

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.013

小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义

王轶凡^{1,2}, 瞿思敏^{1,2}, 李代华³, 石 朋^{1,2}, 单 帅^{1,2}, 周敏敏^{1,2}, 刘金涛^{1,2}, 韩小乐^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 云南省水文水资源局文山分局, 云南 文山 663099)

摘要: 结合水文气象资料, 分析浙江和睦桥小流域在 2015 年汛期的 3 场台风雨事件中降雨、地面径流以及河水的氢氧同位素组成, 并研究降水中 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 的相关关系。结果表明, 降雨中的氢氧同位素具有显著的时程效应。无论是等体积的降雨增量还是等时段降雨, 随着降雨历时的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 值均出现递减的趋势; 穿透降雨由于林冠的滞留作用以及同位素分馏作用, 比林外降雨更加富含重同位素; 降水是河水的主要补给来源, 由于河水蒸发, 河水中重同位素比同时期降雨和地面径流更加富集。

关键词: 氢氧同位素; 大气降水; 地面径流; 河水; 时程效应; 小流域; 东苕溪水系
中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)04-0365-07

Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation

WANG Yifan^{1,2}, QU Simin^{1,2}, LI Daihua³, SHI Peng^{1,2}, SHAN Shuai^{1,2},
ZHOU Minmin^{1,2}, LIU Jintao^{1,2}, HAN Xiaole^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Hydrology and Water Resources Bureau of Wenshan, Wenshan 663099, China)

Abstract: Based on hydrological and meteorological data, the composition of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation, surface water, and stream water were investigated for three typhoon events in the flood period of 2015 in the Hemuqiao Watershed, and the $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ relationship in precipitation was studied. The results show that the composition of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation exhibited significant temporal variation. With the increase of the duration of rainfall, the $\delta^{18}\text{O}$ values of the incremental rainfall with the same volume and rainfall during the same period had a decreasing trend. Throughfall, rather than rainfall, enriched heavier isotopes because of the canopy storage and isotopic fractionation. Rainfall was the main supply source of stream water. The contents of heavy isotopes in stream water were more abundant than those in precipitation and surface runoff due to the evaporation of stream water.

Key words: hydrogen and oxygen isotopes; precipitation; surface runoff; stream water; temporal variation; small watershed; Dongtiaoxi River

随着同位素技术的发展, 同位素作为指示剂在水文学研究中的应用越来越广泛^[1-3]。大气降水作为大气圈与水圈之间物质与能量交换过程中最积极的因子, 是水循环过程中的重要一环, 其同位素组成受到水汽来

收稿日期: 2016-08-06
基金项目: 国家自然科学基金(41371048, 51479062, 40901015); 国家重点研发计划(2016YFC402703)
作者简介: 王轶凡(1992—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事流域水文模拟及同位素水文研究。E-mail: 1299279383@qq.com
通信作者: 瞿思敏, 教授。E-mail: wanily@hhu.edu.cn

源、凝结温度、蒸发等因素的影响,具有明显的时空变化。径流作为连接各水体间的纽带,对流域水循环的影响至关重要。以降水、地面径流、壤中流和地下径流为补给的河流,其水源来源复杂。因此,可以利用同位素示踪技术来反映不同水源的径流成分。

近几年来,国内外学者对于环境同位素在不同水体中的应用研究逐渐增多,尤其是以不同水循环要素为基础的时程效应研究^[4-6]。时程效应是指随降雨历时的变化,降雨径流同位素组成呈现出显著的规律性变化。国内外许多学者的研究表明,降雨径流同位素的组成不仅与降雨成因、水起源地、气象因素以及地形条件有关^[7-8],而且与降雨的时程分布密切相关。在小流域同位素应用方面,顾慰祖等^[9]对藤桥流域的研究表明,划分径流分割过程中考虑 $\delta^{18}\text{O}$ 的时程效应可以得到更加准确的结果;McDonnell等^[10]也得出相似的结论,并且说明采样方法不同会导致新/旧水成分比例不同;Kubota等^[11]在面积为0.84 hm²的试验流域中研究讨论了林外降雨和穿透降雨对径流分割的不同,并发现穿透降水分割流量过程线会降低旧水的比例;Ikawa等^[12]在典型小流域对一场台风雨事件中的总降雨、穿透降雨和径流进行比较,表明径流也可以作为划分流量过程线的一个重要因素。另外一些学者利用已有降水同位素数据,对黄河流域^[13]、长江流域^[14]、黑河流域^[15]等开展一系列研究,结果显示降水同位素信息可以为地区的水汽来源和水循环模式等提供研究依据。在河水和地下径流研究方面,陆宝宏等^[16]基于长江干流径流同位素监测资料,得出了径流同位素与降水同位素季节效应之间的关系。张华安等^[17]讨论了巴丹吉林沙漠湖泊和地下径流的补给关系,进而通过对干旱条件下盐湖的蒸发结果分析,得出巴丹吉林沙漠湖水存在蒸发过度效应的结论。陈茜茜等^[18]对北方地下水若干地区进行采样,判断渗漏的纳木错湖水与东部的地下水存在相关性。陈建生等^[19]研究发现西藏内流区的渗漏水通过断裂带中的渗漏通道补给到内蒙古高原。

笔者以和睦桥小流域为研究对象,选取2015年8—10月间3次台风雨事件,对事件产生的降水、地面径流以及河水进行观测及采样,分析不同水体的氢氧同位素特征,可以指示不同径流成分对河流的补给作用,为流域流量过程线的划分提供科学依据。

1 研究区域概况

和睦桥流域(东经119°47′05″~119°48′20″,北纬30°34′05″~30°34′55″)属长江流域太湖区东苕溪水系,位于姜湾流域上游,流域面积1.35 km²,海拔在150~600 m之间。区域属亚热带季风气候,光照充足,雨量充沛,气候湿润。多年平均降雨量为1580 mm,主要集中在6—8月。多年水面蒸发量为805 mm,多年平均气温为14.0℃,月平均温度最低值为1.3℃左右,月平均温度最高值为25.0℃。流域地貌类型具有多层性,从而构成该流域土壤类型的多样性。流域内以山区和丘陵为主,植被以毛竹为主,基本无工业和生活污水排放。流域内有和睦桥水文站和气象站。

2 水样采集与分析

本次研究的观测及采样地点位于和睦桥小流域(图1)。在研究期间对2015年8月9日、23日和9月30日3次台风雨事件进行降水(143个)、地面径流(32个)及河水(48个)观测及采样,总计223个水样。在流域内设置上、中、下游3个观测点,每个观测点分别再设置林内和林外2个子观测点,进行林外降雨和穿透降雨对照。

流域出口处设置矩形薄壁堰,观测河流出口断面的流量。总降雨采用一个直径50 cm的不锈钢桶采集,林外顺序降雨增量和穿透降雨增量采用由Kennedy等^[20]改进的顺序降雨采样器进行采集。河水在流域出口断面处进行采集,降雨事件前、降雨事件中和降雨事件后均取样。地面径流在位于流域中游的一个冲沟中取样,直至地面径流退去。河水与地面径流采样时间间隔均为1 h。

所有采集到的水样均存储在30 mL的采样瓶中,用防水带密封。采集的水样在河海大学国家重点实验室进行同位素分析($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)。H和O的稳定同位素由质谱仪(MAT523)分析,氦的样本用加有铂催化剂的H₂-H₂O平衡法得到,氧的样本通过CO₂-H₂O平衡法得到。同位素组成用相对于维也纳标准海水的

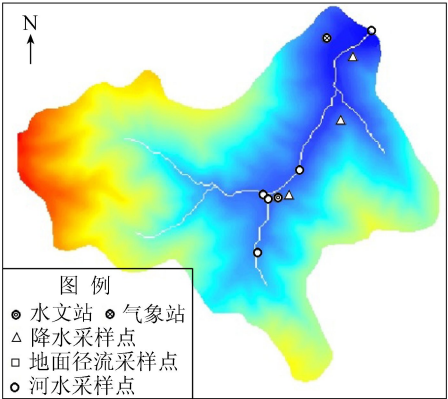


图1 研究区水样采样点位置示意图
Fig.1 Location of sampling sites in study area

δ 值表示。测试的精度 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $\pm 0.002\%$, $\delta^2\text{H}$ 为 $\pm 0.2\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 大气降水中的同位素分布特征

影响大气降水中的同位素特征的因素主要有 4 个:纬度效应、高程效应、温度效应和季节效应^[21]。在一场降水事件中,氢氧同位素组成不仅存在显著的时程效应,还与流域气象要素有关^[22-23]。表 1 为和睦桥流域雨量站采集的 3 场降水中降雨量、气温和相对湿度等气象要素的观测数据。

穿透降雨是指大气降雨受到林冠层截留作用后,落到地面的雨量^[24-25]。穿透降雨经过冠层截留,雨滴的滞留时间较长,同时受到较长时间的蒸发,所以一般来说穿透降雨要比林外降雨富含重同位素。为分析一场降雨过程中林外降雨与穿透降雨的关系,将 3 次台风雨事件中的林外降雨和穿透降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 关系绘制于图 2。分析发现林外降雨大部分分布在穿透降雨下方,说明相同条件下林外降雨要比穿透降雨更为贫化。林外降雨 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值分别为 -2.9% 和 -0.491% ;穿透降雨 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值分别为 -2.8% 和 -0.461% ,两者的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围较大。林外降雨与穿透降雨的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有明显的时程变化,林外降雨的变幅($\delta^2\text{H}$: 1.76% , $\delta^{18}\text{O}$: 0.237%)比穿透降雨的变幅大($\delta^2\text{H}$: 1.49% , $\delta^{18}\text{O}$: 0.215%)。在竹林地区,穿透降雨由于林冠枝叶的滞留作用,使几个时段的降水初步混合,从而导致穿透降雨的变化幅度小,不仅在时间上比林外降雨产生得迟,而且经过分馏过程更加富集重同位素。随着时间的延长,重同位素 ^2H 和 ^{18}O 优先凝结在雨滴中降落到地面。因此在降雨开始时,降水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比较富集;在降雨后期,降水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 则比较贫化。

本次研究在采集等体积降雨水样的同时,还采集了等时段的降雨水样。图 3 为不同高程下,降雨水样在不同采样方法上的对比。从图 3 可以看出,在 9:00 到 15:00 的这场降雨期间,等时段降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 $-0.7\% \sim -1.1\%$ 之间,而等体积的降雨增量 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-0.4\% \sim -0.7\%$ 之间。等体积降雨增量的变幅比等时段降雨的变幅小,这主要是由于等时段降雨是每隔 1h 立即对降雨样品进行采集密封,而等体积的降雨增量则是在降雨完全结束后对降雨进行采集,这中间由于采样时间的迟滞,导致水样轻度混合,从而使该水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 变幅较小。降雨的高程效应不明显,但是时程效应显著,也印证了上面得出的结论。随着样品序号的增大, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有显著降低的趋势。

表 1 流域内 3 次降水事件的气象信息

Table 1 Meteorological information of three typhoon events in Hemuqiao Basin

洪号	起止时间	降雨量/ mm	降雨 历时/h	气温/ ℃	相对 湿度/%
20150809	08-09T13:15—08-10T15:00	141.7	25.75	29	72
20150823	08-23T11:02—08-24T16:20	13.3	29.30	27	70
20150930	09-30T12:50—10-01T11:42	13.8	22.87	22	55

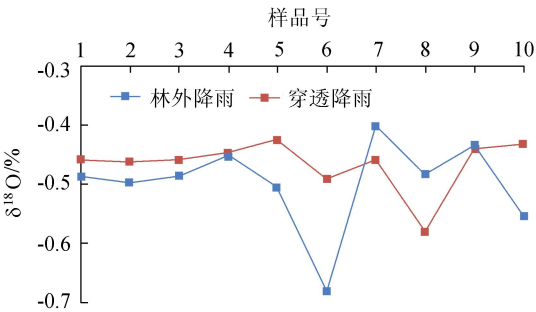


图 2 林外降雨和穿透降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 关系
Fig. 2 Relationship of $\delta^{18}\text{O}$ between precipitation and throughfall

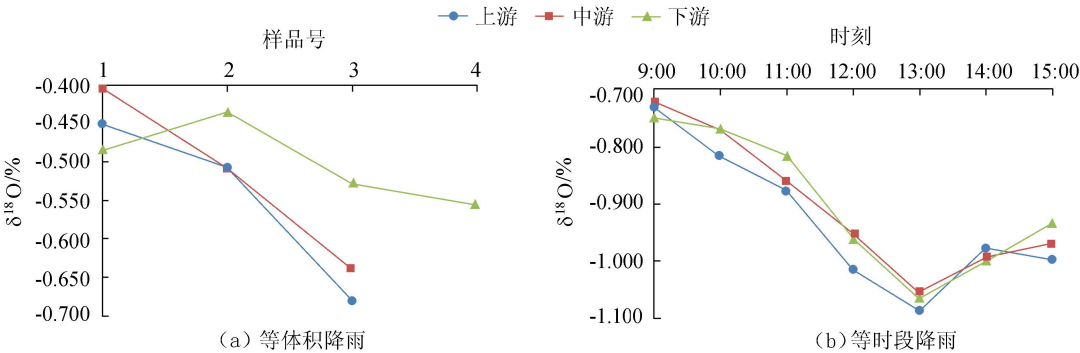


图 3 不同高程下降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 的时程分布

Fig. 3 Temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in rainfall with different elevations

由此可见在二水源划分径流成分中,把同位素浓度处理成常数是不正确的。试验表明,降水对流量过程的贡献不是一成不变,它在径流成分中的比例随着降雨历时的变化而变化。所以考虑到降水的时程变化可以更加准确地对流量过程线划分。

3.2 降水中 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 相关关系与氘盈余

大气降水中的氢氧稳定同位素间具有一定的线性关系,受水汽来源、水汽输送距离及降水期间气象因素的影响,不同时期的 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系具有不同的特征,对于研究水循环过程中稳定同位素比率的变化具有重要的意义。Craig^[26] 在理论上导出了全球大气降水线方程(GMWL): $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$ 。国际原子能委员会对其进行了修正: $\delta^2\text{H}=8.17\delta^{18}\text{O}+10.56$ 。陈中笑等^[27] 通过分析全国 30 个 GNIP 站点的氘氧关系得出我国的大气降水线: $\delta^2\text{H}=7.43\delta^{18}\text{O}+5.51$ 。

笔者对该流域中大气降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的同位素关系进行研究(图 4),通过回归分析得出和睦桥流域汛期氘氧关系方程:

$$\delta^2\text{H}=7.39\delta^{18}\text{O}+5.93 \quad (n=143, R^2=0.98)$$

(1)

将式(1)与全国($\delta^2\text{H}=7.43\delta^{18}\text{O}+5.51$)、南京($\delta^2\text{H}=8.47\delta^{18}\text{O}+17.52$)^[28]、厦门($\delta^2\text{H}=8.35\delta^{18}\text{O}+12.52$)^[8]、武汉($\delta^2\text{H}=8.29\delta^{18}\text{O}+7.44$)^[29]等地的大气降水线相比发现,斜率和截距较小。吴华武等^[30] 研究发现,雨滴在降落过程中会受到不平衡的二次蒸发,从而引起同位素分馏。斜率和截距越小则雨滴在降落过程中受到的蒸发越强烈,说明该流域在夏季台风雨时期降雨同位素发生过强烈的动力分馏效应。从图 4 中看出,与 GMWL 相比差别较小,反映海洋水汽是该流域汛期降水的主要来源。

Dansgaard^[31] 在 1964 年引入了“氘盈余(d)”的概念,将 d 定义为 $d=\delta^2\text{H}-8\delta^{18}\text{O}$ 。降水过程中 d 的大小取决于²H 和¹⁸O 分馏速度不同, d 主要反映了蒸发、凝结过程中的不平衡程度。Pfahl 等^[32] 的研究表明, d 值的大小可以反映当地大气气团的同位素组成,具有包含水汽源区气团类型的重要信息。3 次降水的 d 值变幅分别为 0.475%、0.886% 和 0.785%(图 5)。其中 20150809 次降水 d 值大部分低于 1%,说明本次降水动力分馏作用比较弱,且水汽来源为海洋。而其他 2 场降水变幅均较大,可能的原因是这 2 场降水量较小,降雨时受到强烈的雨中蒸发以及其他气象要素的影响,水汽来源较复杂。

3.3 同一场洪水中不同水循环要素的同位素特征

以 20150809 次台风雨为例,对各水循环要素的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的同位素特征进行分析。顾慰祖^[33] 的研究认为地面径流和地面下径流组成了流量过程的径流成分,而地面下径流又包含非饱和带的壤中流和饱和带的地下水径流,所以本次研究中对于河水和地面径流分开采样。本次台风雨事件中,降水的 $\delta^2\text{H}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变幅分别为 3.4% 和 0.420%;地面径流 $\delta^2\text{H}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变幅分别为 0.3% 和 0.070%,地面径流 $\delta^2\text{H}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的时程变化不显著,可能是因为本次降水较小,产生地面径流的历时较短;河水 $\delta^2\text{H}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变幅分别为 0.7% 和 0.140%。图 6 为该场降水中降水、地面径流和河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的时程分布。从图 6 中可以看出降水具有

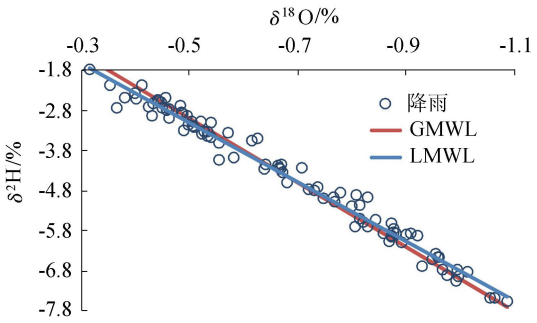


图 4 大气降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig. 4 Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation

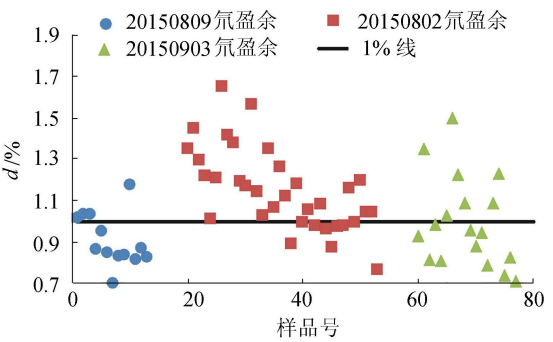


图 5 降水中氘盈余变化

Fig. 5 Variations of deuterium in precipitation

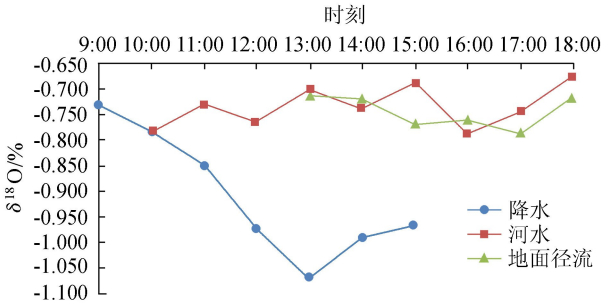


图 6 20150809 次台风雨事件中降水、河水和地面径流 $\delta^{18}\text{O}$ 值时程分布

Fig. 6 Temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation, stream water, and surface runoff in 20150809 typhoon event

比河水和地面径流更加明显的时程效应,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变幅分别比地面径流和河水高 0.350% 和 0.280%。地面径流和降水具有类似的变化趋势,但地面径流的产生在时间上滞后于降水。河水的 δ 值变化较小,但是其 $\delta^{18}\text{O}$ 值比降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值富集。河水在汇流过程中经过了长时间的同位素分馏作用,水体中的轻同位素慢慢逸散到空气中,使重同位素逐渐富集。

3.4 不同场次洪水的水循环要素同位素特征

选择研究期内 3 次台风雨事件中的降水,通过在雨中的连续采样以及同位素组成分析,发现 3 场降水的同位素变化较显著(图 7)。3 场降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变幅分别为 0.280%,0.422% 和 0.563%,平均值分别为 -0.513%,-0.869% 和 -0.644%。从图 7(a)中可以看出,8 月 9 日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均值较高,重同位素较为富集;8 月 23 日的降水中重同位素较上一次降水贫化,平均值为 -0.869%,为 3 次降水中最低;其中 8 月 9 日和 9 月 30 日 2 场降水中, $\delta^{18}\text{O}$ 值随着降雨的进行波动幅度越来越大,8 月 23 日的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较大,但下降趋势不明显。

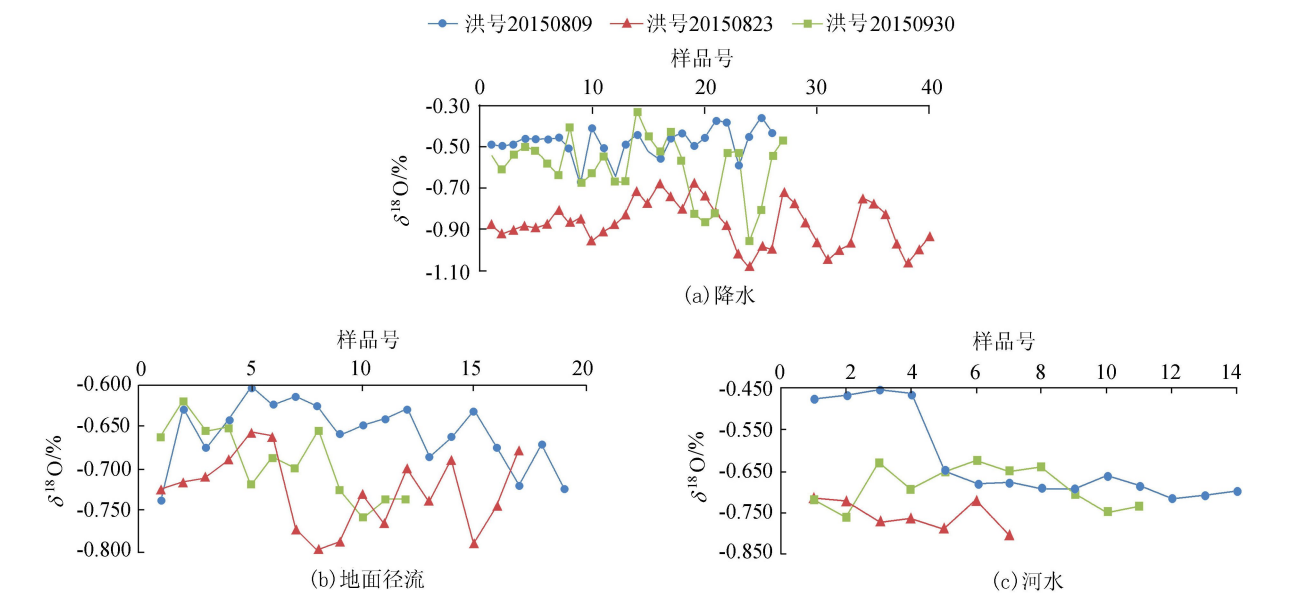


图 7 3 次台风雨事件中降水、河水和地面径流的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布

Fig.7 Distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation, stream water, and surface runoff in three typhoon events

3 次台风雨事件中河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布与降水具有类似的变化趋势(图 7(c)),且其平均值(-0.658%,-0.727% 和 -0.692%)与对应的降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近,表明两者具有相同的来源。但是,河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围分别为 0.135%,0.140% 和 0.142%,均小于其对应的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,表明河水中 ^{18}O 分馏程度远小于降水中 ^{18}O 的分馏程度。另外,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的上下波动可能与夏季强烈蒸发形成局部水汽循环有关。该流域夏季温度较高,水汽的相对湿度较小,水汽循环较快,在一次降水过程中蒸发的雨滴回到云层再次降到地面,使 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动较大。同时强烈的水体蒸发,也会导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高。

4 结 论

- a. 对和睦桥流域大气降水中氢氧同位素的时程效应和穿透降雨的特征进行分析,发现降水中的同位素具有显著的时程效应,穿透降雨比同时期的林外降雨中富集重同位素,穿透降雨 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变幅较小。拟合得出该流域汛期降水的 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 相关关系: $\delta^2\text{H}=7.39\delta^{18}\text{O}+5.93$,分析了降水的氘盈余变化。
- b. 以研究期内 20150809 次台风雨为例,分析了降水、地面径流及河水的同位素特征值。研究表明降水具有比地面径流与河水更加显著的时程效应。在汛期,地面径流大量补给河水,并且也具有一定的时程分布。
- c. 以研究期内 3 场台风雨为例,对降水、地面径流及河水进行比较。研究表明河水与降水的氢氧同位素平均值相近,两者来源大致相同。但河水与地面径流的变幅均小于降水,说明河水与地面径流的分馏程度较小。

d. 本研究表明降水具有明显的时程效应,地表水与河水在降雨初期与退水阶段的同位素含量也不尽相同。所以在径流分割时,以往研究中将降水同位素浓度处理为常数是错误的,考虑不同径流成分的时程变化会对流量过程线的划分具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 顾慰祖,陆家驹,唐海行,等. 水文实验求是传统水文概念:纪念中国水文流域研究50年、滁州水文实验20年[J]. 水科学进展,2003,14(3):368-378. (GU Weizu, LU Jiaju, TANG Haixing, et al. Challenges of basin study to traditional hydrological conceptions: the 50 years anniversary of hydrological basin study of PRC and the 20 years anniversary of Chuzhou hydrological laboratory[J]. Advances in Water Science, 2003,14(3):368-378. (in Chinese))
- [2] 瞿思敏,包为民,JEFFREY J M,等. 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用[J]. 水科学进展,2008,19(4):587-596. (QU Simin, BAO Weimin, JEFFREY J M, et al. Isotope tracer in watershed hydrological modeling[J]. Advances in Water Science, 2008,19(4):587-596. (in Chinese))
- [3] 汪集旻,陈建生,陆宝宏,等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):406-413. (WANG Jiyang, CHEN Jiansheng, LU Baohong, et al. Review and prospect of isotope hydrology[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(5):406-413. (in Chinese))
- [4] COSCARELLI R, CALOIERO T. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria Region)[J]. Journal of Hydrology, 2012, 416/417(3): 145-156.
- [5] CALLOW N, MCGOWAN H, WARREN L, et al. Drivers of precipitation stable oxygen isotope variability in an alpine setting, Snowy Mountains, Australia[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(6): 3016-3031.
- [6] HUGHES C E, CRAWFORD J. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489(3):42-55.
- [7] CHHETRI T B, YAO Tandong, TIAN Lide, et al. Amount and temperature effects responsible for precipitation isotope variation in the southern slope of Himalayas[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013,5(2):165-176.
- [8] 陈衍婷,杜文娇,陈进生,等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨[J]. 环境科学学报,2016,36(2):667-674. (CHEN Yanting, DU Wenjiao, CHEN Jinsheng, et al. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2):667-674. (in Chinese))
- [9] 顾慰祖. 集水区降雨径流响应的环境同位素实验研究[J]. 水科学进展,1992,3(4):246-254. (GU Weizu. Experimental research on catchment runoff responses traced by environmental isotopes[J]. Advances in Water Science,1992,3(4):246-254. (in Chinese))
- [10] McDONNELL J J, BONELL M, STEWART M K, et al. Deuterium variations in storm rainfall: implications for stream hydrograph separation[J]. Water Resources Research, 1990, 26(3):455-458.
- [11] KUBOTA T, TSUBOYAMA Y. Intra-and inter-storm oxygen-18 and deuterium variations of rain, throughfall, and stemflow, and two-component hydrograph separation in a small forested catchment in Japan[J]. Journal of Forest Research, 2003, 8(3):179-190.
- [12] IKAWA R, YAMAMOTO T, SHIMADA J, et al. Temporal variations of isotopic compositions in gross rainfall, throughfall, and stemflow under a Japanese cedar forest during a typhoon event[J]. Hydrological Research Letters, 2011, 5: 32-36.
- [13] 李小飞,张明军,王圣杰,等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义[J]. 地质学报,2013,87(2):269-277. (LI Xiaofei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the Yellow River Basin and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013,87(2):269-277. (in Chinese))
- [14] 孟玉川,刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 水科学进展,2010,21(3):327-334. (MENG Yuchuan, LIU Guodong. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2010,21(3):327-334. (in Chinese))
- [15] 吴锦奎,杨洪越,丁永建,等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学,2011,32(7):1857-1866. (WU Jinkui, YANG Qiyue, DING Yongjian, et al. Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin[J]. Environmental Science, 2011,32(7):1857-1866. (in Chinese))
- [16] 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. (LU Baohong, SUN Tingting, XU Baohua, et al. Isotopic synchronous monitoring of runoff of main stem of Yangtze River[J].

- Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(4): 378-381. (in Chinese))
- [17] 张华安,王乃昂,李卓仑,等. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下径流的氢氧同位素特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1623-1629. (ZHANG Huaan, WANG Naiang, LI Zhuolun, et al. Features of hydrogen and oxygen isotopes in lakes and groundwater in southeast BadainJaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1623-1629. (in Chinese))
- [18] 陈茜茜, 陈建生, 王婷. 我国北方地下水年龄测定问题讨论[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 1-5. (CHEN Xixi, CHEN Jiansheng, WANG Ting. A discussion of groundwater dating in northern China[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 1-5. (in Chinese))
- [19] 陈建生, 张志伟, 刘震, 等. 乌梁素海及其周边地区水源补给关系同位素研究[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 12-18. (CHEN Jiansheng, ZHANG Zhiwei, LIU Zhen, et al. Isotope study of recharge relationships of water sources in Wuliangsu Lake and its surrounding areas[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 12-18. (in Chinese))
- [20] KENNEDY V C, ZELLWEGER G W, AVANZINO R J. Variation of rain chemistry during storms at two sites in Northern California[J]. Water Resources Research, 1979, 15(3): 687-702.
- [21] EASTOE C J, DETTMAN D L. Isotope amount effects in hydrologic and climate reconstructions of monsoon climates: implications of some long-term data sets for precipitation[J]. Chemical Geology, 2016, 430: 78-89.
- [22] WANG Tao, BAO Weimin, XU Haili, et al. Experimental study of relationship between average isotopic fractionation factor and evaporation rate[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(4): 394-404.
- [23] HU Haiying, BAO Weimin, WANG Tao, et al. Experimental study on stable isotopic fractionation of evaporating water under varying temperature[J]. Water Science and Engineering, 2009, 2(2): 11-18.
- [24] ALLEN S T, KEIM R F, MCDONNELL J J. Spatial patterns of throughfall isotopic composition at the event and seasonal timescales[J]. Journal of Hydrology, 2015, 552: 58-66.
- [25] 王文, 诸葛绪霞, 周炫. 植物截留观测方法综[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 495-504. (WANG Wen, ZHUGE Xuxia, ZHOU Xuan. Methods for plant interception measurement[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 495-504. (in Chinese))
- [26] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [27] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. 大气科学学报, 2010, 33(6): 667-679. (CHEN Zhongxiao, CHENG Jun, GUO Pinwen, et al. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2010, 33(6): 667-679. (in Chinese))
- [28] 王涛, 张洁茹, 刘笑, 等. 南京大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[J]. 水文, 2013, 33(4): 25-31. (WANG Tao, ZHANG Jieru, LIU Xiao, et al. Variations of stable isotopes in precipitation and water vapor sources in Nanjing area[J]. Hydrology, 2013, 33(4): 25-31. (in Chinese))
- [29] 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. (DENG Zhimin, ZHANG Xiang, PAN Guoyan. Variations of hydrogen and oxygen isotopes in meteoric precipitation in Wuhan, China [J]. J Yangtze River Sci Res Inst, 2016, 33(7): 12-17. (in Chinese))
- [30] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1404-1414. (WU Huawu, ZHANG Xinping, GUAN Huade, et al. Influences of different moisture sources on δD and $\delta^{18}O$ in precipitation in Changsha, Hunan province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(8): 1404-1414. (in Chinese))
- [31] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [32] PFAHL S, SODERMANN H. What controls deuterium excess in global precipitation? [J]. Climate of the Past Discussions, 2013, 9(4): 4745-4770.
- [33] 顾慰祖. 论流量过程线划分的环境同位素方法[J]. 水科学进展, 1996, 7(2): 105-111. (GU Weizu. On the hydrograph separation traced by environmental isotopes[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(2): 105-111. (in Chinese))