

贺超,刘廷玺,段利民,等.科尔沁沙地差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)水分利用特征[J].中国沙漠,2022,42(4):190–198.

科尔沁沙地差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*) 水分利用特征

贺超^a,刘廷玺^{ab},段利民^{ab},王冠丽^{ab},郝丽娜^{ab}

(内蒙古农业大学 a.水利与土木建筑工程学院, b.内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 深入剖析科尔沁沙地固沙植被水分利用特征,可为科尔沁沙地生态修复和区域荒漠化防治提供参考。测定了科尔沁沙地典型固沙植被差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)2020年生长期植物水及其所在区域的地下水、土壤水与降水的 δD 值,采用多源线性混合模型定量分割了差巴嘎蒿的水分利用来源。结果表明:(1)研究区大气降水方程斜率小于全国大气降水方程,说明该区域大气降水蒸发强烈,方程截距较大,表明研究区水汽再循环强烈。土壤水同位素方程的斜率和截距都小于研究区大气降水方程线,表明土壤水受二次蒸发影响显著。(2)土壤含水率与降雨量、植物生长期的变化有显著的相关关系,受降雨影响,浅层(0—40 cm)土壤含水率波动幅度最大,且土壤含水率随土层深度的增加趋于稳定。(3)雨季,差巴嘎蒿主要利用0—40 cm和120—160 cm层的土壤水,利用率分别为30.1%和25.2%,对其他深度的土壤水利用较少;旱季,主要利用0—80 cm和160—200 cm层的土壤水,利用率分别为30.7%和21.1%,明显高于其他土壤层。

关键词: 差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*); 氢氧稳定同位素; 多元线性混合模型; 水分来源; 科尔沁沙地

文章编号: 1000-694X(2022)04-190-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00007

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

0 引言

荒漠化已成为全球性问题,约30%的陆地已经被荒漠化侵蚀。2011年中国荒漠化土地面积占国土面积的27.4%^[1],荒漠化问题引起国内外学者的高度关注。由于强烈的人类活动以及脆弱的生态环境,科尔沁沙地已成为中国北方典型农牧交错带荒漠化最严重的地区^[2]。

水资源是制约干旱和半干旱地区的植物生长与生存的主要因子^[3],这些区域植物的生长尤其依赖于当地的降水^[4]。降水事件结束后,雨水主要的消耗方式为植物蒸腾与土壤蒸发。大部分植物的根系从土壤中吸水运输到叶片的过程中一般不会发生同位素分馏,因此,研究植物水分利用来源的主要方法就是氢氧稳定同位素技术^[5-6]。

张江等^[7]通过稳定氢氧同位素技术研究了塔里木河下游不同林龄胡杨(*Populus euphratica*)的水分

来源状况。苏鹏燕等^[8]以黄河兰州段作为研究区域,通过收集多枝怪柳与旱柳的枝条以及降水、地下水等样品,通过氢氧同位素方法,分析了旱柳与多枝怪柳对各种水源的利用情况以及二者之间的水分利用关系,发现在生长期,旱柳和多枝怪柳主要吸水层位为浅层(0—30 cm),地下水、河水相对于其他水源对旱柳的贡献最小;但是,在干旱季节,植物对地下水和河水的利用率增加。Wang等^[9]通过测试黄土高原沙棘和毛竹的植物水和不同土层(0—300 cm)的土壤水,发现在生长期沙棘和毛竹主要吸收0—120 cm层位的土壤水,沙棘叶片水分利用效率高于毛竹。Bowling等^[10]的研究表明,黄槭、宏槭等成熟的树种均利用地下水。Javaux等^[11]通过收集大量数据,统计多种植物同位素的组成水源,作为当地植被木质部水蒸发线和气象水线的交叉点坐标 x 和 y 坐标,得出地下水补给的降水来源与

收稿日期:2021-11-04; 改回日期:2022-01-19

资助项目:国家自然科学基金项目(51620105003,51869017);内蒙古自治区自然科学基金项目(2018ZD05,2020JQ06);教育部创新团队发展计划项目(IRT_17R60);科技部重点领域创新团队项目(2015RA4013)

作者简介:贺超(1995—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为生态水文。E-mail: 1677247904@qq.com

通信作者:刘廷玺(E-mail: txliu1966@163.com)

植物吸收水分的降水来源不同。

在科尔沁沙地,有关植物群落的演替及种间关系^[12-13]、蒸散发模拟^[14-15]、遥感解译^[16-17]等方面的研究较多,对于干旱半干旱地区沙丘植被类型区降水-地下水-土壤水-植物水连续体的氢氧同位素特征研究罕见。本研究以科尔沁沙地典型植被差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)为对象,通过野外调查取样和对样地的定位观测,分析研究区不同水体的氢氧同位素特征、植被的水分利用特征以及植被在生长季内水分利用方式的差异,掌握当地植物的水分利用策略,为科尔沁沙地的生态修复和区域荒漠化防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地东南缘的阿古拉生态水文试验站,属于内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇,面积约55 km²。研究区四季分明,属于温带大陆性季风气候,海拔120—290 m,多年平均降水量390 mm,年潜在蒸发量1 412 mm。研究区以湖泊为中心,从南到北大致为沙丘-草甸-农田-沙丘梯级生态带。试验区地理位置和分布见图1,试验站点A3位于研究区中间北侧半流动沙丘上。

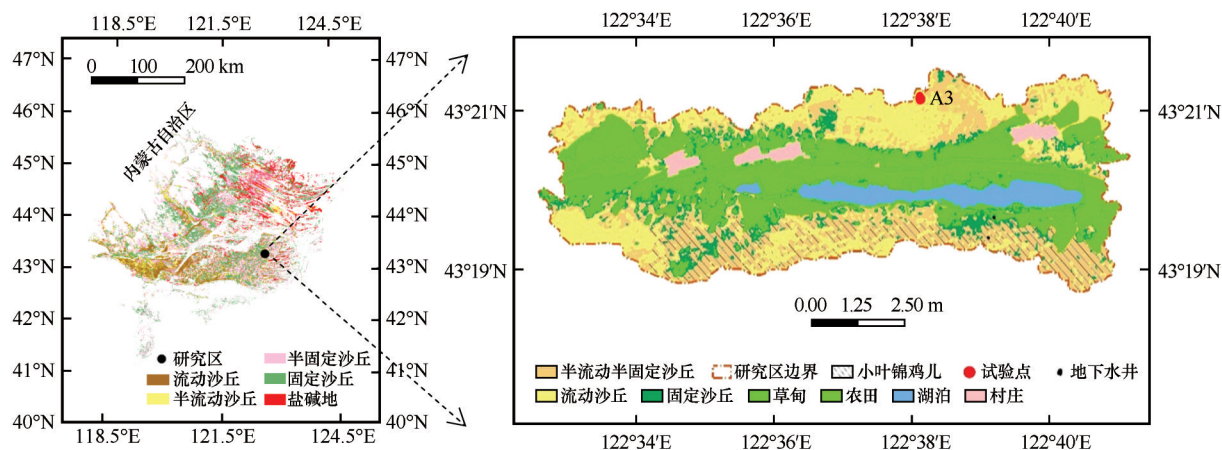


图1 试验区及试验点位置

Fig.1 Study area and location of the experimental site

1.2 样品的采集与试验方法

1.2.1 样品采集

本研究选取半流动沙丘A3试验点的差巴嘎蒿植被作为试验对象,取样时间为2020年5—10月。

在2020年5—10月,选取4株生长状态良好且相似、无人工干扰的典型差巴嘎蒿(代表株所在地地势平坦,土壤质地相同,无边界效应)作为测试对象。在样株上采集成熟的枝条,将外表皮去除,保留木质部,将处理好的枝条放入塑封袋密封,再放入含有冰袋的隔热箱,防止水分蒸发。在每棵样株的正东方向选取3个不同取土位置,位于冠幅边缘和其到基茎距离的三等分点,由内到外分别命名为1/3处、2/3处和边缘处,用土钻采集0—10、10—20、20—40、40—80、80—120、120—160、160—200 cm层位处的土壤,一部分装入铝盒,放入保温箱里用于测试土壤含水率,另一部分装入塑封袋密封,带回实验室进行水分抽提,用于氢氧同位素测定。

在气象站内放置降雨收集装置,每次降雨事件结束后,收集雨水于塑料瓶中,并记录降雨日期与降雨量的多少。

在试验点地下水位观测井中用抽水泵取水,装入塑料瓶中,带回实验室冷冻保存。

1.2.2 样品测定及数据分析

植物水与土壤水的提取采用低温真空蒸馏法提取水分^[18],抽提出的水经过0.22 μm有机系一次性过滤头、13 mm直径的针头过滤器(Advantec MFS® grade No. 235 or similar)过滤,然后低温保存(0—2 °C)到1.5 mL的玻璃样品瓶中。抽取的水样使用美国LGR(LWIA-45-EP)便携式同位素分析仪测定各水体的δD和δ¹⁸O值。测定精度分别为0.1‰和0.3‰。

$$\delta(\text{‰}) = \left[\frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{标样}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中:δ表示δD或δ¹⁸O计算值;R_{样品}与R_{标样}表示测定

样品与标准样品中的氢或氧的值。

1.2.3 计算土壤含水率

本研究采用传统方法烘干后称重测定土壤含水率^[19],先测土样的湿重,然后再将土样置于120℃烘箱中烘干24 h,再称其质量。

$$\omega = \left[\frac{(m - m_s)}{m} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: ω 为土壤含水率; m 为土壤湿重; m_s 为土壤干重。

1.2.4 多元混合线性模型法

采用多元混合线性模型(IsoSource)^[20]定量计算植物水分利用率,各潜在水源的相对贡献率为:

$$Y_p = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + \dots + a_n y_w \quad (3)$$

$$1 = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n \quad (4)$$

式中: a_n 为第 n 个潜在水源对植物水的贡献率; Y_p 代表植物木质部水氢同位素值; y_w 代表不同潜在水源 w 中氢同位素值。

2 结果与分析

2.1 降水量特征

2020年5—10月的日降雨量、气温随时间的变化如图2所示。试验区的降雨量及气温随季节变化明显,5月和10月气温较低,6—8月气温较高。日均气温最高发生在7月24日,为28.1℃,日均气温最低发生在10月,为3.9℃。由于7月中旬一直处于干旱状态,气温较高,随着8、9月降雨频次的增加,气温有所下降,到10月,气温迅速下降。总降雨量为273.4 mm,降雨集中在6—9月,最大降雨量发生在8月,降雨69.5 mm,占全年总降雨量的25%,最

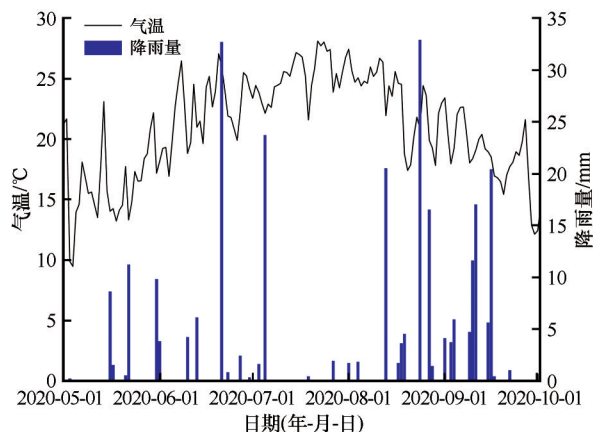


图2 2020年5—10月气温及降雨量变化

Fig.2 Changes in temperature and rainfall from May to October 2020

小降雨量发生在5月,降雨量为0.2 mm。2020年6—9月降雨量占全年降雨量的85%,日最大降雨量发生在8月24日,为32.9 mm。

2.2 降水、土壤水、植物水特征

根据2020年5—10月采集的降水同位素数据计算的研究区大气降水方程线为 $\delta D = 7.85\delta^{18}O + 18.91$ 。大气降水样品中 δD 值-128.87‰—-40.39‰, $\delta^{18}O$ 值-16.69‰—-7.67‰,变化较大,并呈现出大降雨事件同位素富集的现象。与全球大气降水方程线($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)相比较,此区域降水方程线斜率较小,说明大气降水受到了蒸发的影响,而截距较高,表明研究区部分地区水汽再循环比较强烈。研究区的土壤水线为 $\delta D = 4.68\delta^{18}O - 33.86$,土壤水线位于大气降水线的上方,其斜率和截距都小于研究区大气降水同位素方程(图3),说明土壤水受二次蒸发影响显著。差巴嘎蒿茎干水的氢氧值在土壤水氢氧同位素范围内分布,表明差巴嘎蒿的茎干水主要来源于土壤水。

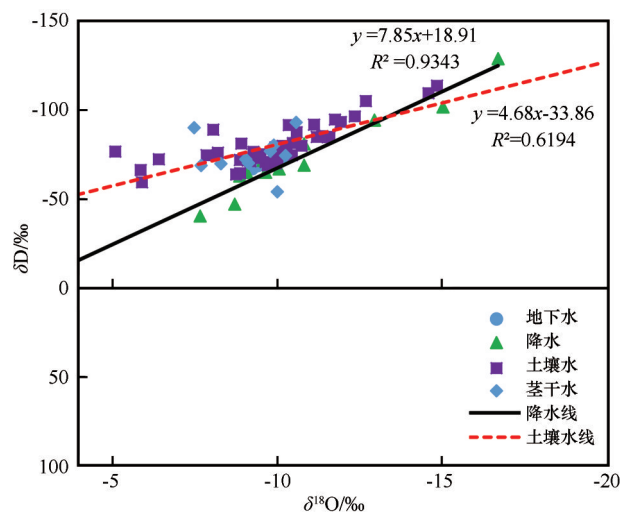


图3 研究区茎干水、土壤水、降水与地下水的氢氧同位素特征

Fig.3 Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of stem water, soil water, precipitation and groundwater in the study area

2.3 生长季土壤含水率的变化

表1为研究区植被在生长季中土壤不同层位土壤含水率结果。试验区整体上土壤含水率偏低,最高为6.32%,最低为0.50%。在植物生长季(5—10月)土壤含水率在0—80 cm土层逐渐增大,80 cm以下土壤含水率逐渐减小。土壤含水率最大值主要

在40—80 cm内,而0—20 cm土壤含水率明显较低,即使6月降雨事件频发,0—10 cm和10—20 cm土壤含水率也只有2.47%和4.34%,由于试验区处于半干旱沙丘,地下水位较深,而植物处于生长期,需要较多的水分,因此主要通过降水入渗到土壤中,植物通过根系来吸收水分,因此表层土壤含水率很小。0—80 cm土层的含水率波动幅度较大,最大值在6月(6.32%),最小值在8月(0.50%),而160—200 cm深层土壤含水率波动较小,为2.56%—5.14%,可能因为土壤层位较深,降水可能下渗不到该土壤层位或是在下渗的过程中一部分被浅中层土壤吸收,另一部分被植物吸收利用。在降雨事件频发的6月,160 cm以下土壤含水率增加不显著,表明大气降水可能没有补给到160 cm以下的土壤层。

表1 研究区土壤含水率(%)的年内变化						
Table 1 Annual change of soil moisture content (%) in the study area						
土壤深度 /cm	月 份					
	5	6	7	8	9	10
0—10	2.86	2.47	1.51	0.50	3.18	1.67
10—20	3.12	4.34	2.15	1.02	3.66	2.68
20—40	3.31	6.32	3.02	1.94	4.50	3.62
40—80	5.32	4.57	4.49	3.45	5.89	6.05
80—120	2.98	2.53	3.65	2.93	4.22	3.90
120—160	2.72	3.52	3.01	3.32	3.12	4.86
160—200	3.79	3.76	3.69	2.70	2.56	5.14

为探明降雨对试验区不同土壤层位含水率的影响,本文选取8月13日极端大降雨事件作为研究,分别采集了雨前,雨后第1、3、5天的土壤水进行分析。由图4可知,由于受降雨影响,0—40 cm土壤含水率波动幅度最大,40—120 cm土壤含水率波动幅度较小,并且在120 cm处土壤含水率保持一致,120—200 cm土壤含水率又有小幅度增加后又减小。0—80 cm内雨后不同层位土壤含水率都高于雨前。降雨后的第1天,0—40 cm浅层土壤含水率增加最显著,雨后第3、5天表层土壤含水率有所减少,同时40—120 cm土壤含水率小幅度增加,但是120—160 cm土壤含水率却没有显著增加。雨后第1、3天在120—180 cm的土壤含水率小于雨前1天,仅在雨后第5天,140—200 cm土壤含水率大于雨前1天,同时180—200 cm雨后土壤含水率均大于雨前土壤含水率,说明降雨入渗需要一定的过程。总体

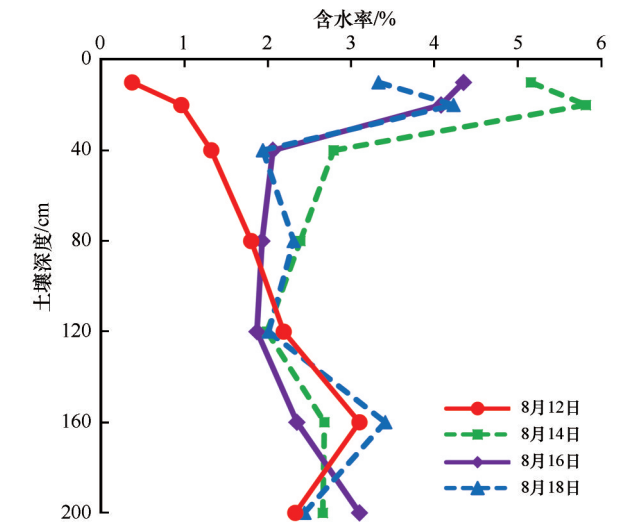
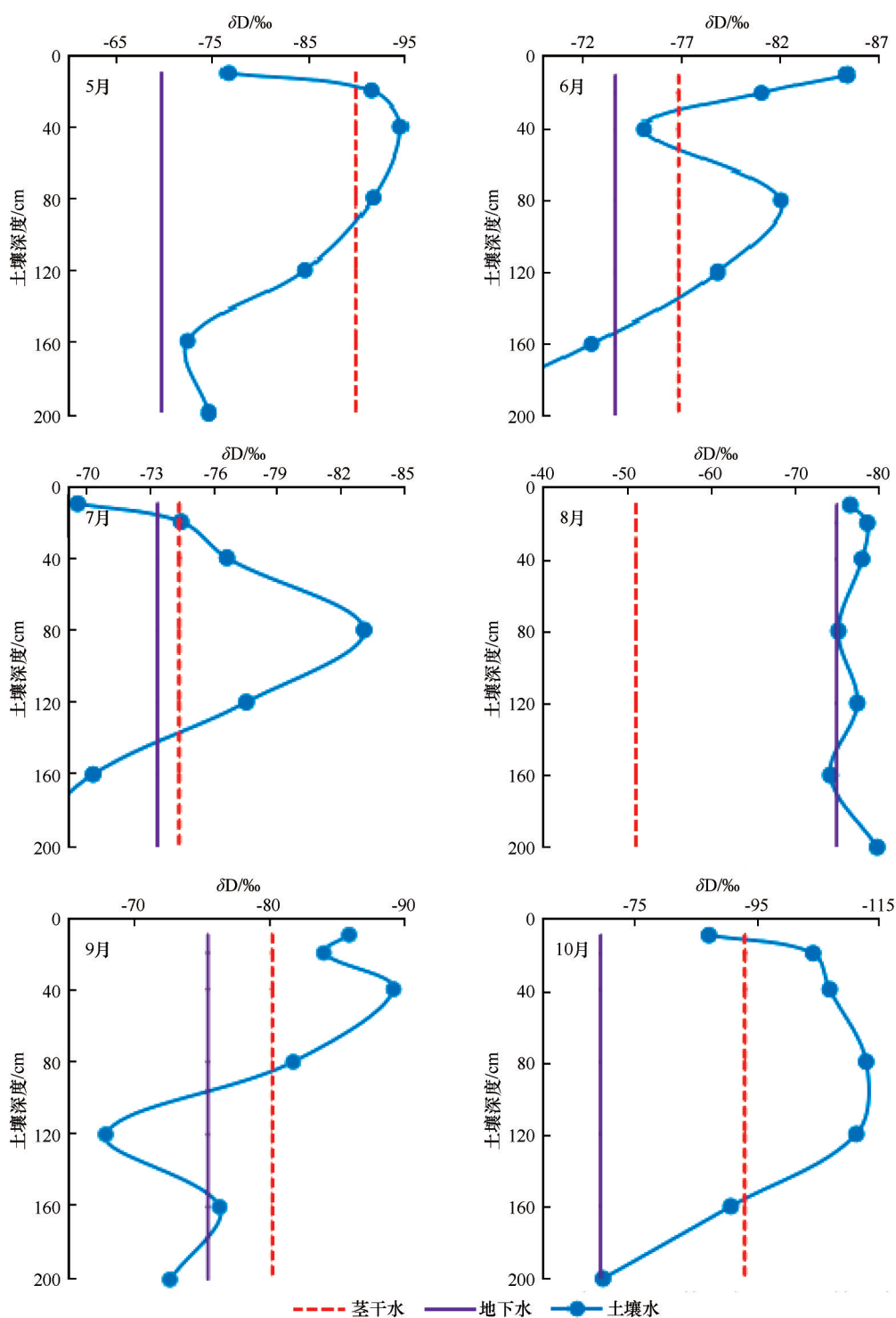


图4 雨前、雨后土壤含水率变化
Fig.4 Changes of soil water content before and after rain

上,随降雨后时间的增加各层土壤含水率呈现出“S”型规律,并且各层土壤含水率的最大值与最小值存在一定的时间差异,表明降雨入渗到土壤中的水和原土壤水发生混合,并逐渐向下推进。

2.4 定性判断差巴嘎蒿的水分来源

将差巴嘎蒿不同深度下土壤水的 δD 值与植物茎干水以及地下水的 δD 值进行对比(图5),结果表明,5月差巴嘎蒿茎干水的 δD 值与10—20 cm土层土壤水的 δD 值相交,与80—120 cm土壤水也相交,表明植物可能利用了10—20 cm和80—120 cm层位的土壤水,此外,土壤水与地下水 δD 值在160 cm处距离较近,说明土壤水可能受地下水的补给。6月差巴嘎蒿茎干水的 δD 值与20—40 cm和40—80 cm以及120—160 cm土层土壤水 δD 值相交,表明这些层位的土壤水被差巴嘎蒿在生长过程中所利用,可以大致得出,差巴嘎蒿在生长初期,主要利用了0—40 cm浅层土壤水和120—160 cm深层土壤水,还可能利用了地下水。由于差巴嘎蒿在生长初期,研究区蒸发强烈且降水事件较少,浅层土壤含水率较小,难以满足差巴嘎蒿的生长,那么差巴嘎蒿为了满足自身生长会吸收更深层的土壤水。7月,差巴嘎蒿茎干水的 δD 值与10—20 cm和120—160 cm土层土壤水的 δD 值有一个交点,说明差巴嘎蒿利用了这些层位的土壤水,同时差巴嘎蒿的茎干水与地下水距离较近,还可能利用了少量地下水,这可能是6月底一直持续降雨,降雨入渗到浅层土壤中,差巴嘎蒿优先利用浅层土壤水来维持生长,当浅层土壤

图5 5—10月土壤水、地下水和差巴嘎蒿茎干水的 δD 比较Fig.5 Comparison of δD in soil water, groundwater and stem water of *Artemisia halodendron* from May to October

水不足以维持植物生长后,则会吸收更深层次土壤水。8月初出现了土壤水与茎干水无交点的情况,可以看到80 cm和160 cm处地下水的 δD 值与差巴嘎蒿 δD 值相近,这种情况的发生是由于7月5日后一直无降雨持续到8月初,土壤蒸发作用加强,可能会出现深层土壤水被地下水通过毛细水上升补给。

9月,差巴嘎蒿茎干水与80—120 cm土层土壤水的 δD 值有交点,且160—200 cm土壤水 δD 值与地下水 δD 值较为接近,说明差巴嘎蒿可能利用80—120 cm土层土壤水并且地下水可能补给了深层土壤水。10月,差巴嘎蒿茎干水与0—20 cm和160—200 cm土层土壤水有交点,说明随着降雨量的减少,植物

在生长末期需要吸收深层土壤水来维持生长。

综上所述,在整个生长期内差巴嘎蒿既吸收了浅层土壤水,也吸收了深层土壤水。另外可以发现波动的 0—200 cm 土层土壤水氢值多次同茎干水或地下水发生相交,说明定性判断不能定量分析出差巴嘎蒿的水分利用来源,则需要采用多元混合线性模型系统定量分析差巴嘎蒿的水分利用来源。

2.5 生长季差巴嘎蒿水分来源定量分析

将土壤水合并后平均分为 5 层(0—40、40—80、80—120、120—160、160—200 cm)、地下水、植物茎干水同位素值按日期输入多元混合线性模型中,资源增量参数设置为 1%,质量平衡忍受差参数设置为 0.05。

如表 2 所列,5 月差巴嘎蒿主要利用 0—80 cm 与 80—120 cm 土层土壤水,利用率分别为 76.5% 与 13.6%。6 月每层土壤水都有利用,但是对浅层土壤水利用多于深层土壤水,0—80 cm 土层土壤水的利用率为 39.9%,120—160 cm 土层土壤水的利用率为 18.9%。7 月进入雨季,0—40 cm 层位土壤水利用率在 5—10 月中最高,利用率为 30.1%,这是由于 6 月底一直降雨的缘故,大量雨水补给到浅层土壤用来供给植物生长,植物优先吸收浅层土壤水,对 120—160 cm 土层土壤水利用率为 25.2%,与直观判断法得出的结论大致相同。8 月植物生长主要利用 120—160 cm 土层土壤水,利用率高达 51.5%,这是由于

近一个月干旱,导致浅层土壤含水率很小,对 0—40 cm 土层土壤水的利用率仅为 5.9%,植物只能吸收深层土壤水来维持生长。9 月差巴嘎蒿对 0—80 cm 土层土壤水的利用率为 50.8%,这是由于 8 月中旬后有连续的大降雨并持续到 9 月初,导致浅中层土壤含水率增大,因此差巴嘎蒿在此阶段对 0—80 cm 土层土壤水的利用率较大。10 月为干旱季节,此阶段差巴嘎蒿对不同层位的土壤水均有利用,其中对 0—80 cm 土层土壤水的利用率为 30.7%,同时植物在此阶段进入了生长末期,当浅层土壤水不足时,会加大对深层土壤水的利用,因此,10 月 160—200 cm 层位土壤水利用率在 5—10 月最大,利用率为 21.1%,表明差巴嘎蒿对土壤水的利用具有明显的季节性差异。

3 讨论

3.1 不同水体氢氧同位素组成分析

对研究区的大气降水-植物水-土壤水-地下水氢氧同位素相互关系分析可知,大部分土壤水同位素值分布在大气降水方程线的上方,大气降水方程的截距和斜率都大于土壤水方程,说明研究区降水主要补给土壤水,同时土壤水受到强烈的非平衡蒸发作用。由图 5 还可以看出,地下水氢氧同位素变化幅度最小,表明地下水氢氧同位素组成稳定,这

表 2 生长季各潜在水源对植物生长的贡献率(%)
Table 2 Contribution rate (%) of each potential water source to plant growth during the growing season

潜在水源	土壤深度 /cm	月 份					
		5	6	7	8	9	10
土壤水	0—40	12.0	20.4	30.1	5.9	25.4	17.3
		(0—57.0)	(0—69.0)	(0—88.0)	(0—32.0)	(0—57.0)	(0—78.0)
	40—80	64.5	19.5	12.3	10.5	25.4	13.4
		(36.0—86.0)	(0—83.0)	(0—52.0)	(0—55.0)	(0—60.0)	(0—58.0)
	80—120	13.6	17.7	11.8	12.9	12.8	12.8
		(0—64.0)	(0—70.0)	(0—50.0)	(0—67.0)	(0—53.0)	(0—55.0)
	120—160	4.3	18.9	25.2	51.5	10.6	16.6
		(0—21.0)	(0—76.0)	(0—93.0)	(0—100.0)	(0—43.0)	(0—74.0)
	160—200	3.1	10.6	10.6	8.2	12.4	21.1
		(0—16.0)	(0—31.0)	(0—50.0)	(0—43.0)	(0—52.0)	(0—60.0)
	地下水	2.5	12.9	10.0	11.0	13.4	18.8
		(0—13.0)	(0—53.0)	(0—86.0)	(0—71.0)	(0—56.0)	(0—44.0)

括号内数值为取值范围。

可能的原因是地下水埋藏土层较深,而影响地下水的氢氧同位素值的环境因素较土壤水少,因此,科尔沁沙地的地下水氢氧同位素几乎不会受到蒸发而发生分馏的影响。降水进入到土壤后,一部分被植物吸收利用,一部分通过土壤表层蒸发,另一部分则会下渗到深层土壤中,而植物会以蒸腾作用将根系从土壤中吸收的水分沿导管向上运输到叶片,最终通过气孔散出。从图3可以看出大部分茎干水在土壤水范围内,且与土壤水靠近,说明茎干水主要来自土壤水。茎干水与土壤水分布在大气降水之上,表明植物吸收的土壤水受到了分馏作用的影响,且茎干水与土壤水较降水受蒸发作用的影响更大,这与傅思华等^[21]的研究结果一致。

3.2 土壤水分特征

土壤水分主要受蒸散发、大气降水等外界条件的影响,土壤受外界条件的影响随着土壤深度的增加而逐渐减弱^[22-23]。另外,当地气候变化、不同的植被类型与不同土壤的结合直接影响土壤水分的分布,土壤理化性质的不同,引起土壤水分的不均一性^[24]。冬季的融雪水和春季降水补给使浅层土壤水含量增加,春季是土壤水分的补给期,土壤水分较高,随着气温升高和植物生长的消耗,夏季变为土壤水分的消耗期^[25]。5月,土壤含水率在80 cm土层出现峰值,原因是雨水和融雪水渗透补给的结果。结合表1和图5可以看出,0—80 cm土层土壤含水率以及土壤水 δD 值变化幅度较大,说明研究区0—80 cm土层受外界影响大,随着深度的增加,深层土壤含水率变化较小,且土壤水 δD 值变化趋于稳定并接近地下水,受外界影响较小。科尔沁沙地属于干旱半干旱地区,降雨较少,表层土壤蒸散发强烈, δD 和 $\delta^{18}O$ 相对富集,表层以下的土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 逐渐贫化,深层土壤水因受地下水的补给变得稳定^[26]。本研究中0—10 cm土壤水 δD 相对富集,为-69.53‰—-84.13‰,10—160 cm土壤水 δD 逐渐贫化,自160 cm以下,土壤水同位素值靠近地下水同位素值,说明地下水可能补给了深层土壤水,这与刘保清等^[27]研究科尔沁沙地南缘主要固沙植物水分来源的结果相似。

3.3 植物水分来源

在干旱半干旱地区,水分是植物生长的驱动力。差巴嘎蒿的吸水来源具有差异性。在干旱时期,差巴嘎蒿主要利用0—80 cm和120—160 cm层位土壤

水;在雨水充足时期,差巴嘎蒿主要利用0—40 cm浅层土壤水与深层土壤水(120—160 cm)。刘自强等^[28]分析北京地区的代表性植物的水分利用特征,发现雨季对侧柏贡献率最大的土壤水分布在0—20 cm土壤层位,干旱时期对侧柏贡献率大的土壤水集中在深层土壤水;而在雨季对栓皮栎贡献率大的有0—20 cm层位土壤水,还有地下水,但是栓皮栎在干旱季节更喜利用浅层土壤水(0—20 cm)。因此,当浅层土壤水充足时,植被会优先利用浅层土壤水分^[29]。另外,植物根系是植物吸水的主要器官,是影响植物吸水来源的重要因素^[30-31]。赵良菊等^[32]通过对黑河下游沿岸植物研究发现,胡杨和深根系灌木柽柳主要利用地下水补给的深层土壤水,深根系草本植物主要利用0—80 cm土壤水,蒲公英和苦苣菜主要利用地表水。本研究中差巴嘎蒿为多年生半灌木,根系较为复杂,且随着年龄增长,根系越深,其主根可以达到150 cm甚至更长,侧根主要分布在10—50 cm沙层土壤中,构成密集的根网,因此差巴嘎蒿在生长季的水分来源存在差异,进而适应环境或者避免竞争。

4 结论

研究区的大气降水方程为 $\delta D=7.85\delta^{18}O+18.91$,和全国大气降水方程相比斜率较小,表明此地区蒸发强烈,而截距较高,说明研究区部分地区水汽再循环比较强烈。土壤水方程线($\delta D=4.68\delta^{18}O-33.86$)位于大气降水方程线的上方,其斜率和截距都小于当地大气降水方程线,表明土壤中的水分受到了二次蒸发的影响,这契合半干旱地区蒸发强烈、降水少的大陆性季风气候的特点。降水同位素 $\delta^{18}O$ 值的波动范围较大,为-16.69‰—-7.67‰,最小值出现在春季(-16.69‰),最大值出现在夏季(-7.67‰),表现出明显的季节性变化特征。

土壤含水率同降雨量和植物生长期的变化有着显著的相关关系。降雨量大,浅层土壤含水率随之增大,且雨后土壤含水率明显高于雨前土壤含水率。降雨后,浅层(0—40 cm)土壤含水率波动幅度最大,并且随着土壤深度的增加土壤含水率趋于稳定。在植物生长旺期,表层土壤含水率显著降低,这是生长旺期的植物大量吸收土壤水所致。

差巴嘎蒿在生长季既能利用浅层土壤水,又能利用深层土壤水。当降雨量较多时,差巴嘎蒿优先

利用0—40 cm层位土壤水,在干旱少雨时期,除了利用浅层土壤水外,还利用了120—160 cm的深层土壤水,这说明差巴嘎蒿为确保自身水分的生理需求,在不同时期采用不同的水分利用策略,进而来适应环境或者避免竞争。另一方面,土壤水的稳定同位素随深度的增加而变化,在本文中,土壤水的 δD 值随土壤深度的加深先减小而后稳定,其深层土壤水 δD 值逐渐趋于地下水 δD 值。

参考文献:

- [1] 王旭洋,李玉霖,连杰,等.半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J].中国沙漠,2021,41(1):183-194.
- [2] 詹瑾,李玉霖,韩丹,等.半干旱沙区3种优势固沙灌木生物量分配及其生态学意义[J].中国沙漠,2020,40(5):149-157.
- [3] Chen L, Zhang Z, Zeppel M, et al. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58 (7) : 1569-1581.
- [4] 孙双峰,黄建辉,林光辉,等.稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用[J].生态学报,2005(9):2362-2371.
- [5] Bertrand G, Masini J, Goldscheider N, et al. Determination of spatiotemporal variability of tree water uptake using stable isotopes ($\delta^{18}O$, δ^2H) in an alluvial system supplied by a high-altitude watershed, Pfyn forest, Switzerland [J]. Ecohydrology, 2014, 7(2):319-333.
- [6] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell & Environment, 2010, 15(9):1073-1082.
- [7] 张江,李桂芳,贺亚玲,等.基于稳定同位素技术的塔里木河下游不同林龄胡杨的水分利用来源[J].生物多样性,2018,26(6):564-571.
- [8] 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.
- [9] Wang J, Fu B, Lu N, et al. Water use characteristics of native and exotic shrub species in the semi-arid Loess Plateau using an isotope technique [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2019, 276:55-63.
- [10] Bowling D R, Schulze E S, Hall S J. Revisiting streamside trees that do not use stream water: can the two water worlds hypothesis and snowpack isotopic effects explain a missing water source? [J]. Ecohydrology, 2017, 10: e1771.
- [11] Javaux M, Rothfuss Y, Vanderborght J, et al. Isotopic composition of plant water sources [J]. Nature, 2016, 536(7617): E1.
- [12] 赵丽娅,钟韩珊,齐开.围封和放牧对科尔沁沙地植物群落种间关联的影响[J].生态学报,2021,41(9):10-18.
- [13] Niu Y, Li Y, Yun H, et al. Variations in diurnal and seasonal ecosystem carbon dioxide exchange in a semiarid sandy grassland ecosystem in China's Horqin Sandy Land [J]. Biogeosciences, 2020, 17(24):6309-6326.
- [14] 王思如,雷慧闽,刘廷玺,等.气候变化对科尔沁沙地蒸散发和植被的影响[J].水利学报,2017,48(5):535-544,550.
- [15] 包永志,刘廷玺,段利民,等.基于 Shuttleworth-Wallace 模型的科尔沁沙地流动半流动沙丘蒸散发模拟[J].应用生态学报,2019,30(3):867-876.
- [16] 郭亚娟,刘廷玺,童新,等.基于长时间序列 landsat 数据的科尔沁沙地土地利用演变分析[J].生态学报,2020,40(23):8672-8682.
- [17] 曹文梅,刘廷玺,王喜喜,等.科尔沁沙丘草甸相间地区土地利用与覆被识别[J].干旱区研究,2021,38(2):10-16.
- [18] 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.
- [19] 郭交,白清源,郭文川.基于融合超宽带雷达和多光谱数据的土壤含水率监测[J].农业机械学报,2021,52(9):9-15.
- [20] 曾祥明,徐宪立,钟飞霞,等. MixSIAR 和 IsoSource 模型解析植物水分来源的比较研究[J].生态学报,2020,40(16):5611-5619.
- [21] 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.
- [22] Miriam P, José M F, Maria P, et al. Multi-temporal evaluation of soil moisture and land surface temperature dynamics using in situ and satellite observations [J]. Remote Sensing, 2016, 8 (7):956-963.
- [23] Shan Y L. Soil Moisture Characteristics of a Typical Slope in the Watershed of the Loess Plateau for Gully Land Consolidation Project [Z]. E3S Web of Conferences, 2020, 199:6.
- [24] Archer N A L. Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate [J]. Ecohydrology, 2016, 9 (4) : 585-600.
- [25] 吕金岭,张希明,刘国军,等.准噶尔盆地南缘荒漠区梭梭维持水源初步研究[J].中国沙漠,2013,33(1):110-117.
- [26] 周海,郑新军,唐立松,等.盐生荒漠土壤水稳定氢、氧同位素组成季节动态[J].中国沙漠,2014,34(1):162-169.
- [27] 刘保清,刘志民,钱建强.科尔沁沙地南缘主要固沙植物旱季水分来源[J].应用生态学报,2017,28(7):2093-2101.
- [28] 刘自强,余新晓,贾国栋.北京山区侧柏和栓皮栎的水分利用特征[J].林业科学,2016,52(9):22-30.
- [29] Hasselquist N J, Allen M F. Increasing demands on limited water resources: consequences for two endangered plants in Amargosa Valley, USA [J]. American Journal of Botany, 2009, 96: 620-626.
- [30] Rossatto D R, Silva L, Villalobos-Vega R, et al. Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna [J]. Environmental & Experimental Botany, 2012, 77: 259-266.

- [31] Liu Y, Xu Z, Duffy R, et al. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrubland using water isotopes[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47: 380–386.
- [32] 赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 等. 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 709–718.

Water use characteristics of typical plant *Artemisia halodendron* in Horqin Sandy Land

He Chao^a, Liu Tingxi^{ab}, Duan Limin^{ab}, Wang Guanli^{ab}, Hao Lina^{ab}

(a. Water Conservancy and Civil Engineering College / b. Inner Mongolia Key Laboratory of Protection and Utilization of Water Resources, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In-depth analysis of the water use characteristics of sand-fixing vegetation on sandy land can provide references for ecological restoration of sandy land vegetation and regional desertification prevention and control. This study uses hydrogen and oxygen isotope technology to determine the δD values of plant water in the typical sand-fixing vegetation of *Artemisia halodendron* and the precipitation, soil water, and groundwater in Horqin Sandy Land during the vegetation growth season in 2020. The multi-source linear mixed model is used to quantitatively segment the water use sources of *A. halodendron*. The results show that: (1) The slope of the atmospheric precipitation equation in the study area is smaller than the national atmospheric precipitation equation line, indicating that the atmospheric precipitation in this area has strong evaporation and the equation intercept is large, indicating that the water vapor recirculation in the study area is strong. The slope and intercept of the soil water isotope equation line are smaller than the atmospheric precipitation equation line in the study area, indicating that soil water is significantly affected by secondary evaporation. (2) Changes in rainfall and plant growth periods have a clear correlation with soil water content. Affected by rainfall, shallow soil water content has the largest fluctuation range from 0 to 40 cm, and soil water content tends to stabilize with the increase of soil depth. (3) In the rainy season, *A. halodendron* mainly uses soil water at depths of 0–40 cm and 120–160 cm, with utilization rates of 30.1% and 25.2%, respectively, and uses less soil water in other parts; in dry seasons, 0–80 cm is mainly used the utilization rate of soil water with depth of 160–200 cm is 30.7% and 21.1% respectively, which is significantly higher than other soil water.

Key words: *Artemisia halodendron*; hydrogen and oxygen stable isotopes; multi-source linear mixed model; water source; Horqin Sandy Land