

刘晓颖,李宗杰,刘梦晴,等.长江源区植物水分来源的量化解析[J].中国沙漠,2024,44(1):102–110.

# 长江源区植物水分来源的量化解析

刘晓颖<sup>1</sup>,李宗杰<sup>1</sup>,刘梦晴<sup>1</sup>,徐斌<sup>1</sup>,桂娟<sup>2</sup>,  
崔乔<sup>2</sup>,薛健<sup>2</sup>,段然<sup>1</sup>

(1.兰州理工大学 能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 高寒山区同位素生态水文与国家公园观测研究站/甘肃省祁连山生态环境研究中心/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基于稳定同位素示踪技术对长江源区植物水、土壤水、降水、河水、冰雪融水、地下冰融水及冻土层上水等水体的氢( $\delta^2\text{H}$ )、氧( $\delta^{18}\text{O}$ )稳定同位素关系进行分析。通过对比22个植物样方的稳定同位素,发现草本的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素值均比灌木偏正。从水体稳定同位素特征的分布情况来看,植物水的直接来源为不同深度土壤水,间接来源为河水、冻土层上水、冰雪融水、降水和地下冰融水。MixSIAR模型计算结果表明长江源区灌木主要利用40~60 cm (11.1%)和80~100 cm (11.1%)的土壤水,草本植物主要利用0~20 cm (13.0%)和20~40 cm (14.0%)的土壤水。土壤水对灌木的贡献比例为55%,对草本植物的贡献比例为62%,冰雪融水、降水、地下冰融水、河水、冻土层上水对灌木的贡献比例分别为7.6%、9.5%、11.1%、9.6%和7.6%,对草本植物的贡献比例分别为8.3%、8.2%、5.7%、7.1%和8.9%。

**关键词:** 长江源区; 植物水分来源; 同位素示踪技术; MixSIAR模型

文章编号: 1000-694X(2024)01-102-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00058

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## 0 引言

水是陆地生态系统内植物生长和分布的主要因素<sup>[1]</sup>,在生态脆弱区,植物可利用水直接决定了物种的组成、生长状态和分布格局<sup>[2]</sup>。一般而言,植物所能吸收利用的水分主要来源于土壤,而土壤水补给源的多元性以及所受影响的复杂性从根本上决定了植物水来源的多样性,使得植物水稳定同位素特征受环境、植被类型等影响<sup>[3]</sup>。高寒山区有着包括冰川、积雪、冻土和山区草原在内的不同土壤水文下垫面,尤其是有冰雪融水补给的地区,降水、地下冰融水和冰雪融水是寒区流域水文过程中土壤主要的水分来源<sup>[4]</sup>,因此高寒区植物水分来源较为复杂,冰雪融水、地下冰融水、冻土层上水对高寒区植物水分的贡献不可忽视。近年来,受到全球

气候变暖和降水格局变化的影响,长江源区的生态系统结构、组成、功能特征和植物空间分布格局发生了很大变化。通过分析植物水、土壤水、降水等水体的同位素分布特征,量化解析植物水分来源,有助于生态系统的保护和修复,可为应对气候变化提供依据<sup>[5]</sup>。因此,研究长江源区植物水分来源对于分析气候变化背景下水循环的演变具有重要意义。

目前,稳定同位素技术已经成为国内外研究植物水分利用的重要方法<sup>[6]</sup>,被广泛应用于确定河岸、海岸、荒漠等不同生态系统和乔木、灌木、草本植物等不同生活类型植物的水分来源。研究表明,植物根系吸收的水分通过木质部导管稳定运输至植物的各个部位,一般不会像叶片、韧皮部通过皮孔吸收水分而发生氢氧同位素的分馏<sup>[7]</sup>,因此,将植物木

收稿日期:2023-03-27; 改回日期:2023-04-28

资助项目:国家自然科学基金项目(42107063,42077187);第二次青藏高原综合科学考察研究专题项目(2019QZKK0405);中国科学院青年交叉团队项目(JCTD-2022-18);国家重点研发计划专题项目(2020YFA0607702);中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项;甘肃省创新群体项目(20JR10RA038);甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RG824);兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划

作者简介:刘晓颖(1998—),女,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要研究方向为寒旱区生态水文。E-mail: liuxy807@163.com;

通信作者:李宗杰(E-mail: lzjie314@163.com)

质部水的稳定同位素与潜在水源(例如:不同深度的土壤水和地下水)的稳定同位素组成进行比较,可以确定植物最可能的水分来源,并且可以结合多元混合模型进一步量化各水源的贡献率<sup>[8]</sup>。国内外学者对植物水分来源进行了多方面的深入研究,国外学者利用氢氧同位素对植物水分的研究地域跨度较大,涉及植物种类较多。中国学者主要针对干旱区和湿润区植物水分来源开展研究,研究内容包括植物水分利用随季节变化的差异及不同种类、生境和生活型植物水分来源及植物的水分利用策略等<sup>[9]</sup>。近年来,随着气候变暖,寒区冰冻圈急剧收缩,进而产生的水文效应对植被水分来源产生了显著影响,但目前国内对高寒区植物水分来源的关注还远远不够,导致对寒区植物水分来源的量化解析尚不清晰,限制了预测未来寒区生态环境变化的准确性。

长江源地处青藏高原腹地,拥有丰富的自然资源,是全球生物多样性保护的重要地域和典型代表区,也是中国乃至亚洲重要的生态安全屏障<sup>[10]</sup>。长江源区平均海拔超过4 000 m,具有独特的地理位置和地形,与低海拔地区相比,冻融作用显著,植被更加脆弱,水循环对气候变化也更为敏感。植被作为陆地生态系统的主体,是连接土壤与大气等要素的纽带<sup>[11]</sup>,尤其在全球变化背景下,长江源是整个青藏高原增温幅度最大的区域<sup>[12]</sup>,导

致植物的生长状况也发生了一定程度的变化,如植被盖度和根系结构发生改变,造成生物量减少,最终可能导致地表荒漠化<sup>[13]</sup>。基于稳定同位素示踪技术,对长江源区植物水、降水、土壤水等不同水体的氢( $\delta^2\text{H}$ )和氧( $\delta^{18}\text{O}$ )稳定同位素数据关系进行研究,运用贝叶斯模型 MixSIAR 计算植物水分来源及各水源相对贡献比例,确定植物水分来源,有助于更全面了解高寒区水循环过程和生态水文过程,为长江源区植被的生态保护和恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长江源区( $32^{\circ}30' - 35^{\circ}40' \text{N}$ ,  $90^{\circ}30' - 97^{\circ}20' \text{E}$ )位于青藏高原腹地(图1),面积13.8万 $\text{km}^2$ ,是三江源区的重要组成部分。长江源区平均海拔超过4 000 m,气候属于典型的高原高寒气候,干冷少雨,空气稀薄,具有热量低、辐射强、干湿季节分明、雨热同期等特点。气温和降水存在明显的梯度,最冷月平均气温 $-13^{\circ}\text{C}$ ,最暖月平均气温可达 $17.3^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为221.5~515.0 mm<sup>[14]</sup>。长江源区属于半湿润-半干旱寒冷高原生态系统的青南羌塘草原、荒漠生态区,植被类型较为简单,从东南到西北,依次分布有高寒灌木、高寒草甸、高寒草原等<sup>[15]</sup>。

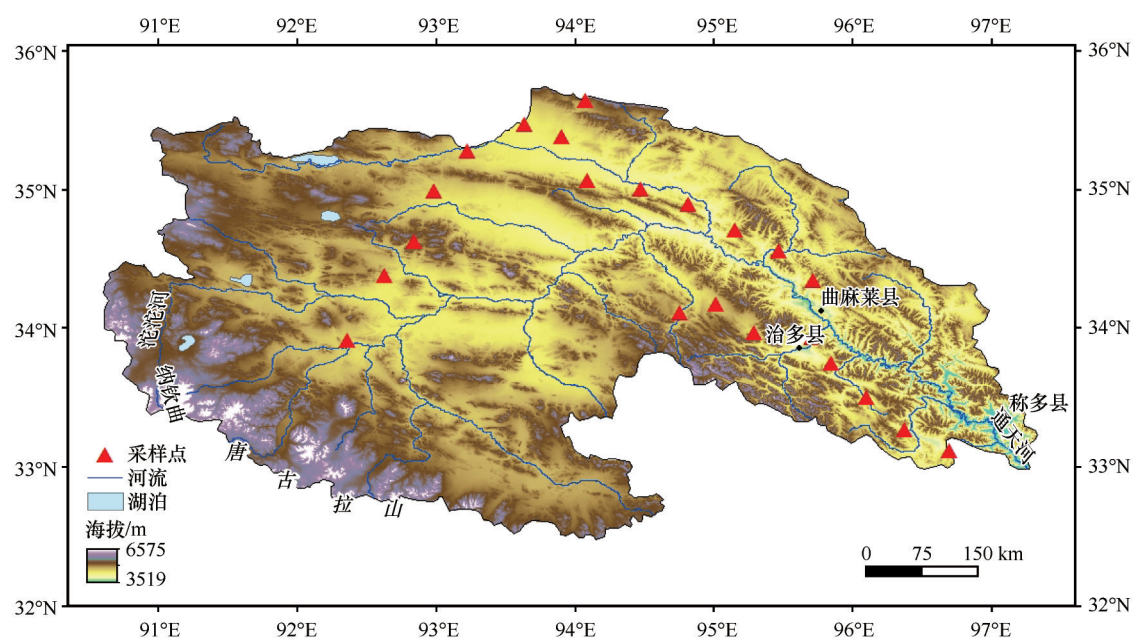


图1 研究区及采样点的位置

Fig.1 Location of the study area and sampling points

## 1.2 样品采集

为了结合不同地貌结构和不同植物类型等因素综合分析,本研究共设22个采样点,于2019年8月在长江源区进行样本采集。选取区域内12种优势种进行采样,其中灌木有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、草本植物包括少花米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)、肉果草(*Lancea tibetica*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、秦艽(*Gentiana macrophylla*)、紫菀(*Aster tataricus*)、铁棒锤(*Aconitum pendulum*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、青藏梭子芹(*Pleurospermum pulszkyi*),分别在选定的植物下方用人工土钻取土壤剖面0~100 cm的土壤样品。

植物样本采集:选取3株生长状况良好、冠幅、高度、地茎等相近的同种植物,剪取5~7枝直径约0.3 cm、长约5 cm的非绿色的栓化枝条,将剪下的植株茎表皮迅速切除后立即放入10 mL的玻璃瓶中,拧紧瓶盖,并用Parafilm膜密封,使用低温冰柜保存样品。

土壤样品采集:在采集植物样品下方,使用土钻分别采集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm的土壤样品,每层采集3个重复样品。土壤样品密封冷冻保存。

样品测定:植物木质部水分和土壤水分采用全自动真空冷凝提取系统(LI-2000,北京理加联合有限公司)进行提取,提取的水低温保存在玻璃瓶中,使用液态水同位素分析仪(DLT-100,美国Los Gatos Research公司)测量所有样品的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的测试精度分别为0.1‰和0.3‰。

本研究量化分析中用到的河水、降水、冻土层上水、冰雪融水数据均来源于参考文献[16],地下冰融水数据来源于参考文献[17]。

## 1.3 研究方法及数据处理

对于植物水分来源的解析采用直接对比法,通过比较植物木质部水和所有潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值,当两者相交或接近时,可以判断植物利用该水源,两条线越接近则该水源的贡献比例越高。对比发现本研究植物有3个以上潜在水源,因此后续采用贝叶斯混合模型中的MixSIAR来确定不同水源对植物的相对贡献比例。MixSIAR是基于R语言开发的R包,属于贝叶斯混合模型中的一类<sup>[18]</sup>,用于定量确定各潜在水源对植物水分的贡献率。

将原始木质部氢氧稳定同位素作为混合物数据输入MixSIAR,将每个潜在水源的氢氧稳定同位素平均值和标准差作为源数据输入模型,因植物根部吸收水分的过程中没有分馏,所以分馏数据输入为0<sup>[19]</sup>,马尔卡夫链蒙特卡罗(MCMC)运行步长设置为“long”。使用ArcMap10.2和Origin 2022绘制图表。

## 1.4 不确定性分析

每个潜在水源对植物的贡献率不能直接测量,只能通过模型计算,但是模型的估计结果具有很大的不确定性<sup>[6]</sup>,因此需要对模型结果进行评估。通过评价植物水同位素的观测值与预测值之间的匹配程度,间接评价模型关于潜在水源对植物水贡献率的计算效果。观测值为采集植物样品在实验室测定的水同位素值,记为 $O_i$ ;预测值为假定植物水的同位素值,由全部潜在水源同位素按相对贡献率组合而成,记为 $P_i$ <sup>[20-21]</sup>。

$P_i$ 的计算公式如下:

$$P_i = \sum_{j=1}^k f_j \delta_{A_j} \quad (1)$$

式中: $k$ 表示潜在水源的数量; $f_j$ 表示使用模型计算的第 $j$ 个水源对植物的贡献率; $\delta_{A_j}$ 表示每个潜在水源的稳定同位素值( $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ )。

使用决定系数 $R^2$ 对模型结果进行评估。 $R^2$ 值为1时表示预测结果最精确。 $R^2$ 值越接近1,说明模型的效果越好。 $R^2$ 值如果为负,则表示模型的效果很差。

$R^2$ 值的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (2)$$

式中: $n$ 是验证样本的数量; $\bar{O}$ 表示植物木质部水同位素的实测值的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物水稳定同位素的分布特征

灌木 $\delta^2\text{H}$ 同位素值为-102.86‰~-85.51‰,平均值为-94.18‰±12.27‰,草本植物 $\delta^2\text{H}$ 同位素值为-126.40‰~-55.44‰,平均值为-89.25‰±18.52‰;灌木 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值为-13.13‰~-11.64‰,平均值为



$-12.38\text{‰} \pm 1.06\text{‰}$ , 草本植物  $\delta^{18}\text{O}$  同位素值为  $-16.78\text{‰} \sim -2.39\text{‰}$ , 平均值为  $-9.07\text{‰} \pm 4.56\text{‰}$ , 草本的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  同位素均比灌木偏正, 这说明在蒸腾过程中草本植物的稳定同位素富集明显。

## 2.2 植物水稳定同位素的时空特征

受环境因子的影响, 植物水稳定氢氧同位素在不同区域存在差异, 为分析其空间特征, 将所采集样品按海拔分为7个梯度, 如图2所示。长江源区

海拔4100、4200、4300、4400、4500、4600、4700 m 植物水的  $\delta^2\text{H}$  平均值分别为  $-88.23\text{‰}$ 、 $-102.90\text{‰}$ 、 $-101.56\text{‰}$ 、 $-83.94\text{‰}$ 、 $-93.60\text{‰}$ 、 $-88.49\text{‰}$ 、 $-120.05\text{‰}$  (图2A)。长江源区海拔4100、4200、4300、4400、4500、4600、4700 m 植物水的  $\delta^{18}\text{O}$  平均值分别为  $-11.06\text{‰}$ 、 $-13.36\text{‰}$ 、 $-13.00\text{‰}$ 、 $-10.54\text{‰}$ 、 $-12.56\text{‰}$ 、 $-11.82\text{‰}$ 、 $-16.59\text{‰}$  (图2B)。4100~4700 m 植物水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的变化趋势一致。同位素最高值出现在4400 m处, 最低值出现在4700 m处。

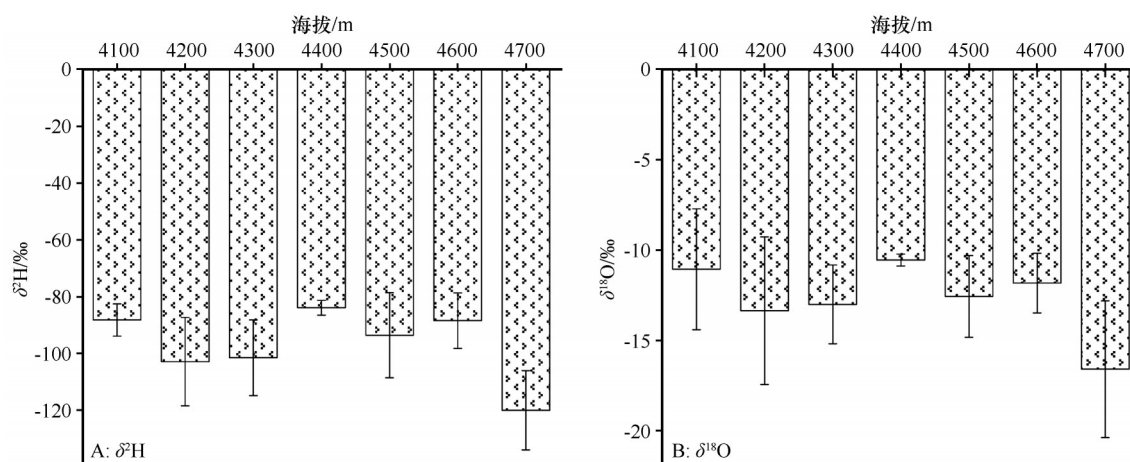


图2 长江源区不同海拔植物水同位素分布

Fig.2 Isotopic distribution of plant water at different elevations in the Yangtze River source area: (A)  $\delta^2\text{H}$  distribution of plant water at different elevations, (B)  $\delta^{18}\text{O}$  distribution of plant water at different elevations

## 2.3 植物水与其他各水体的联系

对研究区土壤水和植物木质部水的  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系点与当地大气降水线(LMWL)进行对比, 图3显示了研究区不同水体氢氧同位素数据点分布和特征线。当地大气降水中  $\delta^2\text{H}$  的值为  $-218.07\text{‰} \sim$

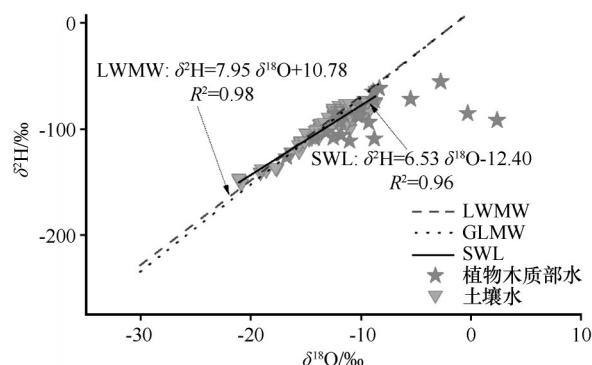


图3 长江源地区降水、土壤水以及植物木质部水  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  关系

Fig.3 The relationship between precipitation, soil water and plant xylem water  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  in the Yangtze River source area

$-54.83\text{‰}$ , 平均值为  $-80.27\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  的值为  $-30.10\text{‰} \sim -6.95\text{‰}$ , 平均值为  $-11.45\text{‰}$ 。对降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  的数据点进行回归分析计算出当地大气降水线为  $\delta^2\text{H} = 7.95\delta^{18}\text{O} + 10.78$  ( $R^2 = 0.98$ )。当地大气水线斜率较低于全球大气水线(GLMW)斜率, 说明截距高于全球平均值, 研究区受蒸发影响较大。

土壤水分稳定同位素组成随土壤深度和植物类型的不同而变化(表1、表2), 采样期间, 所有不同土层土壤  $\delta^2\text{H}$  值为  $-151.27\text{‰} \sim -63.61\text{‰}$ , 均值为  $-95.78\text{‰} \pm 19.46\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-21.10\text{‰} \sim -8.68\text{‰}$ , 均值为  $-12.83\text{‰} \pm 2.85\text{‰}$ 。灌木样方土壤  $\delta^2\text{H}$  值为  $-121.81\text{‰} \sim -72.47\text{‰}$ , 均值为  $-88.59\text{‰} \pm 15.26\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-16.62\text{‰} \sim -9.25\text{‰}$ , 均值为  $-12.21\text{‰} \pm 2.47\text{‰}$ 。草本植物样方土壤  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值相对较小,  $\delta^2\text{H}$  值为  $-151.27\text{‰} \sim -63.61\text{‰}$ , 均值为  $-96.28\text{‰} \pm 19.64\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-21.10\text{‰} \sim -8.68\text{‰}$ , 均值为  $-12.87\text{‰} \pm 2.88\text{‰}$ 。根据所有土壤水的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  稳定同位素值可以得到土壤水线(SWL)方程:  $\delta^2\text{H} = 6.53\delta^{18}\text{O} - 12.40$  ( $R^2 = 0.96$ )。土壤水线基本位于局地大气水线的右下方,

表 1 灌木样方土壤水样  $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素组成统计特征

Table 1 Statistical characteristics  $\delta^2\text{H}$  of and  $\delta^{18}\text{O}$  isotope composition of soil water samples from shrub square

土层 /cm	稳定同位素值							
	$\delta^2\text{H}$				$\delta^{18}\text{O}$			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
0~20	-74.38	-121.81	-93.77	17.01	-9.68	-16.35	-13.28	2.34
20~40	-72.47	-95.83	-82.64	7.78	-9.25	-12.00	-10.36	1.26
40~60	-73.31	-100.16	-83.45	11.62	-9.54	-13.54	-11.77	1.93
60~80	-73.21	-94.71	-82.94	8.44	-9.46	-12.02	-10.86	1.18
80~100	-74.24	-120.89	-104.41	16.18	-11.41	-16.62	-15.31	1.98

表 2 草本植物样方土壤水样  $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素组成统计特征

Table 2 Statistical characteristics  $\delta^2\text{H}$  of and  $\delta^{18}\text{O}$  isotope composition of soil water samples from herbal square

土层 /cm	稳定同位素值							
	$\delta^2\text{H}$				$\delta^{18}\text{O}$			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
0~20	-63.61	-141.08	-99.09	21.10	-8.68	-19.14	-12.94	3.04
20~40	-73.47	-148.32	-95.17	19.18	-8.72	-21.05	-12.55	2.80
40~60	-80.98	-151.27	-97.64	19.18	-11.23	-20.89	-13.28	2.81
60~80	-80.60	-146.72	-93.69	18.37	-11.16	-21.10	-11.81	2.79
80~100	-75.53	-137.65	-93.47	20.23	-9.82	-19.02	-12.49	2.76

其斜率小于全球大气水线和局地大气水线(图 3),说明该地区土壤水来源于降水,并且土壤水经历了较强烈的蒸发。同时,植物水和土壤水的氢、氧稳定同位素值均位于当地大气水线的右下方(图 3),说明植物水分也受到强蒸发的影响,大部分在研究区土壤水线附近,可以判断植物水分主要来源于土壤水。

2.4 植物水分来源解析

由于氢同位素比氧同位素更为贫化,且更易出现分馏现象,因此在直接对比判定植物水分来源时仅用氧同位素。长江源区不同植物木质部水  $\delta^{18}\text{O}$  值与不同水源  $\delta^{18}\text{O}$  值对比显示,不同植被类型不同土层的植物水分与土壤水分的交集存在差异(图 4)。灌木木质部水的  $\delta^{18}\text{O}$  值与 20~40 cm 和 80~100 cm 样地土壤水的  $\delta^{18}\text{O}$  值有交集,表示灌木水分来源于 20~40 cm 和 80~100 cm 深度土壤水。草本植物水分来源较为复杂,木质部水与样地土壤水无交点,因此无法判断该植物的主要吸水层。

为了阐明长江源区植物水分来源,在本研究中进一步分析了植物水的间接来源。利用贝叶斯混

合模型 MixSIAR 计算潜在水源对植物水的贡献率,基于  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值的计算结果表明,灌木和草本非单一水源,有多个吸水层,如图 5 所示,灌木植物水的主要补给是土壤水(0~100 cm 土层),而降水、冰雪融水、地下冰融水、河水、冻土层上水等间接来源也不可忽视。土壤水对灌木植物水的贡献为 54.6%,其中,0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层对灌木的贡献率相差不大,分别为 10.8%、11.0%、11.1%、10.6%、11.1%,这可能与高寒区自然环境和灌木的根系分布和吸水模式有关。同时,地下冰融水、河水和降水的贡献率分别为 11.1%、9.6% 和 9.5%,冰雪融水和冻土层上水的贡献率均为 7.6%。这一结果表明,除土壤水外,地下冰融水、河水和降水也是植物水的重要来源。

不同层次土壤水对草本植物水分的总贡献率为 61.9%,其中,0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层对草本的贡献率分别为 13.0%、14.0%、11.1%、12.7%、11.1%,冻土层上水、冰雪融水和降水对草本植物的贡献率分别为 8.9%、8.3% 和 8.2%,河水和地下冰融水对草本植物的贡献率分别为 7.1% 和 5.7%。

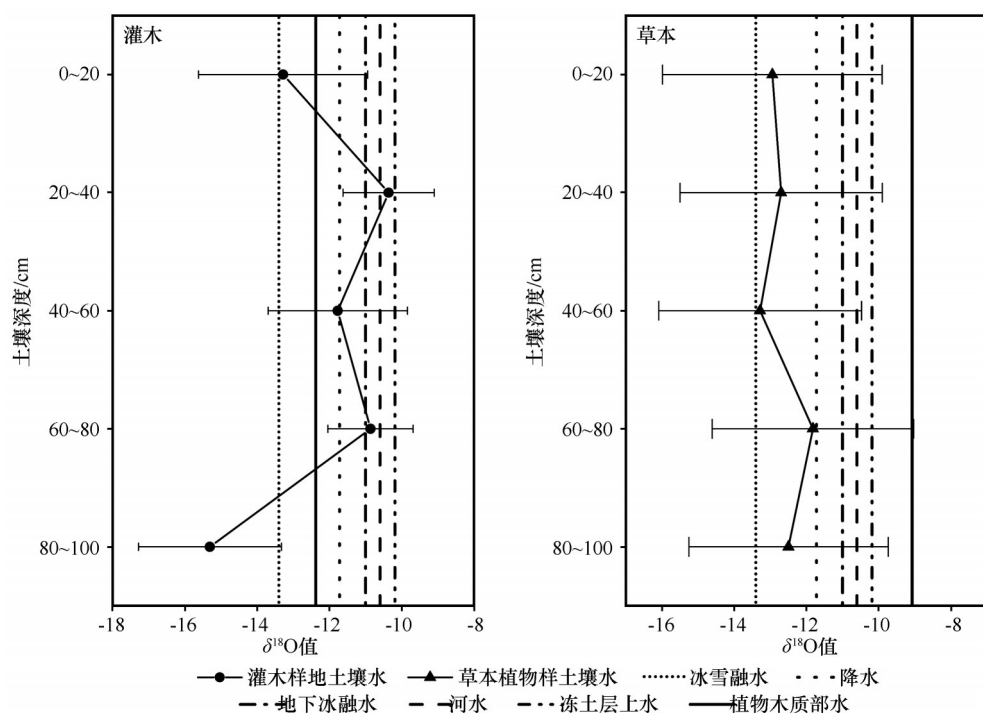
图4 长江源区不同来源水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比

Fig.4 Direct comparison results of different plant waters in the Yangtze River source area

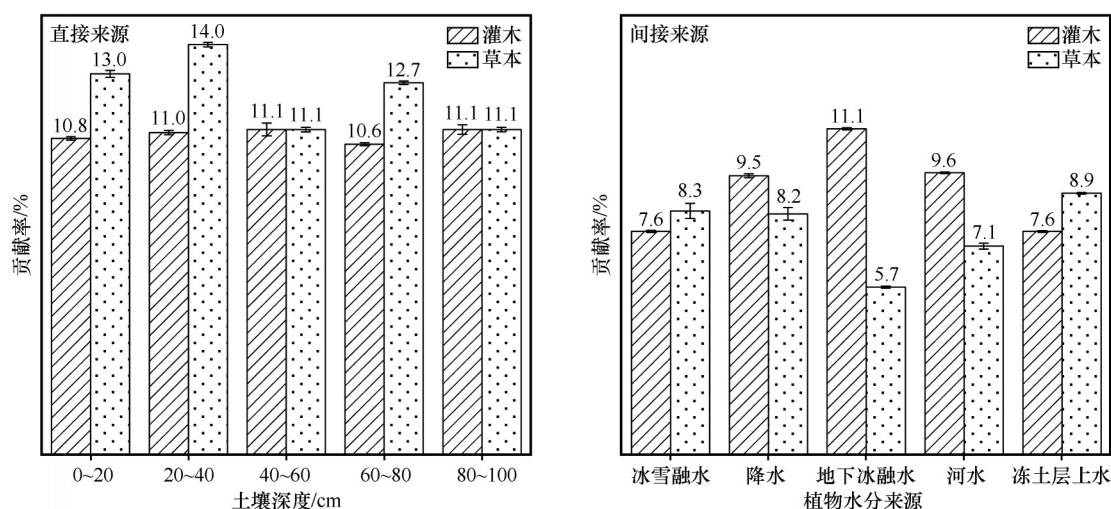


图5 灌木和草本植物水分直接来源和间接来源

Fig.5 Direct sources and indirect sources of water for shrubs and herbs

### 3 讨论

植物水是参与水循环的一个重要组成部分,探讨植物水稳定同位素与降水、土壤水、河水、冰雪融水、冻土层上水、地下冰融水中稳定同位素的相互联系、相互作用,有利于揭示植物水在当地各水体氢氧稳定同位素循环中的作用类别和贡献率。各种潜在水源对植物的贡献率使用MixSIAR模型进行量化分析,由于实验数据可能受到样品采样、贮存、运输以及实验等因素影响产生误差,进而导致

模型计算出现偏差,因此采用决定系数 $R^2$ 对该模型结果进行评价。经评价计算MixSIAR模型的 $R^2$ 值为0.96,计算结果接近1,因此该模型的量化结果较好,计算所得植物水分来源结果可靠。

研究区的大气降水线与全球大气降水线相比斜率稍小而截距较高,这反映出研究区蒸发相对较强和湿度相对较大的特点。灌木和草本植物样地土壤的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 随深度的变化而变化,且 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化保持相同的趋势,同增同减,这与赵颖



等<sup>[22]</sup>在黑河中游测定的土壤水样品 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化规律一致。同时,不同生活类型植物氢氧稳定同位素值存在差异,灌木植物水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 $-94.18\text{‰}\pm 12.27\text{‰}$ 和 $-12.38\text{‰}\pm 1.06\text{‰}$ ,草本植物水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 $-89.25\text{‰}\pm 18.52\text{‰}$ 和 $-9.07\text{‰}\pm 4.56\text{‰}$ ,Wang等<sup>[23]</sup>也发现黄土高原杨庄沟灌木黄荆 $\delta^2\text{H}$ 平均值为 $-58.95\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $-6.22\text{‰}$ ,草本植物本氏针茅 $\delta^2\text{H}$ 平均值为 $-51.47\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $-5.84\text{‰}$ ,与本研究结果基本相符。

从长江源区植物水分利用情况可以看出,灌木和草本植物水分的直接来源都是不同层次的土壤水。Beyer等<sup>[24]</sup>发现植物的根系结构以及植物所处的环境决定了植物水分的稳定同位素特征和植物根系对水分的利用策略。灌木的根系较为发达,根系较深,而草本植物具有广泛的侧根,且分布在较浅的土层中<sup>[25]</sup>。当表层土壤水分丰富时,浅根植物以浅层土壤水为主要水源,当表层土壤含水量减少时,则利用较深层的土壤水,而深根植物则以深层土壤水和地下水为主要水分来源<sup>[26-27]</sup>。在水分条件充足的情况下,植物一般利用表层土壤水较多<sup>[28]</sup>,例如在高寒草甸和高寒灌丛生态系统中植物大都主要利用表层土壤水分<sup>[29]</sup>。本研究通过贝叶斯模型MixSIAR计算,得出灌木与草本植物最主要的水源都是不同层次土壤水,土壤水对灌木和草本植物的贡献率分别为54.6%和61.9%,而降水、地下冰融水、河水、冻土层上水、冰雪融水对其贡献率仅为7%~11%。对于灌木,各土层深度的水分贡献率在整个生长季较为平均,40~60、80~100 cm土层土壤水的贡献率相对较高,均为11.1%。青藏高原高寒地区灌木水分来源与干旱地区灌木相似<sup>[30]</sup>,柴达木盆地戈壁滩白刺主要利用50~100 cm的土壤水和6—9月的地下水<sup>[31]</sup>,这与本研究结果相似。草本植物对浅层土壤水的利用率最高,这一结果与草本植物根系分布有关,因表层细根较多,所以在降水较少时优先利用表层土壤水,对0~20 cm和20~40 cm土层土壤水利用率最高,青海湖流域油菜整个生育期主要利用0~30 cm土层的土壤水<sup>[32]</sup>,同样证明草本植物主要利用浅层土壤水。冻土层上水在植物水间接来源中占比较高,主要是因为高寒区草本植物生长在冻土活动层,因此,在植物生长季节,冻土层上水对植物水分的贡献率高于其他水体。

## 4 结论

不同生活类型的植物氢氧稳定同位素值存在差异,植物氢氧稳定同位素在空间分布上也存在差异。灌木的 $\delta^2\text{H}$ 同位素值( $-94.18\text{‰}$ )和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值( $-12.38\text{‰}$ )比草本的 $\delta^2\text{H}$ 同位素值( $-89.25\text{‰}$ )和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值( $-9.07\text{‰}$ )更偏负。4 100~4 700 m海拔梯度内植物水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势一致,最高值出现在4 400 m处,分别为 $-83.94\text{‰}$ 和 $-10.54\text{‰}$ ,最低值出现在4 700 m处,分别为 $-120.05\text{‰}$ 和 $-16.59\text{‰}$ 。

长江源的大气降水线 $\delta^2\text{H}=7.95\delta^{18}\text{O}+10.78$ ( $R^2=0.98$ ),斜率略小于全球大气降水线,截距较大,说明长江源区受蒸发影响较大。根据土壤水的氢、氧稳定同位素值可以得到土壤水线方程为 $\delta^2\text{H}=6.53\delta^{18}\text{O}-12.40$ ( $R^2=0.96$ )。植物水和土壤水的氢、氧稳定同位素值均位于局地大气水线的右下方,大部分在研究区土壤水线附近,可以判断植物水分主要来源于土壤水。

0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层对灌木的贡献率分别为10.8%、11.0%、11.1%、10.6%、11.1%,对草本植物的贡献率分别为13.0%、14.0%、11.1%、12.7%、11.1%;冰雪融水、降水、地下冰融水、河水、冻土层上水对灌木的贡献率分别为7.6%、9.5%、11.1%、9.6%和7.6%,对草本植物的贡献率分别为8.3%、8.2%、5.7%、7.1%和8.9%。

稳定同位素技术在研究植物水分来源方面的应用越来越广泛,然而相对于其他地区,高寒区观测环境较为恶劣,样品采集难度大,导致应用仍较为有限。本研究旨在探究寒区不同植被类型下植物水分来源的差异,为长江源区生态保护和植被修复提供科学有效的理论支撑。

## 参考文献:

- [1] Wen L, Peng Y, Deng W, et al. Variation in water uptake dynamics of dominant wood plants of *Pinus taiwanensis* Hayata communities based on stable isotopes[J]. Forests, 2022, 13(8): 1336.
- [2] 赵慧芳,曹晓云.三江源国家公园植被覆盖时空变化及其气候驱动因素[J].高原气象, 2022, 41(2): 328-337.
- [3] Barbeta A, Jones S P, 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, 2019, 23: 2129-2146.
- [4] Li Z J, Li Z X, Feng Q, et al. Runoff dominated by supra-perma-

- frost water in the source region of the Yangtze river using environmental isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124506.
- [5] 丁丹, 贾文雄, 马兴刚, 等. 祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1348–1356.
- [6] Rothfuss Y, Javaux M. Reviews and syntheses: isotopic approaches to quantify root water uptake: a review and comparison of methods[J]. Biogeosciences, 2017, 14(8): 2199–2224.
- [7] Li Z J, Liu X Y, Li Z X. Study on recharge source and influence mechanism of plant water in the three-river headwaters region, China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618(4): 129180.
- [8] 温林生, 邓文平, 邓力维, 等. 庐山不同海拔植物季节水分利用策略[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 341–348.
- [9] 谢聪, 赵良菊, 孟飞, 等. 黑河上游森林生态系统植物水分来源[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(4): 502–508.
- [10] 李宗杰, 段然, 柯造成, 等. 基于水化学特征的长江源区生态水文学研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 288–298.
- [11] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105–2138.
- [12] 朱躲萍, 叶辉, 王军邦, 等. 青海三江源区高寒植被地表反照率变化及其辐射温度效应[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5630–5641.
- [13] 邓国江, 刘光生, 陈联荣, 等. 长江源多年冻土区典型坡面土壤水稳定同位素特征[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 426–435.
- [14] Li Z J, Li Z X, Song L L, et al. Hydrological and runoff formation processes based on isotope tracing during ablation period in the source regions of Yangtze River[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24: 4169–4187.
- [15] 傅思华, 胡顺军, 李浩, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落优势植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1024–1032.
- [16] Li Z J, Li Z X, Song L L, et al. Precipitation chemistry in the source region of the Yangtze River[J]. Atmospheric Research, 2020, 245: 105073.
- [17] Yang Y, Wu Q, Hou Y, et al. Unraveling of permafrost hydrological variabilities on Central Qinghai-Tibet Plateau using stable isotopic technique[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605/606: 199–210.
- [18] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. Peer J, 2018, 6: e5096.
- [19] 苏鹏燕, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1835–1843.
- [20] Wang J, Lu N, Fu B. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning[J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 685–693.
- [21] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15: 1073–1082.
- [22] 赵颖, 刘冰, 赵文智, 等. 荒漠绿洲湿地水分来源及植物水分利用策略[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 151–162.
- [23] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 27–37.
- [24] Beyer M, Hamutoko J T, Wanke H, et al. Examination of deep root water uptake using anomalies of soil water stable isotopes, depth-controlled isotopic labeling and mixing models[J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 122–136.
- [25] Qian J, Zheng H, Wang P F, et al. Water sources of riparian plants during a rainy season in Taihu Lake Basin, China: a stable isotope study[J]. Chemical Speciation and Bioavailability, 2017, 29(1): 153–160.
- [26] Wu H, Li X Y, Jiang Z, et al. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 182–191.
- [27] Zhou H, Zhao W Z, He Z B, et al. Stable isotopes reveal varying water sources of *Caragana microphylla* in a desert-oasis ecotone near the Badain Jaran Desert[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018, 10(6): 458–467.
- [28] Jia G, Liu Z, Chen L, et al. Distinguish water utilization strategies of trees growing on earth-rocky mountainous area with transpiration and water isotopes [J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(24): 10640–10651.
- [29] Hu H, Zhu L, Li H, et al. Seasonal changes in the water-use strategies of three herbaceous species in a native desert steppe of Ningxia, China [J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(2): 109–122.
- [30] Zhu Y J, Wang G J, Li R Q. Seasonal dynamics of water use strategy of two *Salix* shrubs in alpine sandy land Tibetan Plateau[J]. Plos one, 2016, 11: 1–2.
- [31] Liu S B, Chen Y N, Chen Y P, et al. Use of  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  stable isotopes to investigate water sources for different ages of *Populus euphratica* along the lower Heihe River[J]. Ecological Research, 2015, 30: 581–587.
- [32] Wu H W, Li J, Zhang C C, et al. Determining root water uptake of two alpine crops in a rainfed cropland in the Qinghai Lake watershed: first assessment using stable isotopes analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 113–121.



## Quantitative analysis of plant water sources in the Yangtze River source area

Liu Xiaoying<sup>1</sup>, Li Zongjie<sup>1</sup>, Liu Mengqing<sup>1</sup>, Xu Bin<sup>1</sup>, Gui Juan<sup>2</sup>, Cui Qiao<sup>2</sup>, Xue Jian<sup>2</sup>, Duan Ran<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine Region / Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center / National Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable Development in Arid Region, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The study explored the stable isotope data relationships of hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in different water bodies such as plant water, soil water, precipitation, river water, glacier snow meltwater, ground ice and supra-permafrost water in the Yangtze River source area based on stable isotope tracing techniques. By comparing the stable isotopes of 22 sample points, it was found that both  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  stable isotope values of herbs were enriched than those of shrubs, while the opposite was true for  $\delta^{18}\text{O}$  isotope values. The distribution of stable isotope characteristics of water bodies showed that the direct sources of plant water were soil water at different levels and indirect sources were river water, supra-permafrost water, ground ice, precipitation and glacier snow meltwater. The MixSIAR model was adopted to calculate the contributions of different water resources to plant water, and indicated that herbaceous plants in the Yangtze River source area primarily utilized soil water from 0–20 cm (13.0%) and 20–40 cm (14.0%), whereas shrubs primarily used soil water from 40–60 cm (11.1%) and 80–100 cm (11.1%). Shrubs received 7.6%, 9.5%, 11.1%, 9.6%, and 7.6% of the snow and ice melt, precipitation, subsurface ice melt, river water, and water on permafrost, respectively. Herbaceous plants received 8.3%, 8.2%, 5.7%, 7.1%, and 8.9% of these factors.

**Key words:** Yangtze River source area; plant water source; isotope tracing technique; MixSIAR model