

毛乌素沙地圪丑沟小流域沙柳水分利用来源研究

李荣磊^{1,2}, 黄来明^{1,3,4}, 裴艳武^{1,2}, 邵明安^{1,2,3,4}, 张应龙⁵

(1.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101;

2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;

4.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049;5.陕西省神木县生态协会,陕西 神木 719399)

摘要:为探究毛乌素沙地典型治沙植物根系吸水来源及其影响因素,通过测定毛乌素沙地圪丑沟小流域沙柳(*Salix psammophila*) (18~20 年)木质部水及其各种潜在水源(降水、土壤水和地下水)的氢氧同位素组成(δD 和 $\delta^{18}O$),利用多元线性混合模型(IsoSource)研究沙柳水分来源的季节变化特征及其影响因素。结果表明,监测期间(6—11 月)沙柳木质部水、降水、土壤水和地下水的 δD 值变化范围分别为 $-82.41\text{\textperthousand}$ ~ $-52.91\text{\textperthousand}$, $-144.81\text{\textperthousand}$ ~ $-6.60\text{\textperthousand}$, $-96.94\text{\textperthousand}$ ~ $-42.65\text{\textperthousand}$ 和 $-86.42\text{\textperthousand}$ ~ $-71.82\text{\textperthousand}$, $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-10.77\text{\textperthousand}$ ~ $-7.29\text{\textperthousand}$, $-18.86\text{\textperthousand}$ ~ $-2.07\text{\textperthousand}$, $-12.85\text{\textperthousand}$ ~ $-0.79\text{\textperthousand}$ 和 $-10.86\text{\textperthousand}$ ~ $-9.74\text{\textperthousand}$ 。雨季(7—9 月)降雨量和土壤含水量分别高于旱季(6, 10, 11 月) $24.80 \sim 90.10 \text{ mm}$ 和 $0.95\% \sim 1.84\%$,但 6—9 月地下水位却低于 10—11 月 $2 \sim 7 \text{ cm}$ 。沙柳根系在旱季 6 月主要利用深层土壤水($>200 \text{ cm}$) (33.70%) 和地下水(26.20%),雨季(7—9 月)逐渐转变为以吸收浅层土壤水($<200 \text{ cm}$)为主(50.70% ~ 54.00%),10—11 月由于气温降低、降水减少及沙柳生命活动减弱,浅层土壤水($<200 \text{ cm}$)对沙柳根系吸水的贡献高于雨季(7—9 月) $35.20\% \sim 40.00\%$,而地下水对沙柳根系吸水的贡献显著降低($<5.00\%$)。因此,沙柳根系对于毛乌素沙地季节性干旱具有较强的适应和调节能力,其吸水来源随降雨量、土壤含水量和地下水位季节波动而变化。

关键词:毛乌素沙地;稳定同位素;水分来源;地下水;植被恢复

中图分类号:S728.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)02-0122-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.017

Water Use Source of *Salix psammophila* in Gechougou Small Watershed of Mu Us Sandy Land

LI Ronglei^{1,2}, HUANG Laiming^{1,3,4}, PEI Yanwu^{1,2}, SHAO Ming'an^{1,2,3,4}, ZHANG Yinglong⁵

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 5. Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shaanxi 719399)

Abstract: The hydrogen and oxygen isotopic compositions (δD and $\delta^{18}O$) of stem water and its potential sources (rain water, soil water, and groundwater) were measured monthly from June to November, 2018 in a *Salix psammophila* forest (18~20 years) in Gechougou watershed of Mu Us Sandy Land. The dynamic changes and controls of root water source were studied by the multiple linear mixed model (IsoSource). Results showed that the variation range of δD were $-82.41\text{\textperthousand}$ ~ $-52.91\text{\textperthousand}$, $-144.81\text{\textperthousand}$ ~ $-6.60\text{\textperthousand}$, $-96.94\text{\textperthousand}$ ~ $-42.65\text{\textperthousand}$, and $-86.42\text{\textperthousand}$ ~ $-71.82\text{\textperthousand}$ for stem water, rain water, soil water, and groundwater, respectively. The variation range of $\delta^{18}O$ were $-10.77\text{\textperthousand}$ ~ $-7.29\text{\textperthousand}$, $-18.86\text{\textperthousand}$ ~ $-2.07\text{\textperthousand}$, $-12.85\text{\textperthousand}$ ~ $-0.79\text{\textperthousand}$, and $-10.86\text{\textperthousand}$ ~ $-9.74\text{\textperthousand}$, respectively, during the monitored period (June—November). Rainfall

收稿日期:2020-09-20

资助项目:国家自然科学基金项目(41601221);中国科学院战略性先导科技专项(XDA23070202);中国科学院青年创新促进会会员项目(2019052);中国科学院地理科学与资源研究所秉维优秀青年人才项目(2017RC203);中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室项目(A314021402-2010)

第一作者:李荣磊(1995—),男,硕士研究生,主要从事土壤物理研究。E-mail:rongleil@163.com

通信作者:黄来明(1984—),男,副研究员,主要从事土壤地理与水文生态研究。E-mail:huanglm@igsnrr.ac.cn

amount and soil water content in the rainy season (July—September) were 24.80~90.10 mm and 0.95%~1.84% higher than that in the dry season (June, October, and November). However, the groundwater level during June to September were 2~7 cm lower than that in October and November. In June, *S. psammophila* mainly used deep soil water (>200 cm) (33.70%) and groundwater (26.20%). From July to September, the root water source mainly came from shallow soil water (<200 cm) (50.70%~54.00%). Compared with the rainy season (July—September), the contribution of shallow soil water (<200 cm) to root water source remarkably increased by 35.20%~40.00% in October and November due to the low air temperature, rainfall amount, and weak life activity of *S. psammophila*. There was a significant reduction in the use of groundwater in October and November (<5.00%). Therefore, *S. psammophila* is adaptable to the seasonal drought and is suitable for desertification control in the Mu Us Sandy Land. The root water source of *S. psammophila* changed with seasonal variations of rainfall amount, soil profile water content, and groundwater level.

Keywords: Mu Us Sandy Land; stable isotope; water source; groundwater; vegetation restoration

水分是干旱半干旱地区植物生存发展的主要限制因子,植物根系吸水不仅影响水资源利用效率,而且决定植物对干旱胁迫的响应和调节能力^[1]。研究植物根系吸水来源及其影响因素对于理解土壤—植物—大气连续体(SPAC)水分传输过程至关重要^[2],可为区域优化水资源管理和维持植被可持续建设提供依据^[3]。传统方法(根系挖掘法、植物生理指标判定法等)虽然能够定性判断植物水分来源,但无法量化植物对不同水源的吸收利用比例^[4]。随着稳定同位素技术的发展,氢氧同位素被广泛应用于识别和量化植物水分来源,具有较高的灵敏度和准确性^[5]。有研究^[6]表明,植物根系吸收水分并沿导管上升过程中氢氧同位素不发生分馏,植物对不同水分来源的利用使得植物本身具有不同的氢氧同位素组成^[7]。因此,通过对比植物木质部水与各水分来源中氢氧同位素组成,应用同位素质量守恒法,并结合多元线性混合模型(IsoSource)可以定量判断植物对不同水源的吸收利用情况。

植物根系吸水来源主要有降水、不同深度的土壤水和地下水,不同类型植物或同一植物在不同时期对各潜在水源的吸收利用比例具有较大差异。周海等^[8]研究河西走廊不同生境下(砂质和砾质)泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)的水分来源表明,砂质生境下泡泡刺在降水较少的春、秋季主要利用地下水(>50%),而砾质生境下泡泡刺无法利用深层地下水,只能以降水入渗后补给的土壤水作为主要水分来源;朱林等^[9]研究银川平原北部不同灌木(20年生柽柳(*Tamarix ramosissima*)、3年生柽柳、宁夏枸杞(*Lycium barbarum*)和四翅滨藜(*Atriplex canescens*))的水分来源特征表明,不同灌木在不同水分条件下水分利用策略不同。3年生多枝柽柳、宁夏枸杞和四翅滨藜在灌溉前主要利用表层土壤水(70.1%,52.3%和48.9%),灌溉后对80—140 cm土壤水利用率最高(>50%),而20年生柽柳在灌溉前后均以利

用地下水为主;邢丹等^[10]对石漠区桑树(*Morus alba* L.)根系吸水研究表明,桑树在4月主要利用10—30 cm土壤水(69.1%),5—9月随着降雨增多,主要吸收50—60 cm土壤水(31.8%~70.2%),而10—11月降雨减少时转变为吸收0—10 cm浅层土壤水为主(71.9%~94.3%),因此,桑树在不同生长季内表现出不同的水分利用策略。尽管前人对不同地区植物根系吸水来源作了大量研究,但关于毛乌素沙区季节性干旱频发、地下水位周期性波动下典型治沙植物根系吸水来源研究较少。探明毛乌素沙区典型治沙植物根系吸水来源及其主控因子可为该地区科学治沙和水资源高效利用提供依据。

毛乌素沙地是中国四大沙地之一,土地荒漠化和沙化严重,生态环境十分脆弱。20世纪60年代以来,国家和地方政府为治理土地荒漠化在该区进行大规模植被恢复,毛乌素沙地植被覆盖率显著增加。然而,随着大规模固沙造林,毛乌素沙地土壤水分供需矛盾日益加剧^[11],一些高密度种植区植被甚至出现退化现象。此外,随着气候暖干化,毛乌素沙地季节性干旱频繁发生,干旱缺水严重威胁毛乌素沙区生态恢复和植被可持续建设。由于气候干旱、蒸发强烈,加之部分种植密度不合理的治沙植物大量耗水,毛乌素沙地东南缘地下水位呈现季节波动和逐年下降趋势,导致土壤水分补给减少^[12]。Wang等^[13]研究发现,毛乌素沙地边缘红碱淖湿地不同类型植物(沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙柳、柠条(*Caragana korshinskii*)、油松(*Pinus tabuliformis*)和小叶杨(*Populus simonii*))在旱季对地下水的利用比例均高于雨季,但没有考虑地下水位季节波动对植物根系吸水深度和吸水来源的影响;Chen等^[14]研究发现,塔里木河下游不同地下水埋深条件下胡杨(*Populus euphratica*)和柽柳根系吸水来源不同,地下水埋深1.8 m时胡杨和柽柳同时利用河水(27.4%~28.7%)、土壤

水(>75 cm)(12.7%~17.8%)和地下水(27.6%~30.4%),地下水埋深3.8 m时胡杨和柽柳主要吸收150—375 cm土壤水(75.2%~81.0%),而地下水埋深7.2 m时胡杨和柽柳主要吸收深层土壤水(>375 cm)(31.4%~46.5%)和地下水(29.8%~34.5%)。可见,地下水埋深对植物根系吸水来源具有重要影响。为了解毛乌素沙地东南缘地下水埋深季节波动条件下典型治沙植物根系吸水来源及其动态变化特征,本研究选取陕北圪丑沟流域沙柳林地为研究对象,通过定期采集和测定沙柳木质部水及其各种潜在水源(降水、土壤水和地下水)的氢氧同位素组成(δD 和 $\delta^{18}\text{O}$),结合多元线性混合模型量化沙柳根系对不同水源的吸收利用比例,并分析降雨量、土壤含水量和地下水位动态变化对沙柳根系吸水来源的影响,以期为沙区水分优化管理和植被可持续建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地东南缘圪丑沟小流域($38^{\circ}48'—38^{\circ}54'\text{N}$, $109^{\circ}11'—109^{\circ}29'\text{E}$),该流域位于陕西省神木市锦界镇西南约23 km处,海拔为1 250~1 280 m。流域内年均气温约为9.2 °C, >10 °C的积温约为3 150 °C,年均降水量为420 mm,主要集中在7—9月,占全年降水量的60%~75%。圪丑沟流域地形起伏较小,土壤类型主要为干旱砂质新成土。流域内地下水位较浅,良好的水分环境适宜植物生存发展。该流域植被类型主要以次生人工林、草为主,包括沙柳(*Salix psammophila*)、紫穗槐(*Amorpha fruticose* Linn.)、长柄扁桃(*Amygdalus pcdunculata* Pall.)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和沙蒿(*Artemisia deuterorum* Spreng.)等。为研究浅层地下水位变化对治沙植物水分来源的影响,选取圪丑沟小流域的优势灌木沙柳为研究对象,在沙柳林地安装地下水位仪(HOBO ware)自动监测地下水位季节变化特征。在沙柳林地附近安装小型气象站,监测和获取气象参数。图1为试验期间气温、降雨量和地下水位动态变化特征。

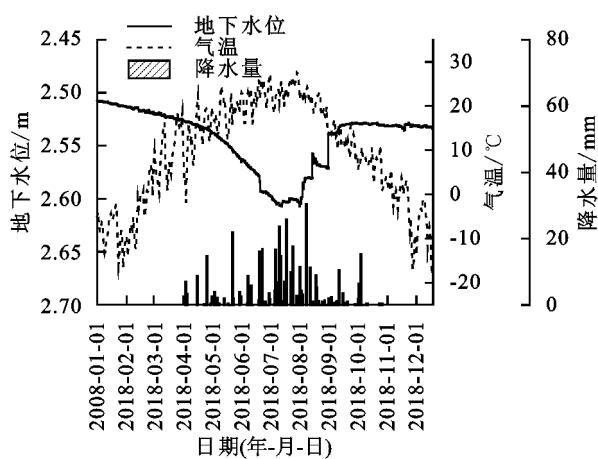


图 1 监测期间圪丑沟流域气温、降雨量和地下水位动态变化特征

1.2 样品采集

试验在圪丑沟小流域选取3块长势基本一致的沙柳林地(5 m×5 m)作为采样点,为避免微地形(坡向、土层深度、地下水位)差异对试验结果产生影响,各沙柳林地采样点相距在50 m以内。采样时间为2018年6—11月,于每月定期采集沙柳茎秆、不同深度土壤和地下水样品,降水样品按降雨事件采集,样品采集后均放入-20 °C冰箱中冷冻保存。在各沙柳样地选择长势较好、品相一致的沙柳作为采集对象。除去沙柳表皮,将茎秆剪成4 cm小段装入10 mL棕色玻璃瓶中,用Para film聚乙烯封口膜封口。同时,用土钻法采集土壤样品,60 cm以内采样间隔为20 cm,60 cm以下至地下水位采样间隔为30 cm,每个土层采集3次混合后做为混合样品。土壤样品采集后分为3组,分别置于棕色玻璃瓶(用于抽提土壤水和测定氢氧稳定同位素)、铝盒(用于测定土壤含水量)和布袋(用于测定土壤基本理化性质)中备用。用环刀法采集原状土,用于测定土壤容重。土壤基本理化性质见表1。表层0—20 cm土壤颗粒组成以粉粒为主(58.65%),其他土层均以砂粒为主(>55%),剖面平均土壤容重为1.64 g/cm³。土壤全氮含量较低,表层0—20 cm全磷和有机质含量高于其他土层。

表 1 沙柳样地土壤基本理化性质

土层 深度/cm	土壤颗粒组成/%			质地	容重/ (g·cm ⁻³)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
	砂粒	粉粒	黏粒					
0—20	36.90	58.65	4.44	粉砂黏壤土	1.68	2.31	1.45	7.53
20—40	61.53	35.73	2.74	砂壤土	1.72	1.73	1.12	3.74
40—60	61.84	34.23	3.93	砂壤土	1.68	1.81	1.15	2.85
60—90	64.31	32.91	2.78	砂壤土	1.65	1.52	1.21	2.61
90—120	67.52	29.22	3.25	砂壤土	1.61	1.44	1.32	2.26
120—150	60.86	35.68	3.46	砂壤土	1.62	1.12	1.12	2.44
150—200	65.79	29.62	4.59	砂壤土	1.65	1.03	1.11	1.29
200—250	62.95	33.08	3.97	砂壤土	1.67	1.11	1.22	2.31

注:土壤质地分类依据国际制土壤分类标准划分。

采用5 m长细线缠绕干净的25 mL玻璃瓶放于地下水井中收集地下水样品,采样前对玻璃瓶进行润洗,每次采集3次重复。每次降雨后收集雨水样品,将雨水放入棕色玻璃瓶中冷冻保存。在地下水位仪附近选取3株长势一致的沙柳,距离沙柳基茎5,50,100 cm处,分别用根钻法采集根系,每10 cm深度采

集1次根系样品,直至多次采集均未发现根系后停止采集。

表2为不同深度沙柳根系生物量分布特征。从表2可以看出,距沙柳基茎不同距离处根系生物量随土壤深度增加而降低,且同一深度土层根系生物量随距沙柳基茎距离的增加而降低。

表2 沙柳根系生物量分布特征

土层深度/cm	距离基茎5 cm		距离基茎50 cm		距离基茎100 cm	
	根系生物量/(g·m ⁻²)	标准差	根系生物量/(g·m ⁻²)	标准差	根系生物量/(g·m ⁻²)	标准差
0—20	111.62	7.80	38.11	3.49	36.85	4.37
20—40	79.79	2.82	33.55	1.12	39.63	0.51
40—60	36.66	2.68	27.16	3.99	6.40	0.62
60—100	7.19	0.89	11.14	0.65	0	0
100—120	6.00	0.41	18.06	0.09	0	0
120—150	4.63	0.73	11.57	0.57	0	0
150—200	2.51	0.81	6.39	0.29	0	0

1.3 样品分析

将采集的环刀样品放置于烘箱中,105 °C下烘至恒重,测定土壤容重。扰动土壤样品带回实验室自然风干,挑去枯枝落叶、根系和砾石,磨碎后分别过2,1,0.25 mm筛备用。土壤全氮(TN)、有机质(OM)和全磷(TP)分别采用半微量开氏法、重铬酸钾氧化法和NaOH熔融—钼锑抗比色法测定;土壤颗粒组成采用MS2000激光粒度仪测定,并根据国际制土壤质地分类划分黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和砂粒(2~0.02 mm),以上指标参考《土壤农化分析》^[15]测定;利用低温真空冷凝法提取土壤水和沙柳木质部水,采用液态水同位素分析仪(LGR测量精度: $\delta^{18}\text{O} \pm 0.3\text{\textperthousand}$, $\delta\text{D} \pm 1\text{\textperthousand}$)对土壤水、地下水和降水氢氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{DH}$)进行测定。为避免植物样品中的有机物对氢氧同位素测试结果产生影响,本试验采用稳定同位素比质谱仪(Isoprime 100测试精度: $\delta^{18}\text{O} < 0.3\text{\textperthousand}$, $\delta\text{D} < 2.0\text{\textperthousand}$)对樟子松木质部水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 进行测定。

氢氧同位素测定结果根据国际标准物平均海洋水(VSMOW)同位素浓度的千分差计算获得:

$$\delta\text{D}(\delta^{18}\text{O})\text{\textperthousand} = \left(\frac{R_{\text{样}}}{R_{\text{VSMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中: $R_{\text{样}}$ 为待测样品的氢或氧同位素自然丰度比; R_{VSMOW} 为国际标准物平均海洋水的氢或氧同位素自然丰度比。

采用同位素质量守恒多元分析法量化沙柳对不同水源的吸收利用比例。为获取不同深度土壤水及其他水分来源的相对贡献,依据质量守恒定律,计算公式为:

$$\delta\text{x} = f_1\delta x_1 + f_2\delta x_2 + f_3\delta x_3 + \cdots + f_i\delta x_i \quad (2)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + \cdots + f_i = 1 \quad (3)$$

式中: δx 为沙柳茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值; $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3$ 和 δx_i 分别为各水源中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值; f_1, f_2, f_3 和 f_i 分别为不同水源对沙柳的贡献率,模型计算分数的增量设定1%,不确定水平为0.1%。

1.4 数据分析

采用SPSS 18.0统计软件进行数据统计与分析,采用Origin 2020制图软件进行相关图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 圳丑沟流域降水氢氧同位素特征

水循环过程中水分的蒸发凝结导致氢氧同位素发生分馏,使得大气降水中的氢氧同位素组成呈现线性关系,这一线性关系称为大气降水线。大气降水线的截距和斜率能够在一定程度上反映研究区的气候条件和降水情况。Craig^[16]通过计算全球尺度下降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系,得到全球大气降水线($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$)。通过对比圪丑沟流域当地大气降水线($\delta\text{D} = 7.79\delta^{18}\text{O} + 8.87$)与全球大气降水线(图2)可以看出,流域内大气降水线斜率和Y轴截距均略小于全球大气降水线,表明研究区降雨量少,气候条件干燥,并且降水在到达地表之前经历的蒸发强度高于全球平均水平^[17]。通过对比圪丑沟流域大气降水线和沙柳样地土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 可以看出,不同深度土壤水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均位于圪丑沟流域大气降水线右下方,表明不同深度土层土壤水受当地降水补给。降水进入土壤后受到强烈的蒸发而发生非平衡分馏,使得表层土壤水(0—20 cm)出现重同位素富集轻同位素贫化的现象^[18]。不同月份地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均值均小于土壤水,且地下水与深层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 较为接近,表明土壤水中存在2个不均一、且

不完全混合的水源,一方面用于维持植物生长需水;另一方面,对地下水进行补给,同时地下水凭借土壤毛管作用力向上补充土壤水,因此地下水与土壤水呈动态循环的过程^[19]。

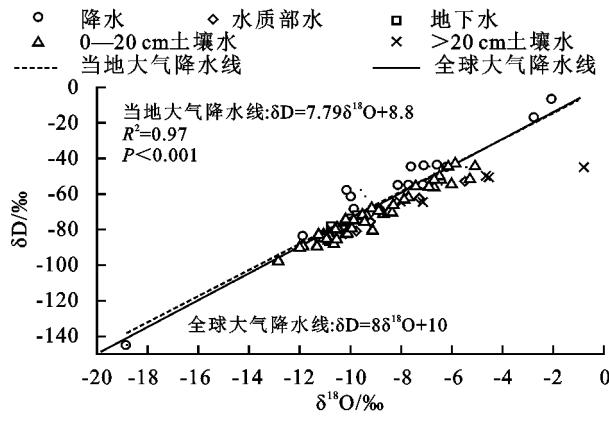


图 2 坎丑沟流域不同水分来源同位素分布与全球大气降水线比较

2.2 监测期间降水、土壤水、沙柳木质部水及地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化特征

图 3 为不同月份降水、土壤水、地下水和沙柳木质部水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化特征。研究区 6—11 月降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 $-144.81\text{‰} \sim -6.60\text{‰}$ 和 $-18.86\text{‰} \sim -2.07\text{‰}$, 平均值分别为 -55.73‰ 和 -8.29‰ , 变异系数分别为 49% 和 58%, 属于中等变异。从整体趋势来看, 降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 在监测期间呈逐渐降低的趋势, 这与西北旱区降水氢氧同位素值夏季较高、冬季偏低的研究结果^[20]一致。土壤水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 $-96.94\text{‰} \sim -42.65\text{‰}$ 和 $-12.85\text{‰} \sim -0.79\text{‰}$, 平均值分别为 -74.11‰ 和 -9.49‰ , 变异系数分别为 19% 和 16%, 属于中等变异。7—9 月由于降水频繁补给土壤水, 使得土壤水中

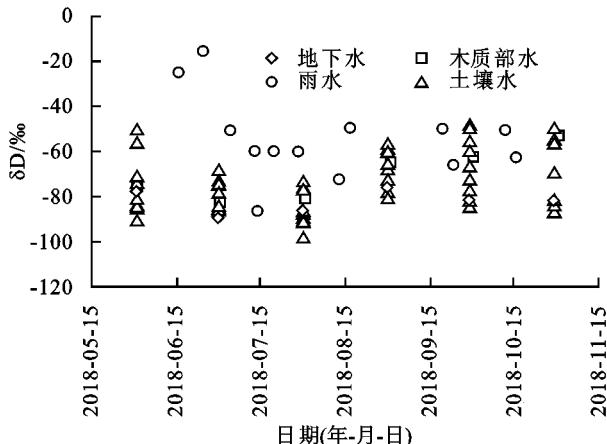
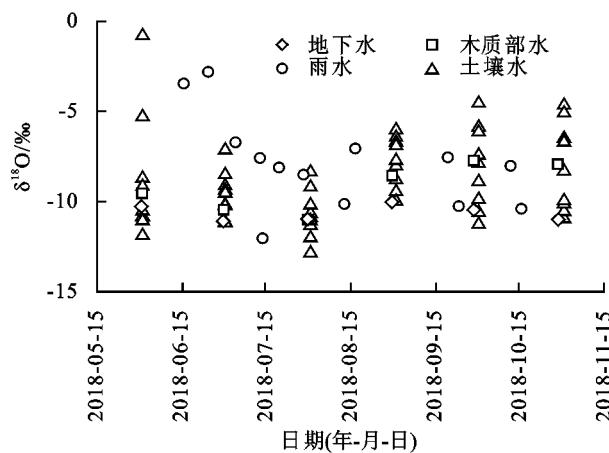


图 3 研究区雨水、土壤水、地下水及木质部水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征

2.3 监测期间土壤水分含量及 δD 和 $\delta^{18}O$ 垂直分布特征

监测期间(6—11 月)土壤含水量表现出相似的剖面分布特征, 200 cm 以上土壤含水量相对稳定,

氢氧同位素相对富集轻同位素, 而 10—11 月由于降水补给减少, 土壤水中氢氧同位素相对富集重同位素(图 3)。沙柳木质部水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 $-82.41\text{‰} \sim -52.91\text{‰}$ 和 $-10.77\text{‰} \sim -7.29\text{‰}$, 平均值分别为 -69.82‰ 和 -8.35‰ , 变异系数分别为 16% 和 17%, 属于中等变异。地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化范围分别为 $-86.42\text{‰} \sim -71.82\text{‰}$ 和 $-10.86\text{‰} \sim -9.74\text{‰}$, 平均值和标准差分别为 -78.46‰ 和 -10.38‰ , 变异系数分别为 7% 和 4%, 属于弱变异。冯蕴等^[21]对浑善达克沙地南缘的杨树水分来源研究表明, 由于存在滞后现象, 地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 较为稳定, 且随季节变化不明显。监测期间(6—11 月)降水、沙柳木质部水、土壤水和地下水 δD 均值大小依次为降水(-55.73‰)>木质部水(-69.82‰)>土壤水(-73.89‰)>地下水(-78.46‰), $\delta^{18}O$ 均值大小依次为降水(-8.29‰)>地下水(-8.55‰)>木质部水(-10.38‰)>土壤水(-9.37‰)。研究区属于气候干燥的内陆, 产生降水的水汽受当地蒸发效应影响, 同时雨滴在降落过程中由于蒸发作用而富集重同位素, 因此同一时期降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值比土壤水、地下水和沙柳木质部水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值更高^[22]。沙柳木质部水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 介于降水、土壤水和地下水之间, 表明土壤水、降水和地下水是沙柳氢氧同位素组成的主要决定因素^[21]。地下水的氢氧同位素值低于降水氢氧同位素值, 但略高于土壤水氢氧同位素值, 表明部分地下水是通过降水补给, 并且降水进入土壤后与土壤水中相对轻组分氢氧同位素混合, 使得补给混合后的地下水氢氧同位素与降水相比相对富集轻同位素。

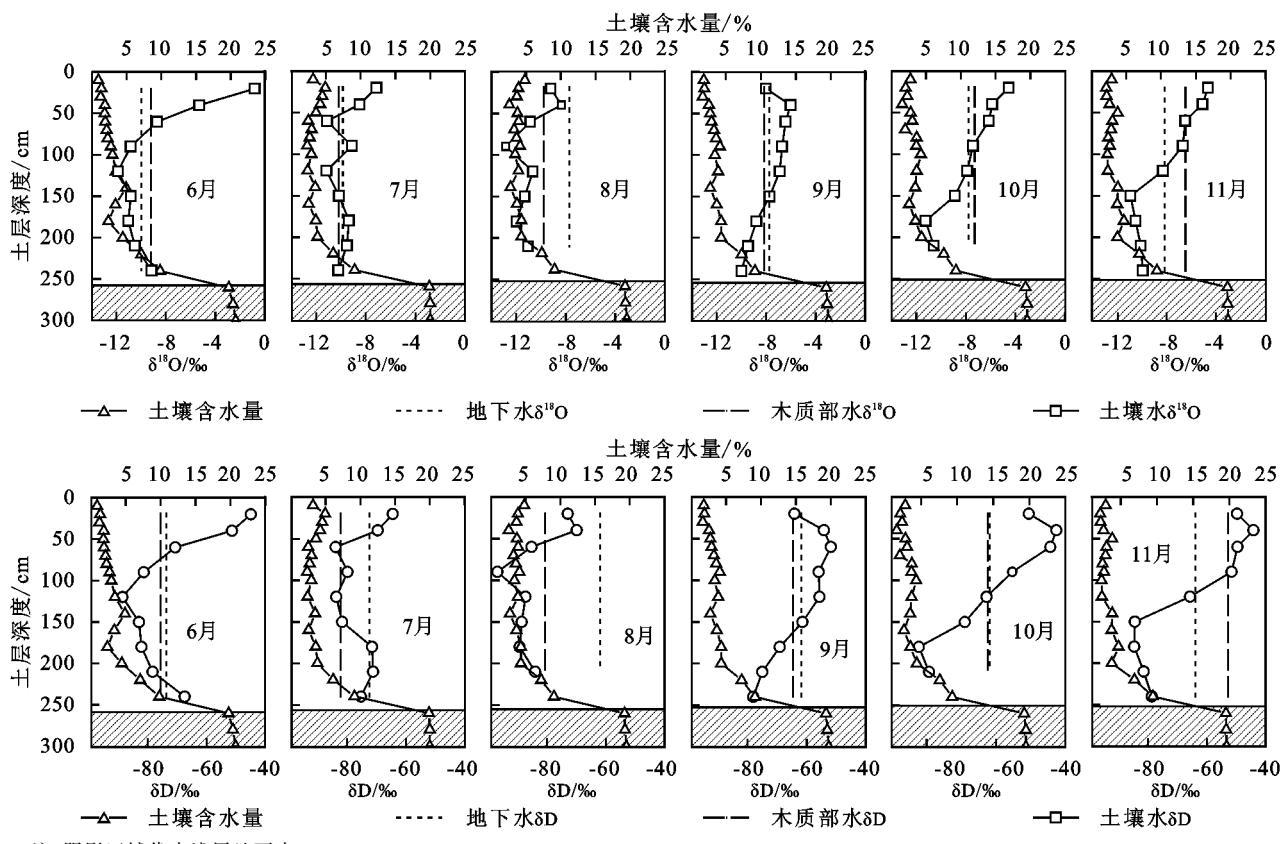


但在不同月份间变化较大(变异系数为 37%~56%), 而 200 cm 以下土壤含水量迅速增加, 但在不同月份间变异较小(变异系数<10%)(图 4)。剖面下部($>200\text{ cm}$)土壤含水量快速增加主要是由于地

下水受毛管力作用上升引起的。解倩等^[23]研究了毛乌素沙地退化湿地土壤含水量剖面分布特征表明,土壤含水量在剖面下部(接近地下水位时)快速增加。6—11月剖面平均含水量分别为3.03%,4.42%,4.30%,4.87%,3.35%和3.28%。雨季(7—9月)土壤剖面平均含水量高于旱季(6,10,11月)0.95%~1.84%。监测期间不同深度土层土壤含水量变异程度不同,6—11月0—100 cm土壤含水量变异系数为20%~56%,100—200 cm土壤含水量变异系数为20%~22%,而200 cm以下至地下水位土壤含水量随土层深度增加逐渐接近饱和含水量(20%),且显著高于0—200 cm土壤含水量($P < 0.05$)。根据不同深度土层含水量变化特征,将土壤含水量剖面划分为活跃层(0—100 cm)、稳定层(100—200 cm)和近饱和层(200 cm至地下水位)。

监测期间(6—11月)土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出相似的剖面分布特征,0—100 cm土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变

化较大(变异系数为19%~28%),100—200 cm土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化相对减小(变异系数为10%~21%),200 cm以下土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化较稳定(变异系数<10%)(图4)。王玉阳等^[24]对塔里木河下游典型荒漠植物水分来源进行研究表明,浅层土壤(<200 cm)由于受降水和蒸发影响较大,因此氢氧稳定同位素变异系数高于深层土壤(>200 cm)。降水和蒸发是土壤水中氢氧稳定同位素变化的重要影响因素,因此不同深度土壤水氢氧稳定同位素组成表现出季节性变化规律。雨季(7—9月)土壤剖面 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别低于旱季(6,10,11月)3.71‰~21.22‰和0.81‰~2.67‰。研究区6,10,11月较为干旱,降水补充少,土壤水受强烈蒸发作用使得轻同位素相对贫化而重同位素相对富集。王锐等^[22]对长武塬区土壤水中同位素组成研究表明,雨季降水的稀释作用使得土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 减小,此后由于旱季蒸发作用使得同位素非平衡分馏作用增强,土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 增大^[23~24]。



注:阴影区域代表浅层地下水。

图4 监测期间土壤水分含量及 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 垂直分布特征

2.4 沙柳水分来源及其贡献率

利用直观法观察沙柳木质部水与土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的交点可以初步判断沙柳在不同月份的水分利用情况。图4为6—11月沙柳木质部水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与0—200 cm土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均有交集,但不同月份交汇点的深度不同,可以初步判断沙柳不同月份吸水深度不同。由于直观法只能定性判断水分来源,无

法定量描述不同水分来源的贡献率,因此本研究采用多元线性混合模型(应用IsoSource软件)对不同水分来源的贡献率进行定量计算^[10]。由于氢同位素在水分循环过程中分馏作用较大,而氧同位素相对稳定,因此通常选择 $\delta^{18}\text{O}$ 进行水分贡献的计算^[25]。

表3为沙柳6—11月不同水分来源的贡献情况。从表3可以看出,旱季6月不同水分来源(活跃层、稳

定层、近饱和层和地下水)对沙柳吸水的贡献率分别为 16.40%、23.70%、33.70% 和 26.20%，沙柳根系在 6 月主要利用深层土壤水($>200\text{ cm}$)(33.70%)和地下水(26.20%)。雨季(7—9 月)活跃层、稳定层、近饱和层和地下水对沙柳根系吸水的贡献率分别介于 26.30%~28.30%，24.40%~25.70%，17.20%~21.20% 和 26.60%~30.40%，浅层土壤水($<200\text{ cm}$)成为沙柳根系的主要吸水来源, 对沙柳吸水的贡献率高于 6 月 10.60%~13.90%。10,11 月活跃层、稳定层、近饱和层和地下水对沙柳吸水的贡献率分别介于 54.40%~63.20%，27.50%~34.80%，5.70%~6.80% 和 3.60%~4.00%，10—11 月由于气温降低、降水减少及沙柳生命活动减弱, 浅层土壤水($<200\text{ cm}$)对沙柳根系吸水的贡献要远远高于雨季(7—9 月), 贡献率分别增加 35.20%~40.00%，而地下水对沙柳根系吸水的贡献显著降低(<5.00%)。地下水和土壤水是旱区植物生存发展的主要水分来源^[26], 地下水位的深浅不仅影响植物对生长所需的水分和养分的利用, 同时地下水也是旱区植被群落形成和发展的主要导向因素^[27]。降水补给较少的 6 月, 地下水对沙柳根系吸水贡献率达到 26.20%, 地下水通过土壤毛管作用持续向上运动补给土壤水并供给沙柳根系吸水。雨季(7—9 月)由于降水补给使得地下水位逐渐抬升, 地下水对沙柳根系吸水的贡献达到 26.60%~30.40%, 较 6 月相比贡献率提升 0.40%~4.20%。10—11 月, 由于气温降低降水补给减少, 沙柳根系仅需在土壤表层吸收少量水分维持自身生命活动, 因此地下水的贡献仅有 3.60%~4.00%。沙柳根系吸水来源随降雨量、土壤含水量剖面分布特征和地下水位季节波动而变化。上述结果表明, 毛乌素沙地浅层地下水通过土壤毛管作用持续向上运动补给土壤水, 同时由于降雨对土壤水的补给, 使得沙柳在不同季节能以土壤水或地下水作为自身生存发展的水分来源, 对于毛乌素沙地季节性干旱具有较强的适应和调节能力。

表 3 沙柳不同水分来源贡献率 单位: %

水分来源	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
活跃层	16.40	27.20	28.30	26.30	54.40	63.20
稳定层	23.70	25.00	25.70	24.40	34.80	27.50
近饱和层	33.70	21.20	17.20	18.90	6.80	5.70
地下水	26.20	26.60	28.80	30.40	4.00	3.60

注: 活跃层、稳定层和近饱和层分别代表 0—100, 100—200, 200 cm 至地下水深度的土层。

3 讨论

圪丑沟小流域位于毛乌素沙地东南缘, 年均降水量

较少且多集中在雨季(7—9 月), 土壤类型以砂土为主, 持水性较差, 气候干燥蒸发作用强烈, 因此水分是该区脆弱生态系统可持续发展的重要限制因子。沙柳是分布于研究区流动沙丘和半流动沙丘中的灌木植物, 由于其耐干旱、抗沙埋、生长速度快等特点, 近年来成为该区重要的防沙治沙植物^[28]。本研究结果表明, 旱季 6 月降水补给较少, 浅层土壤($<200\text{ cm}$)平均含水量较低(2.61%), 沙柳在 6 月主要依靠垂直分布的主根利用深层土壤水($>200\text{ cm}$)(33.70%)和地下水(26.20%)(表 3)。苏鹏燕等^[29]对多枝柽柳和旱柳的水分来源研究同样表明, 土壤含水量降低时, 多枝柽柳和旱柳会增加对河水和地下水的吸收利用比例。雨季(7—9 月)由于频繁的降水, 浅层土壤水($<200\text{ cm}$)得到补给, 其平均含水量(3.75%)比 6 月提高 1.14%, 此时沙柳根系吸水转变为吸收浅层土壤水($<200\text{ cm}$)为主(50.70%~54.00%)(表 3)。这是由于一方面雨水补充了浅层土壤水, 使得浅层土壤水的有效性提高; 另一方面是因为水分供给充足时, 浅层土壤中水平分布的侧根数量会大量增加, 从而促进对降水转化为土壤水的吸收和利用^[30]。此外, 由于雨水补给, 使得 8 月和 9 月地下水位有所抬升(图 1), 放大了地下水对土壤水补给的影响。因此 8 月和 9 月地下水对沙柳根系吸水来源的贡献率较 6 月提升 2.60%~4.20%(表 3)。

沙柳的根系分布状况也是沙柳在该区维持稳定生存发展的重要影响因素。如前所述, 沙柳根系生物量随土层深度增加呈逐渐下降趋势, 根系主要分布于 60 cm 以内土层, 约占整个剖面根系生物量的 68%~91%(表 2)。Chang 等^[31]研究表明, 在植被群落演替过程中, 植物根系分布深度和获取水分来源具有显著的正相关关系。本研究结果表明, 雨季(7—9 月)沙柳能够快速对降水进行响应, 并在雨季以吸收浅层土壤水($<200\text{ cm}$)为主(50.70%~54.00%)(表 3)。杨国敏等^[32]研究同样表明, 柽条和沙柳在旱季主要利用深层土壤水, 而雨季则转向以浅层土壤水为主要水分来源, 表明植物根系的分布特征在一定程度上决定植物获取水分的来源。10—11 月由于气温降低、降水补给减少, 浅层土壤水含量($<200\text{ cm}$)维持在一个较为稳定的水平(3.19%)。同时, 由于土壤蒸发作用减弱, 此时沙柳对地下水的吸收利用比例减少(表 3), 因此地下水得到涵养, 地下水位较 6—9 月抬升 2~7 cm。10—11 月浅层土壤水($<200\text{ cm}$)对沙柳根系吸水的贡献远高于雨季(7—9 月), 贡献率分别增加 35.20%~40.00%, 而地下水对沙柳根系吸水的贡献显著降低(<5.00%)(表 3)。苏文旭等^[33]对浑

善达克沙地杨树吸水来源研究也表明,杨树在较为干旱的旱季仅利用少量地下水。这可能与植物获取水分的滞后性^[34]有关。此外由于10—11月气温降低,沙柳自身的生命活动减弱,逐渐进入休眠状态,浅层土壤水足够维持沙柳自身的基础生命活动,植物根系获取浅层土壤水所消耗的能量更低,更容易从表层土壤中获取足够的水分,因此10—11月沙柳以浅层土壤水为主要水分来源而几乎不利用地下水。

沙柳根系吸水在功能上的二态性也是其能充分适应沙地生境的主要影响因素。有研究^[35-36]表明,旱地乔—灌共生植物生态系统中部分植物根系的二态性是植物充分利用不同水分来源达到共生的关键。本研究表明,沙柳在不同季节的吸水特征明显具有功能上的二态性,旱季主要以吸收深层土壤水和地下水为主,而在雨季主要吸收浅层土壤水为主。在干旱半干旱区,大多数乔木和灌木根系功能上的二态性提高其对干旱环境的适应能力^[37-38]。沙柳根系吸水来源随降雨量、土壤含水量和地下水位季节波动而变化,其根系的二态性对于毛乌素沙地季节性干旱具有较强的适应和调节能力。因此,在毛乌素沙区进行植被建设人工林树种的选择时需要考虑植物水分利用的生态可塑性,提高水资源利用效率,促进区域人工林建设生态服务功能的良性发展。

4 结论

本研究通过测定毛乌素沙地圪丑沟小流域沙柳木质部水及其各种潜在水源(降水、土壤水和地下水)的氢氧同位素组成(δD 和 $\delta^{18}O$),利用多元线性混合模型(IsoSource)研究沙柳水分来源季节变化特征及其影响因素。研究发现,沙柳根系在旱季6月主要利用深层土壤水($>200\text{ cm}$)(33.70%)和地下水(26.20%),雨季7—9月逐渐转变为以吸收浅层土壤水($<200\text{ cm}$)为主($50.70\% \sim 54.00\%$),10—11月由于气温降低、降水减少及沙柳生命活动减弱,浅层土壤水($<200\text{ cm}$)对沙柳根系吸水的贡献高于雨季(7—9月) $35.20\% \sim 40.00\%$,而地下水对沙柳根系吸水的贡献显著降低($<5.00\%$)。因此,毛乌素沙地土壤水分的分布与补给特征以及地下水位的季节性变化是沙柳根系吸水的主要影响因素。

参考文献:

- [1] Wang P, Song X F, Han D M, et al. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 475-482.
- [2] 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.
- [3] Penna D, Geris J, Hopp L, et al. Water sources for root water uptake: Using stable isotopes of hydrogen and oxygen as a research tool in agricultural and agroforestry systems[J/OL]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 291. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106790>.
- [4] 巩国丽.利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较[J].生态学报,2011,31(24):7533-7541.
- [5] 张玉翠,孙宏勇,沈彦俊,等.氢氧稳定同位素技术在生态系统水分耗散中的应用研究进展[J].地理科学,2012,32(3):289-293.
- [6] Wershaw R L, Friedman I, Heller S J, et al. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees[J]. Advances in Organic Geochemistry, 1970, 3: 55-67.
- [7] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 24(1): 225-262.
- [8] 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[J].应用生态学报,2017,28(7): 2083-2092.
- [9] 朱林,许兴,毛桂莲.宁夏平原北部地下水埋深浅地区不同灌木的水分来源[J].植物生态学报,2012,36(7):618-628.
- [10] 邢丹,肖玖军,韩世玉,等.基于稳定同位素的石漠化地区桑树根系水来源研究[J].农业工程学报,2019,35(15):77-84.
- [11] 郝宝宝,艾宁,贾艳梅,等.毛乌素沙地南缘不同植被类型土壤水分特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(5): 196-200.
- [12] 温国胜,王林和,吉川贤.毛乌素沙地臭柏群落地下水位的变化[J].自然资源学报,2005,20(2):111-116.
- [13] Wang L, Mu Y, Zhang Q F, et al. Groundwater use by plants in a semi-arid coal-mining area at the Mu Us Desert frontier [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(3): 1015-1024.
- [14] Chen Y P, Chen Y N, Xu C C, et al. The effects of groundwater depth on water uptake of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in the hyperarid region of Northwestern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(17): 17404-17412.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,1981.
- [16] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [17] 马致远,范基娇,苏艳,等.关中南部地下热水氢氧同位素组成的水文地质意义[J].地球科学与环境学报,2006,28(1):41-46.

- [18] 王贺,李占斌,马波,等.黄土高原丘陵沟壑区流域不同水体氢氧同位素特征:以纸坊沟流域为例[J].水土保持学报,2016,30(4):85-90.
- [19] 王勇,赵成义,王丹丹,等.塔里木河流域不同林龄胡杨与柽柳的水分利用策略研究[J].水土保持学报,2017,31(6):157-163.
- [20] 曾帝,吴锦奎,李洪源,等.西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J].干旱区研究,2020,37(4):1-13.
- [21] 冯蕴,贾德彬,李雪松,等.基于稳定同位素的干旱半干旱地区杨树水分来源研究[J].节水灌溉,2019,27(4):27-31.
- [22] 王锐,刘文兆,宋献方.黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究[J].水土保持学报,2014,28(3):134-137.
- [23] 解倩,王莹,齐瑞鹏,等.毛乌素沙区退化湿地土壤剖面水分和养分特征[J].水土保持学报,2015,29(3):150-155.
- [24] 王玉阳,陈亚鹏,李卫红,等.塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源[J].中国沙漠,2017,37(6):1150-1157.
- [25] 张景文,陈报章.基于同位素分析研究山东禹城夏玉米水分来源[J].水土保持学报,2017,31(4):99-104.
- [26] Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. Water uptake in woody riparian phreatophytes of the southwestern United States: A stable isotope study[J]. Ecological Applications, 1992, 2(4):450-459.
- [27] 樊自立,马英杰,张宏,等.塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J].干旱区地理,2004,27(1):8-13.
- [28] 刘媛心.中国沙漠植物志编写梗概[J].中国沙漠,1993,13(3):14-17.
- [29] 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.
- [30] Sun S J, Meng P, Zhang J S, et al. Variation in soil water uptake and its effect on plant water status in *Juglans regia* L. during dry and wet seasons[J]. Tree Physiology, 2011, 31(12):1378-1389.
- [31] Chang E H, Li P, Li Z B, et al. Using water isotopes to analyze water uptake during vegetation succession on abandoned cropland on the Loess Plateau, China[J/OL]. Catena, 2019, 181. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104095.
- [32] 杨国敏,王爱,王力.六道沟流域2种典型灌木不同季节水分来源及利用效率[J].西北植物学报,2018,38(1):140-149.
- [33] 苏文旭,贾德彬,冯蕴,等.浑善达克沙地杨树水分利用特征[J].干旱区研究,2020,37(2):357-363.
- [34] Brinkmann N, Seeger S, Weiler M, et al. Employing stable isotopes to determine the residence times of soil water and the temporal origin of water taken up by *Fagus sylvatica* and *Picea abies* in a temperate forest[J/OL]. New Phytologist, 2018, 219. DOI: 10.1111/nph.15255.
- [35] 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.
- [36] Wu H W, Li X Y, Jiang Z Y, 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.
- [37] Dawson T E, Pate J. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phreatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation[J]. Oecologia, 1996, 107(1):13-20.
- [38] Yang B, Wen X F, Sun X M. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201:218-228.