

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.002

雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其影响因素

詹泸成¹,赵娜¹,陈建生²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为深入分析不同陆地系统中雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其主要影响因素,在全球尺度下搜集了雾水和降水的氢氧稳定同位素数据,统计分析了不同地区雾水和降水的氢氧稳定同位素特征及二者差异的显著性。结合雾水的 lc-excess 值,分类讨论并揭示了同位素差异的主要形成原因及其与雾发生类型的关系。结果表明:整体上,雾水比降水更富集重同位素, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的差值分别在 10‰~60‰和 1.2‰~5.5‰之间。根据雾水 lc-excess 的特征,各地区雾水和降水氢氧稳定同位素差异可分为 3 类:lc-excess 值近似为 0,雾水分布在 LMWL 的 95% 置信区间内;lc-excess 值大于 0,雾水分布在 LMWL 上方;lc-excess 值小于 0,雾水分布在 LMWL 下方;这 3 类差异的主导因素分别为水汽来源、凝结温度、环境湿度。因地形雾、辐射雾、平流雾对应的水汽条件和冷凝过程不同,因此三者与降水的同位素差异也不同:地形雾与降水的同位素无显著差异;辐射雾与降水的同位素组成差异较大,雾水中重同位素明显富集;平流雾与降水的同位素组成重叠区域较小,雾水中的重同位素明显更加富集。

关键词:雾水;降水;氢氧稳定同位素;lc-excess;差异影响因素

中图分类号:P343 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)04-0010-08

Hydrogen and oxygen stable isotope difference between fog water and precipitation and influencing factors

ZHAN Lucheng¹, ZHAO Na¹, CHEN Jiansheng²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To further understand the hydrogen and oxygen stable isotope composition differences between fog water and precipitation in different terrestrial systems and major influencing factors, the global-scale $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ research data for fog water and precipitation were collected and the significance of their differences was statistically analyzed. Combing the calculation of fog water's lc-excess values, the isotopic difference rules between fog water and precipitation were classified, and corresponding causes and relations to fog types were further discussed and revealed. Results suggest that generally the fog water is significantly more enriched in heavier isotopes than the precipitation, with $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ differences of 10‰ to 60‰ and 1.2‰ to 5.5‰, respectively. The differences between fog and precipitation isotopic composition can be classified into three categories based on lc-excess values of fog water: the lc-excess value is approximately 0 and the fog water is within the 95% confidence interval of LMWL; the lc-excess value is greater than 0 and the fog water is distributed above the LMWL; the lc-excess value is less than 0 and the fog water is distributed below the LMWL. The water vapor source, condensation temperature and environmental temperature are three major factors that influence the isotopic difference between fog water and precipitation, with different categories correspondingly dominated by different factors. Orographic fog, radiation fog, and advection fog have different water vapor conditions and condensation processes, leading to different patterns of isotopic differences in fog and precipitation. There is no significant difference in the isotopic composition between terrain fog and precipitation, while there is a significant difference in the isotopic composition between radiation fog and precipitation, with significant enrichment of heavy isotopes in fog water. The overlap area of isotopic composition between advection fog and precipitation is small, and heavy isotopes in fog water are obviously more enriched.

Key words: fog water; precipitation; hydrogen and oxygen stable isotope; lc-excess; influencing factor

雾被定义为是一种水平能见度小于 1 km 的地面接触云^[1]。空气中较小的雾滴被植被林冠截获后形成

基金项目: 国家自然科学基金项目(41803001)
作者简介: 詹泸成(1989—),男,副教授,博士,主要从事同位素水文学研究。E-mail:luchengzhan@hhu.edu.cn
引用本文: 詹泸成,赵娜,陈建生. 雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):10-17.
ZHAN Lucheng,ZHAO Na,CHEN Jiansheng. Hydrogen and oxygen stable isotope difference between fog water and precipitation and influencing factors[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):10-17.

大水滴,并滴落至地面,也称为“水平降水”^[2]。在世界上一些森林、草地、沙漠、湿地等系统中,雾水具有重要的生态水文学意义,不仅能为植物生长提供额外的水分和养分^[3-4],甚至还会大量参与径流过程^[5-6]。氢(²H)氧(¹⁸O)稳定同位素可以有效识别水分来源、定量分析水体混合情况^[7-9]。学者在对雾水进行氢氧稳定同位素分析时发现,与同一时段的降水相比,雾水中更加富集重同位素^[10-13]。这一同位素组成差异为进一步定量研究雾水对植被、土壤、径流系统的贡献提供了有效方法^[14-16]。例如:Ingraham 等^[17]基于雾水和降水的氢氧稳定同位素差异,发现美国加利福尼亚州针叶林对雾水的依赖性;Liu 等^[3,18-19]系统研究了中国西双版纳地区雾水对热带雨林的重要贡献;基于雾水和降水的同位素组成差异,发现在中国西南赤水森林区,被林冠截留的雾水对径流系统存在大量补给,从而维系了当地旱季的瀑布景观^[5-6]。利用同位素技术定量研究雾水的水文生态效应,需要依赖雾水和降水的同位素组成差异,将二者看作同位素特征不同的混合端元。然而,受到水汽来源和复杂环境的影响,不同地区的雾水与降水同位素的差异特点不同,从而影响着同位素混合模型的适用性和准确性。

由此可见,系统地认识雾水和降水同位素组成的差异及其影响因素,具有十分重要的意义。虽然人们在上世界上很多地区都发现了雾水中氢氧稳定同位素更加富集的现象,对于其成因也作出了合理解释^[10,17,20-22],但是目前仍然缺少全球尺度下的规律总结和系统性的影响因素分析。本文搜集了全球现有的关于雾水同位素的研究,建立了雾水氢氧稳定同位素组成 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的数据库,结合 lc-excess 值计算和统计分析,系统总结了雾水和降水氢氧稳定同位素的差异规律,并探讨了其主要影响因素以及与不同雾发生类型的关系。

1 研究方法

本文从全球已有文献的数据附件或图表中搜集了雾水和同一时段降水的同位素数据,均以相对于标准海水的千分偏差 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表示。这些文献中雾水来自对应研究区内林冠截留雾水(高度一般小于2 m),采样持续时长从数月到数年不等,降水同位素数据来源于水样采集分析或附近的全球降水同位素监测站点(GNIP, global network of isotopes in precipitation, <http://nucleus.iaea.org/wiser>)。对于文献中未直接给出降水同位素数据的情况,用 GNIP 附近站点的数据补充。本文搜集的雾水同位素数据($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)共 932 组,降水数据共 1 203 组,涉及 16 个研究区,覆盖了除南极洲之外的其他六大洲,对应的研究区基本信息见表 1。

表 1 雾水同位素研究区基本信息
Table 1 Basic information of study sites for fog water isotope

研究区	采样时间段	经度	纬度	气候类型	雾主要类型
肯尼亚 Chalbi 沙漠 ^[20]	1986 年 6—8 月	37.35°E	3.17°N	草原气候	地形雾
美国 Point Reyes 半岛 ^[17,21]	1987—1990 年	122.95°W	38.09°N	地中海气候	平流雾
新西兰 Otago 半岛 ^[10]	1996—1998 年	170.50°E	45.88°S	亚热带湿润气候	地形雾
智利 El Romeral 盆地 ^[23]	1996 年 9 月—2003 年 12 月	71.10°W	32.80°S	沙漠气候	平流雾
波多黎各岛 Luquillo 山 ^[24]	1999 年 9—10 月	65.72°W	18.37°N	热带雨林气候	地形雾
中国西双版纳雨林 ^[3]	2002 年 1 月—2004 年 12 月	101.27°E	21.93°N	热带季风气候	辐射雾
哥斯达黎加 Tilarón 山 ^[25]	2003 年 2—5 月	84.63°W	9.62°N	热带季风气候	地形雾
美国 Santa Cruz 岛 ^[26]	2003 年 12 月—2006 年 12 月	119.77°W	34.02°N	地中海气候	平流雾
日本 Alps 山 ^[27]	2006—2008 年	131.61°E	36.57°N	亚热带湿润气候	地形雾
塔桑尼亚 Kilimanjaro 山 ^[11]	2012 年 11 月—2014 年 11 月	37.34°E	3.07°S	热带季风气候	地形雾
纳米比亚 Namib 沙漠 ^[28]	2014 年 1 月—2015 年 1 月	15.04°E	23.55°S	沙漠气候	混合雾
中国洞庭湖湿地 ^[29]	2014 年 12 月	113.01°E	29.36°N	亚热带湿润气候	辐射雾
中国赤水森林 ^[6]	2014 年 12 月	105.66°E	28.42°N	亚热带湿润气候	辐射雾
厄瓜多尔 Galápagos 岛 ^[30]	2015 年 7 月—2016 年 7 月	89.43°W	0.83°S	沙漠气候	混合雾
法国 Garonne 河 ^[31]	2017 年 6 月—11 月	0.30°E	44.38°N	亚热带湿润气候	
捷克山区 ^[32]	2017 年 10 月—11 月	14.26°E	50.05°N	温带气候	辐射雾

利用 SPSS 19.0 软件计算每个研究区雾水和降水的同位素组成($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)差异显著性水平(若 $p<0.05$,认为二者存在显著差异)。分地区画出 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图,判断不同地区雾水和降水同位素的相互关系。Landwehr 等^[33]于 2006 年提出了 line-conditioned excess (lc-excess) 的概念,用来表示陆地水体同位素组成相对于当地降水线(local meteoric water line, LMWL)的偏离程度。本文计算了不同地区雾水同位素的平均 lc-excess 值,以此量化雾水同位素点与对应地区 LMWL 的相对位置关系。当雾水 lc-excess 值近似为 0 时,可以认为形成雾水和降水的水汽来源相似;当 lc-excess 值大于 0 时,说明形成雾水的水汽受到了其他水

汽的混合;当 $lc\text{-}excess$ 值小于 0 时,说明雾水受到了蒸发作用的影响^[34]。根据雾水和降水的同位素特征及 $lc\text{-}excess$ 值,本文对不同地区雾水同位素特点进行了分类,并进一步讨论了二者同位素组成差异的成因和主要影响因素。

需要说明的是,已有研究中的不同地区同位素数据往往来自不同的研究年份和季节。由于同位素组成存在时空变异性,所以本研究没有分析对比不同地区雾水和降水同位素的绝对差异程度,而是在保证二者来自同一时段的前提下,侧重于分析不同地区二者同位素差异的宏观特点,分类讨论二者差异的主要规律和影响因素。

2 结果与分析

2.1 雾水和降水氢氧稳定同位素整体特征

如图 1 所示,雾水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 在 $-91‰ \sim 58‰$ 和 $-13‰ \sim 11‰$ 范围内,平均值($\pm$ 标准差)分别为 $(-10 \pm 19)‰$ 和 $(-3 \pm 2.5)‰$;降水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值在 $-120‰ \sim 44‰$ 和 $-17‰ \sim 6‰$ 范围内,平均值($\pm$ 标准差)分别为 $(-18 \pm 26)‰$ 和 $(-4 \pm 3.3)‰$ 。雾水和降水氢氧稳定同位素组成存在显著性差异($p < 0.05$),与降水相比,雾水更加富集重同位素。根据雾水同位素数据,拟合得到全球雾水线(GFWL) $\delta^2H = 7.14 \delta^{18}O + 10.77 (R^2 = 0.88)$,其斜率小于全球降水线(GMWL) $\delta^2H = 8 \delta^{18}O + 10$ 的斜率。

2.2 各研究区雾水和降水氢氧稳定同位素特征

从表 2 可以看出,大多数地区的雾水同位素明显比降水同位素更富集。例如:新西兰 Otago 半岛的雾水 δ^2H 、 $\delta^{18}O$ 平均值与降水相比,重同位素明显富集,平均值差值分别为 $20‰$ 、 $2.4‰$;中国西双版纳雨林的雾水 δ^2H 、 $\delta^{18}O$ 平均值和降水分别相差 $17‰$ 、 $1.5‰$ 。两处地区(波多黎各岛 Luquillo 山和日本 Alps 山)存在雾水同位素略微比降水同位素贫化的现象。

表 2 雾水和降水的氢氧稳定同位素组成

Table 2 Hydrogen and oxygen stable isotope composition of fog water and precipitation

研究区	雾水				降水			
	$\delta^2H / ‰$		$\delta^{18}O / ‰$		$\delta^2H / ‰$		$\delta^{18}O / ‰$	
	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差
新西兰 Otago 半岛 ^[10]	-70 ~ -29	-45 $\pm$ 11	-10.5 ~ -5.4	-7.2 $\pm$ 1.3	-86 ~ -48	-65 $\pm$ 10	-11.9 ~ -7.8	-9.6 $\pm$ 1.2
捷克山区 ^[32]	-75 ~ -39	-55 $\pm$ 9	-11.1 ~ -6.1	-8.8 $\pm$ 1.2	-84 ~ -57	-65 $\pm$ 9	-12.6 ~ -8.6	-10.0 $\pm$ 1.3
美国 Point Reyes 半岛 ^[17,21]	-18 ~ -7	-12 $\pm$ 3	-3.1 ~ -1.7	-2.4 $\pm$ 0.4	-45 ~ -30	-38 $\pm$ 4	-7.6 ~ -5.8	-6.6 $\pm$ 0.5
厄瓜多尔 Galápagos 岛 ^[30]	-14 ~ 16	1 $\pm$ 6	-3.4 ~ 1.0	-1.6 $\pm$ 1.0	-9 ~ 8	-1 $\pm$ 4	-2.7 ~ 0.7	-1.8 $\pm$ 0.6
塔桑尼亚 Kilimanjaro 山 ^[11]	-56 ~ 23	-11 $\pm$ 16	-8.9 ~ 1.9	-3.1 $\pm$ 2.1	-78 ~ 42	-11 $\pm$ 18	-10.6 ~ 5.4	-2.9 $\pm$ 2.4
哥斯达黎加 Tilarán 山 ^[25]	-77 ~ 12	-10 $\pm$ 25	-10.5 ~ 0.8	-2.4 $\pm$ 2.9	-87 ~ 9	-13 $\pm$ 24	-11.9 ~ 5.6	-2.6 $\pm$ 3.5
日本 Alps 山 ^[27]	-91 ~ -53	-73 $\pm$ 13	-12.6 ~ -8.8	-10.9 $\pm$ 1.2	-110 ~ -22	-64 $\pm$ 25	-15.4 ~ -4.1	-9.4 $\pm$ 3.4
波多黎各岛 Luquillo 山 ^[24]	-48 ~ -4	-18 $\pm$ 18	-7.5 ~ -2.1	-3.8 $\pm$ 2.2	-53 ~ 11	-17 $\pm$ 19	-8.5 ~ 0.7	-3.5 $\pm$ 2.7
法国 Garonne 河 ^[31]	-32 ~ -8	-17 $\pm$ 8	-3.9 ~ -1.1	-2.4 $\pm$ 1.0	-47 ~ -7	-21 $\pm$ 11	-7.3 ~ -2.0	-4.0 $\pm$ 1.5
中国西双版纳雨林 ^[3]	-59 ~ 34	-13 $\pm$ 23	-8.6 ~ 1.8	-3.5 $\pm$ 2.6	-120 ~ 32	-30 $\pm$ 36	-16.6 ~ 2.7	-5.0 $\pm$ 4.3
肯尼亚 Chalbi 沙漠 ^[20]	3 ~ 17	11 $\pm$ 4	-1.8 ~ -0.7	-1.0 $\pm$ 0.4	-53 ~ 23	-10 $\pm$ 20	-7.9 ~ 0.8	-2.9 $\pm$ 2.5
中国洞庭湖湿地 ^[29]	-15 ~ 13	-5 $\pm$ 8	-5.6 ~ 0.3	-3.8 $\pm$ 1.5	-64 ~ -4	-36 $\pm$ 20	-9.4 ~ -2.6	-6.2 $\pm$ 2.2
中国赤水森林 ^[6]	4 ~ 32	20 $\pm$ 9	-3.6 ~ 0.9	-1.2 $\pm$ 1.4	-80 ~ -14	-40 $\pm$ 23	-11.3 ~ -3.6	-6.7 $\pm$ 2.7
美国 Santa Cruz 岛 ^[26]	-16 ~ -6	-10 $\pm$ 3	-3.7 ~ -2.2	-3.0 $\pm$ 0.4	-111 ~ -15	-53 $\pm$ 37	-15.0 ~ -4.1	-8.5 $\pm$ 4.0
智利 El Romeral 盆地 ^[23]	-18 ~ -2	-10 $\pm$ 5	-3.3 ~ -0.7	-2.2 $\pm$ 0.8	-69 ~ -7	-29 $\pm$ 14	-9.2 ~ -1.9	-4.8 $\pm$ 1.7
纳米比亚 Namib 沙漠 ^[28]	-11 ~ 58	8 $\pm$ 17	-1.9 ~ 11.4	1.0 $\pm$ 3.4	-63 ~ 44	-9 $\pm$ 24	-9.3 ~ 5.3	-2.2 $\pm$ 3.4

由图 2 可知,雾水氢氧稳定同位素分布与 LMWL 关系主要存在 3 种情况:雾水点分布在 LMWL 的 95% 置信区间内(如新西兰 Otago 半岛),雾水点分布在 LMWL 上方(如中国赤水森林),雾水点分布在 LMWL 下

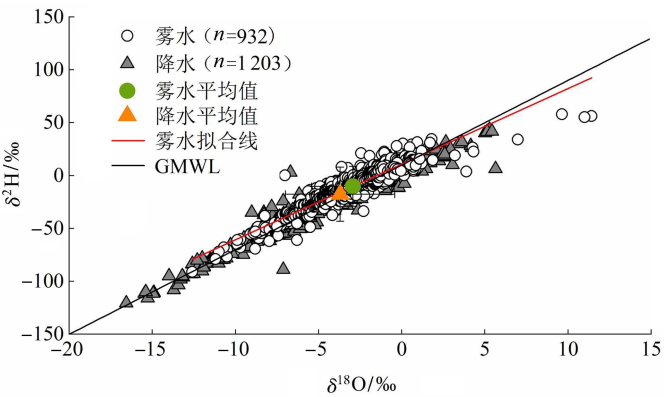


图 1 全球雾水和降水 δ^2H - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 1 Relationship between δ^2H and $\delta^{18}O$ of global fog water and precipitation

方(如纳米比亚 Namib 沙漠)。从拟合线斜率看,部分地区的雾水同位素拟合线 LFWL 的斜率小于 LMWL,表明雾水受到了一定程度的动力分馏作用,纳米比亚 Namib 沙漠地区尤其明显。而在中国西双版纳雨林、肯尼亚 Chalbi 沙漠等地,LFWL 的斜率明显大于 LMWL。

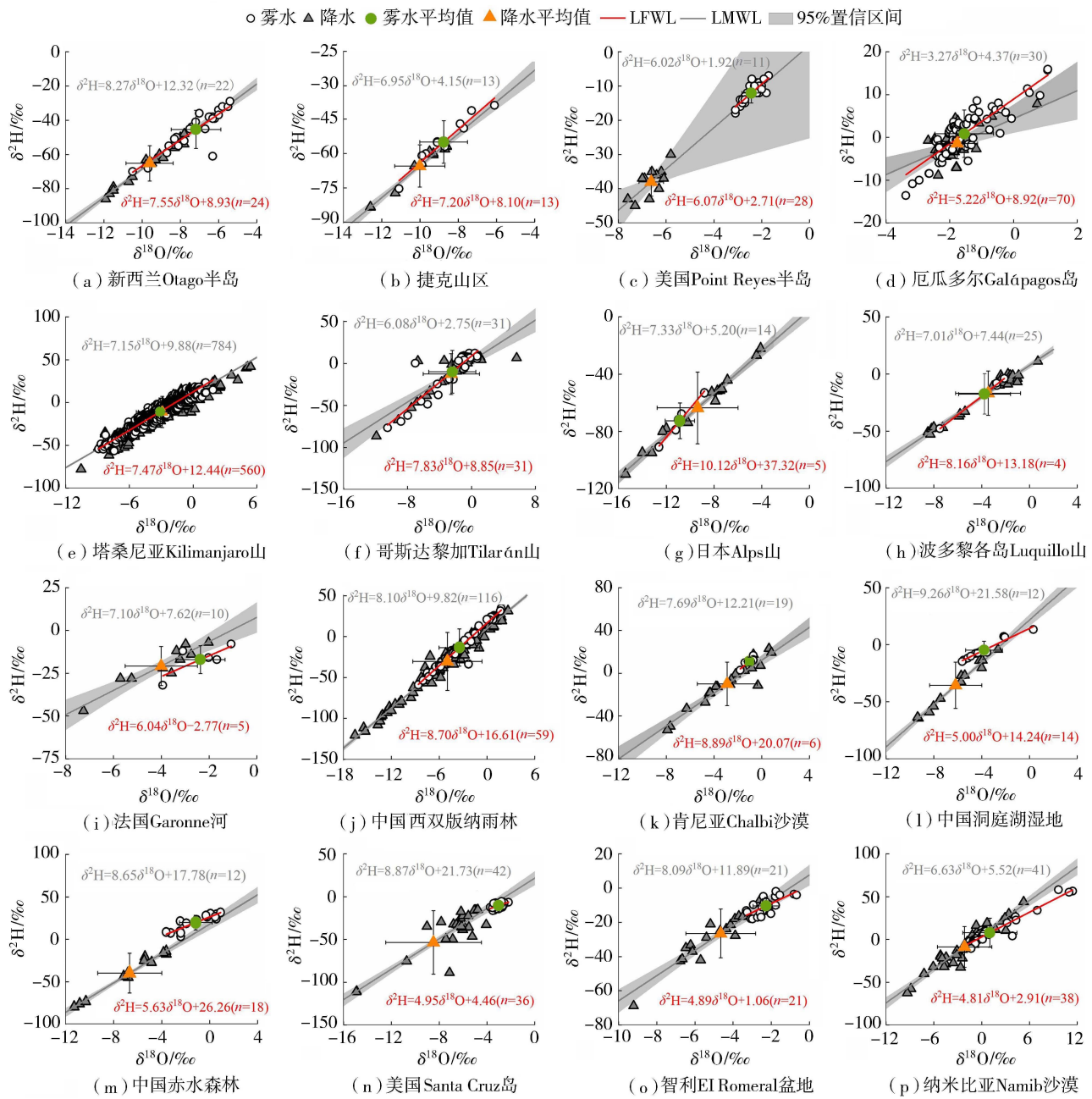


图 2 各研究区雾水和降水同位素 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 2 Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of fog water and precipitation in all study sites

3 讨 论

3.1 雾水和降水同位素差异特征及分类

16 个研究区中的新西兰 Otago 半岛、捷克山区、美国 Point Reyes 半岛等 10 个研究区的雾水和降水同位素组成存在显著性差异(表 3), $\delta^2\text{H}$ 的差异在 10‰~60‰之间, $\delta^{18}\text{O}$ 的差异在 1.2‰~5.5‰之间。同一地区用 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别计算的雾水和降水同位素差异显著性水平一致。

根据各研究区雾水和降水同位素组成以及雾水同位素的 lc-excess 值,可以将 16 个研究区的雾水和降水同位素差异特征分为以下 3 类情况(表 3): ①第 1 类,包含新西兰 Otago 半岛、捷克山区和美国 Point Reyes

半岛3个研究区以及雾水和降水同位素无显著性差异的6个研究区,雾水同位素点分布在LMWL的95%的置信区间之内,lc-excess平均值大都接近于0。对于这类情况,雾水和降水来自相同的水汽,二者的差异取决于同位素分馏程度。其中法国研究区虽然lc-excess值小于0,但无显著性差异,暂归为此类。②第2类,包含肯尼亚Chalbi沙漠、中国(西双版纳雨林、洞庭湖湿地、赤水森林)在内的4个研究区,雾水显著比降水富集重同位素,雾水同位素点主要分布在LMWL上方,lc-excess平均值大于0。在这些地区,雾水同位素组成暗示着形成雾水和降水的主要水汽来源存

表3 各研究区雾水和降水同位素差异及分类
Table 3 Isotopic differences and classification of fog water and precipitation in all study sites

研究区	$\delta^2\text{H}$ 差值/‰	$\delta^{18}\text{O}$ 差值/‰	p 值	显著性 差异	雾水平均 lc-excess 值/‰	类别
新西兰 Otago 半岛	20	2.4	<0.01	是	-0.3±5.4	1
捷克山区	10	1.2	<0.05	是	1.7±2.3	1
美国 Point Reyes 半岛	26	4.2	<0.01	是	0.7±1.7	1
厄瓜多尔 Galápagos 岛	2	0.2	>0.05	否	1.5±3.3	1
塔桑尼亚 Kilimanjaro 山	1	-0.2	>0.05	否	1.6±4.5	1
哥斯达黎加 Tilarán 山	3	0.2	>0.05	否	1.9±11.9	1
日本 Alps 山	-9	-1.5	>0.05	否	1.8±4.0	1
波多黎各岛 Luquillo 山	-1	-0.3	>0.05	否	1.4±2.6	1
法国 Garonne 河	4	1.6	>0.05	否	-7.9±5.4	1
中国西双版纳雨林	17	1.5	<0.05	是	4.7±4.7	2
肯尼亚 Chalbi 沙漠	21	1.9	<0.05	是	6.6±1.8	2
中国洞庭湖湿地	31	2.4	<0.01	是	10.3±5.9	2
中国赤水森林	60	5.5	<0.01	是	20.4±4.6	2
美国 Santa Cruz 岛	43	5.5	<0.01	是	-5.4±2.7	3
智利 El Romeral 盆地	19	3.0	<0.01	是	-3.5±4.5	3
纳米比亚 Namib 沙漠	17	3.2	<0.01	是	-4.5±7.5	3

在差异。较高的lc-excess值表明形成雾水的水汽中存在大量的二次循环水^[3]。③第3类,雾水显著比降水富集重同位素,但雾水同位素点主要分布在LMWL下方,lc-excess平均值小于0,主要发现于美国Santa Cruz岛、智利El Romeral盆地和纳米比亚Namib沙漠的3个研究区,同时这些地区的雾水线LFWL斜率明显小于LMWL。这类现象与雾水所处的特殊环境条件有关,例如在地面相对湿度较低的环境影响下,雾水形成后将受到蒸发等过程的影响。

3.2 不同类别同位素特征差异的主要影响因素

Ingraham等^[20]认为造成非洲肯尼亚沙漠地区雾水和降水的同位素差异主要有两个原因:①相对于降水,雾水形成时的环境温度相对较高,凝结过程中的同位素分馏程度小;②雾水来自于水汽团的初期凝结过程,凝结水量小,凝结水中重同位素占比高。总而言之,雾水和降水同位素特征的差异主要来自于二者不同的冷凝条件和冷凝过程。根据本文搜集的全球已有的雾水和降水同位素数据,在第3.1节中分类结果的基础上,进一步讨论不同类别情况下的主要影响因素。

对于第1类情况,雾水同位素点分布在LMWL的95%置信区间内,可以认为雾水同位素点分布在LMWL上。新西兰东南部的Otago半岛属于典型的山地草原地貌,雾水取自海拔1000m左右的草地,雾水和降水的水汽均来自海洋,且在相似的气象条件下冷凝产生^[10],因此雾水的lc-excess值接近于0。捷克北部的高山森林区也具有类似现象^[32]。在美国Point Reyes半岛研究发现,雾是由海洋表面潮湿的空气在陆地表面凝结而成,与形成降水的水汽相同^[17]。所以在Otago半岛、捷克山区和Point Reyes半岛,水汽凝结时的环境温度成为影响凝结水体同位素组成的关键因素。降水的形成一般发生在温度更低的高空,而低空水汽在近地面达到露点温度(大于0℃)即可形成液态雾滴,后者发生相变时的环境温度相对较高,因此雾水常常比当地降水具有更高的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[10,32]。在第1类的其余6个地区,雾水和降水同位素组成无显著差异。由于同一云团水汽达到过饱和状态并形成降水的温度条件在空间、时间上都是变化的^[35],因此由温度引起的雾水和降水同位素差异存在较大的时空变异性。进一步分析可以发现,其余6个地区雾的发生形式以地形雾为主,这说明温度的影响容易被局部特殊的水汽对流模式削弱。

对于第2类情况,雾水同位素点明显偏离LMWL,分布在LMWL的上方。与高空降水不同,冷凝成近地面雾水的水汽中包含了大量来自陆地水系统(河流、湖泊等)蒸发产生的二次循环水成分^[3,6,20,29],因而具有大于0的lc-excess值。研究表明,中国西南赤水云雾森林区的旱季水汽多来自当地蒸散发和四川盆地,造成该地区雾水中明显较高的lc-excess值^[6]。雾水和降水的水汽来源不同,导致了二者的同位素组成差异。

对于第3类情况,雾水同位素点明显偏离LMWL,分布在LMWL的下方。此类情况下,环境湿度是导致雾水与降水同位素差异的主导因素。环境湿度影响着水汽凝结时的动力分馏过程以及水汽凝结后受蒸发影

响的程度,从而决定了凝结水 $\delta^2\text{H}\text{-}\delta^{18}\text{O}$ 关系线的斜率和截距^[36]。环境湿度的影响在一些干旱地区尤为明显,如在纳米比亚的 Namib 沙漠,LMWL 斜率较小,且雾水 lc-excess 值为负值,LFWL 斜率仅为 4.81。同样,在降水量仅约 100 mm 的智利 El Romeral 盆地中北部沿海的山区,LFWL 斜率为 4.89。在这些干旱地区,年降水量远小于潜在蒸发量,环境湿度较低,水汽冷凝形成雾水和降水时会存在明显的动力分馏过程,且形成后会受到二次蒸发作用的影响,越接近地面的雾水受到二次蒸发的影响越大,从而导致雾水和降水同位素组成差异更加明显。第 3 类情况的有些地区虽然不属于干旱区,但环境湿度的影响主要发生在旱季,如美国 Santa Cruz 岛的森林区,属于典型的地中海气候,采集于旱季的雾水同位素点同样分布在 LMWL 下方(图 2(n)),表现出了明显的动力分馏特征。

综上,雾水是近地面水汽的凝结物,而降水为高空水汽凝结物,因此二者同位素特征差异的主要影响因素为水汽来源、凝结温度和环境湿度。水汽来源的异同决定了雾水同位素点与 LMWL 的相对位置关系,对二者的同位素特征差异起到决定性作用。雾水、降水凝结时的环境温度也是影响二者同位素组成差异大小的关键因素,降水的形成发生在温度较低的高空,而雾水的形成则发生在温度较高的近地面,雾水相对富集重同位素。此外,环境湿度会影响同位素动力分馏过程和水汽凝结后受二次蒸发影响的程度,从而加大了雾水和降水的同位素差异,在干旱地区或旱季尤为明显。

3.3 不同雾类型对应的雾水和降水同位素差异特征

本文搜集的雾水主要涉及地形雾、辐射雾和平流雾 3 种情况(表 1)。不同地区雾的产生机制不同,对应着不同的水汽条件和冷凝过程,而水汽冷凝过程中的同位素分馏又控制着雾水的同位素组成,因此不同地区的雾水同位素特征以及雾水和降水同位素差异便不同。

地形雾是由暖湿空气团沿山坡向上爬升时冷凝形成。新西兰 Otago 半岛东南部的沿海山区盛行东北风,在风力驱动和地形控制下,海洋水汽从海岸线到 Otago 高地不断爬升冷却,逐渐在近地面形成地形雾,在高空形成降水。因此,与降水相比,雾水是同一水汽团在近地面的前期冷凝物,所处的环境温度相对较高,因凝结过程中的温度效应,雾水中更富集重同位素。类似的,肯尼亚 Chalbi 沙漠盆地周围山区的雾属于盆地水汽沿山坡爬升时形成的地形雾^[20],雾水同样是水汽在近地面环境下的冷凝产物。在地形雾情况下,雾水和降水常常同时出现,虽然二者发生的高度存在差异,但特殊的水汽对流模式导致水汽缺乏垂向延展,温度分层也会被相应削弱^[35],因而很多时候雾水和降水的同位素组成存在较大的重叠区域(图 2(a)(k)),甚至不存在显著性差异。比如,在坦桑尼亚 Kilimanjaro 山、哥斯达黎加 Tilarán 山、日本 Alps 山、波多黎各岛 Luquillo 山等研究区都是以地形雾为主,雾水和降水的水汽来源、冷凝过程和条件均相似,导致这些地区的雾水和降水同位素组成没有显著性差异(表 3)。

辐射雾是当夜晚地面辐射冷却形成逆温层时,空气中的水蒸气在近地面大量凝结并积聚而形成的。如,在中国西双版纳热带雨林的雾水主要发生在海拔小于 1 000 m 的低山^[37],该地区地处澜沧江流域,河流水系众多,植被覆盖度高,当地河流、土壤蒸发和森林蒸散发产生丰富的水汽,当夜晚地面温度降低时便冷凝形成雾水^[3]。此外,在中国洞庭湖湿地和赤水森林也常有辐射雾的发生。这类地区雾水和降水同位素特征和差异也存在相似性:首先,由于雾水的主要水汽来源是当地白天蒸发产生的二次循环水,与降水的主要水汽来源不同,因此雾水同位素具有较高的 lc-excess 值;再加上近地面雾与高空降水形成时的温度差异,导致雾水中重同位素明显富集。在不同水汽来源和冷凝条件的共同作用下,辐射雾和降水同位素组成差异较大。由此可见,辐射雾与降水的同位素差异规律,与第 3.2 节中的第 2 类情况存在较好的对应关系。

平流雾是当暖湿的空气移动到温度较低的下垫面时,在水汽下部冷却形成,一般在海岸带较为常见。例如,在智利 El Romeral 盆地中北部的沿海地区,反气旋活动将水汽从海洋带到陆地,遇到地面低温冷凝形成平流雾^[38]。在美国西海岸加利福尼亚州的 Santa Cruz 岛,雾是从东太平洋海面被输送到海岸带的平流雾^[26],暖空气在温度较低的海面上移动,水汽达到露点后凝结形成小水滴,随后被输送到陆地附着在植被上。而在 Namib 沙漠,雾的发生以平流雾和辐射雾混合为主^[34]。在平流雾情况下,雾水直接来自海洋水汽的第一次凝结,虽然往往与降水具有相似的水汽来源,但平流过程中水汽缺乏垂向的对流混合,所以二者同位素组成的重叠区域较小(图 2(n)(o)),雾水中的重同位素明显更加富集。可以看到,以环境湿度为主要影响因素的第 3 类的研究区大都以平流雾为主,说明在平流雾情况下,近地面水汽在水平行进和冷凝过程中,同位素组成更容易受到地面湿度等气象因素的影响而进一步发生变化。

4 结 论

a. 全球已有研究的雾水和降水同位素组成整体上存在显著性差异,雾水比降水更加富集重同位素,全球数据拟合的雾水线为 $\delta^2\text{H} = 7.14 \delta^{18}\text{O} + 10.77$ 。不同地区的雾水和降水同位素差异特征可分为 3 类:①lc-excess 值近似为 0,雾水分布在 LMWL 的 95% 置信区间内;②lc-excess 值大于 0,雾水分布在 LMWL 上方;③lc-excess 值小于 0,雾水分布在 LMWL 下方。

b. 影响雾水和降水同位素差异的主要因素包括水汽来源、水汽凝结温度和环境湿度。水汽来源决定了雾水同位素组成与 LMWL 的相对位置关系。雾水和降水凝结时的温度差异是导致多数地区的雾水比降水更加富集重同位素的关键原因,且温度的影响也存在时空差异。环境湿度影响水汽凝结时的动力分馏以及凝结后受蒸发影响的程度,在干旱区尤为显著。

c. 雾水和降水同位素差异特点与雾发生类型之间存在关联性:地形雾情况下,雾水和降水的水汽来源、冷凝过程和条件均相似,二者同位素组成重叠较大,甚至没有显著差异;辐射雾情况下,地面二次循环水汽导致雾水较高的 lc-excess 值,与温度影响叠加后二者的同位素存在较大差异;平流雾情况下,水汽来源相似,水汽分层明显,二者同位素组成存在较小的重叠,但雾水易受到近地面气象条件的影响而出现二次蒸发。

参考文献:

[1] GLICKMAN T S. Glossary of meteorology[M]. 2nd ed. Boston: American Meteorological Society, 2000.

[2] 刘文杰,曾觉民,王昌命,等. 森林与雾露水关系研究进展[J]. 自然资源学报, 2001, 16(6): 571-575. (LIU Wenjie, ZENG Juemin, WANG Changming, et al. On the relationship between forests and occult precipitation (dew and fog precipitation) [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(6): 571-575. (in Chinese))

[3] LIU Wenjie, LIU Wenyao, LI Pengju, 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.

[4] 刘文杰,张一平,马友鑫,等. 森林内雾水的水文和化学效应研究现状[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 141-146. (LIU Wenjie, ZHANG Yiping, MA Youxin, et al. Advances on study of hydrological and chemical effects of fogwater on forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 141-146. (in Chinese))

[5] 陈建生,赵洪波,詹沛成. 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))

[6] ZHAN Lucheng, CHEN Jiansheng, ZHANG Chenming, et al. Fog interception maintains a major waterfall landscape in Southwest China revealed by isotopic signatures[J]. Water Resources Research, 2020, 56(3): 1-15.

[7] 陈刚,王文凤,马芬艳,等. 大兴安岭外源水补给的水量平衡与同位素证据[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 75-81. (CHEN Gang, WANG Wenfeng, MA Fenyan, et al. Water balance and isotopic evidence of external water supply in Daxing'an Mountains [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 75-81. (in Chinese))

[8] 王帅,饶文波,金可,等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 411-419. (WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 411-419. (in Chinese))

[9] 陈建生,王文凤,马芬艳. 阿尔山新生代玄武岩地下水补给源及其成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 249-256. (CHEN Jiansheng, WANG Wenfeng, MA Fenyan. Recharge source and genesis analysis of Cenozoic basalt groundwater in Arshan [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 249-256. (in Chinese))

[10] 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.

[11] OTTE I, DETSCH F, GÜTLEIN 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.

[12] 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))

[13] SCHOLL M, EUGSTER W, BURKARD R. 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.

[14] SAWASKE S R, FREYBERG D L. Fog, fog drip, and streamflow in the Santa Cruz Mountains of the California coast range[J]. Ecohydrology, 2015, 8(4): 695-713.

[15] CARMICHAEL M J,WHITE J C,CORY S T,et al. Foliar water uptake of fog confers ecophysiological benefits to four common tree species of southeastern freshwater forested wetlands[J]. *Ecohydrology*,2020,13(7):1-13.

[16] EMERY N,LESAGE J. Late summer fog use in the drought deciduous shrub, *Artemisia Californica* (Asteraceae)[J]. *Madroño*, 2015,62(3):150-157.

[17] INGRAHAM N L,MATTHEWS R A. The importance of fog-drip water to vegetation: Point Reyes Peninsula, California[J]. *Journal of Hydrology*,1995,164(1):269-285.

[18] LIU Wenjie,ZHANG Yipeng,LI Hongmei,et al. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China: a preliminary study[J]. *Water Research*,2005,39(5):787-794.

[19] 刘文杰,李鹏菊,李红梅,等. 西双版纳热带季节雨林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 soilwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2006,26(1):9-15. (in Chinese))

[20] 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.

[21] 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.

[22] 郭恒亮,刘丽娜,管东玲. 气候类型的空间数据编码方案及应用[J]. *气象与环境科学*,2007,30(4):82-84. (GUO Hengliang,LIU Lina, GUAN Dongling. Spatial data encoding and its application to Koppen's climatic classification[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*,2007,30(4):82-84. (in Chinese))

[23] SQUEO F A,ARAVENA R,AGUIRRE E,et al. Groundwater dynamics in a coastal aquifer in north-central Chile: implications for groundwater recharge in an arid ecosystem[J]. *Journal of Arid Environments*,2006,67(2):240-254.

[24] LINDE A H,BRUIJNZEEL L A,GORAN J,et al. Stable isotopes in rainfall and fog in the Luquillo Mountains, Eastern Puerto Rico: a preliminary study[J]. *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection*,2001,2001:181-184.

[25] SCHMID S,BURKARD R,FRUMAU K F A,et al. Using eddy covariance and stable isotope mass balance techniques to estimate fog water contributions to a Costa Rican cloud forest during the dry season[J]. *Hydrological Processes*,2011,25(3):429-437.

[26] FISCHER D T,STILL C J,EBERT C M,et al. Fog drip maintains dry season ecological function in a California coastal pine forest [J]. *Ecosphere*,2016,7(6):1-21.

[27] UEHARA Y,KUME A. Canopy rainfall interception and fog capture by *Pinus Pumila* Regal at Mt. Tateyama in the Northern Japan Alps, Japan[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*,2012,44(1):143-150.

[28] KASEKE K F. A stable isotope approach to investigate ecohydrological processes in Namibia[D]. Indiana: Indiana University, 2018.

[29] ZHAN Lucheng,CHEN Jiansheng,LI Ling. Isotopic assessment of fog drip water contribution to vegetation during dry season in Junshan wetland, northern Dongting Lake[J]. *Wetlands Ecology and Management*,2017,25(3):345-357.

[30] SCHMITT S R. The role of fog in the hydrological functioning of tropical island ecosystems[D]. North Carolina: North Carolina University,2018.

[31] BARBETA A,JONES S,CLAVÉ L,et al. Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a Riparian Forest[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*,2019,23:2129-2146.

[32] HUNOVÁ I,HANUSKOVÁ D,JANDOVÁ K,et al. Estimates of the contribution of fog water to wet atmospheric deposition in Czech mountain forests based on its stable hydrogen and oxygen isotope composition: preliminary results[J]. *European Journal of Environmental Sciences*,2020,10(2):89-97.

[33] LANDWEHR J M,COPLEN T B. Line-conditioned excess: a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems[C]//International Conference on Isotopes in Environmental Studies. Vienna:IAEA,2006:132-135.

[34] KASEKE K F,WANG Lixin. Reconciling the isotope-based fog classification with meteorological conditions of different fog types [J]. *Journal of Hydrology*,2022,605:1-10.

[35] 孙自永,程国栋,马瑞,等. 雾水的 D 和¹⁸O 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 ¹⁸O isotopes of fog water[J]. *Advances in Earth Science*,2008,23(8): 794-802. (in Chinese))

[36] 王永森,董四方,陈益钟. 基于温度与湿度的大气降水同位素特征影响因素分析[J]. *中国农村水利水电*,2013(6):12-15. (WANG Yongsen,DONG Sifang,CHEN Yizhong. Research on the precipitation isotope effect factor based on temperature and humidity[J]. *China's Rural Water And Hydropower*,2013(6):12-15. (in Chinese))

[37] CAO M,ZOU X,WARREN M,et al. Tropical forests of Xishuangbanna, China[J]. *Biotropica*,2006,38(3):306-309.

[38] ARAVENA R,SUZUKI O,POLLASTRI A. Coastal fog and its relation to groundwater in the IV region of Northern Chile[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*,1989,79(1):83-91.