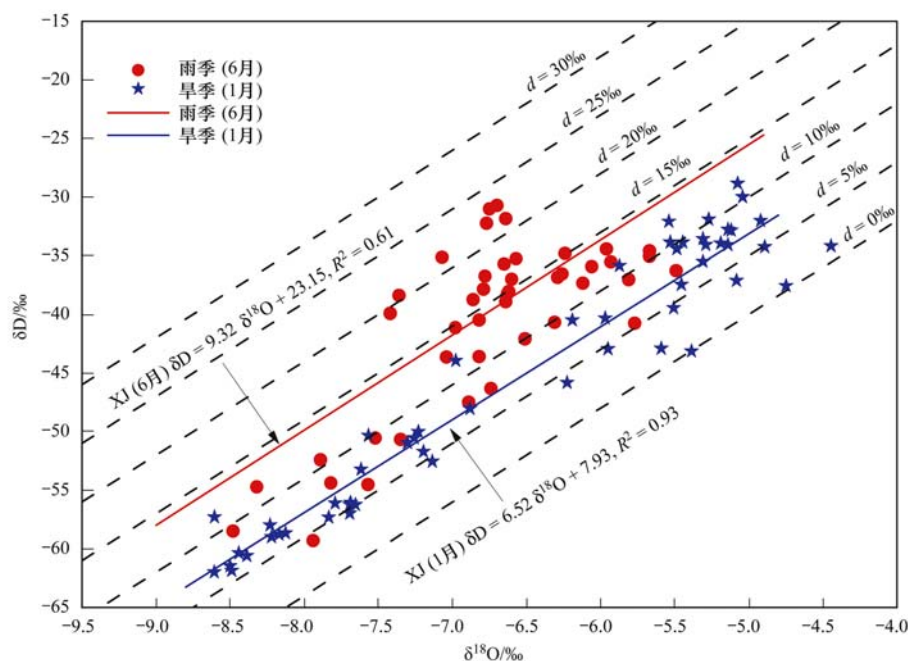


图2 西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 分布

Fig. 2 Crossplot of $\delta^{18}\text{O}$ - δD values of Xijiang River

受季节和纬度等因素的影响^[30]. 在水文地质学研究中 d 值可以表示水-岩作用的强度. 一般情况下, 岩石或地层中的氢的化学组分的含量很低, 不足以影响水的 δD 值, 但是水-岩的氧同位素交换可以导致水体富含 ^{18}O ^[31,32], 使得地下水相对于当地大气降水 d 值有所降低.

根据 Dansgaard^[28]提出的方程将 d 为0‰、5‰、10‰、15‰、20‰、25‰和30‰绘制于图3上. 从中可知, 西江水体雨季 d 值的范围为4.21‰~23.00‰, 平均14.27‰, 旱季 d 值的范围为-0.05‰~12.24‰, 平均6.99‰. 受夏季风和台风影响桂林市雨季(6~10月) d 值较小, 多年平均10.5‰, 受冬季风影响每年旱季(11月~次年4月) d 值较高, 多年平均^[25]16.8‰. 若以桂林地区的大气降水的 d 值作为西江流域大气降水的参考, 那么西江江水雨季 d 值位于流域雨季大气降水和旱季大气降水 d 值之间, 表明西江江水雨季继承了雨水的特征. 但西江江水旱季80%的 d 值小于 $d = 10$ ‰, 明显小于大气降水的 d 值. 由于地下水与其他物质发生变化同位素交换, 包括与围岩和气体在高温或常温条件下的同位素交换. 碳酸盐分解会产生 CO_2 , 因而地下水参与 CO_2 发生如下同位素交换反应, $\text{C}^{16}\text{O}_2 + 2\text{H}_2^{18}\text{O} \rightleftharpoons \text{C}^{18}\text{O}_2 + 2\text{H}_2^{16}\text{O}$, 这一交换经常发生, 且速度相当快, 当 CO_2 的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比水的低, 那么 CO_2 将趋于富集 ^{18}O 而水则趋于贫化^[7]. 西江水体雨季和旱季 d 值的差异主要是由于雨季降水多通过落水洞、竖井、漏斗等岩溶形态直接补给地下河, 且在地下河中以较快的流速运移, 与围岩接触的时间较短, 而旱季降雨较少, 地表河系统受储存在岩溶裂隙、孔隙中的地下水补给, 这部地下水长时间与围岩接触且与 CO_2 发生同位素交换, 因此 d 值

图3 西江水体 d -excess 值分布Fig. 3 Crossplot of d -excess values of Xijiang River

偏低. 西江流域旱季 HCO_3^- 平均值为 $1.96 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 雨季 HCO_3^- 平均值为 $1.78 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 旱季 d 的最小值出现在 XJX16 号都安市乡马陇桥 (-0.05‰) 和 XJD22 号崇左市扶绥县长沙大桥 (0.42‰), 这两个取样点均在岩溶区, 其水体 HCO_3^- 分别为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 分别为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $60.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别是西江旱季和雨季 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的最高值点, 表明这两处的水-岩接触的时间较长或与 CO_2 发生强烈的同位素交换.

2.3 西江流域地表水氢氧同位素组成的沿程变化

从上游到下游, 河水氢氧同位素组成受不同补给源、地面水体、人为活动和蒸发的影响, 同时受到降雨同位素大陆效应, 高程效应的影响, 小流域的空间分布主要是上述某些影响的集中表现, 而大江大河氢氧同位素的空间分布则更多是上述各种影响的综合反映. 图4显示出西江流域干流和主要支流的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值沿流程方向的变化情况. 总体来说, 干流红水河—浔江段除迁江外, 无论是丰水期还是枯水期, 河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 组成都从上游到下游逐渐偏正; 支流右江—郁江段枯水期(1月) $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值沿流程逐渐偏正, 丰水期(6月) 百色、平果略高于南宁、贵港; 桂江段 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值比较平稳, 无明显变化趋势. 作者认为, 影响西江流域河水同位素组成的主要因素是: 继承降雨同位素的特征、河水的沿程蒸发和人为活动影响. 云团从海洋向陆地迁移过程中, 轻同位素逐渐富集, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值沿流程从

上游到下游逐渐偏正符合降雨过程的一般规律, 加之降雨到达地面后在产生地表径流或下渗的过程中均会遭遇地面蒸发而使其同位素发生变化, 蒸发过程中同位素相对较轻的水汽会先蒸发, 剩余的水体富集重同位素^[8,33]. 干流红水河—浔江段和支流右江—郁江段整体上表现为沿流程逐渐偏正的趋势与黄河^[15]、长江^[18]的研究结果一致, 主要是继承了降雨同位素的特征及受沿程蒸发的影响, 但在部分河段 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化趋势不一致, 如在迁江、百色和平果段, 表明不同河段的蒸发效应及人类干扰因素有所不同. 徐敬争等^[18]的研究表明受到蒸发作用影响的湖水、水库进入长江, 必对江水的氢氧同位素组成产生显著影响, 在长江中游的洞庭湖与鄱阳湖, 蒸发作用使其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 升高, 进而影响长江干流的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值. 迁江段河水无论是丰水期还是枯水期 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 均比下游河段偏正主要是因为迁江段取样点在方庆水库下游约 400 m, 受水库蒸发影响. 而丰水期支流右江—郁江段百色、平果略高于南宁、贵港, 主要是因为夏季百色、平果段引水灌溉影响大为增强, 加剧了蒸发作用. 涂林玲等^[25]的研究表明桂林地区在夏季风盛行期, 降水多受热带风暴的控制, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值偏负, 而当冬季风盛行时, 降水多受西南暖湿气流和冬季风的控制, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值偏正. 如图4所示, 桂江支流的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值与桂林地区降水同位素季节变化相似, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值夏季(雨季)偏负, 冬季(旱季)偏正, 表明桂江水体氢氧

同位素特征继承了当地降雨的特征. 而桂江支流未出现从上游到下游逐渐偏正现象,可能是由于桂江支流上游到下游海拔差异不大,流程简短、加上桂江支流水库少于西江干流和右江—郁江支流.

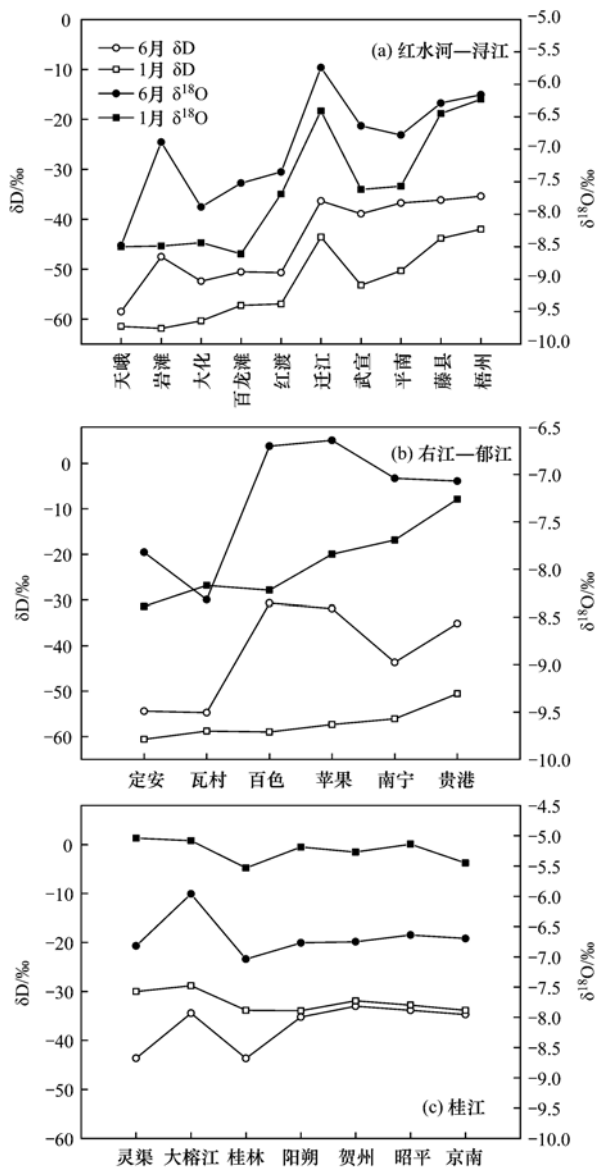


图4 西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值流程变化

Fig. 4 Variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of water in Xijiang River

2.4 西江流域地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值高度变化趋势

图5显示西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值与海拔高度表现出一定的负相关关系,海拔越低 $\delta^{18}\text{O}$ 值越偏重,这主要与低海拔地区降水同位素偏重有关,但其相关性较低(雨季 $R^2 = 0.17$,旱季 $R^2 = 0.20$),这可能是由于不同地区相同海拔的河水相互混合相互干扰的结果.若取每一一定高度范围内水样 $\delta^{18}\text{O}$ 值的加权平均值,可消除局地环境多水样 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,为排除不同地区相同海拔的河水相互混合的干扰,Deshpande

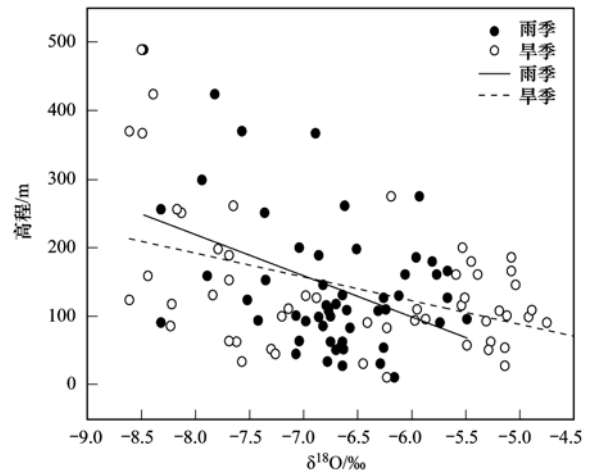


图5 西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 同高程的关系

Fig. 5 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and altitude of water in Xijiang River

等^[34]、Dotsika等^[35]和丁林等^[36]均建立了 $\delta^{18}\text{O}$ 值和海拔高度的回归方程,来消除局地环境对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响.如图6所示西江流域地表水沿高程每50 m范围内(0~50 m为第一个平均范围) $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与高程的线性模型具有较好的相关性.雨季的线性方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.0044H - 5.9423$, $R^2 = 0.83$;旱季的线性方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.0045H - 6.1711$, $R^2 = 0.88$.根据上述的回归分析,西江水体雨季 $\delta^{18}\text{O}$ 值随高度的变化率为: $-0.44\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$,旱季为 $-0.45\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$.由于旱季、雨季水体均来源降水补给,因此,旱、雨季高度差别并不大.与其他研究结果对比,西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值随高度的变化率略高于整个我国西南地区 $-0.38\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ ^[37]和全球降水 $-0.28\text{‰} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ ^[38].西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值的高度趋势在一定程度上反映西江流域降水的高度效应,这对流域水循环过程的研究具有重要的水文

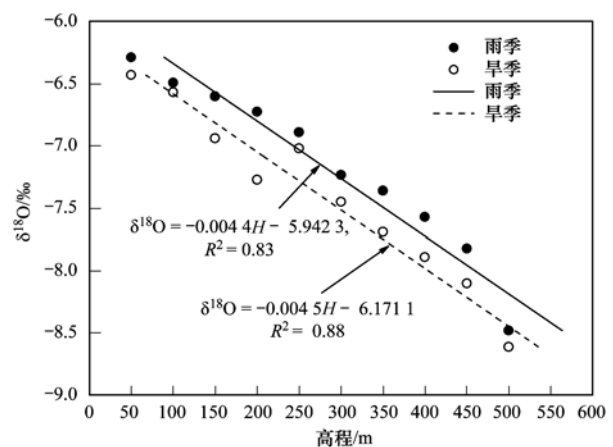


图6 西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 同高程的关系

Fig. 6 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and weighted altitude of water in Xijiang River

地质意义.

3 结论

(1) 西江水体 旱季 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变化范围大于雨季,表明西江水氢氧同位素组成旱季比雨季具有更明显的时空差异.

(2) 西江水体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 存在明显的线性关系 (雨季为 $\delta\text{D} = 9.32 \delta^{18}\text{O} + 23.15$ $R^2 = 0.61$, 旱季为 $\delta\text{D} = 6.52 \delta^{18}\text{O} + 7.93$ $R^2 = 0.93$), 这种相关关系旱季显著于雨季,旱季和雨季西江水体均沿全球大气降水线分布,证明西江水均来源于大气降水补给.

(3) 西江水体雨季 $d\text{-excess}$ 值的范围为 $4.21\text{‰} \sim 23.00\text{‰}$, 平均 14.27‰ , 旱季 $d\text{-excess}$ 值的范围为 $-0.05\text{‰} \sim 12.24\text{‰}$, 平均 6.99‰ . $d\text{-excess}$ 值雨季大于旱季,主要是由于雨季降水多通过落水洞、竖井、漏斗等岩溶形态直接补给地下河,且在地下河中以较快的流速运移,与围岩接触的时间较短,而旱季降雨较少,地表河系统受储存在岩溶裂隙、孔隙中的地下水体补给,这部地下水长时间与围岩接触 $d\text{-excess}$ 值偏低.

(4) 干流红水河—浔江段和支流右江—郁江段 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值整体上表现为沿流程逐渐偏正的趋势,符合降雨从低海拔到高海拔逐渐偏负的一般变化规律;而桂江支流未出现从上游到下游逐渐偏正现象,可能是由于桂江支流上游到下游海拔差异不大,流程简短、加上桂江支流水库少于西江干流和右江-郁江支流.

(5) 通过 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程的关系建立了二者之间的线性回归模型,揭示了雨季西江水体随高度的变化率为: $-0.44\text{‰} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, 旱季为 $-0.45\text{‰} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, 反映西江流域降水的高度效应,这对流域水循环过程的研究具有重要的水文地质意义.

参考文献:

- [1] Mook W G, Tan F C. Stable carbon isotopes in rivers and estuaries[A]. In: Degens E T, Kempe S, Richey J E (Eds.). Biogeochemistry of Major World Rivers[M]. New York: Wiley, 1991, 42: 245-264.
- [2] Zhang J, Letolle R, Martin J M, et al. Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuarine systems[J]. Continental Shelf Research, 1990, 10(4): 369-384.
- [3] Ramesh R, Sarin M M. Stable isotope study of the Ganga (Ganges) river system[J]. Journal of Hydrology, 1992, 139(1-4): 49-62.
- [4] Pawellek F, Frauenstein F, Veizer J. Hydrochemistry and isotope geochemistry of the upper Danube River[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(21): 3839-3853.
- [5] Karr J D, Showers W J. Stable oxygen and hydrogen isotopic tracers in Amazon shelf waters during Amassed [J]. Oceanologica Acta, 2002, 25(2): 71-78.
- [6] Ryu J S, Lee K S, Chang H W. Hydrogeochemical and isotopic investigations of the Han River basin, South Korea[J]. Journal of Hydrology, 2007, 345(1-2): 50-60.
- [7] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 105-238.
- [8] 史晓宜, 蒲焘, 何元庆, 等. 典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1685-1691.
- [9] Yurtsever Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation [R]. Isotope Hydrology Section Report. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1975. 1-40.
- [10] 苏小四, 林学钰, 廖资生, 等. 黄河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 ^3H 的沿程变化特征及其影响因素研究[J]. 地球化学, 2003, 32(4): 349-357.
- [11] 顾镇南, 金德秋, 周锡煌, 等. 长江水中氢氧同位素组成的季节性变化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1989, 25(4): 408-411.
- [12] 陆宝宏, 孙婷婷, 许宝华, 等. 长江干流径流同位素同步监测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 378-381.
- [13] Vrbka P, Jacob H, Froehlich K, et al. Identification of groundwater recharge sources in northern Sudan by environmental isotopes[J]. Journal of Environmental Hydrology, 1993, 1(4): 98-125.
- [14] McKenna S A, Ingraham N L, Jacobson R L, et al. A stable isotope study of bank storage mechanisms in the Truckee river basin[J]. Journal of Hydrology, 1992, 134(1-4): 203-219.
- [15] Gremillion P, Wanielista M. Effects of evaporative enrichment on the stable isotope hydrology of a central Florida (USA) river[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(8): 1465-1484.
- [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] 高建飞, 丁梯平, 罗续荣, 等. 黄河水氢、氧同位素组成的空间变化特征及其环境意义[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 596-602.

- Gao J F, Ding T P, Luo X R, *et al.* δD and $\delta^{18}O$ variations of water in the Yellow River and its environmental significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, **85**(4): 596-602.
- [18] 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.
- [19] 董林垚, 陈建耀, 付丛生, 等. 西江流域径流与气象要素多时间尺度关联性研究[J]. *地理科学*, 2013, **33**(2): 209-215.
- Dong L Y, Chen J Y, Fu C S, *et al.* Recognition on the relationship between runoff and regional meteorological factors of the Xijiang River in multi-time scales[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(2): 209-215.
- [20] 姚冠荣, 高全洲, 王振刚, 等. 西江下游溶解无机碳含量的时空变异特征及其输出通量[J]. *地球化学*, 2008, **37**(3): 258-264.
- Yao G R, Gao Q Z, Wang Z G, *et al.* Seasonal and spatial variations of dissolved inorganic carbon in the lower reaches of the Xijiang River and its export flux [J]. *Geochimica*, 2008, **37**(3): 258-264.
- [21] 何慧, 陆虹, 欧艺. 1959-2008 年广西西江流域洪涝气候特征[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(3): 134-138.
- He H, Lu H, Ou Y. Flood characteristics of the Xijiang river basin in 1959-2008[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5**(3): 134-138.
- [22] 廖胜石, 罗建英, 姚秀萍, 等. 广西西江流域致洪暴雨过程中尺度特征及机制分析[J]. *高原气象*, 2008, **27**(5): 1161-1171.
- Liao S S, Luo J Y, Yao X P, *et al.* Mesoscale characteristic and mechanism analysis of a heavy flooding rainstorm process in Xijiang River Basin, Guangxi[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(5): 1161-1171.
- [23] 水利部珠江水利委员会《珠江志》编撰委员会. 珠江志[M]. 广州: 广东科技出版社, 1991. 150-160.
- [24] Gourcy L L, Groening M, Aggarwal P K. Stable oxygen and hydrogen isotopes in precipitation[A]. In: Aggarwal P K, Gat J R, Froehlich K F O (Eds.). *Isotopes in the Water Cycle*[M]. Netherlands: Springer, 2005. 39-51.
- [25] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和 ^{18}O 同位素的研究[J]. *中国岩溶*, 2004, **23**(4): 304-309.
- Tu L L, Wang H, Feng Y M. Research on D and ^{18}O isotope in the precipitation of Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, **23**(4): 304-309.
- [26] 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.
- [27] 蒲俊兵. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J]. *地球学报*, 2013, **34**(6): 713-722.
- Pu J B. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of karst groundwater in Chongqing[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2013, **34**(6): 713-722.
- [28] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [29] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 738-747.
- Zhang Y H, Wu Y Q, Wen X H, *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 738-747.
- [30] Smith G I, Friedman I, Gleason J D, *et al.* Stable isotope composition of waters in southeastern California: 2. Groundwaters and their relation to modern precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1992, **97**(D5): 5813-5823.
- [31] 尹观, 范晓, 郭建强, 等. 四川九寨沟水循环系统的同位素示踪[J]. *地理学报*, 2000, **55**(4): 487-494.
- Yin G, Fan X, Guo J Q, *et al.* Isotope tracer on water cycle system in Jiuzhaigou, Sichuan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(4): 487-494.
- [32] 尹观, 倪师军. 地下水氧过量参数的演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, **20**(4): 409-411.
- Yin G, Ni S J. Deuterium excess parameter evolution in ground water[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, **20**(4): 409-411.
- [33] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2784-2790.
- Zhu J J, Chen H, Gong G L. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2784-2790.
- [34] Deshpande R D, Bhattacharya S K, Jani R A, *et al.* Distribution of oxygen and hydrogen isotopes in shallow groundwaters from Southern India: influence of a dual monsoon system[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **271**(1-4): 226-239.
- [35] Dotsika E, Lykoudis S, Poutoukis D. Spatial distribution of the isotopic composition of precipitation and spring water in Greece [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, **71**(3-4): 141-149.
- [36] 丁林, 许强, 张利云, 等. 青藏高原河流氧同位素区域变化特征与高度预测模型建立[J]. *第四纪研究*, 2009, **29**(1): 1-12.
- Ding L, Xu Q, Zhang L Y, *et al.* Regional variation of river water oxygen isotope and empirical elevation prediction models in Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(1): 1-12.
- [37] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 等. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J]. *勘察科学技术*, 1997, (3): 34-39.
- Liu J D, Zhao Y C, Liu E K, *et al.* Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1997, (3): 34-39.
- [38] Poage M A, Chamberlain C P. Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change [J]. *American Journal of Science*, 2001, **301**(1): 1-15.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)