

艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究

郝 帅^{1,2}, 李发东^{3,4}

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830054; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 在以风沙和干旱为基本特征的干旱、半干旱生态环境中, 荒漠植被在防风固沙及维持荒漠和绿洲生态系统的稳定性方面有重要作用。选取艾比湖流域不同生境(河岸、沙丘、荒漠、盐沼)典型荒漠植被胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria sibirica*)和盐穗木(*Halostachys caspica*)为研究对象, 运用稳定同位素方法分析降水、土壤水、植株水和地下水同位素组成变化特征, 量化4种植被在整个生长期内吸水来源及比例。结果表明: ①艾比湖流域降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -142.5‰ ~ -0.6‰ 和 -20.16‰ ~ 1.20‰ , 表现为夏季最大, 冬季最小, 春秋季节居中的态势。②4类生境条件下的土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿剖面总体表现为随着深度增加逐渐减小; 不同植株茎水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值时间变化趋势基本一致, 春季最大, 夏季最小, 秋季又逐渐增加; 不同植株间比较, 盐穗木茎水稳定同位素值最大, 其余依次为白刺、梭梭和胡杨。③荒漠植被在不同生长期吸水来源及利用比例不同, 梭梭在整个生长期主要利用地下水; 白刺利用水源比例在整个生长季内变化较大, 春季主要利用表层土壤水, 贡献率为80%~94%, 夏季利用深层土壤水的比例为31%~36%, 秋季利用中层土壤水的比例达到33%~36%; 盐穗木春季和秋季主要利用表层土壤水, 夏季中间层土壤水比例略有提升, 为20%~36%; 胡杨春季主要利用中间层土壤水, 利用比例为53%~54%, 夏季主要利用地下水, 比例达到72%~88%, 河水利用比例仅为2%~5%, 秋季河水利用比例升高为11%~21%。研究结果显示, 干旱区荒漠植被生长季内水分利用来源差异明显。本文为了解干旱区荒漠植被的水分利用机理、水分适应策略, 以及植被恢复和管理提供理论依据。

关键词: 荒漠植被; 水分利用; 氢氧稳定同位素; 艾比湖

DOI: 10.11821/dlxb202107006

1 引言

干旱半干旱区, 降雨量稀少, 水分是限制植被分布和生长最重要的因子^[1]。干旱区自然环境中, 荒漠植被可利用水源包括降水、河水、土壤水和地下水。干旱区盐生植被在长期进化过程中, 会选择相适应的水分来源, 以提高适应干旱环境的能力^[2]。植被水源利用可由许多方法来确定, 比如根系挖掘法^[3]、液流测定法^[4]、放射性示踪迹氡法^[5]等, 这些方法的不足之处在于成本高, 不能详细区分不同水源, 且存在放射性危险等。稳定同位素技术作为一种安全有效, 没有破坏性的方法, 可以用来确定和区分植被水分利用来

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-06-03

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A118); 国家自然科学基金项目(U1803244); 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室开放课题(XJNUSYS2019B18) [Foundation: Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No.2021D01A118; National Natural Science Foundation of China, No. U1803244; Open Project of Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, No.XJNUSYS2019B18]

作者简介: 郝帅(1982-), 男, 博士, 主要从事干旱区水文过程研究。E-mail: haoshuai1869@163.com

通讯作者: 李发东(1972-), 男, 研究员, 博导, 主要从事生态水文环境研究。E-mail: lifadong@igsnnr.ac.cn

源。在植物体内,根系吸收水分沿木质部运输,水分过程以液流形式存在,在到达未栓化幼嫩枝条和叶片之前,与外界环境不发生水分的交换,同位素不存在分馏现象^[6-8]。分析木质部水和潜在水源的同位素值,可判断植物水分利用方式及量化不同水源在植物体内所占比例。

运用稳定同位素方法研究植被水分利用在陆地生态系统中大量应用,比如森林生态系统^[9-10]、农田生态系统^[11-12]、草地生态系统^[13-14]等,但干旱区植被生态系统研究较少,不同生境盐生植被吸水策略问题仍不十分明确,是干旱区植被生态系统研究的一个短板。艾比湖是新疆维吾尔自治区第一大咸水湖,处于准噶尔盆地西南低洼处,具有典型的干旱区生态环境特征,是流域的水盐汇集中心,它维护着整个流域生态系统的稳定,是新疆乃至整个西北地区的一道生态屏障^[15]。在气候变化和人类活动影响下,艾比湖流域出现植被退化,水分的过度开发利用、土壤盐碱化加重等现象。将植被和水体作为一个系统综合考虑,研究荒漠植被和潜在水源相互作用关系,确定其不同生长期水分利用策略,为当地植被生态系统恢复提供理论支持。

本文选取艾比湖流域4种生境(河岸、沙丘、荒漠、盐沼)对应的典型荒漠植被胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria sibirica*)和盐穗木(*Halostachys caspica*)为研究对象,运用氢氧稳定同位素方法,研究其在整个生长季(3—10月)水源以及用水策略。本文的目的是:① 阐明研究区降水、土壤水、植被茎水稳定同位素组成特征;② 量化典型荒漠植被生长期水源利用比例;③ 探求荒漠植被水源利用影响机制。以期为干旱区植被生态系统保护和恢复提供科学依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

艾比湖流域(44°02'N~45°23'N, 79°53'E~83°53'E)属于典型的温带干旱大陆性气候,年平均气温8.0℃,年均降水量89.9~169.7 mm,年均蒸发量1569~3421 mm。艾比湖是准噶尔盆地西部最低洼地,是区域水盐汇集的中心,湖水主要来源于地表河流及地下水补给,目前以地表径流的形式补给的河流主要是精河和博尔塔拉河。流域地下水主要来自积雪融水和河水补给,艾比湖湿地周边地下水埋深约5 m^[17]。该流域地貌景观多样,集湿地和荒漠化过程于一体。

流域内植物区系受中亚和蒙古植物区系影响,植被过渡性明显,植物种类以杨柳科、藜科、柽柳科、禾本科等植物为主,典型植被主要有胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、西伯利亚白刺(*Nitraria sibirica* Pall)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、碱蓬(*Suaeda pterantha*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)等^[16]。

2.2 试验设计和野外采样

选取艾比湖流域不同生境建群种,分别为盐穗木(盐沼地)、胡杨(河岸)、白刺(荒漠)和梭梭(沙丘),在不同生境设置20 m×20 m样地(图1),在样地内选取3株在高度和冠幅均反映样地平均状况的植被作为采样对象,对植株栓质枝条进行采样,同时对土壤、河水和地下水进行采样,样地内荒漠植被形态特征见表1。

样品采集时间覆盖植被整个生长季(3—10月)。河水采集主要在河岸生境,采集博尔塔拉河水;地下水在样地附近3个水井采集,3个井为饮用水井,井水编号从左到右依次为1#、2#和3#(图1),采集时必须保证是新鲜水,避免抽取水管中滞水;土壤采集靠

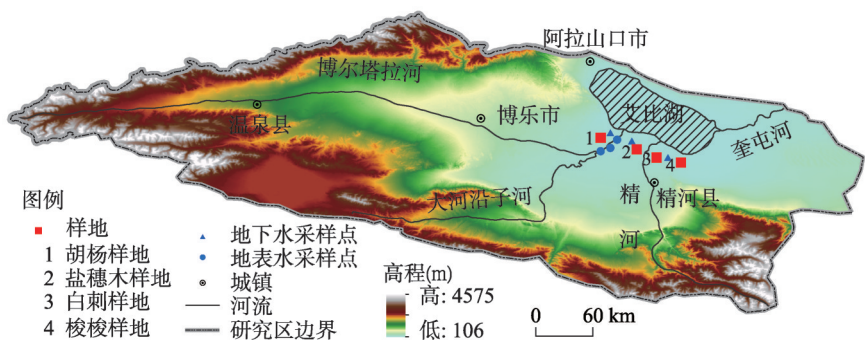


图1 研究区样地设置及采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample setting and sampling points in the Ebinur Lake basin

表1 典型荒漠植被形态特征

Tab. 1 The morphological characteristics of four desert plants

植株	树高(cm)	冠幅(南北(cm)×东西(cm))	生长型	根分布类型	群落类型	群落盖度(%)	生境	采集地
盐穗木	52.3±12.3	(21.3±9.2)×(12.1±4.6)	小灌木	浅根系	盐穗木—盐爪爪	15	盐沼地	北地站
胡杨	312.2±24.3	(214.2±45.6)×(245.4±56.4)	乔木	中深根系	胡杨—芦苇	50	河岸	博河站
梭梭	125.3±14.4	(56.4±10.3)×(64.5±23.5)	小乔木	中深根系	梭梭	10	沙丘	鸵鸟站
白刺	23.2±9.4	(104.6±18.3)×(96.3±10.5)	小灌木	浅根系	怪柳—白刺	30	荒漠	鸵鸟站

注: 表中数值为均值±标准差。

近选取的植株, 用土钻钻取土壤, 采集深度为200 cm, 其中0~40 cm深度每隔10 cm采集一层, 40~200 cm深度每隔20 cm采集一层, 每个植株周边钻取3个土壤剖面; 植株采集要尽量减少光照强度等外界条件对同位素组成分析结果的影响, 植株样品采集尽量在上午9:00—11:00。采集时选取栓质枝条, 4个方向各采集1个3~5 cm小段, 去除外皮。所采集样品均装入带有螺旋瓶盖的玻璃瓶中, 用Parafilm膜密封瓶口, 然后冷藏保存。

2.3 样品水分抽提及氢氧同位素组成测试

样品水分抽提及氢氧同位素组成测试在新疆师范大学新疆干旱区湖泊环境与资源实验室完成, 采集水样均需先经过0.45 μm醋酸纤维素滤膜过滤。植株和土壤样品水分及河水提取采用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100), 该仪器在样品水分抽提过程中不会发生同位素分馏, 水分提取率在98%以上。氢氧稳定同位素组成(δ²H和δ¹⁸O)利用液态水稳定同位素分析仪(Model DLT-100)分析。每个样品分析6次, 为了减小记忆效应, 舍弃前2次分析结果, 最终结果取后4次分析结果平均值。利用低温真空抽提技术获得的植株水有可能掺杂甲醇和乙醇类有机物质, 醇类有机物与水的吸收峰非常接近, 引起利用光谱方法测定的同位素组成产生误差。为了提高植株水δ²H和δ¹⁸O值测试的精度, 本文将测定的植株水同位素组成经Schultz等^[18]拟合的有机物校正曲线进行校正, 尽量降低有机物对测定结果的影响。测得的氢氧稳定同位素组成成为维也纳标准平均大洋水(V-SMOW)的千分偏差, 可用以下公式表示:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000$$

(1)

式中: R_{sample} 和 R_{standard} 分别为采集水样和标准样品的O或H的同位素比率(¹⁸O/¹⁶O或²H/¹H), 其中δ²H和δ¹⁸O的测定精度分别为0.5‰和0.15‰。

2.4 数据处理和统计分析

本文采用IsoSource1.3.1软件计算植物对各水源的利用比例。计算时, 增幅设为

1%, 质量平衡公差设置为 0.1, IsoSource 程序会利用线性混合模型计算所有可能的解, 具体计算过程见 Phillips 等^[19]。

在分析比较各土壤层间土壤含水量和氢氧同位素值差异时, 采用单因素方差分析 ($P < 0.05$)。运用独立样本 T -test 来检验不同植被间茎水同位素值间差异性 ($P < 0.05$)。统计分析在 SPSS17.0 中实现, 图形在 Origin 8.0 中制作。

2.5 植被潜在水源划分

本文将植被潜在水源划分为 5 类: ① 浅层土壤水 (0~60 cm), 同位素值变化有明显的季节及层间变化, 主要是本层土壤容易受降水、温度、蒸发等气候因素影响; ② 中层土壤水 (60~140 cm), 同位素值仍有较大季节性变化, 但与表层相比趋势已经趋缓; ③ 深层土壤水 (140~200 cm), 较小的季节及层间变化, 具有相对一致的同位素值; ④ 地下水, 同位素值季节变化很小或几乎没有变化; ⑤ 河水, 同位素值具有季节性变化特点^[20-22]。土壤分层合并加权处理同位素值的公式如下所示:

$$\delta_{WT} = \frac{\sum (swc_x \times \delta_x)}{\sum swc_x} \quad (2)$$

式中: δ_{WT} 是土壤层合并后加权处理的土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值; swc_x 和 δ_x 分别是土壤深度 x 处的土壤含水量与土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值。

3 结果分析

3.1 降水稳定同位素组成变化特征

根据艾比湖流域事件尺度降水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值, 统计分析得到该区域大气水线为 $\delta^2H = 6.93(\pm 0.18)\delta^{18}O - 5.43(\pm 1.37)$ ($R^2 = 0.99$, $n = 87$)。与全球大气水线 ($\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$, GMWL) 相比, 研究区大气水线的斜率偏小。这主要因为研究区: ① 地处内陆干旱区, 次降水量小, 空气湿度低, 降水在降落过程中经历较强的蒸发分馏; ② 远离海洋, 降水水汽有相当一部分来自局地水循环^[23], 局地水分蒸发导致降水的不平衡分馏和重同位素的富集, 使得大气水线的斜率偏小。

艾比湖流域降水的 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值表现出了显著的季节变化特征 (表 2), δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值呈现出夏季最大, 冬季最小, 春秋季居中的态势, 即降水氢氧稳定同位素组成冬季贫化而夏季富集。新疆干旱区水汽来源主要由 2 个部分组成, 西风环流和局地再循环过程, 再循环水汽的份额全年平均约 8%^[23]。研究区夏季温度较高, 湿度较低, 云下蒸发强烈, 降水同位素“温度效应”明显, 导致同位素值偏高。冬季水汽多来自同位素组成较低的西风环流, 且气温低, 导致当地降水同位素值偏低^[24]。因此, 降水中氢氧同位素组成的季节变化反映了水汽来源的差异性, 并受研究区气象条件制约。

3.2 土壤水及地下水稳定同位素组成变化特征

植被生长季, 不同生境土壤含水量较低, 剖面变化表现为随着深度增加逐渐增加, 由 0~60 cm 层的 $2.9 \pm 1.2\%$ 增加到 140~200 cm 层的 $18.4 \pm 2.3\%$ (表 3)。土壤水剖面 δ^2H 值均表现出沙丘最高、河岸最低、盐沼地和荒漠居中的特征, $\delta^{18}O$ 值在 0~60 cm 和 60~140 cm 层次盐沼地生境最高, 140~200 cm 层次则表现出沙丘最高、河岸最低。从表中还可以看出, 不同生境 3 个层次土壤水同位素组成均表现出 0~60 cm 层富集而 140~200 cm 层贫化。不同生境土壤质地、土壤结构、植被类型、群落盖度等均有差异, 导致土壤含水量和土壤水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 值的差异性。沙丘生境土壤水稳定同位素对湿度变化响应最大, 主要

表2 艾比湖流域降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节变化()Tab. 2 The seasonal variation of precipitation $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in Ebinur Lake basin ()

		春季	夏季	秋季	冬季
$\delta^2\text{H}$	均值	-96.6	-45.5	-103.0	-129.7
	范围	-98.4~-78.4	-63.1~-34.5	-132.7~-62.8	-148.2~-98.3
$\delta^{18}\text{O}$	均值	-12.33	-2.50	-11.31	-18.63
	范围	-12.89~-9.32	-5.94~-1.20	-17.74~-5.64	-20.16~-14.38

表3 不同生境土壤剖面土壤水含量及 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值Tab. 3 The average values of soil water content and soil moisture $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in different habitats

生境	0~60 cm			60~140 cm			140~200 cm		
	含水量(%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	含水量(%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	含水量(%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$
沙丘	2.9±1.2	-41.5±15.2	-2.48±1.45	5.2±1.0	-60.5±8.1	-7.19±0.93	8.9±1.1	-66.3±5.2	-8.50±0.49
荒漠	3.2±1.3	-51.4±13.7	-3.40±1.25	7.5±1.2	-67.5±7.3	-7.88±1.08	11.2±1.6	-73.8±4.7	-10.21±0.84
河岸	5.2±1.5	-55.6±11.4	-4.31±1.95	10.2±1.6	-73.1±6.7	-8.82±0.83	18.4±2.3	-79.3±5.7	-11.20±0.43
盐沼地	3.5±1.4	-48.7±17.1	-2.37±1.86	7.9±2.3	-63.5±8.2	-6.90±1.21	11.3±3.4	-68.4±3.8	-9.02±0.35

注:表中数据为平均值±标准方差。

原因是沙丘土壤砂粒含量高(80%以上),质地松散,大孔隙较多,土壤水分不易保持(2.9%~8.9%,表3),加之土壤表层蒸发强烈,土壤水同位素组成变化随之加大。而河岸生境因为距河流较近,土壤湿度相对较大(5.2%~18.4%,表3),生长有灌木和草本植物,植被覆盖度较好(50%,表1),形成湿度变化较小的小气候环境,导致土壤水稳定同位素组成对湿度响应较弱。盐沼地和荒漠表层土壤板结现象严重,结构相对紧实,孔隙小,土壤含水量较低(3.2%~11.3%,表3),土壤水稳定同位素组成对湿度响应较大。综上,不同生境表现出不同的生态环境特点,正是这些不同生态因子的复合作用,土壤水稳定同位素组成呈现出不同的特征。

土壤水中稳定同位素组成变化受大气降水、地表蒸发、水分在土壤中的水平迁移和垂直运动等多种因素的影响。在植被生长季,土壤水稳定同位素组成剖面总体变化表现为随着深度增加同位素值逐渐减小,到深层,土壤水同位素组成变幅最小,160 cm以下趋于稳定(图2),这同Sprenger^[25]的研究结论是一致的。这是因为,深层土壤水在长期的混合和累积作用下,包含了降水和土壤剖面水同位素信息;再者,土壤深层受到气象因素影响较小,蒸发作用较弱,导致土壤水同位素组成的剖面变化特征。但是,本文中春季和秋季土壤表层的变化趋势并不完全符合这个规律,春季不同生境 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均在20~30 cm深度达最大值,说明积雪对表层20 cm以上土壤水稳定同位素组成有直接的影响。秋季不同生境土壤水稳定同位素值均在10~20 cm出现增加现象,这与夏季不断减小的趋势不同。主要是秋季温度降低而降雨量与夏季基本持平,降雨多是小强度降雨,入渗土壤较浅,导致表层10 cm土壤水同位素值不是最高,而土壤20 cm处由于得不到降雨的补充且蒸发影响明显,导致同位素值最高。

艾比湖流域地下水同位素值表现了一定的季节性差异,但差异不明显(表4)。不同季节间氢氧同位素值总体表现为春季最高,秋季次之,夏季最小。可以看出,地下水同位素值的季节变化同土壤水不同。通过分析可知,土壤水同位素组成主要受气象因素影响,而地下含水层分布在地表以下,井深在80 m左右,受外界气象因子变化影响较小,主要受补给源特征和水—岩作用影响。夏季山区降雨多,温度高,加上冰雪融化补给地下水,导致地下水表现出了较低的同位素值。

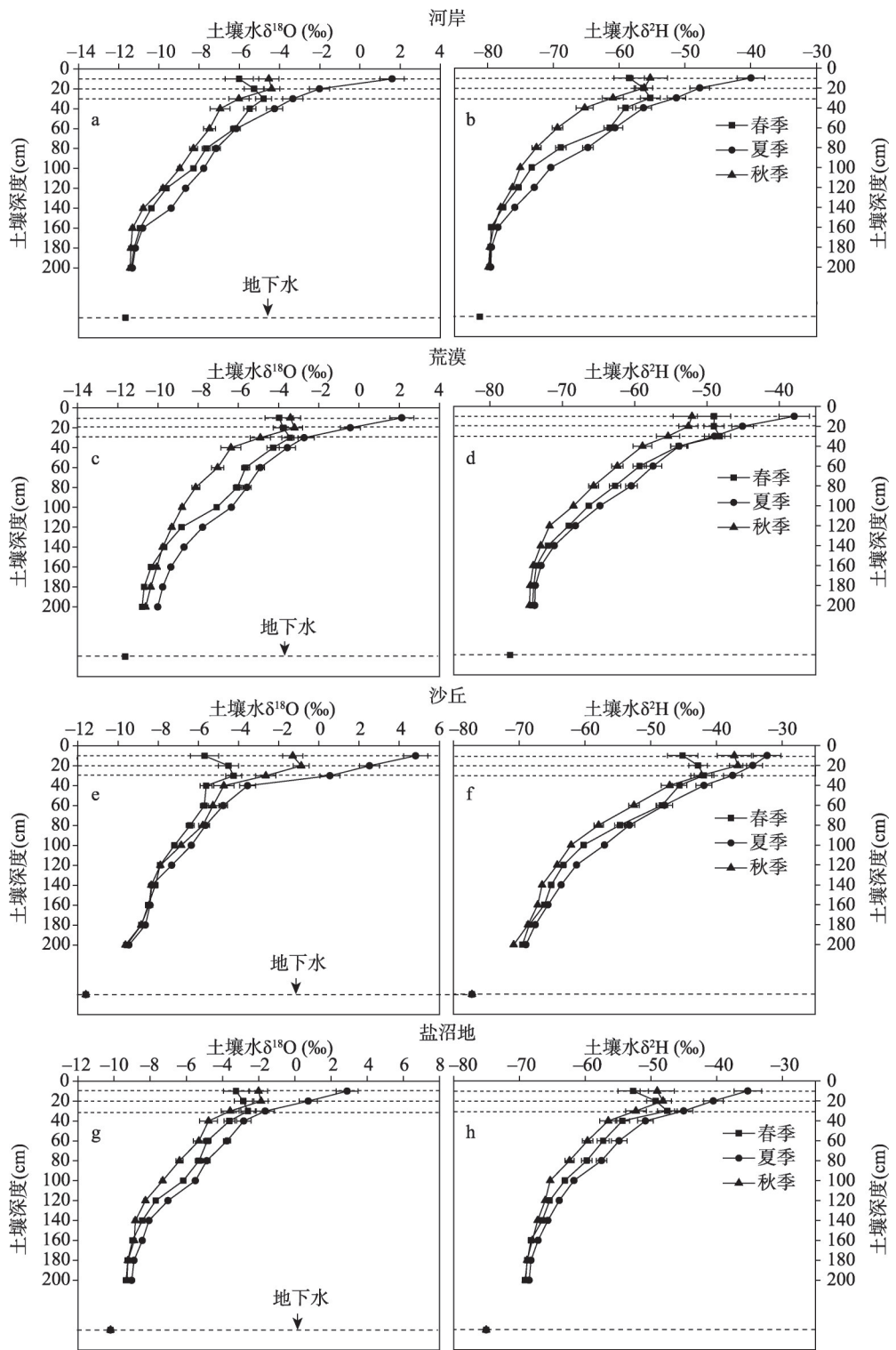


图2 不同生境土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值剖面(0~200 cm)变化特征

Fig. 2 The soil moisture $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ variation at different depths in different habitats

表4 地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节变化特征()
Tab. 4 The seasonal variation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in well water ()

井号	春季		夏季		秋季		井深(m)
	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	
1#	-80.1 ± 2.4	-12.03 ± 0.92	-80.5 ± 1.8	-12.32 ± 0.74	-80.3 ± 3.1	-12.25 ± 1.26	75
2#	-74.6 ± 2.5	-10.44 ± 0.63	-75.0 ± 2.6	-10.71 ± 1.12	-74.8 ± 2.4	-10.63 ± 0.83	80
3#	-76.8 ± 2.6	-11.35 ± 1.21	-77.2 ± 1.6	-11.63 ± 0.45	-77.0 ± 2.3	-11.46 ± 0.71	80

注：表中数据为平均值±标准方差。

3.3 植株水稳定同位素组成特征

不同生境植被植株水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值时间变化见图3。不同植株水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值时间变化趋势基本一致，表现为春季最高，夏季最低，秋季又逐渐增加，近似于“U”型。不同植被生长季内植株水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值不同，梭梭平均为 -69.6‰ 和 -9.36‰ ，分别在 $-71.4\text{‰} \sim -67.8\text{‰}$ 和 $-9.84\text{‰} \sim -8.81\text{‰}$ 之间；盐穗木平均为 -53.7‰ 和 -4.47‰ ，分别在 $-57.6\text{‰} \sim -47.8\text{‰}$ 和 $-5.04\text{‰} \sim -3.47\text{‰}$ 之间；白刺平均为 -64.4‰ 和 -7.49‰ ，分别在 $-70.8\text{‰} \sim -53.7\text{‰}$ 和 $-8.91\text{‰} \sim -4.92\text{‰}$ 之间；胡杨平均为 -75.1‰ 和 -10.18‰ ，分别在 $-80.4\text{‰} \sim -69.6\text{‰}$ 和 $-11.52\text{‰} \sim -7.51\text{‰}$ 之间。从平均值来看，盐穗木植株水稳定同位素值最大，其次为白刺和梭梭，胡杨最小。从同位素值变化幅度来看，梭梭、盐穗木较小，白刺和胡杨较大。不同植被植株水同位素值季节间差异不同，经过方差分析可知，梭梭和胡杨植被春季、夏季和秋季间同位素值差异显著 ($P < 0.05$)，盐穗木和白刺夏季和秋季间同位素值差异不显著 ($P > 0.05$)，而春季与夏季和秋季同位素值则差异性显著 ($P < 0.05$)。植株水同位素值的季节变化与土壤水含量关系密切，夏季土壤含水量浅层低，深层相对较高，同位素组成随深度增加逐渐贫化，地下水同位素值最低，与植株水同位素低值一致。但与降水量季节变化似乎无直接关系，夏季降水量大，同位素值偏高，与植株水同位素的低值不一致。植株水同位素信息反映了不同水源混合后的同位素组成特征，植株水同位素的季节性变化反映了植被不同生长季利用水源的不同。

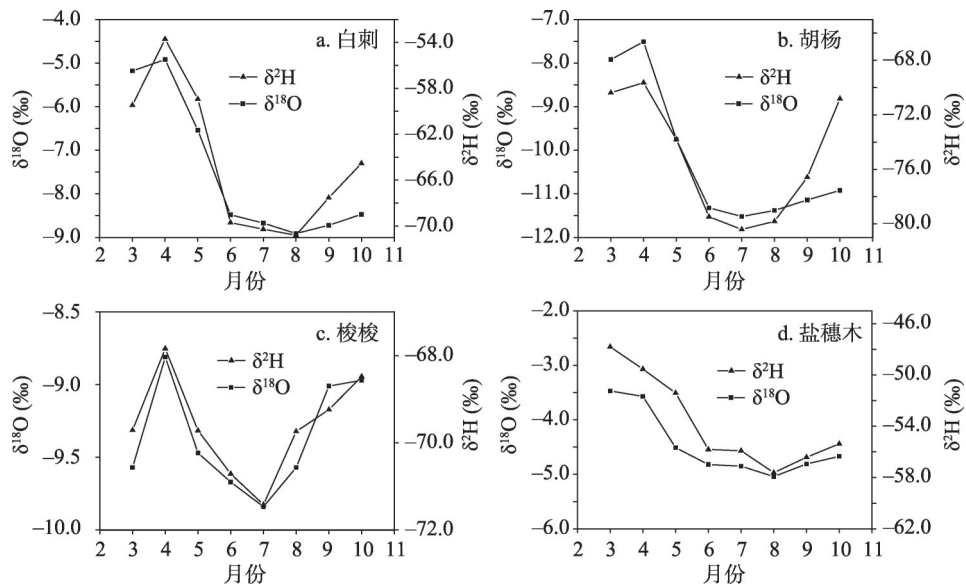


图3 不同植被植株水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值时间变异特征

Fig. 3 The monthly variation characteristics of xylem water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the four plants

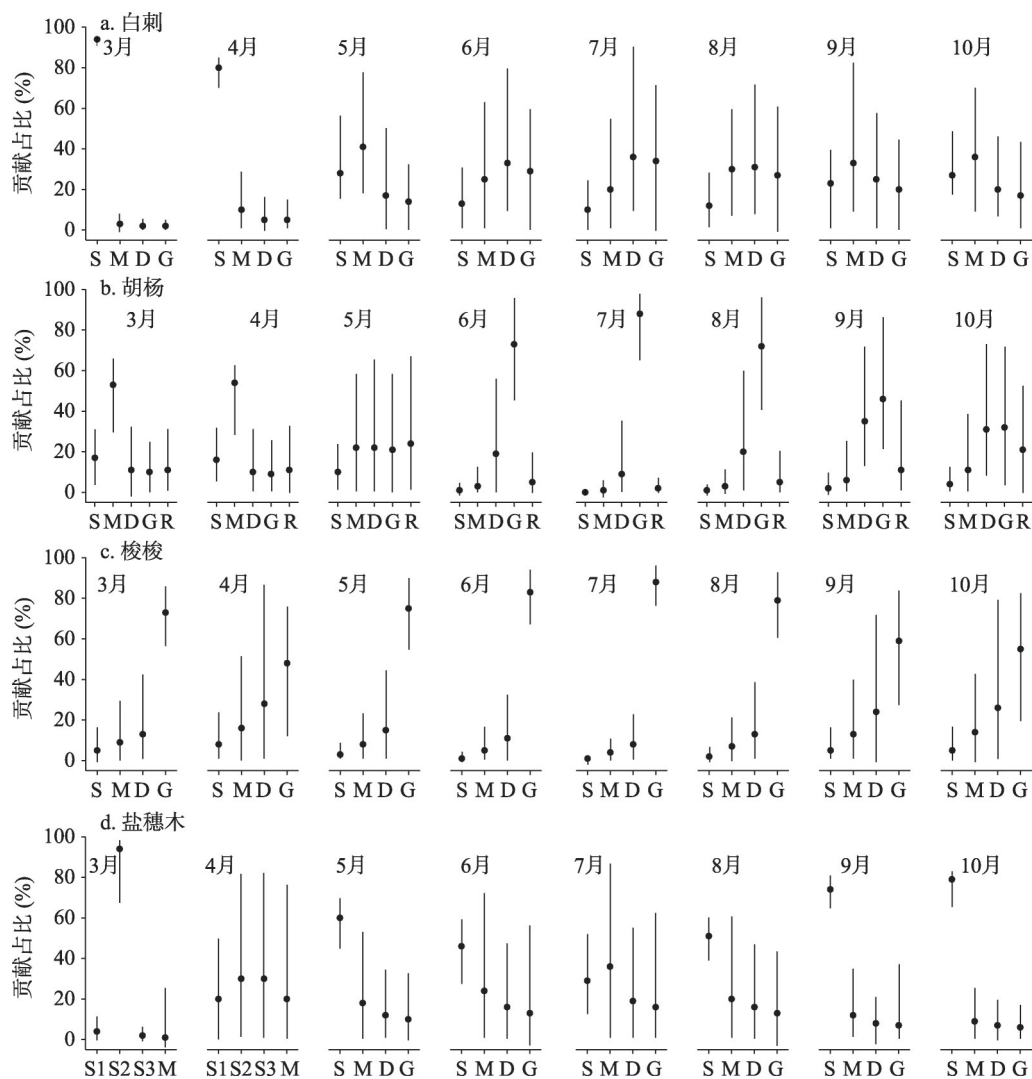
3.4 荒漠植被吸收潜在水源比例变化及影响机制

根据植被生境不同,吸水来源包括土壤水、地下水和河水,不同植被对潜在水源利用比例见图4。梭梭植被在整个生长期主要利用地下水,其次利用深层土壤水,几乎不用中间层和浅层土壤水。在夏季月份利用地下水比例最高,6月、7月和8月平均值分别达到了83%、88%和79%,用水范围分别在66%~96%、76%~97%和60%~94%之间。春季和秋季月份利用地下水的比例相比夏季略低,而深层土壤水比例略高,4月利用地下水的比例降低到48%,利用深层土壤水的比例升高到28%,9月利用地下水的比例为59%,利用深层土壤水的比例为26%,可见梭梭植被在夏季主要利用地下水,而春秋季节在利用地下水的同时也倾向利用深层土壤水。白刺植被利用水源比例在整个生长季内变化较大,3月和4月主要利用浅层土壤水,贡献率分别为94%和80%,5月在利用表层土壤水的同时逐渐利用中间层土壤水,利用比例分别为28%和41%,6月、7月和8月主要利用水源转移到深层土壤水,且利用地下水的比例逐渐加大,这三个月份利用深层土壤水和地下水的比例分别为33%和29%、36%和34%、31%和27%。到了秋季,利用浅层和中间层土壤水的比例又逐渐升高,9月和10月利用比例分别为23%和33%、27%和36%。可见,白刺植被在不同生长季主要利用水源在浅层、中间层、深层土壤水和地下水之间变换。盐穗木植被在整个生长季利用水源主要集中在浅层和中间层土壤水。3月主要利用20~40 cm层次土壤水,比例为94%,4月利用40~60 cm层次土壤水比例为60%,中间层土壤水利用比例有所升高,比例为20%。到了夏季,浅层土壤水利用比例开始下降,中间层土壤水比例开始升高,6月、7月和8月利用浅层土壤水比例分别为46%、29%和51%,中间层土壤水比例分别为24%、36%和20%。秋季,利用水源以浅层土壤水为主,9月和10月利用比例分别为74%和79%。胡杨植被因为生长在博尔塔拉河岸边,水源利用在土壤水和地下水的基础上可能还直接利用博尔塔拉河水。3月和4月,胡杨主要利用中间层土壤水,利用比例分别为53%和54%,其他层次土壤水、地下水和河水利用比例不太高,其中河水利用比例为11%和11%。5月向其他水源转移,中间层土壤水、深层土壤水、地下水和河水利用比例分别为22%、22%、21%和24%。夏季月份主要利用水源为地下水,6月、7月和8月利用比例分别达到73%、88%和72%,其他水源利用比例很低,河水利用比例为5%、2%和5%。秋季月份,深层次土壤水和地下水利用比例相当,9月和10月利用比例分别为35%、46%和31%、32%,利用河水比例逐渐升高,分别为11%和21%。

4 讨论

4.1 环境对荒漠植被水分利用影响

荒漠植被吸收不同水源的比例随生长期发生变化,这说明了植被在不同生长期对水分的需求是不同的,是植被适应干旱区环境变化,特别是可利用水源变化的体现,这是植被与环境协同进化的结果。尽管不同植被在不同生长期利用水源比例不同,但都呈现出相似的变化趋势,即春季由于积雪覆盖及融化,土壤表层含水量较高,荒漠植被会优先利用浅层土壤水,到了夏季,土壤含水量降低,植被(尤其是深根系植被)开始利用深层水源,比如深层次土壤水和地下水,到了秋季,土壤含水量较夏季有所增加,植被利用中间层土壤水比例增加。研究结果同古尔班通古特沙漠南缘的沙漠灌木研究结果是一致的^[25]。荒漠植被不同生长季利用不同水源表明植被根系在不同季节对不同水源的吸收上具有选择性,可以通过不同深度根系的快速生长、激活或者休眠的方式来适应可利用水源的季节性转换^[21]。不同生长季,土壤温度和含水量不同,在夏季,土壤温度较高



注: S1表示0~20 cm土壤水, S2表示20~40 cm土壤水, S3表示40~60 cm土壤水, S表示0~60 cm土壤水,

M表示60~140 cm土壤水, D表示140~200 cm土壤水, G表示地下水, R表示河水;

圆圈表示平均值, 竖线表示水源贡献的最小值到最大值的范围。

图4 植被利用潜在水源占比

Fig. 4 Contribution rates of water consumption from different water sources

(沙丘和盐沼地表层温度达40.5~45.6℃, 表5), 土壤含水量低(浅层土壤含水量为2.9%~5.2%, 表3), 在温度和干旱胁迫下可能会导致表层根系休眠或者细根脱水死亡。这种情况下, 可能会激发深层土壤根系的生长以吸收利用充足的深层水源。本文中, 沙丘生境的梭梭夏季主要利用地下水, 盐沼地生境的盐穗木夏季利用中深层次土壤水逐渐增多, 荒漠生境的白刺夏季利用水源也转入深层土壤水。因此, 在干旱区荒漠植被—水系统中, 荒漠植被具有重新分配不同深度根系功能的能力, 进而可选择性吸收利用不同的水源供植被生长需要。土壤表层盐渍化程度也能诱导植物可利用水源发生变化^[11]。由于强烈的蒸发作用, 干旱区土壤表层表现出较高的盐渍化现象, 尤其是盐沼地和荒漠生境(表层土壤全盐量分别为38.3 g/kg和26.5 g/kg, 表5), 为了减小盐胁迫的伤害, 盐穗木

表5 不同生境土壤剖面温度、盐度和pH值特征
Tab. 5 Temperature, salinity and pH values of soil profile in different habitats

生境	0~20 cm			20~40 cm			40~60 cm		
	温度(℃)	pH	全盐(g/kg)	温度(℃)	pH	全盐(g/kg)	温度(℃)	pH	全盐(g/kg)
沙丘	45.6±3.4	—	—	40.3±3.5	—	—	32.2±2.9	—	—
盐沼地	40.5±3.6	9.33±0.34	38.3±5.6	36.2±2.9	8.92±0.25	24.5±3.5	29.6±2.1	8.85±0.14	13.5±2.4
荒漠	33.4±4.4	8.82±0.21	26.5±4.8	27.5±3.2	8.73±0.15	15.6±4.1	23.4±2.6	8.75±0.13	9.7±1.9
河岸	28.3±2.7	8.75±0.23	12.2±3.6	24.6±2.3	8.68±0.17	9.3±2.6	18.3±1.8	8.63±0.15	6.4±1.8

注：表中数据为平均值±标准方差，—表示无测试值，采样时间为2018年6月。

和白刺通常放弃表层土壤水而选择吸收含盐量较小的深层土壤水，胡杨甚至会选择吸收含盐量更小的河水和地下水。而在低盐渍化区域，比如河岸生境，在春季胡杨较多的吸收利用表层和中层土壤水。

植物生长于土壤之中，土壤水是植物水的直接来源，植物根系吸收土壤水过程控制着植物生长和水分状态。地下水是多数荒漠植被重要的水分来源，地下水埋深的变化可以直接影响土壤水分和养分的分布，引起植被对水资源的竞争，从而影响荒漠植被分布、生长及种群演替等群落格局^[20]，本文区地下水埋深较深，可达到5 m^[17]，因此深根系植被较容易利用。在本文中，梭梭在整个生长季对地下水利用比例最高，但是在土壤相对湿润的春季，也会利用土壤水。盐穗木主要利用浅层土壤水，特别是在春季，利用比例达94%，夏季利用中间层土壤水的比例增加。白刺同盐穗木相似，春秋季节利用浅层土壤水比例最高，但到了夏季主要利用水源转向了深层土壤水。胡杨在整个生长季表现出对地下水的依赖性，尤其在夏季，值得注意的是，胡杨虽然生长在博尔塔拉河岸边，但通过同位素值观测，并没有表现出对河水利用的依赖，对河水利用的比例最大值为24%。

4.2 植被根系分布特征对水分利用影响

植物根系的分布特点决定植物的水分利用策略，植物对水分匮乏的生理响应与植物水分利用策略密切相关，并且和根系功能型一起决定着植物对限制其生存的环境因子的响应与适应特征（图5）。梭梭是深根系植被，拥有庞大的根系，可深达地下水层^[21]，而且地下水是一种稳定性水源，可满足植被在整个生长季的需求。另外梭梭植被根冠比大，相应的吸收根面积也大，有更多的光合产物分配于根系，这可能是深根系植物利用深层土壤水和地下水的一种必要投资。据研究，白刺直根能达2 m，水平根延伸4~6 m，2/3的总根面积限制在土壤剖面上层40 cm^[26]。根据白刺根系分布判断，它能够吸收本文中整个土壤剖面的水分，所以在不同生长季，白刺根据土壤剖面含水量的大小采用了春

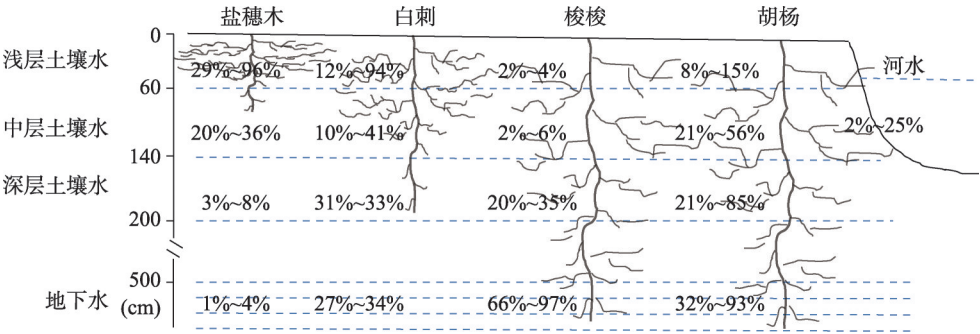


图5 典型荒漠植被水分利用来源及比例

Fig. 5 Water utilization sources and their proportions of the four desert vegetation species

季优先利用表层土壤水,夏秋季可以利用深层土壤水和地下水的生存策略。盐穗木根系没有找到可参考的资料,但可以参考同一生境且同为小灌木的琵琶柴植被根系,琵琶柴根系分布范围为0~80 cm,总吸收根面积的93%分布在0~60 cm深度^[27]。可见,类似盐穗木这类半灌木植被根系分布较浅,利用的水分主要集中在浅层和中间层土壤。所以,在干旱荒漠区,盐穗木植被对盐碱和干旱胁迫的抵抗力也是较强的。据研究,胡杨植被在地下水埋深不低于4 m的河岸生长良好,且具有水分再分配的功能^[28]。本文中胡杨在春季主要利用土壤水,可能是因为春季地下水埋深较低,而土壤水分含量较高的原因。夏季随着河水径流增加,对地下水补给增加,地下水上升,胡杨主要利用地下水,河水则利用率始终不太高,说明胡杨采取了多头下注的水分利用策略^[29],虽然生境为河岸,因为河水的季节性变化较大,胡杨还是将河水作为一种辅助水源来利用。

5 结论

(1) 艾比湖流域降水的氢氧稳定同位素组成表现出了显著的季节变化,夏季富集,冬季贫化,春秋季居中的态势。不同生境土壤水氢氧稳定同位素组成均表现为表层富集,随着土壤深度增加而逐渐贫化。

(2) 植株水氢氧稳定同位素值比较,不同季节均表现出盐穗木最大,其次为白刺和梭梭,胡杨最小。不同植株水氢氧稳定同位素值季节变化基本一致,表现为春季最高,夏季最低,秋季又逐渐增加。

(3) 荒漠植被在不同生长期潜在水源及利用比例不同。梭梭植被在整个生长期主要利用地下水。白刺植被利用水源比例在整个生长季内变化较大,春季主要利用表层土壤水,夏季和秋季利用深层土壤水和地下水的比例有所升高。盐穗木植被春季主要利用20~60 cm层次土壤水,夏季利用中间层土壤水比例略有提升,而秋季则又转移利用浅层土壤水。胡杨植被春季主要利用中间层土壤水,夏季主要利用地下水,河水利用比例较低。秋季深层土壤水和地下水利用比例开始上升,河水利用比例也随之升高。荒漠植被根系的分布及水源可利用性决定荒漠植被的水分利用策略。

参考文献(References)

- [1] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26. [陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [2] Barbeta A, Mejia C, Ogaya R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1213-1225.
- [3] Brooke A S, Kate L H, Tanya M D. Water use strategies of two co-occurring tree species in a semi-arid karst environment. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2003-2017.
- [4] Eggemeyer K D, Awada T, Harvey F E, et al. Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant C₄ grasses in a semiarid grassland. *Tree Physiology*, 2008, 29(2): 157-169.
- [5] Schwendenmann L, Pendall E, Sanchez-Bragado R, et al. Tree water uptake in a tropical plantation varying in tree diversity: Interspecific differences, seasonal shifts and complementarity. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 1-12.
- [6] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant Soil*, 2007, 291(2): 93-107.
- [7] Wang Yanli, Liu Lichao, Gao Yanhong, et al. Analysis of water sources of plants in artificial sand-fixation vegetation area based on large rainfall events. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1053-1060. [王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 基于较大降水事件的人工固沙植被区植物水分来源分析. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1053-1060.]
- [8] Liu Shubao, Chen Yaning, Chen Yapeng, et al. Response of *Populus euphratica* at different ages to rainfall pulses in the desert riparian forest of the lower reaches of the Heihe River. *Arid Zone Research*, 2016, 33(1): 172-178. [刘树宝, 陈亚

- 宁, 陈亚鹏, 等. 黑河下游荒漠河岸林不同林龄胡杨对脉冲式降雨的响应. 干旱区研究, 2016, 33(1): 172-178.]
- [9] Chen Dingshuai, Dong Zhengwu, Gao Lei. Water-use process of two desert shrubs along a precipitation gradient in Horqin Sandy Land. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(12): 1262-1272. [陈定帅, 董正武, 高磊, 等. 不同降水条件下科尔沁沙地小叶锦鸡儿和盐蒿的水分利用动态. 植物生态学报, 2017, 41(12): 1262-1272.]
- [10] Xing Xing, Chen Hui, Zhu Jianjia, et al. Water sources of five dominant desert plant species in Nuomuhong area of Qaidam Basin. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6277-6286. [邢星, 陈辉, 朱建佳, 等. 柴达木盆地诺木洪地区 5 种优势荒漠植物水分来源. 生态学报, 2014, 34(21): 6277-6286.]
- [11] Zhao X, Li F D, Ai Z P, et al. Stable isotope evidences for identifying crop water uptake in a typical winter wheat-summer maize rotation field in the North China Plain. Science of the Total Environment, 2018, 618: 121-131.
- [12] Meißner M, Köhler M, Schwendenmann L, et al. Soil water uptake by trees using water stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$): A method test regarding soil moisture, texture and carbonate. Plant Soil, 2014, 376(1/2): 327-335.
- [13] Huo G P, Zhao X N, Gao X D, et al. Seasonal water use patterns of rainfed jujube trees in stands of different ages under semiarid plantations in China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 265: 392-401.
- [14] Zhou Hai, Zhao Wenzhi, He Zhibin. Water sources of *Nitraria sibirica* and response to precipitation in two desert habitats. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2083-2092. [周海, 赵文智, 何志斌. 两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2083-2092.]
- [15] Chen J, Xu Q, Gao D Q, et al. Differential water use strategies among selected rare and endangered species in West Ordos Desert of China. Journal of Plant Ecology, 2017, 10(4): 660-669.
- [16] Chen Shuijiang, Hou Ping, Li Wenhua, et al. Comprehensive Scientific Investigation of Aibi Lake Wetland Nature Reserve in Xinjiang. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2006. [陈蜀江, 侯平, 李文华, 等. 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006.]
- [17] Qian Yibing, Wu Zhaoning, Chang Yishen, et al. South-north differences of vegetations and soils in the Aibi Lake area. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 781-789. [钱亦兵, 吴兆宁, 常轶深, 等. 艾比湖地区植被和土壤在南—北区段上的差异性分析. 干旱区地理, 2013, 36(5): 781-789.]
- [18] Xu Li. The research of soil and lake level changes for different plant communities in the Ebinur Lake wetland [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2014. [徐莉. 艾比湖湿地典型植物群落对土壤及湖泊水位变化的响应研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.]
- [19] Schultz N M, Griffis T J, Lee X H, et al. Identification and correction of spectral contamination in $^2\text{H}/^1\text{H}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measured in leaf, stem, and soil water. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2011, 25(21): 3360-3368.
- [20] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. Oecologia, 2003, 136 (2): 261-269.
- [21] Bahejiayinaer T, Min X J, Zang Y X, et al. Water use patterns of co-occurring C3 and C4 shrubs in the Gurbantonggut desert in northwestern China. Science of the Total Environment, 2018, 634: 341-354.
- [22] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, et al. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. Plant and Soil, 2015, 389: 73-87.
- [23] Ines K B, Jadranka B, Andreja S. Isotope composition of precipitation, groundwater, and surface and lake waters from the Plitvice Lakes, Croatia. Water, 2020, 12(9): 2414. DOI: 10.3390/w12092414.
- [24] Pang Zhonghe. Mechanism of water cycle changes and implications on water resources regulation in Xinjiang Uygur Autonomous region. Quaternary Sciences, 2014, 34(5): 907-917. [庞忠和. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄. 第四纪研究, 2014, 34(5): 907-917.]
- [25] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Northwest China and its water vapor sources. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 12-22. [柳鉴容, 宋献方, 袁国富. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. 地理学报, 2008, 63(1): 12-22.]
- [26] Sprenger M, Leister H, Gimbel K, et al. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes. Reviews of Geophysics, 2016, 54(3): 674-704.
- [27] Zhang C C, Li X Y, Wu H W, et al. Differences in water-use strategies along an aridity gradient between two coexisting desert shrubs (*Reaumuria soongorica* and *Nitraria sphaerocarpa*): Isotopic approaches with physiological evidence. Plant and Soil, 2017, 419: 169-187.
- [28] Xu Guiqing, Li Yan. Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 130-137. [徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. 生态学报, 2009, 29(1): 130-137.]
- [29] Yang Xiaodong, Lv Guanghui. Estimation of hydraulic redistribution of *Populus euphratica* in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8): 816-824. [杨晓东, 吕光辉. 新疆艾比湖湿地自然保护区胡杨根系水分再分配的估算. 植物生态学报, 2011, 35(8): 816-

824.]

- [30] Si J H, Feng Q, Cao S K, et al. Water use sources of desert riparian *Populus euphratica* forests. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(9): 5469-5477.

Water sources of the typical desert vegetation in Ebinur Lake basin

HAO Shuai^{1,2}, LI Fadong^{3,4}

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830054, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In arid and semi-arid environments, desert vegetation plays an important role in preventing soil erosion by wind and maintaining the stability of the desert and oasis ecosystem. Four types of typical desert vegetation, namely, *Populus euphratica*, *Haloxylon ammodendron*, *Nitraria sibirica* and *Halostachs caspica*, in different habitats (i.e., banks, sand dunes, desert, and salt marshes) were chosen as the model vegetation in this research. The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of rain water, soil water and plant water were applied to identify the water sources and quantify the proportions of water used during the whole growth period (from March to October). The results showed that the precipitation $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the Ebinur Lake basin varied from -142.5‰ to -0.6‰ and from -20.16‰ to 1.20‰ , respectively. The largest values of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ were found in summer and the smallest ones in winter. The soil water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the four habitats decreased gradually with the increase of the depth. The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of water extracted from the four plant stems had similar variation trend, i.e., the maximum was observed in spring, and the minimum was in summer. Among the four plants, *Halostachs caspica* had the highest stable isotopic values in the stem water, followed by *Nitraria sibirica*, *Haloxylon ammodendron* and *Populus euphratica*. The water sources and utilization ratios of desert vegetation varied in different growth stages. In the whole growing period, *Haloxylon ammodendron* mainly used groundwater. The proportion of water used by *Nitraria sibirica* varied greatly throughout the growing season. In spring, plants mainly relied on surface soil water, with a contribution rate of 80%-94%; in summer, the proportion of deep soil water use was 31%-36%; and in autumn, the proportion of middle soil water use was 33%-36%. *Halostachs caspica* mainly relied on topsoil water in spring and autumn, and the proportion of soil water in the middle layer slightly increased in summer, which was 20%-36%. *Populus euphratica* mainly used the intermediate soil water in spring, with a utilization rate of 53%-54%; in summer, groundwater was the main source, with a utilization rate of 72%-88%, and only 2%-5% from river water; in autumn, the utilization rate of river water rose to 11%-21%. The results indicated that there were significant differences in water use sources during the growing season of desert vegetation in arid areas. This research provides a theoretical basis for understanding the water use mechanism, water adaptation strategies, and vegetation restoration and management of desert vegetation in arid areas.

Keywords: desert vegetation; water use; stable isotope of hydrogen and oxygen; Ebinur Lake