

百色干热河谷地区降雨氢氧稳定同位素特征及芒果树水分来源研究

王 升^{1,2}, 黄玉清^{1,2}, 丁亚丽³, 赵银军²

1. 广西百色国家农业科技园区管理委员会, 广西百色 533612; 2. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西南宁 530001; 3. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084

摘 要: 百色市右江河谷是我国著名的干热河谷之一, 干旱是该地区最严重的气象灾害。芒果是该地区地理标志农产品, 但其水分利用策略尚不清楚。本文基于氢氧稳定同位素示踪技术研究该地区降雨同位素特征及影响因素, 利用多元线性混合模型方法量化不同来源水分对芒果树根系吸水的贡献比例, 揭示芒果树生育期内水分利用策略。结果表明: (1) 研究区氢氧稳定同位素具有明显的季节变化, δ 值和氘盈余(d)具有旱季富集、雨季贫化的规律, 建立了研究区的大气降水线方程: $\delta D=8.2587\delta^{18}O+12.308$, δD 和 $\delta^{18}O$ 值有极显著相关性($r=0.9968, n=35, P<0.001$); (2) 季风气候影响下大气降水稳定同位素值具有显著的降雨量效应和反温度效应($P<0.05$); (3) 在芒果花期、幼果期、果实膨大期和成熟期, 土壤水氢氧稳定同位素总体上随土壤深度的增加而变贫; 在花期和幼果期, 芒果树对各层次土壤水分及地下水利用比例较为均匀, 果树膨大期和成熟期则主要利用深层次土壤水及地下水, 表明该地区芒果树主要以深层次土壤水及地下水为水源, 说明芒果树更接近于保守型水分利用策略。降雨氢氧稳定同位素特征反映了该地区干热的气候特征, 芒果树主要以深层土壤水和地下水为水源。研究结果可为百色干热河谷地区芒果园种植结构调整及芒果产业的可持续发展提供科学依据。

关键词: 干热河谷; 大气降雨; 芒果; 氢氧同位素; 植物水分来源

中图分类号: P426.612 文献标识码: A

Characteristics of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic of Precipitation and Water Use Strategy of Mango in Baise Dry-hot River Valley Region

WANG Sheng^{1,2}, HUANG Yuqing^{1,2}, DING Yali³, ZHAO Yinjun²

1. Administration Committee of Baise National Agricultural Sci-tech Zone, Baise, Guangxi 533612, China; 2. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Nanning Normal University), Ministry of Education, Nanning, Guangxi 530001, China; 3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Youjiang River Valley in Baise is one of the famous dry and hot river valleys in China. Drought is the most serious meteorological disaster in the region. It has a unique suitable environment for mango and is the main mango producing area in China. However, the research on the water use strategy of Mango in Baise dry-hot river valley region is still lacking. Based on the measuring of hydrogen and oxygen stable isotope of precipitation, soil water at different layers, groundwater, and mango xylem water, the variation characteristics of hydrogen-oxygen isotope and its influencing factors of precipitation were analyzed, and the water absorption sources of mango roots at different growth stages were quantified. The hydrogen-oxygen stable isotopes and d-excess had obvious seasonal changes in the year, which were low in rainy season and high in dry season. The local meteoric water line was $\delta D=8.2587\delta^{18}O+12.308$

收稿日期 2022-04-21; 修回日期 2022-05-06

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 42167038); 广西科技计划项目(桂科 AD19110140); 中央引导地方科技发展资金项目(桂科 AD20238026)。

作者简介 王 升(1987—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 水文过程及水土资源高效利用, E-mail: hbws@nnnu.edu.cn。

($r=0.9968$, $n=35$, $P<0.001$) for the area. Under the influence of monsoon climate, the stable isotope value of precipitation had a significantly negative linear relationship with precipitation amounts and air temperature ($P<0.05$). During mango flowering stage, young fruit stage, fruit expansion stage, and mature stage, the stable isotopes of soil water became poor with the increase of soil depth. In the flowering stage and young fruit stage, mango trees used a relatively uniform proportion of soil water at different depths and groundwater, while in the expansion stage and maturity stage, mango trees mainly used deep soil water and groundwater, indicating that mango trees in this area mainly use deep soil water and groundwater as water sources, as mango trees' roots are mainly distributed in deep layers, and reveals its conservative water use strategies. The variation of hydrogen-oxygen stable isotopes of precipitation indicates the xerothermic environment of Baise dry-hot river valley region, and mango mainly uses deeper soil water and groundwater, the above results are expected to provide a basis for the sustainable development of mango industry in this area.

Keywords: dry-hot river valley; precipitation; mango; stable hydrogen and oxygen isotope; plant water source

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.013

位于百色市的右江河谷是我国著名的干热河谷之一，被誉为“天然温室”^[1]。该地区属于亚热带季风气候区，具有光、热能充足，水热同期、夏季高温多雨、干湿季节分明且无冬季的河谷干热气候特征，具备芒果得天独厚的适生环境，种植芒果已有 100 多年历史，目前已逐步成为我国芒果主产区。截止 2021 年 8 月，百色芒果种植总面积已达 8.9 万 hm^2 ，面积和产量均占全国的近三成，“百色芒果”获“国家级农产品地理标志示范样板”称号，芒果产业已成为百色革命老区脱贫致富的主要途径之一。然而，该地区年平均温度 $22.2\text{ }^\circ\text{C}$ ，年均降水量 1165.8 mm，年蒸发量 1681.7 mm，蒸发量大于降水量，是全区最干旱的地区之一^[2]，有“十年十旱”之称（尤其是春旱发生的频率达 70%~90%），旱灾已成为右江河谷旱地作物生长发育及产量提高的主要制约因素。已有研究表明右江河谷旱作全生育期的平均水分条件是亏缺的，且近 40 年来右江河谷作物生育期内有效降水量呈下降趋势^[3]。百色芒果园 80%以上分布于山地上，基础设施落后，水电缺乏，旱季能够使用地头水柜等简陋设施灌溉的果园面积仅占全市芒果园面积的 19.5%，而完全靠雨养果园的面积达 80.0%，抵抗旱灾的能力较低。芒果果实生长发育的大部分时间在旱季，水源或者灌溉设施匮乏致使芒果关键需水时期水分难以得到保证，产量波动大。在干热河谷生境下，芒果树对土壤水分的吸收利用是否存在季节性转变特征尚不清楚，不同物候期的主要水分来源（如浅层土壤水、深层土壤水或地下水等）及各水源贡献比例也未明确^[4]。

水循环是地球物质循环的重要组成部分，也是物质和能量迁移的动力和载体之一。降水是大

气圈和水圈物质与能量交换最积极的一部分，且降水氢氧同位素具有时空差异性，其变化受到温度、湿度、气压、降水量、水汽来源等因素的影响^[5]。作为流域的主要水分来源，降水中的氢氧同位素特征对该区域内各水体（土壤水、地下水和植物水等）中的氢氧同位素有根本性的影响，是利用同位素技术在该地区开展水循环研究的基础^[6-7]。了解不同时空尺度降水中氢氧同位素组成对生物地球化学研究十分必要^[8]，如研究土壤水和地下水补给、地下水滞留时间、植物水分来源等^[7]。

稳定同位素技术过去主要应用于水分循环及水分运移等方面，相比传统的水文研究方法，如水量平衡、空气动力学及模型模拟等方法，由于其具有精量、精细、精准和可控性，自 20 世纪 90 年代以来，开始广泛应用于植物水分来源研究^[4]。通过测定植物木质部水分和不同水源（不同季节降水、雾水，不同层次土壤水、地下水、地表径流等）的氢和氧同位素组成来分析植物水源，可判断植物根系有效吸水区域，且有助于解释植物水分利用策略对环境水分变化的适应^[9]。前人研究表明不同功能型植物利用水分的方式不同，如禾本科等草本植物和仙人掌类植物主要利用来自近期降水的浅层土壤水，河岸带树木和深根系植物则主要利用深层土壤水或地下水^[10]，而灌木类常利用几种水源的混合水^[11]，即综合应用了雨水、土壤水、地下水和河水^[12-13]。基于氢氧同位素方法对南方丘陵区幼年油茶水分来源的研究发现，果实生长高峰期主要应用了 0~30 cm 深度的土壤水，0~30、30~60、60~100 cm 土壤水的贡献率分别为 51.3%、28.2%和 20.5%^[12]。综上，稳定性氢氧同位素示踪技术作为植物水分关系过程研究的有效手段，定量判别估算作物生长期对潜在水源

的利用比例以及季节性转变模式,有助于推动区域生态水文效应的模拟和预测。

在全球气候变化的大背景下,目前缺乏对于热河谷地区降雨氢氧稳定同位素特征及芒果树根系吸水来源方面的研究。百色干热河谷地区降雨氢氧稳定同位素组成随季节如何变化?不同生育期芒果树分别利用了哪个层次的水分?本研究应用氢氧稳定同位素示踪技术,分析降雨氢氧稳定同位素动态变化及其影响因素,综合直接对比法和线性混合模型方法探讨百色干热河谷地区芒果树根系吸水来源,并量化各潜在水源的贡献比例,以期为该地区农业水资源高效利用及芒果产业可持续发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西百色市田阳县百育镇,是典型的干热河谷区,地貌以河谷冲积平原和小丘陵为主。属亚热带季风气候,年均温度 22.2℃,最冷月 1 月平均温度 13.7℃,最热月 7 月平均温度 28.4℃,极端最高温度 42℃,极端最低温度 -1.7℃,温度水平差异小,垂直差异大。年际间最大年降水量 1668.7 mm,最小年降水量 832.2 mm,多年平均降水量 1165.8 mm,年蒸发量 1681.7 mm。雨季平均开始于 5 月上旬,结束于 9 月下旬,平均持续 132 d。降水量南北山区多,中间河谷少,夏季多,冬季少,干湿季分明。年均日照时数 1711.2 h。

在百色市国家农业科技园区芒果庄园(106°59'E, 23°41'N)开展研究,芒果园属低山丘陵坡地,坡向西北,无灌溉。试验品种为 30 年生‘贵妃芒’,长势一致,无病虫害,种植密度为 500 株/hm²,株行距 4.00 m×5.00 m。平均树高 2.90 m,平均胸径 20.30 cm,平均南北冠幅 2.92 m,平均东西冠幅为 3.14 m。果园定期进行病虫害防治,适时拉枝剪梢、套袋、保墒追肥,定期清除杂草,果树生长管理措施在该区域具有代表性。

1.2 降水样品采集及测定

该地区的降水均以降雨的形式出现,雨水收集采用国际原子能机构全球大气降水网络计划(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)推荐的方法和装置,采用超纯水清洗棕色收集瓶,烘干,然后置于离地面 2 m 高的位置,雨水通过漏斗进入密闭的收集瓶,漏斗内放置一

个乒乓球以防止蒸发,收集过程中注意密封,尽量避免收集的雨水样品与外界空气进行交换,将蒸发的影响降到最低。雨水样品装入 2 mL 冷冻管后用 parafilm 封口膜密封,放于冰箱 4℃ 冷藏保存,待测水中氢氧同位素组成^[14-15]。自 2020 年 7 月—2021 年 10 月,共收集 35 份雨水样品。

所有降水水样的氢氧稳定同位素组成由北京松盛华嘉检测技术有限公司进行测试分析,所用仪器为 LGR 水同位素分析仪(型号:912-0050)。水样上机测试之前用 0.22 mm 孔径的滤膜进行过滤,以去除水样中的杂质。测试结果用相对于 V-SMOW(维也纳标准平均海水)标准的 δ(‰)表示:

$$\delta D = \left[\frac{(^2H/^1H)_{\text{sample}}}{(^2H/^1H)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 1000$$

$$\delta^{18}O = \left[\frac{(^{18}O/^{16}O)_{\text{sample}}}{(^{18}O/^{16}O)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 1000$$

式中, sample 为待测样品, VSMOW 为标准样品, δD 值的测试误差不超过 ±1‰, δ¹⁸O 值的测试误差不超过 0.2‰。此外,氡盈余(*d*)为 δD 与 8δ¹⁸O 之差,反映了水汽源地、空气湿度、水汽路径等。

1.3 土壤水、地下水及芒果茎秆水取样及测定

于 2021 年 3—6 月(芒果的重要生育期:花期、幼果期、果实膨大期及成熟期)对百色市田阳县百育镇芒果园土壤与植株进行调查取样,采样时间分别为 3 月 11 日、4 月 10 日、5 月 15 日和 6 月 17 日。

土壤样品采集:按照 10、20、30、40、60、80、100 cm 深度在芒果树根系附近 0~60 cm 土层内用土钻采集土壤样品,每层采集铝盒样品和同位素样品各 1 份,铝盒土样用烘干法(105℃, 12 h)测定土壤含水量,同位素样品装入采样瓶内并用 parafilm 封口膜密封以防止蒸发,放入便携式冰盒(4℃),带回实验室后冷藏保存,后期在实验室内利用植物土壤水分真空抽提系统提取土壤中的水分。

植物样品采集:截取 4~5 节 10 cm 左右长度的芒果树栓质小茎,并立即剥离韧皮部后装入 10 mL 螺口玻璃样品瓶中,拧紧瓶盖,用 parafilm 封口膜密封以防止蒸发,放入便携式冰盒(4℃),带回实验室后冷冻(-20℃)保存,待真空提取植物水样。

地下水样品采集:在芒果园附近泉水口采集

地下水 2 mL 于采样瓶,用 parafilm 封口膜密封以防止蒸发,放入便携式冰盒(4℃),带回实验室后冷藏保存。

土壤水和植物水萃取:植物和土壤样品的水分提取采用真空冷冻蒸馏法,使用真空抽提系统(北京理加联合科技有限公司)进行低温真空抽提。将收集好的液态水装入 2 mL 玻璃瓶待测。植物和土壤抽提的液态水样品的氢氧同位素含量同样采用 LGR 水同位素分析仪测定。

1.4 植物水源判断方法

1.4.1 直观相关法 顾名思义就是指将树茎水与不同潜在水源的 δD 和 $\delta^{18}O$ 进行直接对比,当其与某潜在水源 δD 和 $\delta^{18}O$ 交叉或者相近时,就大致可以定性判断出植物水分利用来源所处的土壤深度。但利用直观相关法进行分析时,有一个先决条件,即在任意时间,植物优先利用某一特定层次的土壤水。

1.4.2 多元线性混合模型法 根据同位素质量守恒原理,PHILLIPS 等^[16]提出了多元线性混合模型法确定植物对各潜在水源的利用比例,建立了 Isosource 模型。同位素种类最多可输入 5 种,水分来源最多可输入 10 种, Mixtures 表示植物木质部水的同位素值,对来源增量(source increment)和质量平衡公差(mass balance tolerance)分别赋值为 1%(表示以 1%的增量赋值植物对各水源的利用比例,用以检测可能的比例组合)和 0.1%(表示各水源同位素值被利用比例加权值之和与植物木质部水同位素值的差异不差过 0.1‰,此时的比例组合被认为是可能的组合)。质量平衡公差越大,可接受的值也越多。PHILLIPS 等^[16]认为质量平衡

公差不小于来源增量与各可能最大水源同位素值之间最大差值的乘积的 1/2。

2 结果与分析

2.1 降雨氢氧稳定同位素组成及其影响因素

通过采样分析,实验区域 2020 年 7 月—2021 年 10 月降水同位素值 $\delta^{18}O$ 变化范围为 $-15.75‰\sim-0.97‰$, 年均值为 $-7.39‰$; δD 变化范围为 $-116.03‰\sim 4.35‰$, 年均值为 $-48.70‰$; 氘盈余 d 的变化范围为 $4.92‰\sim 14.82‰$, 平均值为 $10.78‰$ (表 1、图 1)。 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d 的月均值最大值均出现在 4 月,分别为 $-1.81‰$ 、 $-1.73‰$ 和 $12.76‰$; 最小值均出现在 8 月,分别为 $-11.13‰$ 、 $-81.29‰$ 和 $7.92‰$ 。 $\delta^{18}O$ 和 δD 月变幅最大的月份均为 8 月,变化范围分别为 $-15.75‰\sim-7.73‰$ 、 $-116.03‰\sim-55.32‰$; 变幅最小的月份均为 4 月,变化范围分别为 $-2.63‰\sim-0.97‰$ 、 $-9.33‰\sim 4.35‰$ 。整体而言,雨季降水中的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值均低于旱季,雨季变幅大于旱季。

由表 1 可见,研究区实验期间 35 场降雨中, d 值小于 $10‰$ 的降水次数为 14 次,占 40%,这部分水汽可能是由于海洋水汽远距离补给, d 值微升。降水中的 d 值呈现雨季低而旱季高的特点,说明在雨季,百色地区降水的水汽主要来自低纬度海洋,空气湿度大,降水过程中蒸发微弱以及远距离水汽输送导致同位素贫化, d 值较小。干燥水汽可以显著增加降水中的 d 值,干燥水汽来自于大陆盆地或途径内陆;在旱季,受大陆性气团的控制,该地区降水的水汽可能来源于区域再蒸发水汽的补给,空气湿度小,蒸发较强,导致

表 1 研究区降雨 $\delta^{18}O$ 、 δD 和氘盈余月统计特征

Tab. 1 Monthly variation of $\delta^{18}O$, δD and d -excess in precipitation

月份 Month	$\delta^{18}O/‰$			$\delta D/‰$			氘盈余 $d/‰$		
	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min
4	-1.81	-0.97	-2.63	-1.73	4.35	-9.33	12.76	14.43	11.73
5	-3.72	-2.03	-8.54	-17.87	-6.27	-56.60	11.89	13.74	9.99
6	-6.54	-5.43	-7.21	-42.74	-36.35	-47.45	9.58	11.52	6.97
7	-7.41	-5.71	-8.88	-48.66	-36.41	-60.08	10.62	12.80	8.62
8	-11.13	-7.73	-15.75	-81.29	-55.32	-116.03	7.92	11.38	4.92
9	-8.10	-5.43	-11.11	-53.92	-31.43	-78.03	10.86	11.97	9.77
10	-9.14	-6.37	-11.37	-61.30	-38.09	-78.35	11.81	14.82	7.92
总计	-7.39	-0.97	-15.75	-48.70	4.35	-116.03	10.78	14.82	4.92

降水中重同位素富集, d 值较大。张君等^[15]在桂西北的研究也有类似相关的结果, 即春季 (13.27‰) 和冬季 (17.05‰) 的氘盈余大于夏季 (10.12‰) 和秋季 (11.07‰)。

降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d 与日平均温度变化的关系见图 1, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与日平均气温呈相反的变化趋势, 表现为随着气温的降低而升高、随气温的升高而降低。对其进行相关性分析 (图 2),

可见降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与日平均气温呈极显著负相关。

图 2 还表明, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值随降雨量的增大而偏贫化, 即降水中氢氧稳定同位素值与降雨量之间呈显著负相关 ($P < 0.01$)。本研究中大气降水同位素表现出明显的“降雨量效应”, 即降雨量与同位素的负相关关系, 这可能与本研究区位于中低纬度受到强对流天气的影响有关。

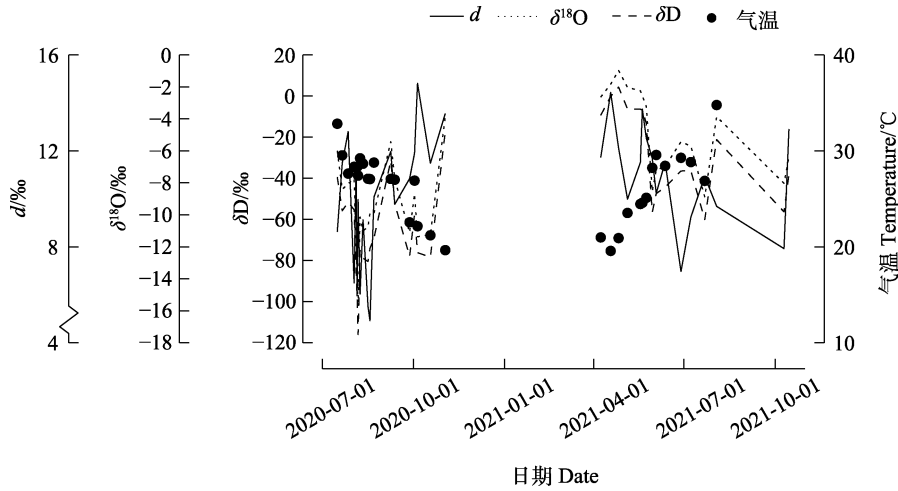


图 1 研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 d 及气温变化

Fig. 1 Variation of $\delta^{18}\text{O}$, δD , d in precipitation and air temperature

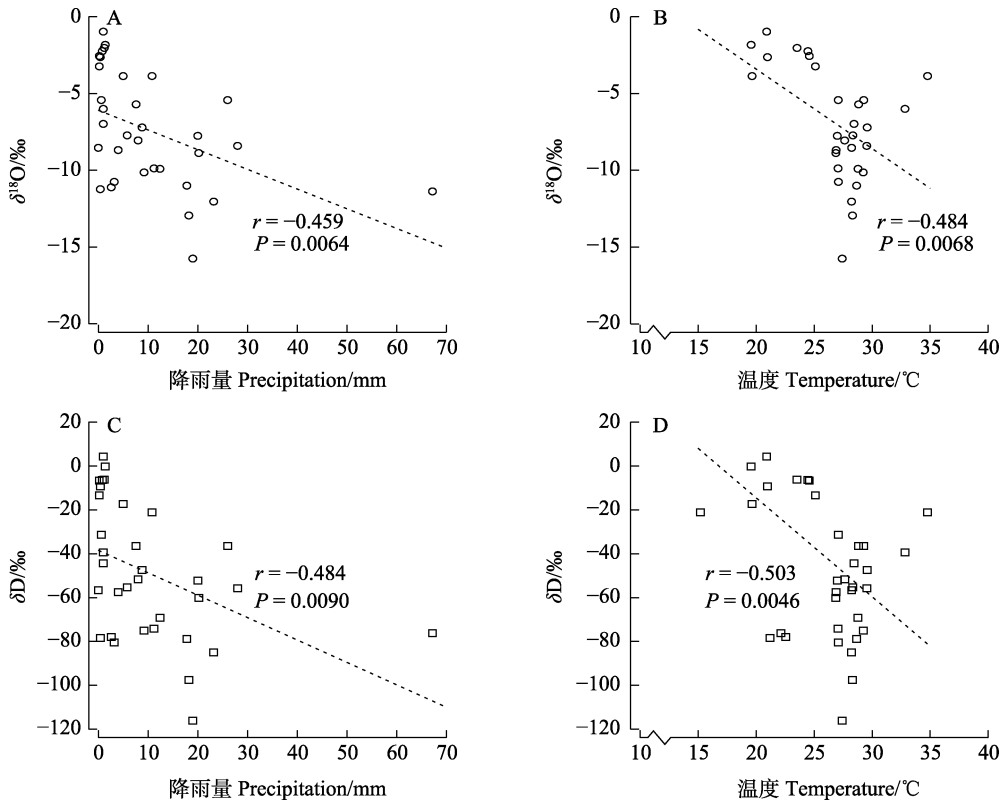


图 2 研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与降水量 (A、C)、气温 (B、D) 在次降雨尺度变化的关系

Fig. 2 Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and rainfall amount (A, C) and air temperature (B, D)

2.2 当地大气降水线

在水的蒸发和凝结过程中,存在 H₂O 和 HDO 之间蒸汽压变化与 H₂¹⁶O 和 H₂¹⁸O 之间蒸汽压变化的比例关系, δD 和 δ¹⁸O 的平衡分馏系数值 *S* ≈ 8.2 (*T*=25℃), 所以导致水体中 D 和 ¹⁸O 的线性关系^[7]。这一关系用最小二乘法表示, 即为大气降水线方程, 其揭示的是水汽在其源地非平衡蒸发以及水汽在凝结过程中平衡分馏条件下降水中稳定同位素比率 δD 和 δ¹⁸O 之间的对比关系, 其斜率反映两类稳定同位素 δD 和 δ¹⁸O 分馏速率的对比关系, 截距表示氘对平衡状态的偏离程度, 对研究区域水文循环过程具有重要意义^[13]。图 3 为研究区大气降水线, 方程为 δD=8.2587δ¹⁸O+12.308, δD 和 δ¹⁸O 值有极显著相关性 (*r*=0.9968, *n*=35, *P*<0.001)。当地大气降水线方程的斜率和截距分别为 8.2587 和 12.308, 与全球大气降水线方程 δD=8δ¹⁸O+10 相比, 研究区降水线方程斜率和截距均偏大。由于 δD 值与 δ¹⁸O 值之间存在显著的线性关系, 因此本文其余部分使用 δD 值来反映降雨同位素特征。

2.3 芒果树水分来源

2.3.1 土壤含水量及土壤水的氢氧同位素变化特征 4 次取样前期降水和日均温如表 2 所示, 芒果园各月土壤含水量如图 4 所示。2021 年 3—6 月, 日均温逐渐升高。由于 2021 年 3 月 11 日前期降水较少 (1 月和 2 月总降雨量仅为

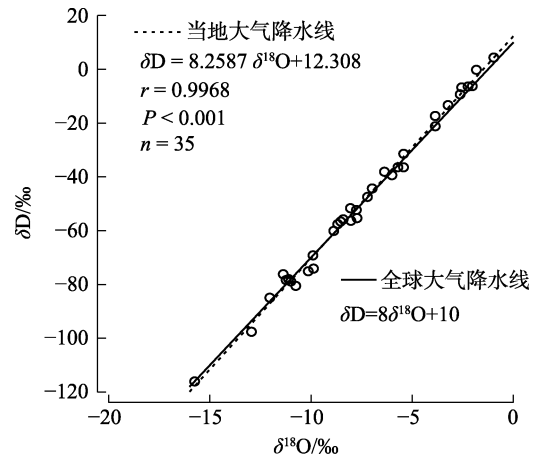


图 3 研究区当地大气降水线与全球大气降水线对比
Fig. 3 Comparison of local meteoric water line in study area and global meteoric water line

51.4 mm), 无雨天数较长, 土壤含水量较低 (18.9%)。2021 年 4 月 10 日采样时, 由于 3 月较多降雨的补给 (187.8 mm), 土壤含水量有所上升 (20.3%)。2021 年 5 月 15 日采样时, 可能是由于采样前降雨较少 (5 月 1 日至 5 月 14, 仅 5 月 11 日降雨 19.2 mm), 且气温较高 (28.5℃)、蒸发强烈, 导致土壤含水量下降 (17.3%)。2021 年 6 月 17 日采样时, 经过降水补给 (6 月 3 日和 6 月 5 日降水量分别为 57.2 mm 和 98.8 mm), 土壤含水量达到较高水平 (21.6%)。从土壤含水量的动态变化中可以看出高温、蒸发强烈的夏季, 干热河谷区作物容易遭受水分胁迫。

表 2 土壤取样时芒果生育期及前期天气概况

Tab. 2 Growth periods and weather conditions during sampling days

日期 Date	生育期 Growth period	前期降水情况 Antecedent precipitation	日均温 Mean air temperature/℃
2021-03-11	花期	6 d 无雨	23.4
2021-04-10	幼果期	3 d 无雨	25.5
2021-05-15	果实膨大期	3 d 无雨	28.5
2021-06-17	成熟期	7 d 无雨	28.9

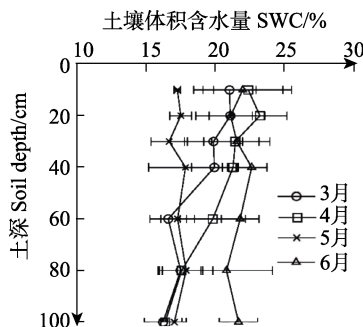


图 4 2020 年研究区土壤体积含水量动态变化
Fig. 4 Variation of volumetric soil water content at study area in 2020

芒果园土壤水 δD 值随土壤深度的变化特征见图 5, 总体来看, 土壤水中氢稳定同位素的变化具有一定的规律性: 不同月份土壤水 δD 总体上随土壤深度的增加而变贫, 表层的同位素丰度较为富集, 而后随着深度的增加逐渐贫化, 在 60 cm 以下深度则保持一个比较稳定的状态。土壤表层氢氧同位素较为富集是由于受地表蒸发和树木截留水分蒸发的影响, 但对于深层的土壤, 只有当降雨达到一定量 (超过冠层截留量和表层土壤一定补给量) 时才开始入渗补给深层土壤水

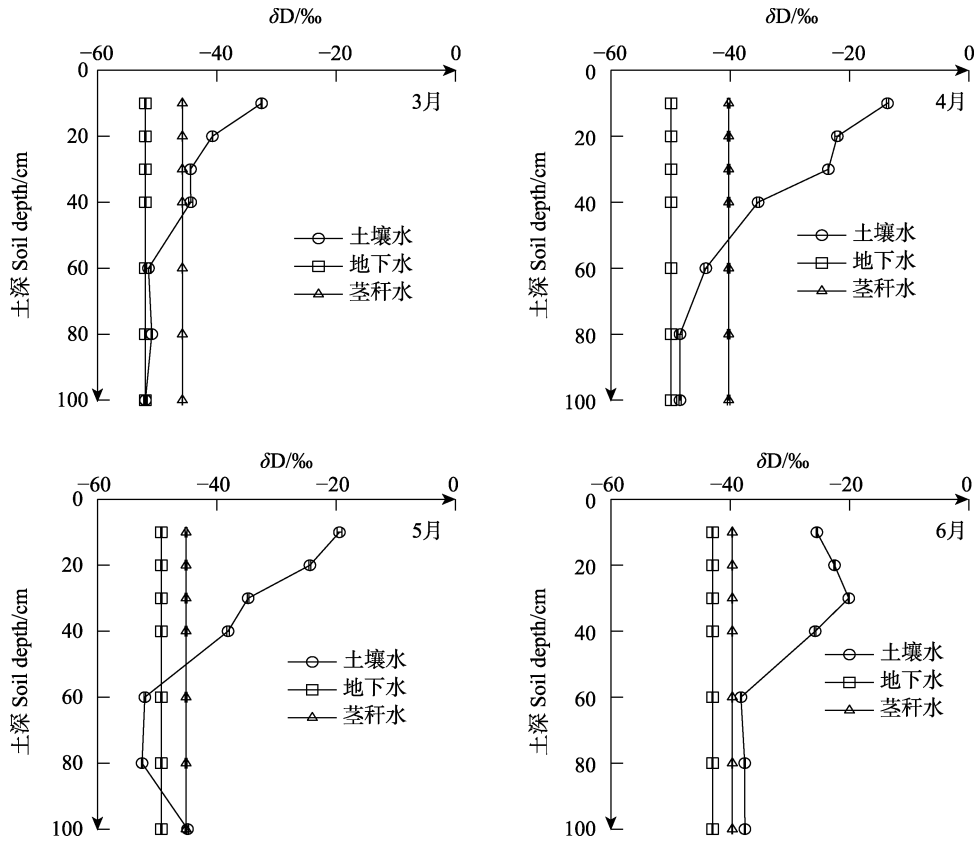


图 5 芒果园地下水、芒果茎秆及土壤水 δD 变化特征

Fig. 5 Variation of δD in groundwater, xylem water, and soil water at mango garden

分，因此表现为深层土壤层中 δD 值较小。

比较 δD 值在不同月份、不同土壤深度之间的分布特征 (图 6)。整体来看，3—6 月 δD 平均值依次为 $-45.185\% \pm 0.170\%$ 、 $-33.635\% \pm 0.256\%$ 、 $-38.029\% \pm 0.184\%$ 和 $-29.595\% \pm 0.101\%$ 。结合土壤含水量和各月降水量，可见由于 3 月之前较为干旱，导致 3 月氢同位素较为贫化；随着 3、4 月降水的增加，雨水在下渗过程中挟带重同位素补

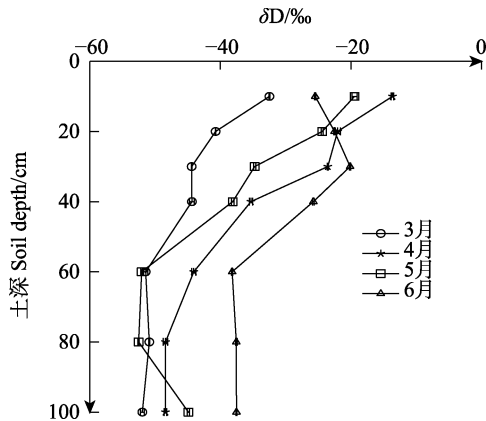


图 6 不同月份芒果园土壤水 δD 变化特征

Fig. 6 Variation of δD in soil water at mango garden

充到各层土壤中，使 4 月氢同位素丰度较为富集；由于 5 月中上旬基本无降水，导致 5 月的氢同位素值又贫化而偏负；经过 6 月初较大降水补给 (6 月 3 日和 6 月 5 日降水量分别为 57.2 mm 和 98.8 mm)，6 月氢同位素丰度又得到提升。

2.3.2 芒果树水分来源 利用直观相关法对不同月份芒果树茎水、土壤水及地下水 δD 进行对比，若与芒果树茎水同位素值接近或相交即为芒果树吸水来源区域。由图 5 可知，不同月份芒果树茎水与土壤水均有交叉或接近于地下水，初步判断芒果树同时利用 60 cm 以下土层的土壤水及地下水。3 月芒果树木质部水分 δD 值为 -45.771% ，与 30、40 cm 及以下土壤水分及地下水 δD 值相近；4 月芒果树木质部水分 δD 值为 -40.246% ，与 40 cm 及以下土壤水及地下水 δD 值相近；5 月芒果树木质部水分 δD 值为 -45.155% ，对应于 60 cm 及以下土壤水和地下水 δD 值；6 月芒果树木质部水分 δD 值为 -39.640% ，与 60 cm 及以下土壤水和地下水 δD 值相近。综合来看，芒果树在雨季初期主要利用中下层土壤水分及地下水，雨季主要利用深层土壤水及地下水。同时可见，

直观相关法属于定性方法，精确性欠佳，尚需借助定量算法进一步明确主要吸水来源及其贡献率。

利用多元线性混合模型（基于 IsoSource 软件）定量研究芒果树对各层土壤水源及地下水的利用比例，在分析过程中以 δD 值的分析结果为主（表 3），3 月及之前降雨较少，芒果树在花期对各土层土壤水分及地下水利用较为均匀，对

20~40 cm 处土壤的水分利用比例稍高；4 月幼果期主要利用 40 cm 以下土层土壤水及地下水；5 月果实膨大期和 6 月成熟期均主要利用 60 cm 以下土壤水及地下水，特别是在成熟期对地下水利用比例达到 58.9%。表明干热河谷地区芒果树主要以深层土壤水及地下水为水源，这是由于芒果树根系主要分布在深层，说明芒果树更接近于保守型水分利用策略。

表 3 基于 δD 的不同深度土壤水及地下水对芒果树根系吸水的贡献率

Tab. 3 Contribution rates of soil water at different depths and groundwater to mango tree at different growing stage based on δD

月份 Month	土壤水贡献率 Contribution rates of soil water/%							地下水贡献率 Contribution rate of groundwater/%
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	
3	11.3	14.5	15.1	15.1	11.5	11.8	11.3	11.3
4	6.2	7.9	8.3	12.5	16.2	16.9	16.9	17.0
5	4.4	5.2	8.1	9.8	20.3	20.5	14.9	18.6
6	2.6	2.1	1.8	2.7	12.2	10.7	10.6	58.9

3 讨论

3.1 降雨氢氧稳定同位素组成及其影响因素

中国降水年均 $\delta^{18}O$ 变化范围为 -13.9‰ ~ -3.6‰ ， δD 变化范围为 -134‰ ~ -17‰ ^[13]，本研究中 $\delta^{18}O$ 和 δD 的变化范围在中国降水氢氧同位素的变化范围内。张君等^[15]分析了西南喀斯特小流域 2013—2018 年日尺度降水的氢氧稳定同位素值，发现 $\delta^{18}O$ 变化范围为 -15.20‰ ~ 1.06‰ ， δD 变化范围为 -118.88‰ ~ 32.00‰ ， d 值介于 -9.25‰ ~ 33.89‰ 之间，平均值为 12.02‰ ^[15]，本研究区域（位于百色市）与其研究小流域（位于河池市）均位于桂西北地区，因此 $\delta^{18}O$ 、 δD 和 d 值的变化范围也在该范围内。张君等^[15]的研究结果表明重同位素值相对较高，如 $\delta^{18}O$ 最大值为 1.06‰ ， δD 最大值为 32‰ ，这是由于其收集了所有降水，包括小于 20 mm 的降水，甚至对 2 mm 的降水也进行了测定，这类降水往往表现出重同位素特征，造成了重同位素值范围比较大。

大气降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 值的变化与产生降水的物理过程密切相关，其中水循环过程中的蒸发和凝结过程对 $\delta^{18}O$ 和 δD 值大小的影响最显著。降水中的氢氧同位素一般存在以下规律： δ 值向远离海岸线的方向降低的大陆效应，沿纬度升高方向降低的纬度效应，沿高程增加方向减少的高程效应，随地面气温升高而增大的温度效应，随降水量增大而减少的降水量效应^[5]。降水量效应

主要发生在低纬度热带地区，而温度效应主要发生在高纬度地区^[17]。温度是影响蒸发和凝结过程的重要因素之一，本研究表明试验区存在反温度效应。张君等^[15]在桂西北（河池市）喀斯特小流域的研究也发现 $\delta^{18}O$ 与日均气温的极显著负相关关系，温度每升高 1℃ ， $\delta^{18}O$ 值降低 0.27‰ 。这与降雨同位素温度效应（指 δ 值随温度升高而升高，原因在于降水云团的冷凝温度与雨水的 δ 值有直接关系，而地面气温在一定程度上与冷凝温度有对应关系）不一致，很多中国南方季风区的研究也表现出反温度效应^[18-19]。其原因在于在受东南季风影响的中国大部分地区，由于水热同步，降雨量效应掩盖了温度效应，导致氢氧稳定同位素与温度的负相关关系。本研究区属于珠江流域，受季风气候、雨滴凝结时的温度以及相对湿度的综合影响，一定程度上消减了温度效应^[19]。SCHOTTERER 等^[20]在关于全球尺度降雨年 $\delta^{18}O$ 平均值与气温的研究中发现二者呈正相关关系。随着全球气候变暖的趋势，降水中的 $\delta^{18}O$ 值也在升高，降水 $\delta^{18}O$ 与气温之间的关系存在时空尺度的差异。本研究还揭示了该地区存在显著的降雨量效应，和临近地区的研究结果^[13, 18-19]相同。张君等^[15]在桂西北喀斯特小流域通用观测到降水中氢氧同位素随降雨量的增大而减小，降雨量每增加 1 mm， $\delta^{18}O$ 值降低 0.05‰ ，且温度对 $\delta^{18}O$ 和 δD 的影响强于降雨量的影响。

张君等^[15]建立的桂西北(河池市)喀斯特小流域的大气降水线方程为 $\delta D=8.37\delta^{18}O+14.45$, 斜率和截距也均大于全球大气降水线方程的斜率和截距, 与本研究的大气降水线方程相近。由于水汽来源、水汽输送方式、地理位置(海拔、经纬度、地带性气候等)及气候条件的差异, 各地大气降水线的斜率和截距不尽相同。本研究建立的方程与纬度相近的如章新平等^[21]报道的长沙($\delta D=8.74\delta^{18}O+15.46$)、涂林玲等^[22]建立的桂林($\delta D=8.42\delta^{18}O+16.28$)、贵阳($\delta D=8.82\delta^{18}O+22.06$)、香港($\delta D=8.08\delta^{18}O+11.08$)及珠江($\delta D=7.68\delta^{18}O+8.73$)^[13]等地的大气降水线方程相近, 表明这些地区的降水与季风类型、水汽来源以及所处气候带相似。另外, 大气越干热, 大气降水线斜率和截距越小^[23], 本研究中百育镇大气降水线的斜率和截距均小于临近地区的贵阳^[13]、河池($\delta D=9.016\delta^{18}O+19.66$)^[24]、桂林^[22]及长沙^[21], 反映了研究区较为干旱、相对湿度较低、降水过程受云霞二次蒸发作用较强的特点^[23]。降水线方程的高截距反映出研究流域以受大陆性局地水汽来源影响为主, 降落到地表的水重新蒸发在当地水汽来源中占很大比例。罗芳芳^[25]获得的云南元谋干热河谷地区的大气降水线方程为 $\delta D=7.56\delta^{18}O-0.988$ ($r=0.984, P<0.001, n=24$), 斜率和截距均比本研究小, 表明该地区更为干热的气候特征。

3.2 芒果树水分来源

总体来看, 在花期和幼果期, 芒果树对各层次土壤水分及地下水利用比例较为均匀, 果实膨大期和成熟期则主要利用深层次土壤水及地下水。表明该地区芒果树在生育期尤其是耗水量较大的阶段, 主要以深层次土壤水及地下水为吸水来源, 这是由于研究区芒果树龄为 30 a, 根系主要分布在深层, 倾向于较为保守的水分利用策略。多数研究表明, 在干旱半干旱地区或蒸发需求较大的旱季, 降水存留周期短, 浅层土壤水分资源大幅减少, 根系较深的乔木或具有二态根系的多年生植物能开发获取更深更广的土壤水分维持蒸腾生长需要, 其下扎的深根可获取相对较稳定的深层土壤水或地下水, 上层根系可以吸收即使是小降水事件仍能得到补给的浅层土壤水分^[9, 11]。

另外, 植物不同生长周期对水分需求量有所差异, 同时受前期降雨格局和根区水分环境的影响, 也会驱动水分吸收来源以及利用策略发生转

变。多数经济果树在果实膨大期耗水量较大, 如陕北山地苹果园苹果树果实膨大期耗水量占全生育期的 44%~47%, 远高于其他时期^[26]。虽然果实膨大期一般发生在雨季, 但由于干热河谷特殊的水热条件, 导致该区域夏季高温、蒸发强烈, 造成土壤含水量下降, 可利用水分减少, 作物反而容易遭受水分胁迫。因此, 该区域芒果树在高温、蒸发强烈的果实膨大期吸收利用深层水分和地下水以维持蒸腾, 保证该生育期的耗水需求得以满足。

此外, 由于取土深度有限, 未能获取更深层土壤水稳定氢氧同位素值参与计算, 因此本研究中芒果树利用了较多地下水, 可侧面反映芒果树利用了更多深层次水分(包括深层土壤水及地下水)。综合研究区芒果园树龄较老、根系深扎、水分利用策略较为保守等特征, 本研究建议针对芒果树不同生育期的需水规律, 采用地下渗灌方式进行合理灌溉, 调节芒果生长状况, 进一步提高芒果水分利用效率和产量品质。

4 结论

百色干热河谷地区降水氢氧同位素在年内具有明显的季节变化, δ 值及氘盈余(d)均呈雨季低而旱季高的特点; 研究区的大气降水线方程为 $\delta D=8.2587\delta^{18}O+12.308$ ($r=0.9968, n=35, P<0.001$)。土壤水氢氧稳定同位素总体上随土壤深度的增加而变贫; 在花期和幼果期, 芒果树对各层次土壤水分及地下水利用比例较为均匀, 果树膨大期和成熟期则主要利用深层次土壤水及地下水, 表明该地区芒果树主要以深层次土壤水及地下水为水源, 说明其倾向于较为保守的水分利用策略。

参考文献

- [1] 黄战威. 广西右江河谷地区芒果产业现状及发展对策[J]. 热带农业工程, 2009, 33(6): 46-49.
HUANG Z W. Present situation of mango industry in Youjiang valley and development strategies[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2009, 33(6): 46-49. (in Chinese)
- [2] 胡宝清. 广西地理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011.
HU B Q. Geography of Guangxi[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 陆耀凡, 廖雪萍, 陈欣, 史彩霞, 林振敏. 广西右江河谷旱作灌溉需水量变化特征[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 100-104.
LU Y F, LIAO X P, CHEN X, SHI C X, LIN Z M. Variation

- characteristics of dry farming irrigation water demand in Youjiang valley of Guangxi[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2015, 36(1): 100-104. (in Chinese)
- [4] BARBETA A, JONES S P, CLAVÉ L, WINGATE L, GIMENO T E, FRÉJAVILLE B. Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a riparian forest[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(4): 2129-2146.
- [5] 韦飞黎, 李双成, 余武生, 谢爱丽, 侯文宇. 降水稳定同位素研究的历史与现状——基于文献计量学及网络分析方法[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2634-2643.
WEI F L, LI S C, YU W S, XIE A L, HOU W Y. A review of stable isotope in precipitation studies based on bibliometric and social network analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2634-2643. (in Chinese)
- [6] 饶文波, 李焱炜, 谭红兵, 李永国, 温川, 张西营. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源: 以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. *水利学报*, 2021, 52(9): 1116-1125.
RAO W B, LI Y W, TAN H B, LI Y G, WEN C, ZHANG X Y. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: a case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(9): 1116-1125. (in Chinese)
- [7] 顾慰祖, 庞中和, 王全九, 宋献芳. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
GU W Z, PANG Z H, WANG Q J, SONG X F. *Isotope hydrology*[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [8] NELSON D B, BASLER D, KAHMEN A. Precipitation isotope time series predictions from machine learning applied in Europe[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(26): e2024107118.
- [9] NIE Y P, CHEN H S, DING Y L, MA X Y, WANG K L. Qualitative identification of hydrologically different water sources used by plants in rock-dominated environments[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 386-394.
- [10] BROOKS J R, BARNARD H R, COULOMBE R, MCDONNELL J J. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 100-104.
- [11] NIE Y P, CHEN H S, WANG K L, YANG J. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 264-274.
- [12] 岳伶俐, 夏雄, 胡德勇, 肖卫华, 张文萍, 许文彬, 吴友杰. 基于氢氧同位素的油茶果实生长高峰期水分来源量化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 154-161.
YUE L L, XIA X, HU D Y, XIAO W H, ZHANG W P, XU W B, WU Y J. Quantifying the water sources of *Camellia oleifera* during fruit growth peak period using hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(20): 154-161. (in Chinese)
- [13] 杜康, 张北赢. 珠江流域降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. *水文*, 2020, 40(6): 75-82.
DU K, ZHANG B Y. Stable isotope characteristics and water vapor sources of precipitation in the Pearl River basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(6): 75-82. (in Chinese)
- [14] ZHAO P, TANG X Y, ZHAO P, WANG C, TANG J L. Identifying the water source for subsurface flow with deuterium and oxygen-18 isotopes of soil water collected from tension lysimeters and cores[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 503: 1-10.
- [15] 张君, 陈洪松, 黄荣. 桂西北喀斯特小流域降雨稳定氢氧同位素组成及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 236-245.
ZHANG J, CHEN H S, HUANG R. Composition of stable hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and its influencing factors in karst area, northwest Guangxi of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022(1): 236-245. (in Chinese)
- [16] PHILLIPS D L, GREGG J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136: 261-269.
- [17] 陈中笑, 程军, 郭品文, 林振毅, 张福颖. 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 Z X, CHENG J, GUO P W, LIN Z Y, ZHANG F Y. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, 33(6): 667-679. (in Chinese)
- [18] 李维杰, 王建力, 王家录. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(5): 1132-1142.
LI W J, WANG J L, WANG J L. Characteristics of the stable isotopes in precipitation and the source of water vapor in different terrain in the southwest region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(5): 1132-1142. (in Chinese)
- [19] 李广. 我国西南地区降水稳定同位素变化特征及水汽来源追踪的研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
LI G. Study on variable characteristics of stable isotopes in precipitation and tracking the moisture sources in Southwest

- China[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014. (in Chinese)
- [20] SCHOTTERER U, FRÖHLICH K, GÄGGLER H W, SANDJORDJ S, STICHLER W. Isotope records from mongolian and alpine ice cores as climate indicators[J]. *Climatic Change*, 1997, 36(3/4): 519-530.
- [21] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. *地理学报*, 1998, 43(4): 70-78.
ZHANG X P, YAO T D. Distribution features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 43(4): 70-78. (in Chinese)
- [22] 涂林玲, 王华, 冯玉梅. 桂林地区大气降水的 D 和 ^{18}O 同位素的研究[J]. *中国岩溶*, 2004, 45(4): 48-53.
TU L L, WANG H, FENG Y M. Research on D and ^{18}O isotope in the precipitation of Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 45(4): 48-53. (in Chinese)
- [23] 朱秀勤, 范弢, 官威. 昆明大气降水稳定同位素分析[J]. *云南地理环境研究*, 2013, 25(5): 90-95.
ZHU X Q, FAN T, GUAN W. The analysis of stable isotopes of precipitation in Kunming[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2013, 25(5): 90-95. (in Chinese)
- [24] 胡可, 陈洪松, 聂云鹏, 杨静, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 53-62.
HU K, CHEN H S, NIE Y P, YANG J, WANG K L. Characteristics of seasonal variation of deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation in karst peak-cluster depression area, northwest Guangxi of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 53-62. (in Chinese)
- [25] 罗芳芳. 云南元谋干热河谷水分特征的环境同位素研究[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
LUO F F. The research about water environmental isotope in Yuanmou dry-hot valleys[D]. Kunming: Yunnan University, 2012. (in Chinese)
- [26] 廖阳, 曹红霞, 刘星, 薛文凯. 覆盖及亏缺灌溉对山地苹果生长, 耗水及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 47-56.
LIAO Y, CAO H X, LIU X, XUE W K. The effects of mulching and deficit irrigation on growth, evapotranspiration and yield of mountain apple trees[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 47-56. (in Chinese)