

文章编号: 1008-2786-(2018)4-519-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000348

哈尼梯田区降水稳定氢氧同位素的 旱雨季变化特征及其影响因素

刘澄静, 角媛梅*, 刘志林, 刘 歆, 高 璇

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘 要: 水的稳定同位素(D 和 O)是水文过程的重要示踪剂。本文以哈尼梯田文化景观遗产核心区全福庄河扇形小流域为研究对象,通过采集流域内雨季和旱季的大气降水样品,并测定和分析氢氧同位素值(D 和 $\delta^{18}\text{O}$),得出以下结论:(1)研究区全年大气降水线方程为: $\delta\text{D}=8.35\delta^{18}\text{O}+22.41$ ($R^2=0.98, n=48$),但年内旱季和雨季降水线方程的斜率和截距差异明显。(2)研究区大气降水中氢氧稳定同位素组成具有明显季节差异,雨季降水中氢氧同位素贫化, d 值偏低;旱季降水氢氧同位素值相对偏正, d 值偏高,这与我国季风区旱雨季水汽来源差异有关。(3)根据相关分析可知,温度、降水和相对湿度 3 个要素的变化是研究区降水同位素值变化的主要影响因素,但在不同的时间尺度下影响降水同位素变化的环境因素存在差异。(4)在年尺度下降水和相对湿度是主要的影响因素;在旱雨季尺度下,温度是雨季降水同位素值变化的主要因素,而温度、降水量和相对湿度对旱季降水同位素值变化的影响则不显著,旱季降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化为三因素共同作用的结果。

关键词: 哈尼梯田区;降水;氢氧同位素;旱雨季;相关性分析

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

大气降水是流域水文循环的关键环节和重要输入因子,不同来源的水体具有不同的同位素组成特征,这使得利用水体中稳定同位素变化对水循环过程进行研究成为可能^[1]。环境同位素中的 ^{18}O 和D作为自然水体中的两种天然示踪剂^[2],是研究流域水文过程与区域气候变化的重要工具,特别是对大气降水中稳定同位素组成特征的研究,对于我们深入了解水循环过程及其结构具有重要意义^[3-5]。大气降水同位素组分存在大陆效应、纬度效应、高程效应和季节效应,这些效应的产生与区域降水水汽形成、运移以及降水过程中的环境温度、相对湿度、蒸发和降水量等影响因素有密切的关系^[6]。早在1998年在对全球降水同位素监测网络(Global Network of Isotope in Precipitation, GNIP)提供的东

亚地区降水稳定同位素数据的分析中,就发现由于受到不同水汽来源的影响在中国地区降水稳定同位素值存在季风区冬高夏低,非季风区夏高冬低的特征^[7]。但由于所分析的季风区和非季风区样点并不均匀,其中东亚季风区22个,非季风区仅6个且位于中国的只有2个,因而这种分析还存在不全面性。就中国的季风区与非季风区降水而言,我国降水稳定同位素的时空变化主要受降水量效应和温度效应控制,在季风区主要是降水量效应,在非季风区主要表现为温度效应^[8,9]。在海河流域季风区的研究中也发现,受季风影响强弱不同,流域降水稳定同位素的季节变化具有明显的空间差异,降水稳定同位素值在季风期相对贫化,而非季风期则相对富集,结论也证明了这一点^[5]。在季风区和非季风区

收稿日期(Received date):2017-10-24;改回日期(Accepted date):2018-05-04

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金项目(41271203,41761115)。[National Natural Science Foundation of China (41271203, 41761115)]

作者简介(Biography):刘澄静(1994-),男,云南宾川人,硕士研究生,主要研究方向:稳定同位素生态学。[LIU Chengjing (1994-), male, born in Binchuan, Yunnan province, M. Sc. candidate, research on stable isotope ecology] E-mail: 18487101130@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):角媛梅(1972-),女,博士,教授,主要研究方向:景观生态学。[JIAO Yuanmei (1972-), female, Ph. D., professor, specialized in landscape] E-mail: ymjiao@sina.com

上,降水同位素组成能够较好地表征出季风区与非季风区的水汽来源差异,但是具有相同水汽来源的在季风区内,同位素是否依然能够体现这种差异,是一个十分值得研究的问题。如在珠江流域全年降水氢氧稳定同位素的研究中则发现,在全年尺度上研究区降水氢氧同位素主要受温度的影响,仅仅在旱季存在有较为微弱的降水量效应^[10]。这之前人们的研究结论存在一定差异,主要是因为不同的环境特征造成了季风区不同季节不同区域的氢氧稳定同位素组成的差异,如我国的季风气候区具有雨热同期的气候特点,有的地方旱雨季的温差较大和降水量差异较大。总的来说,降水中的稳定同位素不仅受到季风等宏观大尺度因素的影响,也与区域温度、降水量、纬度、高程等地理和气象因素有关^[11]。

哈尼梯田作为一个持续 1300 余年的世界文化景观遗产,哈尼梯田的持续存在主要就得益于水资源的持续及良性循环利用^[12]。遗产区所处的哀牢山区,属热带季风气候,雨热同期现象明显,旱季(11—4 月)和雨季(5—10 月)分明。且在雨季,该区同时受到东南季风和西南季风的影响,水汽来源较为复杂,降水同位素的影响因素较多;旱季主要受大陆气团控制,水汽来源较为单一。在哈尼梯田区一年的耕作周期内,不论是雨季的水稻种植,还是旱季末的冲水肥田和关水养田都需要大量的灌溉用水补给。降水作为研究区最主要的补给水源,明晰不同季节的降水水汽来源、循环过程及其区域影响因素,对明显该区的灌溉水资源状况尤为重要。目前利用同位素方法对于哈尼梯田区降水的尺度和影响因素等方面的研究已经展开,主要是对哈尼梯田区的短时间尺度降水同位素研究^[13],不同空间尺度的地下水同位素海效应、分布格局研究^[14,15],因而在降水同位素方面还缺乏较长时间尺度的研究和影响因素分析。就云南全省来看,降水同位素研究开展较早,但研究主要依托于已有的气象观测站点数据,而对于未长时设站关键自然地理区域的观测较少。在昆明、蒙自、腾冲等地区开展的多尺度的降水同位素分析^[16];丽江季风降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化分析等^[17]等。对此,于 2015 年 5 月—2016 年 4 月,在哈尼梯田区设置样点采集一个旱雨季周期内的大气降水样品进行分析,并对其全年尺度及以不同季节尺度(旱雨季)的同位素组成特征变化情况及其影响因素进行研究,以期通过对哈尼梯田区的降水稳定同位素组

同位素组成进行研究,了解研究区不同尺度的水汽来源及其影响因素,揭示研究区的水文循环过程,从而对科学解释哈尼梯田水文循环规律和水资源配置情况,以及在全球气候快速变化的大背景下区域水循环特征和过程的响应机制的研究提供相应的理论基础和研究准备。

1 研究区与研究方法

1.1 区域概况

研究区位于云南省红河哈尼梯田世界文化遗产核心区之一的坝达片区,经纬度范围在 $102^{\circ}43'16'' \sim 102^{\circ}50'39''\text{E}$ 、 $23^{\circ}5'20'' \sim 23^{\circ}13'18''\text{N}$ 之间(图 1)。区内的全福庄河小流域属红河一级支流麻栗寨河上游水源区,小流域内海拔高差大,海拔范围在 1500 ~ 2000 m 左右立体气候明显。在 1500 ~ 1800 m 为亚热带季风气候,植被为亚热带常绿阔叶林和针阔混交林,以青冈、木荷为代表性植物,年平均气温在 17°C 左右,是梯田的主要分布区,土壤为水稻土;在 1800 ~ 2000 m 为温带季风气候,植被为常绿阔叶苔藓林(也称云雾林),以桉木和山茶为代表性植物,人为破坏的地区分布有草地,年平均气温在 14°C 左右,是森林的主要分布区,土壤为黄壤。从土地利用类型上看,研究区土地利用以森林和耕地(主要是水田)为主,其中森林景观占整个小流总面积的 66.6%,水田则占 22.1%。

1.2 样品采集与测试

在收集研究区相关资料和借鉴前人研究方法的基础上,于 2015 年 5 月—2016 年 4 月在研究区 1500 ~ 2000 m 的海拔范围上梯级布点,按月采集大气降水。选取其中位于森林区降水样点 2 个,梯田区降水样点 2 个,每个点采集样品 12 个,共对 4 个样点 48 个大气降水样品进行分析(图 1)。考虑到森林区最主要的景观类型为森林和梯田,在两种景观类型内分别设置采样点,样点 1 ~ 4 海拔分别为 1468、1663、1889 和 1957 m,这样既兼顾了景观类型变化也考虑到了海拔变化。

采集雨水样品时,先用自制的雨水收集器收集雨水,到该月结束后对桶内收集的雨水进行采集,并记录月降水量,其中森林区降水收集器设置在较大的林窗下为非穿透雨,收集雨水的桶被埋藏于地下且收集器口部放有乒乓球以减少外界气温变化对样品的影响。收集采集雨水收集器中雨水样品时,先

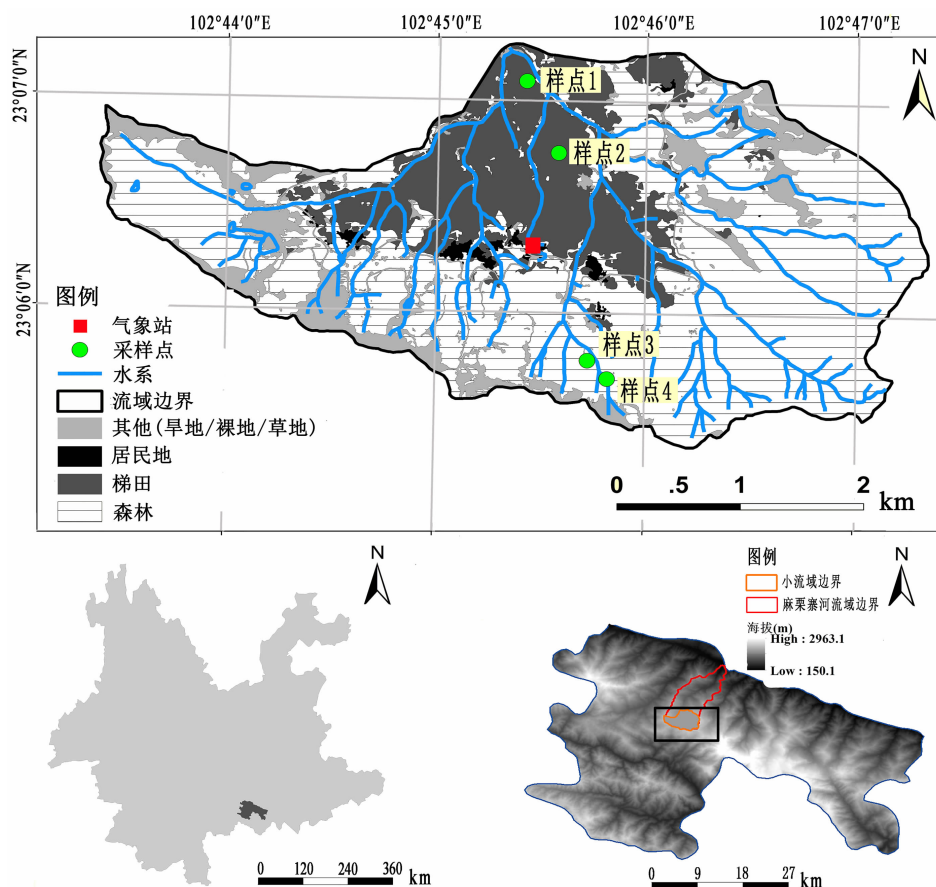


图1 研究区采样点分布

Fig. 1 Sampling points distribution of study area

将 100 ml 聚乙烯瓶用雨水清洗三次,迅速灌满,使瓶内无气泡后用密封胶封口,贴好标签。气象数据采集自设立于全福庄中寨的自动气象站,采样点海拔等地理位置信息通过手持 GPS 确定。

样品测试在云南师范大学高原湖泊与生态全球变化实验室进行,使用的是 Picarro L2130-i 超高精度液态水和水汽同位素分析仪。仪器的测试精度: ^{18}O 为 $\pm 0.1\text{‰}$, D 为 $\pm 0.5\text{‰}$,最终分析结果是用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示:

$$\delta\text{D} = \left(\frac{R_{\text{D-sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{O-sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{D-sample}}$ 为水样中的 D 的稳定同位素比率 $R(\text{D}/\text{H})$, $R_{\text{O-sample}}$ 为水样中 ^{18}O 的稳定同位素比率 $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$, $R_{\text{V-SMOW}}$ 为维也纳平均海洋水中氢和氧稳定同位素比率 $R(\text{D}/\text{H})$ 和 $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$ 。

2 结果与分析

2.1 局地大气降水线

由于水汽来源和环境因子等因素的差异,往往会使得局地大气降水线(Local Meteoric Water Line, LMWL)不同程度偏离全球大气降水线(Global Meteoric Water Line, GMWL)^[18]。根据在研究区 4 个样点采集到的 2015 年 5 月—2016 年 4 月的大气降水氢氧同位素实测值,将大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行一元线性回归分析,得出的研究区局地全年大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 8.35\delta^{18}\text{O} + 22.41$ ($R^2 = 0.98$, $n = 48$),局地雨季大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 6.85\delta^{18}\text{O} + 3.22$ ($R^2 = 0.97$, $n = 24$),旱季局地大气降水线方程为: $\delta\text{D} = 7.24\delta^{18}\text{O} + 19.45$ ($R^2 = 0.93$, $n = 24$),局地全年大气降水线方程的斜率要略大于全球大气降水线方程^[19]和宋献方等提出的中国大气降水线方程(7.82)^[20](图 2)。考虑到研究区在 2016 年 1 月和 2 月曾受到北方强冷空气影响而出

现极端低温天气,将这两月的数据去除后得到本地大气降水线方程为 $\delta D = 8.02\delta^{18}O + 42 (R^2 = 0.97)$, 则本区大气降水线方程斜率从去除前的 8.35 减小为去除后的 8.02,充分说明寒潮对本地大气降水线有很大影响。此外,研究区雨季局地大气降水线斜率要比张贵玲^[13]等得出的哈尼梯田区大气降水线 $\delta D = 7.59\delta^{18}O + 3.31 (R^2 = 0.99, n = 90)$ 小。

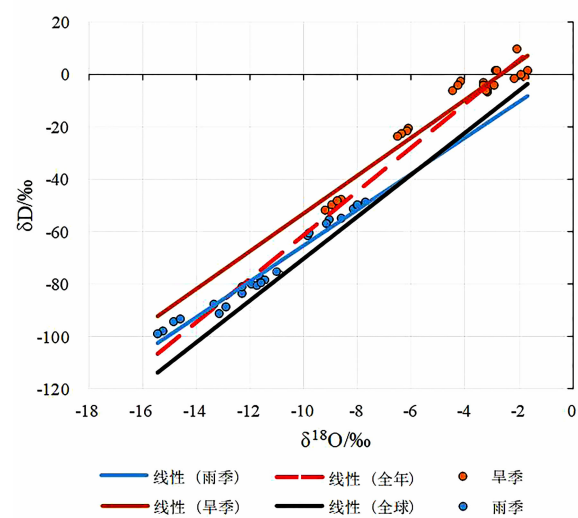


图2 研究区局地大气降水线图

Fig. 2 Local meteoric water line (LMWL) in study area

2.2 降水 $\delta^{18}O$ 值的时间变化分析

通过研究区 4 个样点一年的观测资料可知,全福庄流域样点的全年大气降水同位素 $\delta^{18}O$ 的变化幅度为: $-15.46‰ \sim -1.69‰$, 变化幅度较大。 $\delta^{18}O$ 值全年变化在整体上呈“V”字型(如图 3):雨季(5—10 月)降水同位素值不断偏负,旱季(11—4 月)降水 $\delta^{18}O$ 值不断偏正,具有明显的季节效应;各样点的极小值出现在雨季末期的 10 月,极大值出现在旱季末的 4 月,但在 1 月样点 2 出现的极大值要明显高于其他样点值。从雨季内部来看,在整个雨季同位素值不断偏负的背景下,5—6 月降水氢氧同位素值基本稳定,6—7 月开始快速偏负,7—9 月基本稳定,到雨季末期的 10 月同位素值再次偏负;从旱季内部来看,在整个旱季同位素值不断偏正的背景下,11—次年 2 月同位素值快速偏正,2—4 月逐渐趋于稳定。

由表 1 可知,研究区稳定同位素 $\delta^{18}O$ 平均值在年内具有明显的旱雨季差异,旱季要比雨季偏正 $6.95‰$;在气温上研究区旱季平均气温($12.89^{\circ}C$)要小于雨季的 $18.8^{\circ}C$,气温年较差达 $6.0^{\circ}C$,年均温

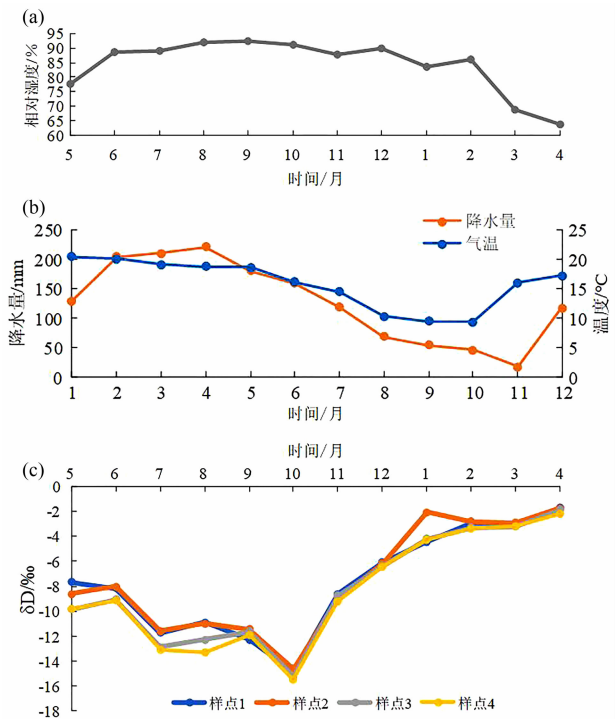


图3 降水 $\delta^{18}O$ 值与气象要素随时间变化情况 (a. 相对湿度旱雨季变化情况;b. 降水量和温度旱雨季变化情况;c. 不同样点 $\delta^{18}O$ 旱雨季变化情况)

Fig. 3 Changes of precipitation $\delta^{18}O$ value and meteorological parameters across seasons (a. Changes of relative humidity across seasons; b. Changes of precipitation and temperature across seasons; c. Changes of precipitation $\delta^{18}O$ value across seasons in different Sampling points)

为 $15.9^{\circ}C$;且全年降水量的 72.26% 均集中在雨季,旱季仅占 27.74%;在相对湿度方面,除雨季初期的 5 月和旱季末期的 3—4 月相对湿度低于 80% 之外,研究区其他月份的平均相对湿度均在 80% 以上,雨季中后期更是高达 90% 以上,从整体上看雨季相对湿度变化较小,旱季相对湿度变化较大。综合以上分析结果可知,研究区稳定同位素 $\delta^{18}O$ 平均值明显具有的季节差异,与环境因素中的温度、降水量和相对湿度应具有一定的相关性,但具体相关性如何还需进一步分析。

表 1 研究区 $\delta^{18}O$ 值与主要环境因素

Tab. 1 $\delta^{18}O$ value and main environmental factors in study area

	$\delta^{18}O$ 值/ $‰$	降水量/mm	温度/ $^{\circ}C$	相对湿度/ $‰$
全年	-7.98	1532.19	15.90	84.14
雨季	-11.45	1107.26	18.92	88.32
旱季	-4.50	424.93	12.89	79.97

2.3 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与主要环境因素的相关性分析

如表2所示,在0.05的显著性水平下,检验临界为0.576时,4个样点的全年降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量、相对湿度呈显著的负相关关系,但与温度的相关性则不显著,这说明研究区全年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在有明显雨量效应和湿度效应。从旱雨季来看,在0.05的显著性水平下,检验临界为0.811时,4个样点雨季降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度的相关系数高达0.9以上,呈显著正相关,说明研究区雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有明显的温度效应,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水和相对湿度的相关性不显著,其中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量的相关性更低;在旱季,4个样点旱季降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量、温度和相对湿度的相关性均未能通过相关系数临界值检验,故相关性均不显著,但其中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与相对湿度的相关性要明显偏高。总的看来,在年尺度上,研究区降水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化主要受到温度和相对湿度的变化主导,在旱雨季尺度上,温度是影响研究区旱季降水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化的主要因素,而旱季则没有明显的主导性环境因子影响。

表2 不同样点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与主要环境因素的相关性统计
Tab.2 Correlation statistics of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value with main environmental factors in different sampling point

	样点1	样点2	样点3	样点4	平均值
全年					
降水量	0.76 *	-0.77 *	-0.79 *	-0.81 *	-0.79 *
温度	-0.48	-0.54	-0.54	-0.54	-0.53
相对湿度	-0.72 *	-0.68 *	-0.69 *	-0.68 *	-0.70 *
雨季					
降水量	-0.09	0.01	-0.03	-0.14	-0.06
温度	0.94 *	0.96 *	0.92 *	0.90 *	0.95 *
相对湿度	-0.69	-0.57	-0.52	-0.58	-0.60
旱季					
降水量	-0.35	-0.44	-0.37	-0.41	-0.40
温度	0.18	-0.01	0.18	0.14	0.12
相对湿度	-0.71	-0.60	-0.73	-0.70	-0.69

注:全年分析时, $n=12$, $\alpha=0.05$, $r_a=0.576$;旱雨季分析时, $n=6$, $\alpha=0.05$, $r_a=0.811$ 。其中带“*”为通过0.05显著性水平检验。

将不同时间尺度上的4个样点降水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与其影响因素进行回归分析可知,在年尺度上, $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量和相对湿度变化的回归方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.04P - 0.19H + 12.75$ ($R^2 = 0.75$),式中 P 为降水量(mm), H 为相对湿度(%)。在旱雨季尺度上,雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与旱季温度变化

的回归方程为: $\delta^{18}\text{O} = 1.47T - 39.19$ ($R^2 = 0.89$),式中 T 为温度($^{\circ}\text{C}$);旱季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与旱季各主要环境因素的回归方程为: $\delta^{18}\text{O} = 0.001P - 0.86T - 0.38H + 37.03$ ($R^2 = 0.75$),式中 P 为降水量(mm), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), H 为相对湿度(%)。

2.4 全年降水中的氘盈余

由图4可知,研究区的氘盈余值范围在10.59‰~31.11‰之间,变化范围较大且均高于全球大气降水 d 平均值的10‰,而本地平均值19.61‰几乎是全球平均值的2倍。各样点 d 值在雨季存在一定差异但无明显的变化规律,而旱季各样点 d 值变化则基本一致;4个样点 d 值的雨季平均值为16.34‰,旱季则为22.87‰,呈现出雨季偏低,旱季偏高的特点。降水中 d 的值主要取决于水汽源区的相对湿度,如果水汽源区的空气相对湿度降低,则降水中 d 的值会升高;反之, d 值降低,二者之间为反相关关系^[21]。研究区4个样点 d 值旱季要明显大于雨季,这说明雨季的水汽源区没有旱季水汽源区干燥,研究区雨季受印度洋和太平洋上海洋气团影响,旱季则为北方大陆气团影响的实际情况也说明了这一点。

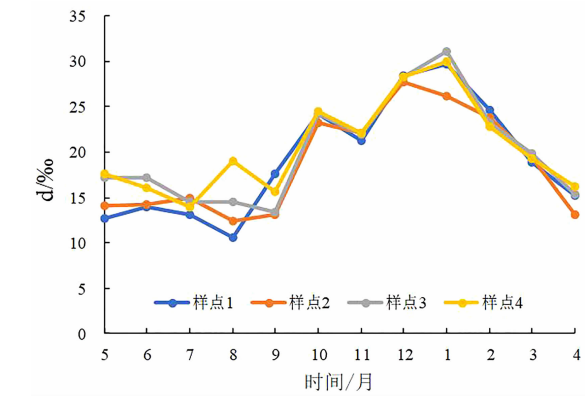


图4 氘盈余(d 值)随时间变化特征
Fig.4 Variation of deuterium excess (d value) across seasons

3 讨论

3.1 不同时空尺度下降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与环境影响因子的关系

通过本研究可以发现,在年尺度下降水和相对湿度是主要的影响因素;在旱雨季尺度下温度是雨季降水同位素值变化的主要因素,而在旱季则没有主要影响因素。根据同位素温度效应和降水效应特征可知,温度越高同位素值越偏正,而降水量越大同

位素值则越偏负^[19]。研究区地处我国南部,在雨热同期的气候特征影响下,雨季研究区一直保持着极高的降水量及其所造成的高相对湿度,两者在季节内差异并不明显,但研究区的温度却因为雨季的深入而从5月的20.5℃下降到了10月的16.16℃,在雨季内的温差为4.34℃, $\delta^{18}\text{O}$ 值随时间变化的温度梯度达到 $1.47\text{‰}\text{℃}^{-1}$ 。而在年尺度下,早雨季间的降水量和相对湿度差异要大于温度差异,这就使得研究区全年尺度下的温度效应被降水量效应掩盖。而胡海英等^[22]在对香港地区降水同位素的分析中也认为,在年内变化上降水氢氧同位素变化存在显著的降水量效应,而不存在温度效应,但并没有对季节内的降水同位素效应进行分析;刘忠方等^[23]在对雅鲁藏布江流域的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究中也发现,在季风降水期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的最低值并不完全出现在降水量最大的月份,但也没有明确说明造成这种现象的原因。因此,在不同尺度上产生的尺度效应,在不同测量尺度下可能会产生差异。

此外,在空间尺度上,张琳等在总结大量学者的研究后认为:由于季风气候和青藏高原的影响,在某种程度上,季风气候对同位素组成及效应的影响超过温度效应和纬度效应;季风降水量效应主要出现在东南沿海、云贵及青藏高原等地;温度效应则主要出现在我国内陆的中、高纬度地区^[24]。而位于云贵高原地区的研究区全年降水同位素值与降水量和相对湿度存在的负相关关系,也说明了这一点。但是在较小的时空尺度下,即在季风期内或是非季风期内的季风区降水同位素是否如本研究一样不具有雨量效应特征,还有待进一步研究。

3.2 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与主要环境因素的二阶偏相关分析

将研究区4个样点全年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与降水量、温度和相对湿度进行二阶偏相关分析可知(表3),在年尺度下,全年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与相对湿度呈明显负相关,而与降水量的相关性下降,变得不显著;在早雨季尺度下,雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与温度呈明显的正相关,但相关性有所下降;旱季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值则与温度和相对湿度均存在明显的负相关关系,而非之前的没有主导影响因素。根据偏相关计算结果,对全年降水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与其影响因素进行回归分析可知, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与相对湿度变化的一元线性回归方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.32H + 19.21$ ($R^2 = 0.49$) 相对湿度;而旱季 δ^{18}

O 平均值与降水量和相对湿度变化的二元线性回归方程为: $\delta^{18}\text{O} = -0.03P - 0.16H + 10.40$ ($R^2 = 0.64$) 相对湿度。从以上式中可以看出,两者的决定系数都比较低,说明除了受到主导因素的影响外,还有其他的因素对降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 造成影响。鉴于二阶偏相关分析的结论与一般相关分析存在一定差异,因此二阶偏相关与一般相关分析何者更符合研究区实际情况,还需要进一步讨论。

表3 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值与主要环境因素的偏相关统计

Tab.3 Partial correlation statistics of average $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation with main environmental factors

控制变量	变量	偏相关系数		
		全年	雨季	旱季
相对湿度-降水	温度	-0.54	0.88 *	-0.94 *
相对湿度-温度	降水	0.03	-0.39	0.07
温度-降水	相对湿度	-0.72 *	0.30	-0.97 *

注:全年分析时, $n = 12$, $\alpha = 0.05$, $r_a = 0.576$; 早雨季分析时, $n = 6$, $\alpha = 0.05$, $r_a = 0.811$ 。其中带“*”为通过0.05显著性水平检验。

4 结论

通过对以上元阳哈尼梯田区全福庄河小流域全年降水氢氧稳定同位素数据及气象数据的相关性分析,得到以下结论:

(1)研究区所处流域的大气降水中稳定氢氧同位素组成,在时间上具有明显季节性差异。其中:雨季降水中氢氧同位素贫化,d值偏低;旱季降水氢氧同位素值相对偏正,d值偏高,这与我国季风区早雨季水汽来源差异有关。

(2)全福庄流域雨季大气降水同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值随时间变化特征,主要受到季节效应、温度效应和降水效应的影响。由于源自研究区温度、降水和相对湿度3个气象要素的变化和相互影响,使得这三种效应在时空上具有复杂的耦合关系。

(3)在不同的时间尺度下影响降水同位素变化的环境因素存在差异,在年尺度下降水和相对湿度是主要的影响因素;在早雨季尺度下,温度是雨季降水同位素值变化的主要因素,而在旱季则没有主要影响因素。但在年尺度下,早雨季间的降水量和相对湿度差异要大于温度差异,这就使得研究区全年尺度下的温度效应被降水量效应掩盖。

参考文献 (References)

- [1] 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 - 144 [GU Weizu, PANG Zhonghe, WANG Quanjia, et al. Isotope hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 105 - 144]
- [2] 李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(09): 46 - 50 [LI Hui, ZHOU Hongfei. Variation characteristics of δD and $\delta^{18}O$ stable isotope in the precipitation of Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, **21**(09): 46 - 50]
- [3] KOSTER R D, JOUZEL J, SUOZZO R, et al. Global sources of local precipitation as determined by the NASS/GISS GCM[J]. Geophysical Research Letters, 1986, **13**(2): 121 - 124
- [4] 李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 624 - 633 [LI Yaju, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: a review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 624 - 633]
- [5] 庞朔光, 赵诗坤, 文蓉, 等. 海河流域大气降水中稳定同位素的时空变化[J]. 科学通报, 2015, **60**(13): 1218 - 1226 [PANG Shuoguang, ZHAO Shikun, WEN Rong, et al. Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Haihe River basin. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(13): 1218 - 1226]
- [6] 刘鑫, 宋献方, 夏军, 等. 黄土高原岔巴沟流域降水氢氧同位素特征及水汽来源初探[J]. 资源科学, 2007, **29**(3): 29 - 66 [LIU Xin, SONG Xianfan, XIA Jun, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes and preliminary analysis of vapor source for precipitation in Chabagou Catchment of the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2007, **29**(3): 29 - 66]
- [7] ARAGUASARAGUAS L, FROELICH K, ROZANSKI K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, **103**(D22): 28721 - 28742
- [8] JOHNSON K R, INGRAM B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, **220**(3): 365 - 377
- [9] LIU Z, TIAN L, CHAI X, et al. A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}O$ over China[J]. Chemical Geology, 2008, **249**(1 - 2): 203 - 212
- [10] 郭政昇, 王娟, 赵培. 珠江流域大气降水稳定性氢氧同位素特征[J]. 水文, 2017, **37**(02): 78 - 82 [GUO Zhengsheng, WANG Juan, ZHAO Pei. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in Pearl River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2017, **37**(02): 78 - 82]
- [11] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}O$ 的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, **54**(22): 3521 - 3531 [LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Sci Bull, 2009, **54**(22): 3521 - 3531]
- [12] 角媛梅. 哈尼梯田自然与文化景观生态研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009: 1 - 12 [JIAO Yuanmei. Natural and cultural landscape ecology of Hani Rice Terraces[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press. 2009: 1 - 12]
- [13] 张贵玲, 角媛梅, 刘澄静, 等. 哈尼梯田麻栗寨河流域雨季大气降水氢氧同位素特征及影响因素[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(06): 1701 - 1709 [ZHANG Guiling, JIAO Yuanmei, LIU Chengjing, et al. Hydrogen and oxygen isotopic of precipitation during the rainy season of the Malizhai River basin in Hani terraces: characteristics and impact factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(06): 1701 - 1709]
- [14] 刘澄静, 角媛梅, 张贵玲, 等. 哈尼梯田麻栗寨河流域泉水氢氧同位素的海拔效应[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(05): 1404 - 1410 [LIU Chengjing, JIAO Yuanmei, ZHANG Guiling, et al. Altitude effect of hydrogen and oxygen isotopes in spring water of the Malizhai River basin, Hani terrace[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(05): 1404 - 1410]
- [15] 角媛梅, 刘澄静, 刘歆, 等. 哈尼梯田优势景观类型对泉水氢氧同位素效应的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(07): 2299 - 2306 [JIAO Yuanmai, LIU Chengjing, LIU Xin, et al. Impacts of dominated landscape types on hydrogen and oxygen isotope effects of spring water in the Hani Rice Terraces[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(07): 2299 - 2306]
- [16] 章新平, 关华德, 孙治安, 等. 云南降水中稳定同位素变化的模拟和比较[J]. 地理科学, 2012, **32**(01): 121 - 128 [ZHANG Xinping, GUAN Huade, SUN Zhian, et al. Simulations of stable isotopic variations in precipitation and comparison with measured values in Yunnan Province, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, **32**(01): 121 - 128]
- [17] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 天气尺度下丽江季风降水中 $\delta^{18}O$ 变化[J]. 科学通报, 2006, **51**(10): 1218 - 1224 [PANG Hongxi, HE Yuanqing, LU Aigang, et al. Synoptic-scale variation of $\delta^{18}O$ in summer monsoon rainfall at Lijiang, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(10): 2897 - 2904]
- [18] 陈曦, 李志, 程立平, 等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. 生态学报, 2016, **36**(01): 98 - 106 [CHEN Xi, LI Zhi, CHENG Liping, et al. Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(01): 98 - 106]
- [19] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 58 - 75 [LIN Guanghui. Stable isotope ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 58 - 75]
- [20] 于静洁, 宋献方, 刘相超, 等. 基于 $\delta(D)$ 和 $\delta(O^{18})$ 及水化学的永定河流域地下水循环特征解析[J]. 自然资源学报, 2007, **22**(3): 415 - 421 [YU Jingjie, SONG Xianfang, LIU Xiangchao, et al. A Study of groundwater cycle in Yongding River Basin by using δD , $\delta^{18}O$ and Hydrochemical Data[J]. Journal of Natural Resources, 2007, **22**(3): 415 - 421]
- [21] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林. 新德里季风降水中过量氘与季风水汽

- 来源[J]. 冰川冻土, 2005, **27** (06): 876 – 880 [PANG Hongxi, HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin. Correlation between deuterium excess in monsoon precipitation of New Delhi and the origin of precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27** (06): 876 – 880]
- [22] 胡海英, 黄华茂, 杨健文. 香港地区降水氢氧同位素多尺度演变特征分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, **47** (05): 577 – 584, 620 [HU Haiying, HUANG Huamao, YANG Jianwen. Multi time scale variation of hydrogen and oxygen in precipitation under changing environment in Hong Kong area[J]. Engineer Journal of Wuhan University, 2014, **47** (05): 577 – 584, 620]
- [23] 刘忠方, 田立德, 姚檀栋, 等. 雅鲁藏布江流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空变化[J]. 地理学报, 2007, **62** (05): 510 – 517 [LIU Zhongfang, TIAN Lide, YAO Tandong, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation of the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, **62** (05): 510 – 517]
- [24] 张琳, 陈宗宇, 聂振龙, 等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析[J]. 核技术, 2008, **31** (09): 715 – 720 [ZHANG Lin, CHEN Zongyu, NIE Zhenlong, et al. Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature on different time-scale in China [J]. Nuclear Techniques, 2008, **31** (09): 715 – 720]

Seasonal Variations of Precipitation Stable Hydrogen and Oxygen Isotope in Hani Rice Terraces and Its Influencing Factors

LIU Chengjing, JIAO Yuanmei*, LIU Zhilin, LIU Xin, GAO Xuan

(School of Tourism and Geographical Sciences Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The stable isotopes of water (D and O) are important tracers for hydrological processes. In this paper it took a fan-shaped watershed of the Quanfuzhuang River located at the core zone of the cultural landscape heritage of Hani Rice Terraces in Yunnan, China as the research object, where 48 atmospheric precipitation samples in this basin were collected in rainy seasons and dry seasons separately, and then they were tested and analyzed for hydrogen and oxygen isotopes (δD and $\delta^{18}\text{O}$) comparison. Conclusions were drawn: (1) The meteoric water line equation for a year was: $\delta\text{D} = 8.35\delta^{18}\text{O} + 22.41$ ($R^2 = 0.98$, $n = 48$), and graphically the slopes and intercepts of the equation for dry season were quite different from those for rainy season. (2) There was an obvious seasonal variation in the composition of precipitation hydrogen and oxygen stable isotope. During the rainy season they were lean with low d values, whereas in the dry seasons they were relatively positive with higher d values, suggesting that the differences were ascribable to the seasonal changes in the moisture sources of China monsoon regions. (3) Correlation analysis revealed that temperature, precipitation, and relative humidity were the main three factors affecting the changes in precipitation isotope values, but they changed in response to different time scales. At an annual scale they were precipitation and relative humidity, but in rainy season it was only temperature significant. As for a dry season they were attributed to a combination of all the three factors.

Key words: Hani Rice Terraces; precipitation; hydrogen and oxygen isotope; dry and wet season; correlation analysis