

DOI: 10.20103/j.stxb.202306051182

詹泸成, 何晓冬, 赵娜. 赤水桫欏保护区截留雾水对地下水的贡献. 生态学报, 2024, 44(23): 10817-10826.

Zhan L C, He X D, Zhao N. The contribution of fog interception to groundwater in the Chishui Cyathea Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10817-10826.

赤水桫欏保护区截留雾水对地下水的贡献

詹泸成^{1,*}, 何晓冬¹, 赵娜²

1 河海大学水利水电学院, 南京 210024

2 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024

摘要: 在一些云雾林系统中, 林冠截留雾水对水文生态过程具有重要贡献, 但其对地下水系统的重要性仍缺乏认识。以赤水河下游云雾森林为例, 基于同位素水文学方法, 揭示截留雾水对地下水系统的贡献。选择在赤水桫欏保护区内的金沙沟集水区, 于 2021 年 3 月—2022 年 2 月对降水、雾水和泉水开展持续采样和²H、¹⁸O 同位素分析。基于长时间序列数据, 揭示了雨、雾、地下水同位素时间变化规律及成因, 在此基础上建立同位素混合模型并进一步量化了地下水中雾水的贡献比率。结果显示, 降水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、氘盈余(d-excess)均呈现出明显的季节性变化, 体现了水汽来源组成的季节性差异。相较于其他西南地区, 研究区降水 d-excess 值偏高, 特别是在旱季, 表明降水中包含更高的陆地二次循环水汽成分。雾水的重同位素比率高于同期降水, 其季节性变化规律与降水一致, 形成雾水和降水的水汽来源相似, 但因雾水形成时的凝结温度相对较高, 其 d-excess 值略低于降水。泉水同位素组成无季节性变化, 表明地下水滞留时间长, 是大气水多年补给和充分混合的结果。地下水同位素平均值高于全年降水加权平均值, 体现出降水、雾水共同补给的特征。同位素混合模型估算赤水桫欏保护区地下水中雾水的比例为 25.5%—28.1%, 水量输入 367—419 mm。研究在前人基础上进一步考虑了水体同位素的季节性变化, 降低了量化结果的不确定性。由此可见, 林冠截留雾水对研究区地下水系统的水量贡献明显, 其生态水文效应对于维持当地桫欏种群具有重要意义。

关键词: 赤水河; 雾水; 地下水; 同位素; 氘盈余; 桫欏

The contribution of fog interception to groundwater in the Chishui Cyathea Reserve

ZHAN Lucheng^{1,*}, HE Xiaodong¹, ZHAO Na²

1 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China

2 PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China

Abstract: In some cloud forest systems, fog water intercepted by the canopy plays a significant role in ecohydrological processes, while its importance on groundwater systems remains poorly understood. In this study, a cloud forest system in the lower reaches of the Chishui River was selected as an example to explore the contribution of fog interception to the local groundwater system using isotope hydrology methods. From March 2021 to February 2022, samples of rainwater, fog water, and spring water in the Jinshagou catchment of the Chishui Cyathea Reserve were collected and analyzed for ²H and ¹⁸O isotopes. Using long time-series data, temporal variation rules and causes of isotopic composition in rainwater, fog interception, and groundwater were revealed, based on which an isotope mixing model was established to quantify fog interception's proportion in groundwater. Results showed that $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, and d-excess values of rainwater exhibited obvious seasonal fluctuations, indicating the seasonal alternation of water vapor sources. Compared to other southwestern regions, the rainwater of the study area was characterized by higher d-excess values especially during the dry season, indicating a

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41803001)

收稿日期: 2023-06-05; 网络出版日期: 2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luchengzhan@hhu.edu.cn

more significant component of terrestrial recirculated water vapor source. Fog interception water was more enriched in heavier isotopes than rainwater, but they had a similar seasonal variation pattern, suggesting their similar water vapor source. Due to the relatively higher condensation temperature of fog, however, the d-excess of fog water was slightly lower than that of rainwater. No seasonal isotopic variation was observed in spring water, suggesting that groundwater has a long residence time and is a long-term mixture of atmospheric water recharge. The averaged isotopic values of groundwater were higher than the weighted mean of annual rainwater, proving the joint recharge from both rainwater and fog water. The isotope mixing model estimated that the proportion of fog water in the groundwater of the Chishui Cyathea Reserve was 25.5%—28.1%, corresponding to a water input of 367—419 mm. Compared with previous studies, this study further considers the seasonal changes of water isotopes, thus reducing uncertainties in the quantitative results. In summary, fog interception has a significant water contribution to the groundwater system in the study area, and its ecohydrological effect is important for sustaining the local Cyathea population.

Key Words: Chishui River; fog water; groundwater; stable isotope; d-excess; Cyathea

植被林冠截获空气中雾滴而形成的“水平降水”被视为一种重要的水文和化学输入^[1-2],在一些多雾的森林^[3-4]、草地^[5]、沙漠^[6-7]、湿地^[8]等陆地系统中,截留雾水对生态水文过程起着重要的作用。在一些地中海气候的山地云雾森林系统中,截留雾水不仅能够补给浅层土壤,影响植物分布和生长^[9-11],而且会进一步入渗并参与产流,对水文系统贡献相当可观的水量^[12-13]。森林系统是重要的生物基因库,也是地球上最大的碳库。随着全球气候变化,雾的发生规律可能发生改变^[14],进一步研究雾水对云雾林水文系统的重要性,对于认识陆地森林生态系统稳定性有着重要意义。

雾水和降水中的²H、¹⁸O 稳定同位素组成差异,为研究雾水对植被、土壤、径流系统的贡献提供了有效的手段^[15-17]。在一些云雾森林系统中,雾水对地下水系统的贡献也逐渐被人们发现和关注。例如,1995年,Ingraham 等人在美国加利福尼亚 Point Reyes 半岛的研究表明,地下水同位素组成显示出明显的雾水成分,初步估算约有 25%的地下水来自林冠截留雾水补给^[18]。2002年,Scholl 等人在夏威夷开展了短期的稳定同位素采样分析,发现截留雾水是泉水和溪流的重要组成部分^[19]。2007年,刘文杰等人曾在我国西双版纳热带雨林地区关注了雾水和地下水的关系,但结果表明地下水同位素组成与降水相似,初步判断该地区雾水仅对浅层土壤水有贡献,而没有补给地下水系统^[20]。2020年,Zhan 等人发现在我国西南赤水云雾林区,林冠截留雾水对地下水系统和当地瀑布景观有重要贡献,但因采样时间较短,没有对其贡献量进行定量估计^[4]。由此可见,目前仅有少数研究涉及雾水对地下水的贡献,且由于缺少长时间序列的连续观测采样,对雾水的同位素变化特征及其对地下水的补给量缺乏较准确的认识。

位于我国西南四川盆地和云贵高原过渡区域的赤水河下游,拥有桫欏国家级自然保护区,保存着世界上数量最多、面积最广的桫欏林。前期研究表明,赤水河下游雾事件频发,林冠截留雾水对赤水河下游林区的生态水文过程有重要意义^[4,21]。然而,因缺少雾水和降水同步连续监测,前期研究忽略了雾水同位素组成的季节性变化,在定量分析雾水对地下水的贡献方面存在一定的不确定性。针对这一不足,本研究选择在赤水河下游桫欏保护区内的金沙沟集水区,开展了为期 1 年的降水、雾水、地下水同步采样,进一步分析和探究了该地区各水体同位素变化特征,并定量揭示了截留雾水对地下水系统的贡献。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

赤水河是长江上游支流,发源于乌蒙山北侧、云南省北部镇雄县,沿滇川黔边界于四川省合江县注入长江^[22]。赤水河下游的赤水林区主要位于东经 105°30′—106°15′,北纬 28°00′—28°45′之间,处于四川盆地和云贵高原的过渡地带,区域地貌主要为山地森林,植被覆盖率达 90%以上^[23],且有较高的物种多样性。在赤

水林区的葫市镇金沙沟一带,广泛生长着国家一级珍稀濒危保护的木本蕨类植物—桫欏^[24],是世界上唯一的以桫欏及其生存环境为保护对象的自然保护区(图 1)。该地区属于中亚热带湿润季风气候区,年平均气温约 18.1°C,具有冬无严寒、夏无酷暑的气候特点^[22]。年平均降水量约 1047 mm,80%以上的降水集中在 4 至 9 月份,年平均相对湿度约 82%,12 月的相对湿度最大^[25]。该地区全年雾事件频发,多发生在清晨,且秋冬旱季更为明显,雾发生天数约占全年的 60%,能见度小于 1 km 的大雾天数约占全年的 9%,导致该地区较短的年日照时数和较低的太阳辐射总量^[4]。该地区地表水系发达,河网密度高达 1 km/km²,加上地质活动引起的大量断崖陡坎,形成数量庞大的瀑布群景观^[26]。地下水储存在山地砂岩含水层中,在断层区域以泉水的形式溢出。研究表明,该地区频繁发生的雾气被林冠捕获后大量补给地表水、地下水系统^[4,21]。本研究地点位于赤水林区桫欏保护区内的金沙沟,属于赤水河的一级支流系统,集水区面积约 40 km²,海拔 208—1412 m,平均海拔约 882 m,研究区位置及采样点分布如图 1 所示。

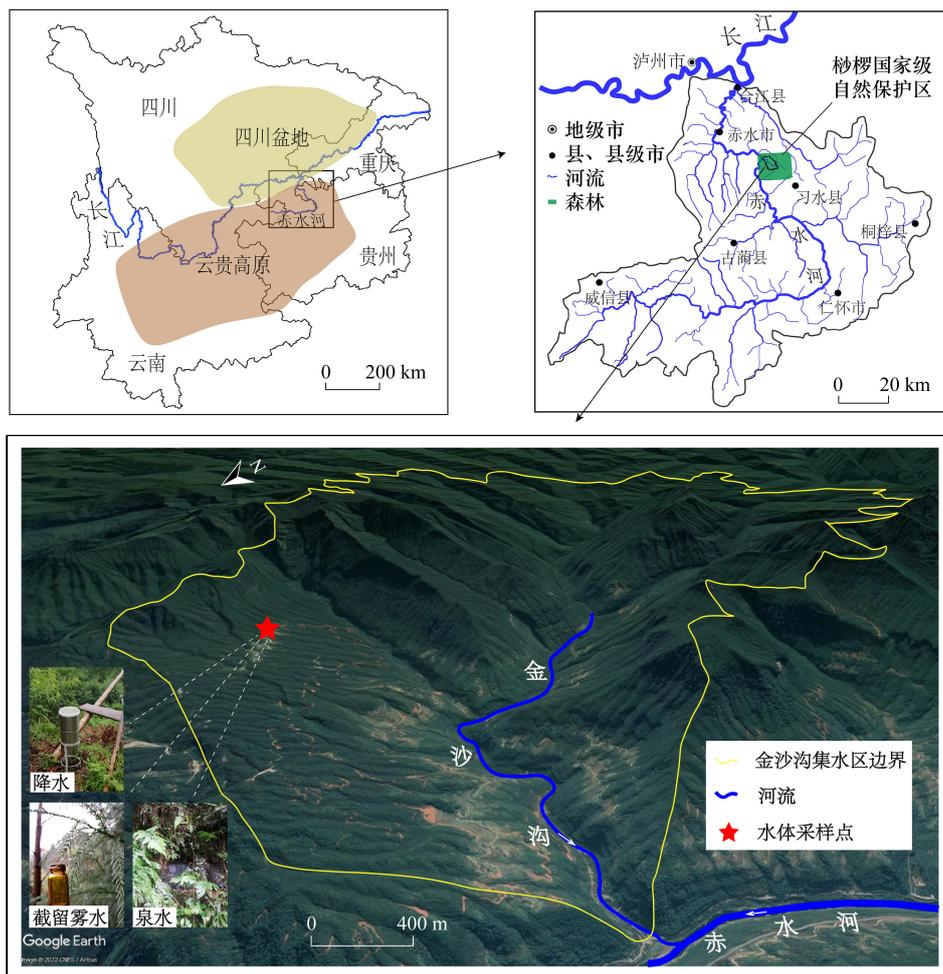


图 1 研究区域及采样位置图

Fig.1 Location of study area and sampling sites

1.2 样品采集和分析

山区水体同位素组成存在一定的高程效应,为了尽可能反映研究区域内的总体情况,同时便于样品的连续搜集,将采样点选择在研究区内接近平均海拔的村庄(海拔 820 m)。从 2021 年 3 月至 2022 年 2 月,对金沙沟集水区内的降水、雾水和地下水进行了为期 1 年(52 周)的持续采样。降水样品的采集以降水事件为准,采用标准降水量桶收集降水并记录降水量大小,每次降水结束后用 100 mL 聚乙烯瓶及时收集降水,共采集降

水样品 64 个,未出现降雪。在降水采样点附近对林冠截留雾水进行收集,为了避免雨、雾的混合,只在有明显雾事件且前夜无降雨的清晨采集雾水。选择用 5 mL 螺口瓶收集林冠植物叶片上滴落的雾水,具体方法可参见前期研究^[4],全年共获得雾水样品 50 个。此外,在村庄附近有一处从岩石裂隙中常年溢出的泉水,是当地居民的重要饮用水来源,每周 1 次对该泉水用 100 mL 聚乙烯瓶进行采集,共获得地下水样品 52 个。

所有样品采集后放入冰箱在 4℃ 条件下保存,并及时送至河海大学地球科学与工程学院分析测试中心完成同位素组成分析,所用仪器为 LGR 水同位素分析仪(美国 Los Gatos Research 公司,型号 T-LWIA Model 912-0050),测量结果以相对于 VSMOW(维也纳标准平均海水)标准的千分变差 δ 值表示, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度分别为 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

1.3 同位素混合模型

研究区泉水同位素组成无明显季节性变化,表明地下水来自大气水入渗后的多年混合(后文具体讨论分析)。基于此,本研究采用二端元混合模型方法^[27],将地下水视为降水和雾水的长期混合,端元取值采用降水、雾水同位素的全年平均值,由此估算降水和雾水在地下水中的贡献比例。具体方法为:

$$\delta_c = f_f \delta_f + f_p \delta_p \quad (1)$$

$$1 = f_f + f_p \quad (2)$$

联立式(1)、式(2),得

$$f_f = (\delta_c - \delta_p) / (\delta_f - \delta_p)$$

$$f_p = 1 - f_f$$

式中, f_f 、 f_p 分别为雾水、降水对地下水的贡献比例(后文以%表示), δ_c 为地下水的同位素组成,取全年样品的平均值, δ_f 为雾水的同位素组成,取全年样品的平均值(本研究忽略雾水水量变化的影响), δ_p 为降水的同位素组成,取全年降水的加权平均值(以降雨量为权重)。

2 结果

采样期间的降水、雾水、地下水同位素组成随时间的变化情况如图 2 所示。采样期间总降水量为 1072 mm,全年多数降水事件降水量在 20 mm 以下,超过 50 mm 的降水事件主要发生在 7—9 月。降水同位素组成变化范围较大, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别在 -104.5‰ — 33.3‰ 和 -14.76‰ — 2.40‰ 范围内变化,加权平均值(\pm 标准差 SD)分别为 $(-44.5 \pm 36.3)\text{‰}$ 和 $(-7.71 \pm 4.24)\text{‰}$ 。降水中的重同位素存在夏秋季贫化、冬春季富集的特点。

采样期间约 60% 的雾事件发生在 2021 年 11 月—2022 年 2 月的秋冬季节。全年雾水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -102.3‰ — 22.8‰ 和 -14.56‰ — 0.90‰ 范围内变化,平均值(\pm 标准差 SD)分别为 $(-15.9 \pm 30.4)\text{‰}$ 和 $(-4.40 \pm 3.49)\text{‰}$,明显高于降水同位素平均值。与同时段的降水相比,大部分雾水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对更高,表明雾水中重同位素相比于降水更加富集。与降水类似,雾水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值也呈现夏秋季低、冬春季高的季节性变化特征。

地下水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -39.4‰ — 31.2‰ 和 -7.33‰ — 5.78‰ 范围内,平均值为(\pm 标准差 SD)分别为 $(-37.2 \pm 1.9)\text{‰}$ 和 $(-6.78 \pm 0.33)\text{‰}$ 。与降水、雾水相比,一年中地下水同位素组成波动微小,无明显季节性变化。

根据前文建立的同位素混合模型,以 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别计算,相关参数的取值情况和计算结果如表 1 所示,估算得到研究区地下水中截留雾水的比重为 25.5%—28.1%。

表 1 地下水中截留雾水贡献比率估算结果

Table 1 Estimated proportion of fog water in the groundwater

同位素组成 Isotopic composition	地下水/ ‰ Groundwater	降水/ ‰ Precipitation	雾水/ ‰ Fog water	雾水贡献比率/ ‰ Fog water proportion
$\delta^2\text{H}$	-37.2	-44.5	-15.9	25.5
$\delta^{18}\text{O}$	-6.78	-7.71	-4.40	28.1

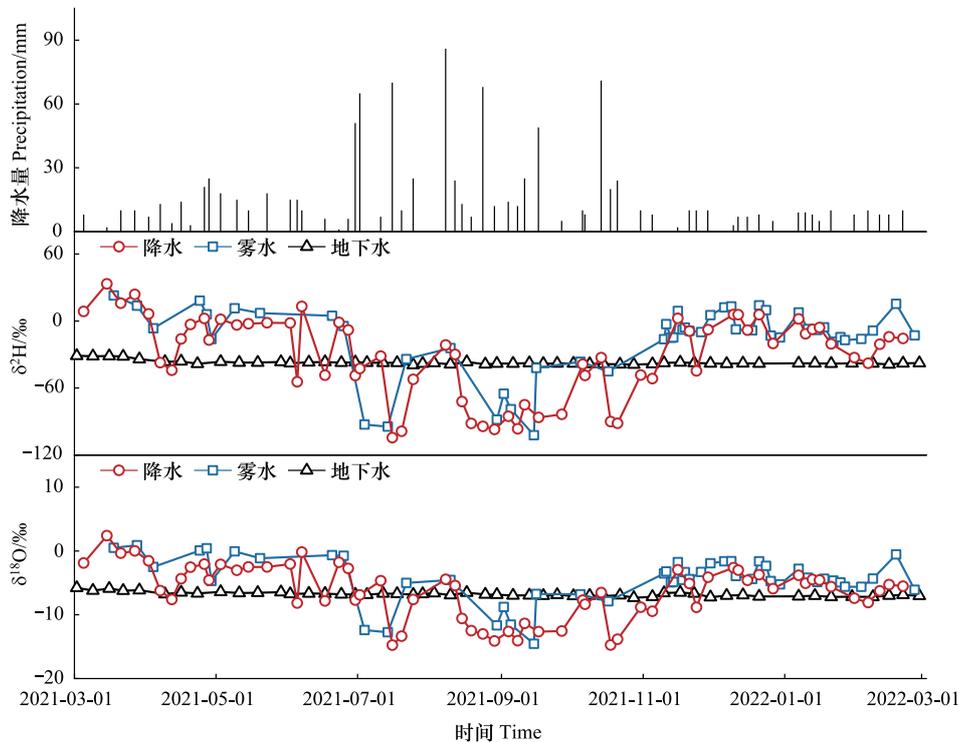


图2 采样期间降水、雾水、地下水同位素组成变化

Fig.2 Isotopic composition of rainwater, fog water and groundwater during the sampling period

3 讨论

3.1 雨雾同位素组成及水汽来源特征

研究区降水重同位素夏秋季贫化、冬春季富集的特点(图3)与我国南方地区的一般规律一致,是水汽来源、降水量季节性差异共同作用的结果。根据采样期间的降水同位素数据,拟合得到当地降水线(LMWL)为 $\delta^2\text{H} = 8.41\delta^{18}\text{O} + 22.42$ ($n = 64, R^2 = 0.96$),与前期研究中赤水地区当地降水线 $\delta^2\text{H} = 8.65\delta^{18}\text{O} + 17.78$ ^[4]和全球大气降水同位素监测网(GNIP, <https://nucleus.iaea.org/wiser/>)附近贵阳站点的降水线 $\delta^2\text{H} = 8.82\delta^{18}\text{O} + 22.06$ 相比较为接近。降水线斜率和截距明显高于全球大气降水线($\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$),这与我国西南四川、重庆地区的特点相似,体现出降水受大陆性水汽来源的影响以及当地空气湿度较高、云下蒸发作用较弱的气候特点^[28]。

大气降水同位素的氘盈余(d-excess)值可以反映区域内降水同位素偏离全球大气降水线的趋势,指示形成降水水汽源地的气象环境^[29-30]。金沙沟集水区降水同位素 d-excess 值如图3所示,春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—次年2月)的 d-excess 平均值(\pm 标准误差 SE)分别为 $(18.49 \pm 0.74)\text{‰}$ 、 $(12.04 \pm 0.64)\text{‰}$ 、 $(21.37 \pm 1.24)\text{‰}$ 、 $(28.78 \pm 0.66)\text{‰}$,全年平均值(\pm 标准误差 SE)为 $(19.81 \pm 0.87)\text{‰}$ 。可以看出,研究区降水 d-excess 表现出明显的春夏季低、秋冬季高的现象,体现出该地区水汽来源组成的季节性差异。赤水河下游处于典型的西南季风气候区,其降水水汽来源变化符合我国西南地区的整体特征。研究表明,我国西南地区雨季降水的水汽中来自低纬度海洋的比重较大,对应降水重同位素相对贫化, d-excess 值相对较小,而旱季降水水汽主要受到大陆性气团的影响,降水重同位素富集, d-excess 值较大^[31]。

研究区各个季节降水同位素 d-excess 水平均高于全球平均值(10‰),其中秋冬季节更为明显。事实上,我国西南地区秋冬季节降水同位素的高 d-excess 值主要与西风环流及当地水汽再循环有关,这与前人在腾冲^[32]、蒙自^[33]、贵阳^[34]、桂林^[35]的研究结果相似。但与这些地区相比,本研究区的 d-excess 值水平整体更

高,这说明研究区内形成降水的水汽受到了更大程度的高 d-excess 值水汽影响。水汽源区的相对湿度是影响降水 d-excess 值的主要因素,与海洋表面的蒸发不同,内陆水体再蒸发时所处的相对湿度较低,同位素动力学分馏较强,因而内陆蒸发水汽及其形成的凝结水体具有更高的 d-excess 值^[36-37]。由此可以判断,赤水河下游林区的全年降水中包含了较高的陆地二次循环水汽成分。

研究区地处四川盆地和云贵高原过渡区域,盆地内陆地蒸发水汽的向外输送以及林区自身的蒸散发对该地区的水汽组成产生了较大的影响^[23],这可能是其降水水汽盈余特征与西南其他地区存在较大差异的主要原因。在受海洋水汽影响较小的秋冬季节,这一区域性陆源水汽的影响起主导作用,导致降水的 d-excess 全年均值接近 20‰,冬季均值超过 28‰。对比前期研究在赤水市区(海拔约 265 m a.s.l.)的降水 d-excess 值(全年均值 13.50‰)^[4],本研究采样点降水 d-excess 值更高。这一现象与其他一些山地区域^[38-39]的现象相似,降水 d-excess 值会随海拔的增加而增加,这主要与高海拔地区降水受局部再循环水汽影响程度更大有关。

雾水作为一种特殊的大气凝结水,其 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值也表现出了与降水相似的季节性变化规律,表明形成雾水的水汽来源与降水存在相似性。然而,显著性差异分析结果表明,降水和雾水同位素组成在全年中整体上存在显著性差异($P < 0.05$),特别在秋季最为明显。对比不同季节雨雾同位素组成可以发现(图 3),雾水中重同位素比率高于同期降水,这与世界上很多云雾林地区的特征一致,这是由于雾水形成具有相对较高的凝结温度和相对较小的凝结水量^[27,40]。研究表明,雨雾同位素组成差异主要受到水汽来源、环境温度、湿度等因素的共同影响^[41],因此二者差异程度在不同季节、不同事件中也不相同。

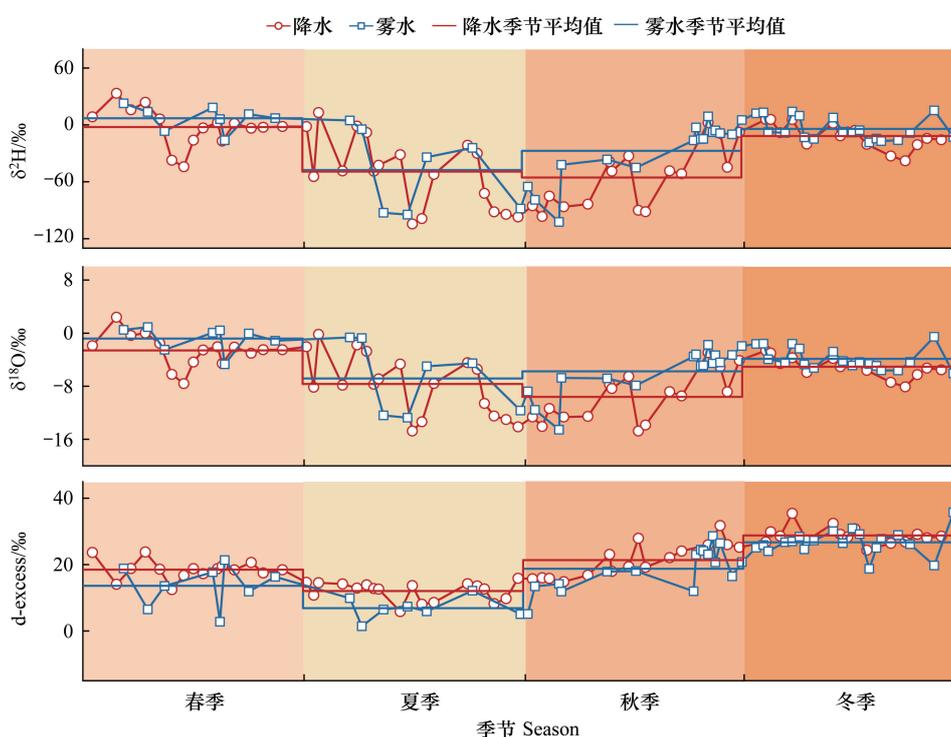


图 3 降水和雾水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、d-excess 值季节性变化

Fig.3 Seasonal variations of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess in rainwater and fog water

金沙沟集水区春、夏、秋、冬季的雾水 d-excess 平均值(\pm 标准误差 SE)分别为(13.61 \pm 2.10)‰、(6.88 \pm 1.20)‰、(18.75 \pm 1.53)‰、(26.72 \pm 0.84)‰,全年平均值(\pm 标准误差 SE)为(19.30 \pm 1.19)‰。雾水 d-excess 值与降水存在一致的季节性变化,春夏季低,秋冬季高,二者变化较同步,进一步表明形成雾水和降水的水汽来源具有相似性。与降水类似,秋冬季节形成雾的水汽多来自四川盆地及附近区域的蒸散发^[4],借助当地盛行风通过赤水河谷输入研究区,夜间降温后形成雾,具有明显的陆地二次循环水汽特征,而在春夏季受到低纬度

海洋水汽输送的影响。对比各个季节雾水和降水的 d-excess 值可以发现,与同位置的降水相比,雾水 d-excess 值相对偏低,春夏季这一差异明显。一般情况下,雾水的形成位于近地面,受局部水汽的影响程度更大,但其相对降水较低的氡盈余说明受到了其他因素的影响。事实上,不同的凝结温度也会导致 d-excess 值的不同,这与水体经历相变过程中 ^2H 和 ^{18}O 不同的分馏速率有关^[42],温度越高,d-excess 值越小。雾水的凝结发生在温度较高的近地面,降水的形成发生在温度较低的高空,因此雾水中的 d-excess 值偏小^[43],这一影响在温度较高的春、夏季更为明显。此外,雾水采样前可能会受到蒸发作用的影响^[4],这也是导致雾水氡盈余偏低的另一个因素。

3.2 林冠截留雾水对地下水的贡献

虽然降水同位素组成在年内表现出了显著的季节性变化,但泉水同位素组成在全年中几乎稳定不变,即使在降水量较大的雨季,地下水依然没有受到降水同位素波动的影响。这一现象表明,采样点泉水来自山区地层深处,在含水层中的滞留时间较长,是大气水多年补给和充分混合的结果。大气水入渗后与前期水体混合并进一步补给更新地下水,该过程极为缓慢,导致以泉水形式出现的地下水排泄中没有明显的同位素变化信号。这一现象与世界上很多山区相类似,一些山地森林系统中的地下水平均滞留时间可达 10a 以上^[44-45]。正因这一特点,山区地下水同位素组成往往接近于当地降水的全年加权平均值^[46]。然而,对比发现,金沙沟集水区的地下水同位素组成全年平均值($\delta^2\text{H}=-37.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-6.78\text{‰}$)和大气降水同位素加权平均值($\delta^2\text{H}=-44.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-7.71\text{‰}$)之间存在较大的差异。这一现象与前期在赤水森林地区的研究结果一致,已证实是由于林冠截留雾水补给地表水、地下水所导致^[4,21]。本研究通过长期采样分析发现地下水相对于降水有较高的同位素 δ 值(图 4),进一步验证了该地区雾水对地下水系统的重要性。

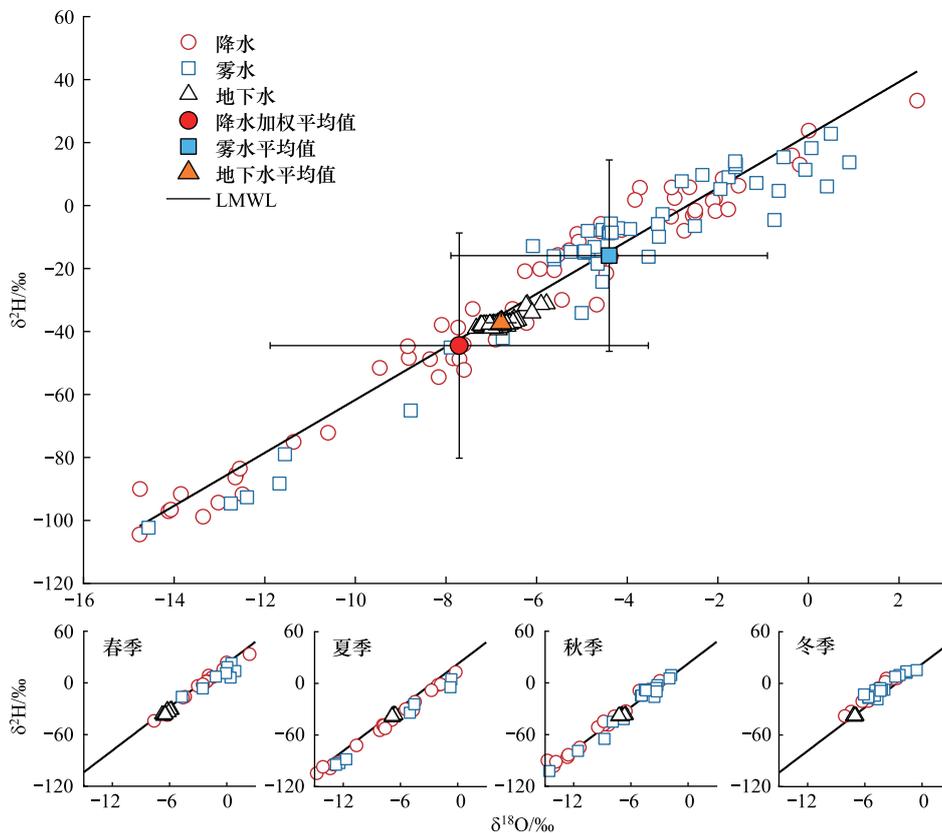


图 4 不同水体的 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig.4 $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ relationships for different water types

基于稳定同位素技术,国内外学者曾报道了世界上一些地区存在地下水接受截留雾水补给的现象,对应的雾水、降水、地下水同位素组成情况如表 2 所示。

表 2 截留雾水补给地下水的同位素研究案例
Table 2 Study cases of groundwater recharge by fog interception using stable isotopes

研究区域 Study sites	雾水同位素/‰ Fog water isotope		降水同位素/‰ Precipitation isotope		地下水同位素/‰ Groundwater isotope		雾水贡献率/% Fog water proportion
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	
中国赤水森林 ^[4] Chishui Forest, China	3.5—31.5	-3.6—0.9	-51.6	-7.9	-46.1—-31.8	-7.9—-5.6	20—24
肯尼亚 Chalbi 沙漠 ^[6] Chalbi Desert, Kenya	2.9—16.6	-1.8—-0.7	-53.0—-23.0	-7.9—-0.8	-26.8—-12.4	-4.9—-2.4	—
美国 Point Reyes 半岛海岸 ^[18] Point Reyes Peninsula Coast, USA	-18.0—-7.0	-3.1—-1.7	-41.0—-33.0	-7.0—-5.8	-32.0—-29.0	-5.8—-5.2	25
葡萄牙 Madeira 岛森林 ^[47] Madeira Island Forest, Portugal	-24.0—-5.6	-4.7—-2.1	-34.9—-7.6	-6.0—-2.1	-29.9—-15.5	-6.4—-3.3	—
美国 Puerto Rico 岛森林 ^[48] Puerto Rico Island Forest, USA	2.8	-1.5	-127.0—-12.0	-16.8—-0.7	-10.0—-3.0	—	—
中国赤水桫欏保护区(本研究) Chishui Cyathea Reserve, China (this study)	-102.3—-22.8	-14.6—-0.9	-104.5—-33.3	-14.8—-2.4	-39.4—-31.2	-7.3—-5.8	25.5—28.1

与本研究相似,受截留雾水影响,这些地区地下水中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于降水单一补给的结果。然而,受限于样品数量少、采样时间短,部分研究没有强调雾水对地下水的实际贡献。本研究基于持续一年的同位素时序数据,估算地下水中约 25.5%—28.1% 的水量来自林冠截留雾水的补给。若以年输入降水量 1072 mm 计算,截留雾水对该水文系统的年输入水量可达 367—419 mm。林冠截留雾水对山地系统的补给水量受到植被类型、气候条件和地形条件的影响,本研究结果与前人在类似亚热带山地云雾林的实际测量结果较为接近^[49—50]。由此可见,林冠截留雾水对桫欏保护区内的地下径流系统存在相当可观的水量贡献,对于维持当地水文循环具有重要的意义。

2014 年 12 月,陈建生等人^[21]在赤水林区采集了单月的雾水、泉水和溪水,初步估算了该区域雾水对地表水的贡献量约为 20%—24%。2020 年,Zhan 等人^[4]进一步证实,在赤水河下游林区的大同河、风溪河集水区,雾水对地下水系统存在相当可观的贡献,并维系了当地旱季的瀑布群景观。本研究在这些前期研究的基础上,优化了样品采集方法,考虑了降水和雾水的时空变化,提高了计算结果的准确性。首先,由于降水、雾水同位素存在随海拔增高而贫化的现象,本研究选择的采样点位于研究区腹地,其海拔接近集水区平均海拔,能够更加准确地代表该地区的降水、雾水同位素组成情况;其次,本研究对降水、雾水和地下水同步进行了为期一年的持续采样,充分考虑了雨雾同位素组成的季节性变化,在同位素混合模型中以年内平均值作为端元取值,虽忽略了雾水水量变化的影响,但仍然大大减少了结果的不确定性。

金沙沟集水区位于赤水桫欏保护区内,从雨雾同位素组成看,全年受大陆再循环水汽的影响显著。林冠辐射冷却面较大,近地面水汽易饱和冷凝形成雾,导致该地区常年在浓雾的笼罩下^[25]。基于上述混合模型的估算结果,地下水中雾水的成分接近 30%,表明雾水对该地区地下水系统的贡献是不可忽略的。雾水进入地下含水层之前会经过林冠层、土壤层,对地面生态系统有着重要影响。研究表明,雾水对于一些树木、草地等是重要的水分来源,特别是在旱季,这些植物会吸收叶片截留雾水或浅层土壤中的雾水作为补充水源^[19,51]。此外,雾的发生增加了空气中的湿度,有效降低了林冠的蒸散发和植被叶片的蒸腾作用,对于维持旱季植被生存有重要作用^[27,52]。研究区拥有世界罕见的大面积桫欏林,雾水的这一生态水文效应可能是该地区桫欏得以大面积存活的关键因素。

4 结论

本研究在赤水河下游桫欏保护区内的金沙沟集水区,通过对平均海拔附近的雾水、降水和地下水开展了

为期一年的采样,基于水样 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素长序列数据,对降水和雾水的同位素组成和水汽来源特征进行了分析和探讨,并进一步定量了截留雾水对地下水的贡献,主要结论如下:

(1) 由于水汽来源组成存在季节差异,降水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、d-excess 值呈季节性变化。该地区的 d-excess 值水平整体偏高,且高于其他西南地区,主要原因是全年降水中包含了较高的陆地二次循环水汽成分,特别是在旱季尤为明显;

(2) 雾水的重同位素比率高于同期降水,并存在与降水相似的季节性变化规律,形成雾水和降水的水汽来源相似。雾水的 d-excess 值相对于降水偏低,主要原因是雾水形成时的凝结温度较高,这一影响在温度较高的春、夏季更为明显;

(3) 基于一年的持续采样研究结果,赤水桫欏保护区截留雾水对地下水系统的水量贡献明显,同位素混合模型计算得到地下水中雾水的比例占 25.5%—28.1%,对研究区的水量输入约为 367—419 mm,雾水对于维持该保护区的大规模桫欏种群具有极其重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 刘文杰,张一平,马友鑫,李红梅. 森林内雾水的水文和化学效应研究现状. 林业科学, 2005, 41(2): 141-146.
- [2] 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. 西南林业大学学报, 2015, 35(4): 106-110.
- [3] Liu W J, Liu W Y, Li P J, Gao L, Shen Y X, Wang P Y, Zhang Y P, Li H M. Using stable isotopes to determine sources of fog drip in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1/2): 80-91.
- [4] Zhan L C, Chen J S, Zhang C M, Wang T, Xin P, Li L. Fog interception maintains a major waterfall landscape in southwest China revealed by isotopic signatures. Water Resources Research, 2020, 56(3): 1-15.
- [5] 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. Austral Ecology, 2000, 25(4): 402-408.
- [6] Ingraham N L, Matthews R A. Fog drip as a source of groundwater recharge in northern Kenya. Water Resources Research, 1988, 24(8): 1406-1410.
- [7] Kaseke K F. A Stable Isotope Approach to Investigate Ecohydrological Processes in Namibia[D]. The State of Indiana, Indiana University, 2018.
- [8] Zhan L C, Chen J S, Li L. Isotopic assessment of fog drip water contribution to vegetation during dry season in Junshan wetland, northern Dongting Lake. Wetlands Ecology and Management, 2017, 25(3): 345-357.
- [9] Cannon W A. On the relation of redwoods and fog to the general precipitation in the redwood belt of California. Torrey, 1901, 1(12): 137-139.
- [10] Cooper W C. Redwoods, rainfall and fog. Plant World, 1917, (20): 179-189.
- [11] Byers H R. Coast redwoods and fog drip. Ecology, 1953, 34(1): 192-193.
- [12] Uehara Y, Kume A. Canopy rainfall interception and fog capture by *Pinus pumila* regal at Mt. Tateyama in the northern Japan Alps, Japan. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2012, 44(1): 143-150.
- [13] del-Val E, Armesto J J, Barbosa O, Christie D A, Gutiérrez A G, Jones C G, Marquet P A, Weathers K C. Rain forest islands in the Chilean semiarid region: fog-dependency, ecosystem persistence and tree regeneration. Ecosystems, 2006, 9(4): 598-608.
- [14] 郭渠,李瑞,阮定伦,张天宇. 重庆地区冬季雾气候变化特征及其成因分析. 气象与环境学报, 2018, 34(5): 47-56.
- [15] Sawaske S R, Freyberg D L. Fog, fog drip, and streamflow in the Santa Cruz Mountains of the California Coast Range. Ecohydrology, 2015, 8(4): 695-713.
- [16] Carmichael M J, White J C, Cory S T, Berry Z C, Smith W K. Foliar water uptake of fog confers ecophysiological benefits to four common tree species of southeastern freshwater forested wetlands. Ecohydrology, 2020, 13(7): 1-13.
- [17] Emery N, Lesage J. Late summer fog use in the drought deciduous shrub, *Artemisia californica* (Asteraceae). Madroño, 2015, 62(3): 150.
- [18] Ingraham N L, Matthews R A. The importance of fog-drip water to vegetation: point Reyes Peninsula, California. Journal of Hydrology, 1995, 164(1/2/3/4): 269-285.
- [19] Scholl M A, Gingerich S B, Tribble G W. The influence of microclimates and fog on stable isotope signatures used in interpretation of regional hydrology: East Maui, Hawaii. Journal of Hydrology, 2002, 264(1): 170-184.
- [20] Liu W J, Zhang Y P, Li H M, Liu Y H. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China: a preliminary study. Water Research, 2005, 39(5): 787-794.
- [21] 陈建生,赵洪波,詹沪成. 赤水林区旱季雾水对地表径流的水量贡献. 水科学进展, 2016, 27(3): 377-384.

- [22] 徐向华, 穆彪, 何佩云, 熊中华. 赤水景区旅游气候资源分析与评价. 贵州大学学报: 农业与生物科学版, 2002, 21(5): 320-326.
- [23] 翁玲, 陈宇. 赤水丹霞气候分析. 农业与技术, 2012, 32(3): 94-95.
- [24] 杨广斌, 安裕伦, 屠玉麟. 基于 GIS 和 RS 的赤水桫欏自然保护区生态环境调查. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(11): 125-130.
- [25] 穆彪, 张宗兰, 刘宗富. 赤水林区气候特征. 山地农业生物学报, 1999, 18(2): 68-73.
- [26] 陈建庚. 中国丹霞第一瀑——赤水十丈洞成因探讨. 贵州科学, 2003, 21(4): 63-67.
- [27] 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. *Hydrological Processes*, 2011, 25(3): 353-366.
- [28] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 刘歆, 刘澄静, 闫晓景, 王梅. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1094-1103.
- [29] 马潜. 基于降水同位素样品的兰州地区水汽来源研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
- [30] 黄锦忠, 谭红兵, 王若安, 温夏伟. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究. 水文, 2015, 35(1): 33-39, 50.
- [31] 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 谢自楚. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源. 冰川冻土, 2009, 31(4): 613-619.
- [32] 李广, 章新平, 张新主, 吴华武, 孙广禄, 黄一民. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1458-1465.
- [33] 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁. 滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源. 环境科学, 2016, 37(4): 1313-1320.
- [34] 朱磊, 范弢, 郭欢. 西南地区大气降水中氢氧稳定同位素特征与水汽来源. 云南地理环境研究, 2014, 26(5): 61-67.
- [35] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和¹⁸O 同位素的研究. 中国岩溶, 2004, 23(4): 304-309.
- [36] Ian D C, Peter F. 水文地质学中的环境同位素. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [37] 贺强, 孙从建, 吴丽娜, 张永清, 陈伟. 基于 GNIP 的黄土高原区大气降水同位素特征研究. 水文, 2018, 38(1): 58-66.
- [38] 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义. 环境科学, 2018, 39(6): 2661-2672.
- [39] Mahindawansa A, Jost M, Gassmann M. Spatial and temporal variations of stable isotopes in precipitation in the mountainous region, North Hesse. *Water*, 2022, 14(23): 3910.
- [40] Kaseke K F, Wang L X, Seely M K. Nonrainfall water origins and formation mechanisms. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1603131.
- [41] 詹沪成, 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(04): 10-17.
- [42] 吴华武, 章新平, 孙广禄, 黄一民, 申林, 郭丽香. 湖南长沙地区大气降水中稳定同位素特征变化. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 540-546.
- [43] 隋明滨, 张瑛, 徐庆, 高德强, 王婷, 汪思龙. 水汽来源和环境因子对湖南会同大气降水氢氧同位素组成的影响. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1791-1799.
- [44] Zhou J, Liu G D, Meng Y C, Xia C C, Chen K, Chen Y. Using stable isotopes as tracer to investigate hydrological condition and estimate water residence time in a plain region, Chengdu, China. *Scientific Reports*, 2021, 11: 2812.
- [45] Kuo C H, Li P Y, Lin J Y, Chen Y L. Integrating stable isotopes with mean residence time estimation to characterize groundwater circulation in a metamorphic geothermal field in Yilan, Taiwan. *Water*, 2022, 14(1): 97.
- [46] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义. 环境科学, 2021, 42(4): 1739-1749.
- [47] Prada S, Cruz J V, Figueira C. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 409-425.
- [48] Scholl M A, Murphy S F. Precipitation isotopes link regional climate patterns to water supply in a tropical mountain forest, eastern Puerto Rico. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 4305-4322.
- [49] Hutley L B, Doley D, Yates D J, Boonsaner A. Water balance of an Australian subtropical rainforest at altitude: the ecological and physiological significance of intercepted cloud and fog. *Australian Journal of Botany*, 1997, 45(2): 311.
- [50] Ritter A, Regalado C M, Aschan G. Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the garajonay National Park (canary islands): a combined approach using artificial fog catchers and a physically based impaction model. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(5): 920-935.
- [51] 边俊景, 孙自永, 周爱国, 余绍文. 干旱区植物水分来源的 D、¹⁸O 同位素示踪研究进展. 地质科技情报, 2009, 28(4): 117-120.
- [52] Dawson T E. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia*, 1998, 117(4): 476-485.