

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190328

关键环境因子及水汽来源 对雾水氢氧稳定同位素组成特征的影响

刘澄静, 角媛梅, 吴常润, 刘志林, 丁银平

(云南师范大学地理学部, 云南 昆明 650500)

摘要:雾降水对山区森林生态系统和农业生态系统具有十分重要的生态意义, 稳定同位素法是示踪雾水生态水文过程的有效方法。由于雾水采集与测定困难, 环境因子对雾水稳定同位素影响的研究较少。为加强雾水稳定同位素变化及其影响因素的认识, 通过对2016年1~4月在哈尼梯田区采集的40个雾水样品的稳定同位素组成及环境因子进行分析, 得出以下结论: (1) 雾水稳定同位素值的时空变化主要受雾水水汽来源和局地环境条件两个因素影响。 (2) 雾水存在外来和局地两种不同的水汽来源。 (3) 温度、露点温度和相对湿度三个环境因子与雾水稳定同位素值存在显著的相关性, 是影响雾水稳定同位素变化的关键因子。 (4) 在全球范围内, 还缺乏雾水水汽来源及其对雾水稳定同位素值影响的系统性研究, 但现有雾水研究可总结出两个特点: 同一水汽来源雾水稳定同位素值范围相对接近, 内陆地区雾水稳定同位素值要比海岸地区偏正。

关键词:雾水; 氢氧稳定同位素; 环境因子; 水汽来源

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2021)03-0038-06

0 引言

雾(降)水作为一种重要的水文和化学输入项, 具有多方面的和特殊的生态水文效应^[1-2]。特别是在多雾的山地生态系统和海滨生态系统中, 雾水是维持生态系统水分输入不可或缺的因素^[3]。当雾团与植物体表面接触时, 较小的雾滴被枝叶截获并逐渐合并成大水滴, 超过植被冠层的储水能力时会降落到地面, 形成雾降水(Fog interception, Horizontal precipitation)^[4]。根据雾水水汽来源和凝结形式的不同, 雾降水按成因可分为海岸雾、平流雾、地形雾、辐射雾、蒸发雾和混合雾等^[5-6]。在雾高频发生的山地地区, 雾水既是植物的水源, 也可以补给地下水和地表径流^[3,7], 这对于山区的森

林生态系统和农业生态系统十分重要^[8-9]。早在1993年Bruijnzeel对马来西亚山地雨林的观测中就已发现雾水的生态效应^[10]。现阶段关于山地地区雾水的研究则发现雾水具有抵消季节性干旱对于地方性物种的影响^[11], 满足缺水地区再造林和农业灌溉的用水需求^[12], 维持热带雨林和热带农业生态系统^[9], 减轻山地云雾林中土壤水分的不足对植物的影响^[13]等方面的功能。因此, 利用水体氢氧稳定同位素技术示踪这种重要补给形式的全过程是十分有必要的^[14-15]。早在1961年Gonfiantini等就使用同位素方法对北大西洋雾和降雨的氧同位素组成和变化进行了研究^[16-17]; 而之后的1989年Aravena开始对智利北部第五区的科迪勒拉山区对雾水和植被的关系进行了分析^[18]。在此之后,

收稿日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项“利用地理空间技术监测和评估土地利用/土地覆被变化对区域生态安全的影响”(2018YFE0184300); 国家自然科学基金资助项目“哈尼梯田景观结构-水文连接度与世界遗产保护研究”(41271203); “哈尼梯田遗产区聚落景观快速变化机制与景区化过程及保护”(41761115)

作者简介: 刘澄静(1994—), 男, 云南宾川人, 博士, 主要研究方向为景观生态学和同位素水文。E-mail: 18487101130@163.com

通信作者: 角媛梅(1972—), 女, 云南马龙人, 教授, 博士, 主要研究方向为景观生态学。E-mail: ymjiao@sina.com

关于海岸地区和山区雾水的研究逐渐增多,相对于海岸雾主要来自于海洋水汽,水源稳定且单一,但山区森林雾水有着更加复杂的水汽来源,水源不稳定且多元。在不同地区、不同水汽来源的雾水具有不同的稳定同位素组成,通过分析其氢氧稳定同位素组成,可分析不同水汽来源的雾水过程,加强对雾水的生态水文效应的认识。但目前,关于森林区雾水稳定同位素的研究,主要还是集中于森林对雾水的利用^[2,19],森林雾水与地表水(土壤水、地表径流等)和地下水的补给关系^[7,20]两个方面。

在众多的山地农业景观当中,哈尼梯田文化景观以其森林在上、村寨居中、梯田在下、河渠贯穿其中的景观格局特色,成为了举世瞩目的世界文化遗产^[21]。“云海”和“梯田”一直是哈尼梯田世界遗产最受瞩目的美景,其中云海就是由广泛出现于遗产区的浓雾形成的。目前仅有李华伟等通过对元阳县 1960~1996 年的气象数据进行分析后得出哈尼梯田主要月份的雾日数和成因^[22]。但对于哈尼梯田不同土地利用类型内的雾水同位素组成及影响因素的研究还没有展开。因此,本文通过对哈尼梯田区雾水同位素采集和测试,对雾水同位素的组成和影响因素进行分析,其结果不仅可为景观尺度下的生态水文过程提供初步解释,还可为梯田景观的水源稳定性评价与保护和文化景观遗产可持续发展提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区

研究区位于红河哈尼梯田世界文化遗产核心区的全福庄河小流域内,小流域平面形态近似扇形,总面积 13.92km²,属红河一级支流麻栗寨河上游水源区(23°5'20"~23°13'18"N,102°43'16"~102°50'39"E)。区内海拔 1 500~2 000m,因地处北回归线以南,气候属亚热带季风气候类型,湿润多雨,年降雨量 1 403mm,年蒸发量 929.4mm,年均湿度 90.3%,年平均温度 16.4℃,年日照 1 770.2h,年无霜日 363d,干湿季分明,立体气候显著。在海拔 1 000 m 以上的山区,处在暖湿气流凝结层高度范围,突出的特点是云雾多,有显著的逆温层存在,冬末春初的 2~3 月,可见到茫茫的“云海”奇观^[22]。在景观格局上,森林和梯田是整个研究区的优势景观类型,其中森林景观类型主要分布在海拔 1 800m 以上,梯田景观类型则分布在 1 800m 以下,村寨景观类型镶嵌于森林和梯田景观类型间的 1 700~1 800m 范

围内^[21]。

1.2 采样方法与数据来源

在 2016 年 1~4 月研究区雾日最为集中的时间段内,在森林和梯田两种景观类型内每日采集雾水,雾水采样带集中在全福庄中寨附近的 1 700m (梯田区)和 1 900m(森林区)两个采样带上。在 4 个月的 36 个无降水雾日内,采集到雾水样品 44 个,其中 6 个样品采集至森林区,其余 38 个样品均来自梯田区(见图 1)。在采集雾水时,在雾日时使用 2mL 一次性注射器吸取凝结在植物叶片上的雾水水滴,注射器采集满后,转移到 5mL 采样瓶中,迅速放到样品保存柜中以 2~4℃ 的温度保存。采集时间选择为日出前的清晨(1 月和 2 月在早上 8 时之前,3 月和 4 月在早上 7 时之前),这一时期研究区温度最低、雾最为浓重、湿度也达到最大,因此可视为该时间段的雾水不受分馏作用影响,出现降雨时不进行采样,以防止降水对雾水造成干扰。气象数据则收集自设置于全福庄中寨的小型气象站,采集数据包括降水量、温度、湿度、风速等气象信息。

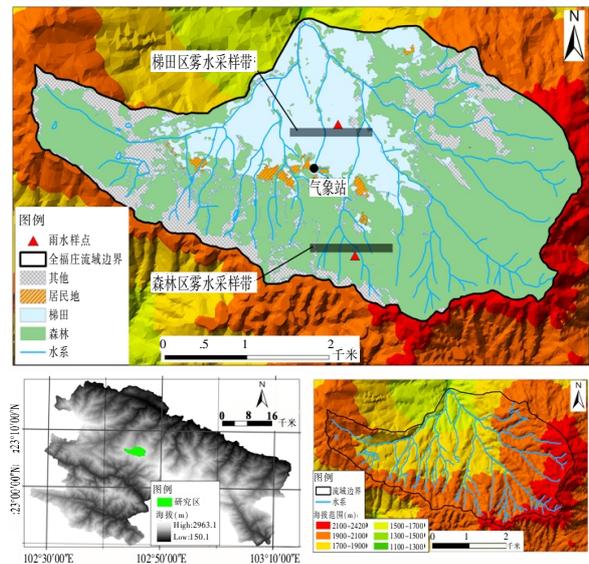


图1 研究区采样点分布

Fig.1 The sampling points distribution of the study area

1.3 数据测试和分析

所有水样由云南师范大学高原湖泊生态与全球变化实验室的 Picarro L2130-i 超高精度液态水和水汽同位素分析仪测定。仪器的测试精度:¹⁸O 为±0.1‰, D 为±0.5‰,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:

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

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

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

2 结果与分析

2.1 雾水稳定同位素组成特征

从表 1 看出,雾水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 范围分别在: $-6.66\text{‰} \sim 3.51\text{‰}$ 和 $-32.38\text{‰} \sim 36.29\text{‰}$ 之间,平均值为 -1.18‰ 和 11.30‰ ,与刘文杰等在西双版纳所测得的雾水稳定同位素值范围 $-8.00\text{‰} \sim 2.90\text{‰}$ 和 $-30.50\text{‰} \sim 29.40\text{‰}$ 基本相当^[23]。在时间变化上,1~4 月雾水同位素月平均值整体上随时间逐渐由负变正,但在不同月份内部,雾水同位素值范围变化很大,不同月份差异明显。这说明,在整体上雾水稳定同位素值随时间变化(温度回升)而逐渐偏正,但在月份内部还存在其他环境因素影响雾水稳定同位素值的时间变化。在空间变化上,森林区雾水样品稳定同位素值范围略小于梯田区,但 $\delta^{18}\text{O}$ 要比梯田区偏负, δD 则比梯田区偏正,这与森林区雾水样品较少存在密切关系。

表1 雾水稳定同位素值统计

Table1 The statistics of stable isotopes in fog water

时空 变化	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			$\delta\text{D}/\text{‰}$		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
时间	1月	-6.66	1.34	-3.63	-32.38	16.42
	2月	-5.86	-1.95	-3.91	-11.18	-3.5
	3月	-5.66	3.51	-0.29	-8.97	36.29
	4月	-0.72	1.09	-0.10	10.81	24.19
空间	森林区	-5.86	1.36	-1.23	-11.8	31.48
	梯田区	-6.66	3.51	-1.17	-32.38	36.29
1~4 月统计	-6.66	3.51	-1.18	-32.38	36.29	11.3

将 44 个雾水样品进行回归分析可知,多雾期(1~4 月)雾水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系线方程为: $\delta\text{D}=5.83\delta^{18}\text{O}+18.19$ ($R^2=0.83, n=44$) (见图 2)。从斜率来看,雾水线斜率明显小于全球大气降水线 ($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)^[17] 的斜率 8 和研究区旱季局地降水线 ($\delta\text{D}=7.31\delta^{18}\text{O}+19.8$)^[24] 斜率的 7.31, 这说明雾水氢氧稳定同位素环境温度的影响较大,雾水凝结前的水汽受到蒸发作用影响强烈。在雾水同位素值的分布上,雾水同位素值分布零散,部分样点值分布于局地降水线附近,表明其与局地降水的水汽

来源相同;也有部分样点处于全球线附近,说明雾水水汽来源与外来降水的水汽来源有关;还有少量样点完全偏离局地 and 全球降水线,这说明影响研究区雾水同位素组成水的主要因素是雾水的水源和雾水形成时的局地环境。

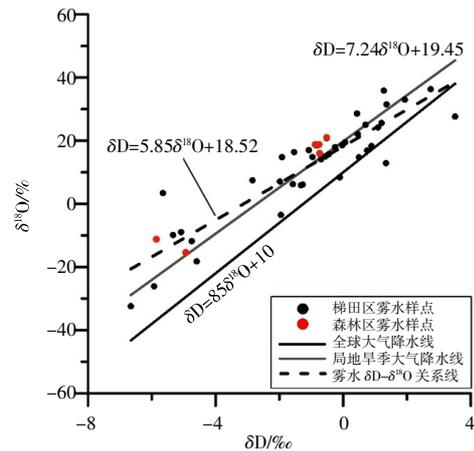


图2 研究区雾水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系线方程

Fig.2 The fog water $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ line equation of the study area

2.2 影响雾水稳定同位素的环境因子识别

根据氢氧稳定同位素效应可知,降水、温度和相对湿度是影响氢氧稳定同位素值变化的主要环境因子,另外露点温度也是雾出现与否的一个关键环境因子。但由于降水时没有采样,本研究主要选取温度、露点温度和相对湿度三个环境因子与各样点雾水氢氧稳定同位素值进行相关性分析,温度、露点温度和相对湿度数据选取雾水采样日 0 时至日出前 (7 时或 8 时) 的气象数据平均值。相关分析结果(见表 2):研究区雾水稳定同位素值与温度、露点温度和相对湿度在 0.05 的显著性水平上,具有明显的相关关系。

2.3 雾水稳定同位素值变化的多元回归分析

雾水稳定同位素值与各环境因子的一元回归分析结果(见表 2 和图 3),研究区雾水稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$

表2 雾水稳定同位素值与主要环境因子的相关性分

Table2 The correlations analysis between isotopic values and main environmental factors

环境因子	相关系数		一元回归 P 值	
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD
温度	0.51**	0.59**	0.002	0.0002
露点温度	0.29*	0.38**	0.05	0.01
相对湿度	-0.51**	-0.53**	0.004	0.0002

注:* 为通过 0.05 显著性水平检验,** 为通过 0.01 显著性水平检验, $n=44$ 。

和 δD 与温度、露点温度和相对湿度三个环境因子的一元回归方程 P 值均小于 0.05, 表明是影响雾水稳定同位素变化的主要环境因子。其中, 温度和露点温度与雾水稳定同位素变化呈正相关关系, 相对湿度与雾水稳定同位素变化呈负相关关系。对雾水 $\delta^{18}O$ 和 δD 与温度、露点温度和相对湿度三个环境因子进行多元回归分析, 回归方程为:

$$\delta^{18}O = -2.73T + 2.87Td - 0.668H + 61.15 (R^2 = 0.38) \quad (3)$$

$$\delta D = -13.81T + 15.14Td - 3.522H + 332.14 (R^2 = 0.42) \quad (4)$$

式中: T 为温度 ($^{\circ}C$); Td 为露点温度 ($^{\circ}C$); H 为相对湿度 (%); 多元回归后的 R^2 明显大于各因子一元回归的结果, 这说明雾水稳定同位素值变化是多因素综合影响的结果。

3 讨论

由于形成雾水的水汽来源和同位素分馏机制的差异, 不同类型雾水的 ^{18}O 和 D 同位素特征也存在明显差异^[25]。研究区雾水水汽来源方面, 雾水同位素值在 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系线方程 (见图 2) 上的分布表明, 研究区 1~4 月的雾水具有局地 and 外来两种不同的水汽来源形式, 外来水汽的雾水同位素组成比较靠近全球大气降水线, 而局地水源形成的雾水则更加靠近本地旱季 (11

月~次年 4 月) 大气降水线。徐秋娥等^[24]利用后向轨迹模型对本研究区旱季 (11 月~次年 4 月) 降水水汽来源进行追踪的结果也表明, 在旱季研究区降水存在西风南支、西南季风和局地循环三种来源。说明, 利用稳定同位素示踪方法是可以准确判定出雾水水汽来源的。但是, 对于雾水类型的判定则还需要进一步的分析。

相对于降水、地表水、地下水和植物水等水体而言, 雾水样品的采集与测定十分困难, 这也导致了雾水稳定同位素的相关研究进展缓慢, 关于不同类型雾水稳定同位素组成及其影响机制还缺乏系统的综述性、进展性研究。根据现有的雾水稳定同位素研究数据 (见表 3), 不同地区雾水稳定同位素组成范围存在明显差异, 但也存在一定规律。具体表现为: (1) 同一水汽来源雾水稳定同位素值范围相对接近, 如与研究区雾水 $\delta^{18}O$ 范围为 $-6.66\text{‰} \sim 3.51\text{‰}$, 与同样受到西南季风影响的西双版纳地区的雾水 $\delta^{18}O$ (范围为 $-8.00\text{‰} \sim 2.90\text{‰}$) 相比, 差异并不很大; 但与美国的加利福尼亚地区的雾水 $\delta^{18}O$ (范围为 $-3.10\text{‰} \sim -1.70\text{‰}$) 相比, 差异则很大。 (2) 内陆地区雾水稳定同位素值要比海岸地区偏正, 如美国加利福尼亚和夏威夷地区的雾水稳定同位素值范围就明显比中国西双版纳、赤水和红河 (本研究区) 的雾水值范围偏正。

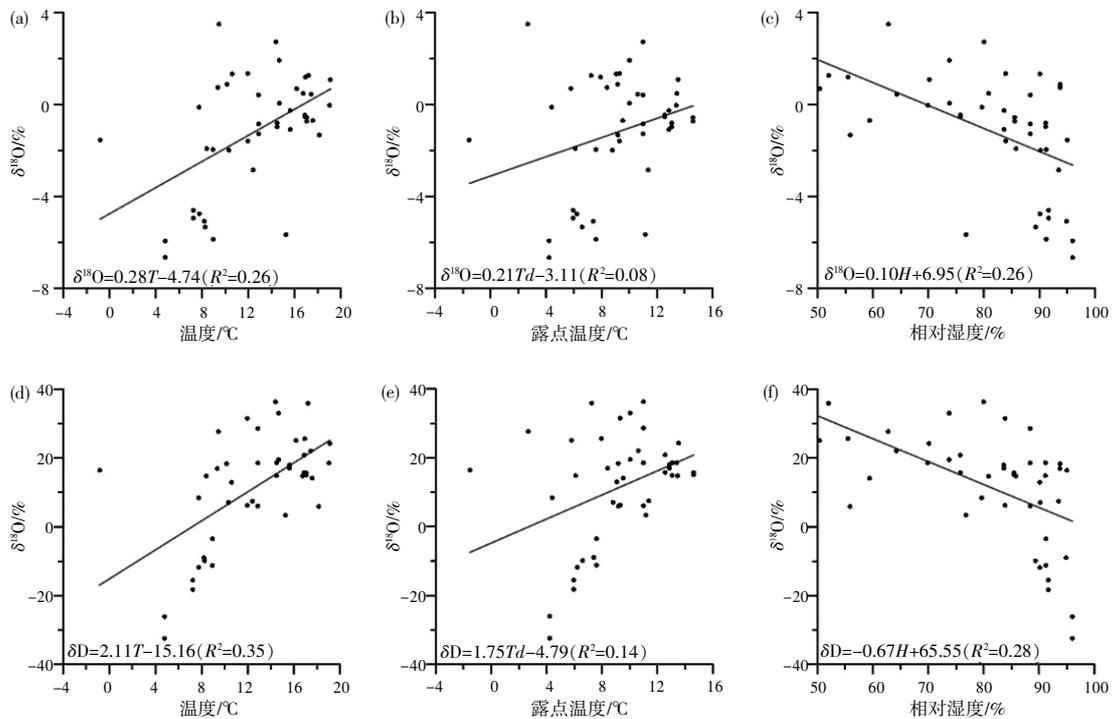


图3 雾水稳定同位素值与各环境因子的一元回归分析

Fig.3 The univariate regression analysis between isotopic values and main environmental factors

表3 不同地区雾水稳定同位素值组成
Table3 The composition of stable isotopes in fog water at different regions

研究区	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$		$\delta\text{D}/\text{‰}$		雾水线方程	时间	国家
	Min	Max	Min	Max			
内陆地区							
本研究	-6.66	3.51	-32.38	36.29	$\delta\text{D}=5.84\delta^{18}\text{O}+18.16$	2016.01 ~ 2016.04	中国
西双版纳 ^[23]	-8.00	2.90	-30.50	29.40	$\delta\text{D}=7.76\delta^{18}\text{O}+14.63$	2002.01 ~ 2004.12	中国
赤水 ^[7]	-3.86	0.93	0.50	31.50	-	2014.12 ~ 2014.12	中国
乞力马扎罗山 ^[26]	-9.65	3.09	-56.05	24.66	$\delta\text{D}=7.56\delta^{18}\text{O}+14.54$	2012.11 ~ 2014.11	坦桑尼亚
马萨比特山区 ^[27]	-1.80	-0.70	2.90	16.60	-	1986.06 ~ 1986.07	肯尼亚
海岸地区							
加利福尼亚 ^[14]	-3.10	-1.70	-18.00	-7.00	-	1987.09 ~ 1987.12	美国
加利福尼亚 ^[28]	-4.90	2.70	-8.90	6.40	-	1992.0 1~ 1994.12	美国
夏威夷 ^[29]	-3.40	-2.80	-7.00	-5.00	-	2004.04 ~ 2002.04	美国
达尼丁 ^[30]	-10.40	-5.30	-30.00	-71.00	$\delta\text{D}=8.11\delta^{18}\text{O}+13.60$	1996.06 ~ 1998.12	新西兰
全球统计 ^[31]	-10.40	2.70	-71.00	13.00	-	1962~2009	-

针对以上规律也有例外的地区,如居于内陆的马萨比特山区雾水同位素值范围明显偏正,而位于沿海的达尼丁地区雾水同位素值反正则明显偏负。这也说明,除了雾水水汽来源外,可能局地环境也是影响雾水稳定同位素组成的关键因素,对于不同地区可能会存在不同的环境因素。

4 结论

(1)根据雾水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系方程及其同位素值时空分布可知,研究区雾水稳定同位素值的时空变化主要受到雾水的水汽来源和形成雾水时的局地环境条件两个因素影响。

(2)在水汽来源方面,根据雾水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系方程可知,研究区存在外来水汽和局地循环水汽两种不同的水汽来源,不同水汽来源地区的雾水稳定同位素组成存在明显差异。

(3)在局地环境条件方面,相关性分析结果表明,在 0.05 显著性水平下,温度、露点温度和相对湿度三个环境因子与雾水稳定同位素值($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD) 存在显著的相关性,是影响雾水稳定同位素变化的关键因子。温度、露点温度和相对湿度三个环境因子对雾水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化的影响,可通过多元回归方程归纳为: $\delta^{18}\text{O}=-2.73T+2.87Td-0.668H+61.15$ ($R^2=0.38$) 和 $\delta\text{D}=-13.81T+15.14Td-3.522H+332.14$ ($R^2=0.42$)。

(4)在全球范围内,目前还缺乏关于雾水水汽来源及对雾水稳定同位素值影响的系统性研究,但从目前的研究结果来看,不同水汽来源雾水稳定同位素值存在有两个特点:同一水汽来源雾水稳定同位素值范围相对接近,内陆地区雾水稳定同位素值要比海岸地区偏正。

参考文献:

- [1] Ingraham N L, Matthews R A. The importance of fog-drip water to vegetation: Point Reyes Peninsula, California [J]. Journal of Hydrology, 1995(164):269-285.
- [2] 刘文杰,李鹏菊,李红梅,等. 西双版纳热带季节雨林冠截留雾水和土壤水的关系[J]. 生态学报, 2006,26(1):9-15. (LIU Wenjie, LI Pengju, LI Hongmei, et al. Fog interception and its relation to soil water in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(1):9-15. (in Chinese))
- [3] Ingraham N L, Matthews R A. The importance of fog-drip water to vegetation: Point Reyes Peninsula, California [J]. Journal of Hydrology, 1995,164(17):269-285.
- [4] Bruijnzeel L A, Proctor J. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? [J]. Springer Ecological Studies, 1995,110:38-78.
- [5] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(15):8205-8214.
- [6] 郭丽君,郭学良. 北京 2009~2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学, 2016,40(2):296-310. (GUO Lijun, GUO Xueliang. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009-2013 in the Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016,40(2):296-310. (in Chinese))
- [7] 陈建生,赵洪波,詹泸成. 赤水林区旱季雾水对地表径流的水量贡献[J]. 水科学进展, 2016,27(3):377-384. (CHEN Jiansheng, ZHAO Hongbo, ZHAN Lucheng. Water contribution of fog drip to surface runoff in Chishui forest region during the dry season [J]. Advances in Water Science, 2016,27(3):377-384. (in Chinese))
- [8] Salem T A, Omar M E D M, El Gammal H A A. Evaluation of fog and rain water collected at Delta Barrage, Egypt as a new resource for irrigated agriculture [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017,135:34-40.
- [9] Zhang Y J, Holbrook N M, Cao K F. Seasonal dynamics in

- photosynthesis of woody plants at the northern limit of Asian tropics: potential role of fog in maintaining tropical rainforests and agriculture in Southwest China [J]. *Tree Physiology*, 2014,34(10):1069–1078.
- [10] Bruijnzeel L A, Waterloo M J, Proctor J, et al. Hydrological observations in montane rain forests on Gunung Silam, Sabah, Malaysia, with special reference to the ‘Massenerhebung’ effect [J]. *Journal of Ecology*, 1993,81:145–167.
- [11] Baguskas S A, Still C J, Fischer D T, et al. Coastal fog during summer drought improves the water status of sapling trees more than adult trees in a California pine forest [J]. *Oecologia*, 2016,181(1):1–12.
- [12] Tomaszkiwicz M, Najm M A, Zurayk R, et al. Dew as an adaptation measure to meet water demand in agriculture and reforestation [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017,232:411–421.
- [13] Eller C B, Lima A L, Oliveira R S, et al. Foliar uptake of fog water and transport below ground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae) [J]. *New Phytologist*, 2013,199(1):151–162.
- [14] Ingraham N L, Matthews R A. A stable isotopic study of fog: the Point Reyes Peninsula, California, U.S.A. [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1990,80(4):281–290.
- [15] 李静,吴华武,周永强,等. 长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征[J]. *环境科学*, 2020,41(3):1176–1183. (LI Jing, WU Huawu, ZHOU Yongqiang, et al. Variations of stable oxygen and deuterium isotopes in river and lake waters during flooding season along the middle and lower reaches of Yangtze River regions [J]. *Environmental Science*, 2020,41(3):1176–1183. (in Chinese))
- [16] Gonfiantini R, Longinelli A. Oxygen isotopic compositions of fog and rains from North Atlantic [J]. *Experientia*, 1961,18:222–223.
- [17] Craig H. Isotope variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961,133:1702–1703.
- [18] Aravena R, Suzuki O, Pollastri A. Coastal fog and its relation to groundwater in the IV region of northern Chile [J]. *Chemical Geology*, 1989,79:83–91.
- [19] 刘文杰,张一平,刘玉洪,等. 热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留雾水的比较研究[J]. *生态学报*, 2003,23(11):2379–2386. (LIU Wenjie, ZHANG Yiping, LIU Yuhong, et al. Comparison of fog interception at a tropical seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003,23(11):2379–2386. (in Chinese))
- [20] 王卓娟,宋维峰,张小娟. 氢氧稳定同位素在森林雾水研究中的应用及展望[J]. *西南林业大学学报*, 2015,35(4):106–110. (WANG Zhuojuan, SONG Weifeng, ZHANG Xiaojuan. Application of oxyhydrogen stable isotope technology on research of fog water in forest [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2015,35(4):106–110. (in Chinese))
- [21] Jiao Y, Liu C, Gao X, et al. Impacts of moisture sources on the isotopic inverse altitude effect and amount of precipitation in the Hani rice terraces region of the Ailao mountains [J]. *Science of the Total Environment*, 2019:470–478.
- [22] 李华伟,韩迁立,王建华. 红河哈尼梯田雾的特征及成因分析[J]. *贵州气象*, 2013,37(S1):59–61. (LI Huawei, HAN Qianli, WANG Jianhua. Analysis on the characteristics and genesis of the fog of the Hani rice terraces [J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2013,37(S1):59–61. (in Chinese))
- [23] Liu W, Liu W Y, Li P J, et al. Using stable isotopes to determine sources of fog drip in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007,143(1):80–91.
- [24] 徐秋娥,刘澄静,角媛梅,等. 旱季降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源对哈尼梯田降水补给的影响[J]. *生态学报*, 2020,40(5):1709–1717. (XU Qiue, LIU Chengjing, JIAO Yuanmei, et al. Isotopic characteristics and moisture sources of precipitation in the dry season and its impacts on precipitation supply of Hani rice terraces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(5):1709–1717. (in Chinese))
- [25] 孙自永,程国栋,马瑞,等. 雾水的 D 和 ^{18}O 同位素研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008,23(8):794–802. (SUN Ziyong, CHENG Guodong, MA Rui, et al. Advances in the D and ^{18}O isotopes of fog water [J]. *Advances in Earth Science*, 2008,23(8):794–802. (in Chinese))
- [26] Otte I, Detsch F, Gutlein A, et al. Seasonality of stable isotope composition of atmospheric water input at the southern slopes of Mt. Kilimanjaro, Tanzania [J]. *Hydrological Processes*, 2017,31(22):3932–3947.
- [27] Ingraham N L, Matthews R A. Fog drip as a source of groundwater recharge in northern Kenya [J]. *Water Resources Research*, 1988,24(8):1406–1410.
- [28] Dawson T E. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants [J]. *Oecologia*, 1998,117(4):476–485.
- [29] Scholl M A, Gingerich S B, Tribble G W, et al. The influence of microclimates and fog on stable isotope signatures used in interpretation of regional hydrology: East Maui, Hawaii [J]. *Journal of Hydrology*, 2002,264(1):170–184.
- [30] Ingraham N L, Mark A F. Isotopic assessment of the hydrologic importance of fog deposition on tall snow tussock grass on southern New Zealand uplands [J]. *Austral Ecology*, 2000,25(4):402–408.
- [31] Scholl M A, Eugster W, Burkard R, et al. Understanding the role of fog in forest hydrology: stable isotopes as tools for determining input and partitioning of cloud water in montane forests [J]. *Hydrological Processes*, 2011,25(3):353–366.

Impacts of Key Environmental Factors and Water Vapor Sources on the Composition Characteristics of Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in Fog Water

LIU Chengjing, JIAO Yuanmei, WU Changrun, LIU Zhilin, DING Yinping

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

(下转第 87 页)