

DOI: 10.11766/trxb202011060608

裴艳武, 黄来明, 李荣磊, 邵明安, 张应龙. 毛乌素沙地东南缘人工林樟子松根系吸水来源与影响因素[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1336–1348.

PEI Yanwu, HUANG Laiming, LI Ronglei, SHAO Mingan, ZHANG Yinglong. Root Water Source of *Pinus sylvestris* L. var. *Mongholica* Litv. and Influencing Factors in the Southeastern Part of Mu Us Sandy Land, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1336–1348.

毛乌素沙地东南缘人工林樟子松根系吸水来源与影响因素*

裴艳武^{1, 2}, 黄来明^{1, 3, 4†}, 李荣磊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: 水资源短缺是我国西北旱区沙漠化防治和植被恢复重建的主要限制因子。揭示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。本研究选取毛乌素沙地东南缘圪丑沟小流域樟子松人工林(18–20年)为研究对象, 通过定期采集和测定植物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($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$), 结合多元线性混合模型研究樟子松根系吸水来源、动态变化特征及其影响因素。结果表明: 监测期间(6—11月)樟子松木质部水、降水、土壤水和地下水的 $\delta^2\text{H}$ 值变化范围分别为 -69.95‰ ~ -49.25‰ 、 -144.81‰ ~ -6.60‰ 、 -83.62‰ ~ -48.57‰ 和 -65.63‰ ~ -53.65‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为 -8.77‰ ~ -8.21‰ 、 -18.86‰ ~ -2.07‰ 、 -9.45‰ ~ -6.54‰ 和 -9.97‰ ~ -8.26‰ 。雨季(7—9月)降雨量、土壤含水量和地下水位分别高于旱季(6月, 10月和11月)24.8~90.10 mm, 3.36~8.40%和5~15 cm。樟子松根系在6月主要利用深层土壤水(>90 cm)(15.40%)和地下水(70.10%), 7—9月逐渐转变为以吸收浅层土壤水(<80 cm)为主(61.03%), 10—11月随着降雨量减少, 深层土壤水(>70 cm)和地下水对樟子松根系吸水的贡献比雨季(7—9月)分别增加5.82%~28.00%和20.64%~23.30%。毛乌素沙地樟子松人工林根系吸水来源受土壤水分消耗和地下水位季节波动的共同影响。

关键词: 毛乌素沙地; 樟子松; 稳定同位素; 浅层地下水

中图分类号: S128.2 **文献标志码:** A

* 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兼维优秀青年人才项目(2017RC203)和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开放基金项目(A314021402-2010)资助。Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41601221), the Chinese Academy of Sciences Strategic Leading Science and Technology Project (No.XDA23070202), the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No.2019052), the Bingwei Outstanding Young Talent Project from the Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research (No.2017RC203), and the Scientific Research Program from State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources (No.A314021402-2010)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: huanglm@igsnr.ac.cn

作者简介: 裴艳武(1992—), 男, 河南三门峡人, 博士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: peiyanwuxn@163.com

收稿日期: 2020-11-06; 收到修改稿日期: 2021-07-11; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-07-24

Root Water Source of *Pinus sylvestris* L. var. *Mongholica* Litv. and Influencing Factors in the Southeastern Part of Mu Us Sandy Land, China

PEI Yanwu^{1,2}, HUANG Laiming^{1,3,4†}, LI Ronglei², SHAO Mingan^{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, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shaanxi 719399, China)

Abstract: Water shortage is the main limiting factor for vegetation restoration and desertification control in the arid region of northwestern China. **【Objective】** Investigation of the root water source and influencing factors of typical plants used for desertification control can provide a basis for scientific sand control and efficient water use in the region. **【Method】** *Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv. (*P. sylvestris*) is an evergreen coniferous tree of the *Pinus* genus. It is widely used in wind sheltering and sand fixation in the north of China because of its strong root system and ecological adaptability. In this study, the hydrogen and oxygen isotope composition ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of plant xylem water and its potential water sources (precipitation, soil water and groundwater) were measured monthly from June to November 2018 in an artificial *P. sylvestris* forest (18~20 a). The experiment was carried out in the Gechougou watershed in the southeastern part of Mu Us Sandy Land. The dynamic changes and controls of root water sources were studied by the multiple linear mixed models. **【Result】** Our results showed that the range of $\delta^2\text{H}$ was $-69.95\text{‰} \sim -49.25\text{‰}$, $-144.81\text{‰} \sim -6.60\text{‰}$, $-83.62\text{‰} \sim -48.57\text{‰}$ and $-65.63\text{‰} \sim -53.65\text{‰}$ for xylem water, precipitation, soil water and groundwater, respectively. Also, the range of $\delta^{18}\text{O}$ was $-8.77\text{‰} \sim -8.21\text{‰}$, $-18.86\text{‰} \sim -2.07\text{‰}$, $-9.45\text{‰} \sim -6.54\text{‰}$ and $-9.97\text{‰} \sim -8.26\text{‰}$, respectively, during the period monitored (June–November). The weighted mean values of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in soil water were between the precipitation and groundwater due to the influence of precipitation infiltration and groundwater recharge. Rainfall amount, soil water content and groundwater level in the rainy season (July–September) were 24.80~90.10 mm, 3.36%~8.40% and 5~15 cm higher than that in the dry season (June, October, November). Iso-source model predicted that *P. sylvestris* mainly used the nearly saturated layer water (>90 cm) (15.40%) and groundwater (70.10%) in June. However, from July to September, the root used water source mainly came from the active and stable soil layer (<80 cm) (61.03%) with the increase in rainfall. Compared with the rainy season (July–September), the contribution of the nearly saturated layer (>70 cm) and groundwater to the root water source increased by 5.82%~28.00% and 20.64%~23.30% in October and November when precipitation decreased. During the detection periods, the average ratio of absorption and utilization by *P. sylvestris* root from the active layer, stable layer, nearly saturated layer and groundwater were 21.48%, 31.13%, 16.42% and 30.98%, respectively. The dependence on groundwater for *P. sylvestris* was significantly higher than that of other soil layers, which may be prejudice to survival under extreme drought environments in the future. **【Conclusion】** The soil water content was positively correlated with the root water absorption of *P. sylvestris*. The uplift and decline of groundwater level significantly changed the position of the nearly saturated soil layer, and then affected the absorption and utilization ratio of *P. sylvestris* from different potential water sources. Therefore, the root water source of artificial *P. sylvestris* forest was affected by both supply-consumption dynamics of soil water and seasonal fluctuation of groundwater level. This study provides a useful method that identified the absorption and utilization ratio of water by plants from different potential water resources, which will be significant for vegetation restoration in the Mu Us Sandy Land soil-plant ecosystems.

Key words: Mu Us Sandy Land, *P. sylvestris*., Stable isotope, Shallow groundwater

在干旱半干旱地区，水分是制约农林生产、植物生长及生态系统稳定的主要限制因子^[1]。水分由土壤、植物根系和茎干向大气的传输过程决定了土壤—植被系统演化方向和生态系统服务功能^[2-3]。揭示典

型植物根系吸水来源及其季节变化特征对于西北旱区植被合理配置和水资源高效利用具有重要意义。

植物对不同水源的利用情况可以通过多种方法确定,如根系挖掘法^[4]、树干液流技术(Sap flow)^[5]、和电阻率成像技术(Electrical Resistivity Imaging, ERI)^[6]等。然而,传统方法耗时费力。稳定同位素技术作为“指纹”^[7-8]为量化植物对不同水源的吸收利用提供了一种有效手段,具有较高的灵敏度和准确性^[9-11]。过去研究表明,植物在根系吸水过程中氢氧同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)不发生分馏,对不同水源和植物木质部水的氢氧同位素进行对比分析,可有效区分植物对不同水源的吸收利用情况^[12]。在此基础上,国内外学者利用同位素技术对植物吸水来源及其影响因素等诸多方面开展了大量研究并取得了重要进展。常恩浩等^[13]研究了黄土丘陵区不同类型植物根系吸水来源及其季节变化特征,结果表明不同类型植物根系吸水深度不同,且随季节发生变化。茵陈蒿群落在不同季节主要利用0~10 cm层土壤水(52.00%),铁杆蒿和白羊草群落在旱季主要利用30~40 cm层土壤水(68.40%),而在雨季主要利用0~20 cm层土壤水(86.50%和80.10%),达乌里胡枝子和油松在旱季主要利用60 cm以下土层土壤水(74.60%和88.80%),而在雨季主要吸收20~40 cm土壤水(31.00%和66.10%)。可见,降雨量和土壤水分条件是影响植物在不同时期根系吸水深度的重要因素。张铁钢等^[14]研究表明当降雨量由28 mm减少至8 mm时,丹江鸚鵡沟小流域土石山区侧柏根系吸水深度向上迁移,而玉米根系吸水深度由10~20 cm土层转变为0~20 cm土层。王艳莉等^[15]对较大降水事件下固沙植物水分来源进行了研究,结果表明,柠条和油蒿对浅层土壤水的吸收利用比例随降雨量增加而增加。然而,王玉阳等^[16]研究发现,尽管生长季内降雨量和土壤含水量发生变化,胡杨和柽柳在5—9月几乎不吸收<50 cm的土壤水,主要吸收深层土壤水(>200 cm)(39.60%~75.60%)和地下水(20.30%~42.10%)为主,而甘草和骆驼刺5—9月份水分来源均主要来自50~200 cm土层的水分(43.20%~85.10%)。此外,刘树宝等^[17]对黑河下游不同林龄胡杨吸水深度进行了研究,结果表明胡杨平均吸水深度随林龄增加而增加,胡杨成熟林(>30~40 a)平均吸水深度(>145 cm)远大于胡杨幼苗(<5~6 a)(37 cm)。上述研究表明,

不同类型植物根系吸水来源因植物、时期及生境等表现出不同的水分利用特征,具有较大的不确定性。然而关于毛乌素沙区降水季节分布不均、地下水水位周期性变化条件下人工治沙植物根系吸水来源研究较少。基于此,本研究选取毛乌素沙地东南缘圪丑沟小流域樟子松人工林(18~20 a)为研究对象,通过定期采集和测定植物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($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$),结合多元线性混合模型研究樟子松人工林根系吸水来源、动态变化特征及其影响因素,以期为该地区科学治沙和水资源高效利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

毛乌素沙地位于黄土高原西北部,长期以来,由于自然干旱和人为因素的强烈干扰,使得该地区成为我国土地荒漠化和沙化最严重的地区之一^[18]。近年来,随着大规模造林活动,毛乌素沙区人工植被面积逐年增加,由原来的10%以下增加至现在的20%~50%,部分地区植被盖度甚至超过50%。然而,随着大规模植被恢复和生态重建,毛乌素沙区土壤水分供需矛盾日益加剧,部分地区人工林甚至出现退化现象。

本研究区域位于毛乌素沙地东南边缘圪丑沟小流域(38°48'—38°54'N, 109°11'—109°29'E)(图1),该流域地处水蚀风蚀交错带,属温带半干旱大陆性季风气候。地理位置位于陕西省神木市西北约70 km,海拔1 250~1 280 m,年均气温9.1℃, >10℃的积温3 150℃,无霜期134~153 d。降水年际变化率较大,多年平均降水量为420 mm,主要集中在7—9月份,约占全年降水量的70%以上。流域内地形起伏较小,沙丘分布广泛且多为半固定沙丘。地下水埋深随地形起伏而变化,同时呈现明显的季节波动^[19],关于该地区地下水来源目前主要存在两种观点:一种观点认为鄂尔多斯盆地丰富的地下水是由当地降水入渗补给^[20-21],另一种观点认为地下水的主要补给源是通过深大断裂带输入的外源水^[22-23]。流域内土壤类型单一,主要为干旱砂质新成土^[24]。该流域自然植被分布稀少,主要以草本植物为主,包括狗尾草(*S. viridis.*)和芒草(*S. bungeana.*)。近年来,随着该区生态重建和荒漠化防治工程的实施,

流域内荒漠化和沙化面积持续减少，植被盖度显著增加。流域内人工林、草植被主要有樟子松 (*P. sylvestris.*)、沙柳 (*S. psammophila.*)、紫穗槐 (*A. fruticosa.*)、长柄扁桃 (*A. pedunculata.*) 和沙蒿 (*A. desterorum.*) 等。

樟子松 (*Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv. 以下简称为 *P. sylvestris.*) 属松科松属多年生常绿乔木，生长稳定、防风固沙性能好，近年来在毛乌素沙

区大面积推广和种植。本研究选取圪丑沟流域内广泛种植的樟子松 (18~20 a) 人工林地为研究对象，样地植物生长状况和土壤基本理化性质分别见表 1 和表 2。同时，在选取的樟子松林地安装了小型气象站 (TS-Z1) 和地下水位仪 (HOBO) (2018 年 4 月安装)，自动监测气象数据和地下水位动态变化特征。试验期间 (2018 年 4 月至 2018 年 12 月) 樟子松林地降水、气温和地下水位动态变化特征见图 2。

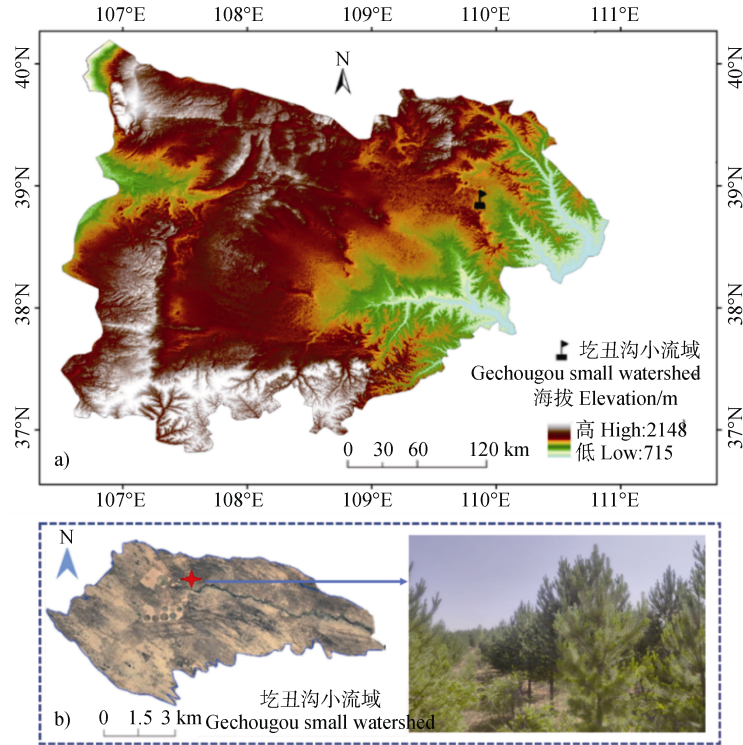


图 1 圪丑沟小流域区域位置 (a) 和采样点林地景观照 (b)

Fig. 1 The location of Gechougou small watershed (a) and woodland landscape of sampling site (b)

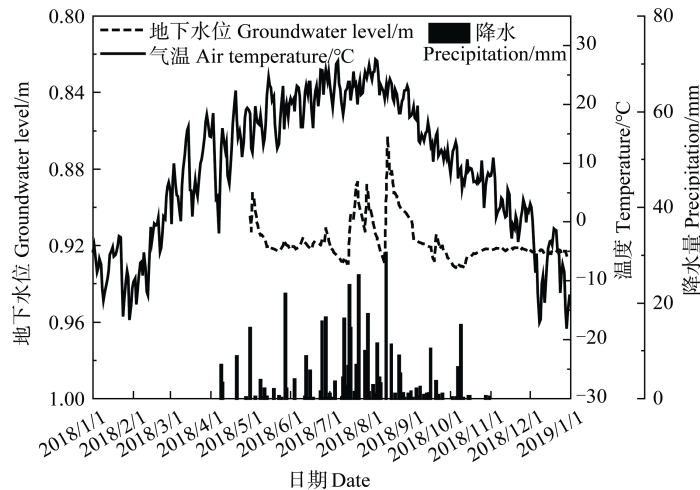


图 2 圪丑沟小流域监测期间降水、气温与地下水位动态变化特征

Fig. 2 Dynamics of precipitation, temperature and groundwater level in the Gechougou small watershed during the monitored period

表 1 樟子松林地植物生长状况

Table 1 Vegetation growth status in the studied *P. sylvestris*. land

优势植物	植被类型	年龄	株高	基茎	平均冠幅	盖度
Dominant plant	Vegetation types	Age/a	Plant height/m	Basic stem/cm	Average crown/m×m	Coverage/%
樟子松 ^①	乔木 ^③	18~20	4.40±0.80	17.50±4.50	3.40×4.80	73.40±4.60
沙蒿 ^②	草本 ^④	5~8	0.34±0.10	6.62±2.80	0.35×0.45	8.15±1.25

① *P. sylvestris*. ② *A. dosterorum*. ③ Arbor, ④ Herb

表 2 土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the studied soils

土壤深度 ^① /cm	容重 ^② / (g·cm ⁻³)	饱和导水率 ^③ / (10°C, cm·h ⁻¹)	田间持水量 ^④ / (g·g ⁻¹)	土壤机械组成			总有机质 ^⑤ / (g·kg ⁻¹)	全氮 ^⑥ / (g·kg ⁻¹)	全磷 ^⑦ / (g·kg ⁻¹)
				Soil mechanical composition/%					
				黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand			
0~20	1.68	18.48	0.11	—	2.51	97.31	2.07	1.18	1.24
20~40	1.71	22.56	0.09	—	—	100.00	1.41	0.81	0.63
40~60	1.68	19.98	0.08	—	—	100.00	1.08	0.68	0.58
60~90	1.65	18.48	0.09	—	0.28	99.72	1.09	0.54	0.40
90~120	1.66	17.98	0.10	—	1.07	98.93	1.29	0.44	0.51
120~150	1.67	17.88	0.09	—	1.07	98.93	1.06	0.66	0.71

① Soil depth, ② Bulk density, ③ Saturated hydraulic conductivity, ④ Field water holding capacity, ⑤ Total organic carbon, ⑥ Total nitrogen, ⑦ Total phosphorus

1.2 样品采集

2018年6月至11月定期采集降水、土壤、植物茎秆和地下水样品。采集的样品置于棕色玻璃瓶(30 mL)中,用聚乙烯封口膜密封,并迅速置于-20°C的冰箱中临时冷冻保存,并在一个月内完成本月所有样品的抽提。依据该地区多年的降水量及土壤含水量的变化特征结合前人在相似区域的研究,将土壤、植物茎秆和地下水样品的采集频率定为每月采集1次,采集时间为发生较大降水事件后2~3 d植物蒸腾旺盛的9~11 h进行。降水样依据发生降水事件进行采集。

土壤样品用土钻进行采集,在每个林地中布设3个样点进行混合取样。即由表层土壤向下至地下水界面每间隔10 cm采集一次。将取出的土样一部分置于铝盒中带回实验室烘干称重,用于测量土壤质量含水量,另一部分按照土壤层次分别进行混合,作为混合样品用于后续同位素分析。同位素样品60 cm以内间隔为20 cm,60 cm以下至地下水位间隔为30 cm。混合后的土壤水氢氧同位素的样品置于

棕色玻璃瓶中,低温冷冻(-20°C)保存备用。同时,采集不同深度(间隔20 cm)土层扰动土用于测定其基本理化性质。

在樟子松林地选取3株长势基本一致的樟子松,从距地面1 m以上的冠层不同方向分别采集生长2年的直径约1~2 cm的枝条。将取下的枝条快速除去韧皮部分并切成3~4 cm小段迅速放入棕色玻璃瓶中,并用聚乙烯封口膜封口,低温冷冻(-20°C)保存备用。同时,采用根钻(D=9 cm, H=10 cm)法对植物根系进行调查,分别在距樟子松基茎50、100、150和200 cm处进行同心圆采样(n=9),由地表向下间隔10 cm取样,直至多次取样未发现根系为止。

地下水样品取自樟子松林地地下水位观测井,每次取3个重复,保存方法与降水样品相同。

1.3 样品分析

土壤基本理化性质测定。采用烘干(105°C)称重法测定土壤含水量。采用环刀法和定水头法分别测定土壤容重和土壤水力性质(田间持水量和饱和

导水率等)。土壤机械组成采用激光粒度仪测定。土壤全氮(TN)、全磷(TP)和有机质分别采用半微量开氏法、NaOH 熔融—钼锑抗比色法和重铬酸钾外加热法进行测定。

土壤水和植物水的提取与分析。采用植物—土壤水分真空抽提系统(LI-2 000, 北京, 中国)对土壤和樟子松茎干木质部进行抽提, 采用液态水同位素分析仪(Los Gatos Research Inc, Mountain View, CA, 美国, 测量精度: $\delta^{18}\text{O} \pm 0.3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} \pm 1\text{‰}$)对土壤水、地下水和降水氢氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$)进行测定^[25]。为避免植物样品中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质谱仪(Isoprime 100, Thermo Fisher Scientific, 德国, 测试精度: $\delta^{18}\text{O} < 0.3\text{‰}$, $\delta^2\text{H} < 2.0\text{‰}$)对樟子松木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 进行测定。

土壤含水量、变异系数及植物吸水来源计算。土壤含水量计算公式如下:

$$SWC = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (1)$$

式中, SWC 表示土壤含水量, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; M 表示湿土质量, g ; M_s 表示干土质量, g 按照国际通用的数据标准化方法, 对获得的氢氧同位素值进行标准化, 同位素比值具体计算方法如下:

$$\delta X = \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{stand}}} - 1 \quad (2)$$

式中, X 表示氢同位素(^2H)或氧同位素(^{18}O), R_{sample} 和 R_{stand} 分别表示样品和标准样品(标准平均海水)同位素摩尔丰度比($^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。

采样期间降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值($\delta_{p,\text{mean}}$)计算如下:

$$\delta_{p,\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \times PPT_i}{\sum_{i=1}^n PPT_i} \quad (3)$$

式中, δ_i 和 PPT_i 分别表示每次降水事件的同位素组成和降雨量。

$$\delta X_{CV} = \frac{\delta X_{sd}}{\delta X_m} \quad (4)$$

式中, δX_{CV} 为变异系数, δX_{sd} 表示各部分样品中氢/氧同位素标准差, δX_m 表示加权平均值。

采用同位素质量守恒多元分析法^[26]量化樟子松对不同水源的吸收利用比例。依据质量守恒定律, 其计算公式如下:

$$\delta x = f_1 \delta x_1 + f_2 \delta x_2 + f_3 \delta x_3 + \dots + f_i \delta x_i \quad (5)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_i = 1 \quad (6)$$

式中, δx 为植物木质部水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的数值, δx_1 、 δx_2 、 δx_3 和 δx_i 分别为各水源中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的数值, f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_i 分别为不同水源对植物的贡献率, 模型计算分数的增量设定 1%, 不确定水平为 0.1%。

数据统计与分析。采用 SPSS 16.0 对试验数据进行统计分析, 采用 5%置信水平下最小显著差异(Least significance difference, LSD)多重比较检验 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值之间的差异显著。采用 IsoSource 软件计算樟子松对不同水源的吸收利用比例, 利用 Origin9.0 对数据进行作图。

2 结 果

2.1 不同水源 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布

表 3 为樟子松林地 6—11 月不同水源稳定同位素 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征。试验观测期间樟子松林地不同水源(降水、土壤水和地下水)中 $\delta^2\text{H}$ 值变化范围分别为 $-144.81\text{‰} \sim -6.60\text{‰}$ 、 $-83.62\text{‰} \sim -48.57\text{‰}$ 和 $-65.63\text{‰} \sim -53.65\text{‰}$, 平均值分别为 -55.74‰ 、 -62.36‰ 和 -64.61‰ , 降水和土壤水中 $\delta^2\text{H}$ 值变异系数分别为 58%和 25%, 属于强变异($> 20\%$), 而地下水 $\delta^2\text{H}$ 值变异系数为 2%, 属于弱变异($< 10\%$)。不同水源(降水、土壤水和地下水)中 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为 $-18.86\text{‰} \sim -2.07\text{‰}$ 、 $-9.45\text{‰} \sim -6.54\text{‰}$ 和 $-9.97\text{‰} \sim -8.26\text{‰}$, 平均值分别为 -8.29‰ 、 -8.35‰ 和 -8.61‰ , 分别为强变异(49%)、中等变异(15%)和弱变异(4%)。不同水源中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值均表现为降水 $>$ 土壤水 $>$ 地下水, 表明降水中氢氧同位素较土壤水和地下水重组分富集, 这是由于降水在到达地面之前受到不平衡的蒸发作用而产生同位素分馏。相对于土壤水, 地下水氢氧同位素轻组分出现一定程度的富集(表 3)。

表 3 樟子松林地 6—11 月份不同水源 δ²H 和 δ¹⁸O 描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of δ²H and δ¹⁸O values of different water sources in *P. sylvestris*. forest-land from June to November

水分来源 ^①	δ ² H/‰					δ ¹⁸ O/‰				
	最小值 ^②	最大值 ^③	加权平均值 ^④	标准差 ^⑤	变异系数/% ^⑥	最小值 ^②	最大值 ^③	加权平均值 ^④	标准差 ^⑤	变异系数/% ^⑥
降水 Precipitation	-144.81	-6.60	-55.74	32.05	58	-18.86	-2.07	-8.29	4.05	49
土壤水 Soil water	-83.62	-48.57	-62.36	7.92	25	-10.83	-5.48	-8.35	1.04	15
地下水 Groundwater	-65.63	-53.65	-64.41	1.48	2	-9.97	-8.26	-8.61	0.37	4

①Water sources, ②Minimum, ③Maximum, ④Weighted mean, ⑤Standard deviation (SD), ⑥Coefficient variation (CV)

图 3 表示圪丑沟小流域樟子松林地不同水源 δ²H 和 δ¹⁸O 的相关关系。如图 3 所示, 不同水源中 δ²H 和 δ¹⁸O 均存在显著的线性相关关系, 其中雨水中 δ²H 和 δ¹⁸O 具有较强的相关关系 R²=0.96 (P < 0.01), 土壤水次之 R²=0.89 (P < 0.05), 地下水和植物木质部水中 δ²H 和 δ¹⁸O 具有较弱的相关性, 决定系数 (R²) 分别为 0.77 和 0.79。不同水源 δ²H 和 δ¹⁸O 拟合曲线的斜率和截距存在差异 (图 3)。本地降水线的斜率和截距均小于全球大气降水线^[27], 氢氧同位素组成表现为重组分相对富集, 表明圪丑沟流域降水蒸发作用高于全球大气降水蒸发。土壤水线斜率和截距均介于当地降水线和地下水线之间, 表明流域内土壤水受降水和地下水共同补给, 且在补给过程中经历了与蒸发相关的同位素重组分富集过程。

2.2 土壤水分含量与氢氧同位素组成剖面分布特征

图 4 表示樟子松林地 6—11 月土壤水分含量与氢氧同位素组成剖面分布特征。从图 4 可以看出, 监测期间土壤含水量均随土壤深度增加而增加, 且具有明显的“拐点”(本文将土壤含水量变化的“拐点”定义为相邻土层之间土壤含水量变化率 > 200%), 但不同月份“拐点”出现的深度不同。雨季 (7—9 月)“拐点”起始深度均为 60 cm, 而旱季 (6 月、10 月和 11 月)“拐点”起始深度为 70 cm, 这可能是由于不同月份地下水位和植物根系吸水深度发生变化共同作用引起的。试验观测期间不同月份 0~30 cm 土层含水量变化范围为 0.01~0.06

g·g⁻¹。不同月份间 0~30 cm 土层平均含水量存在显著差异 (P < 0.05), 变异系数为 44%。该土层主要受降水和蒸发影响在时空上表现为强变异 (CV > 20%)。6—11 月 30 cm 至“拐点”起始深度 (60 cm 或 70 cm) 土壤含水量均未表现出显著的增加趋势 ((P > 0.05), 但不同月份间这一土层含水量存在显著差异 (P < 0.05), 介于 0.02~0.05 g·g⁻¹, 且变异系数为 0.19。该土层土壤蒸发影响较弱, 降水通过土壤孔隙向下入渗参与与原有土壤水混合迁移, 土壤含水量时空分布表现为弱变异 (CV < 20%)。不同月

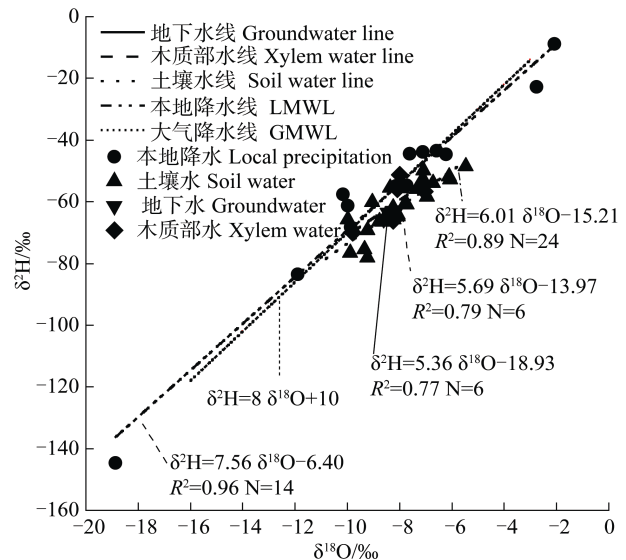
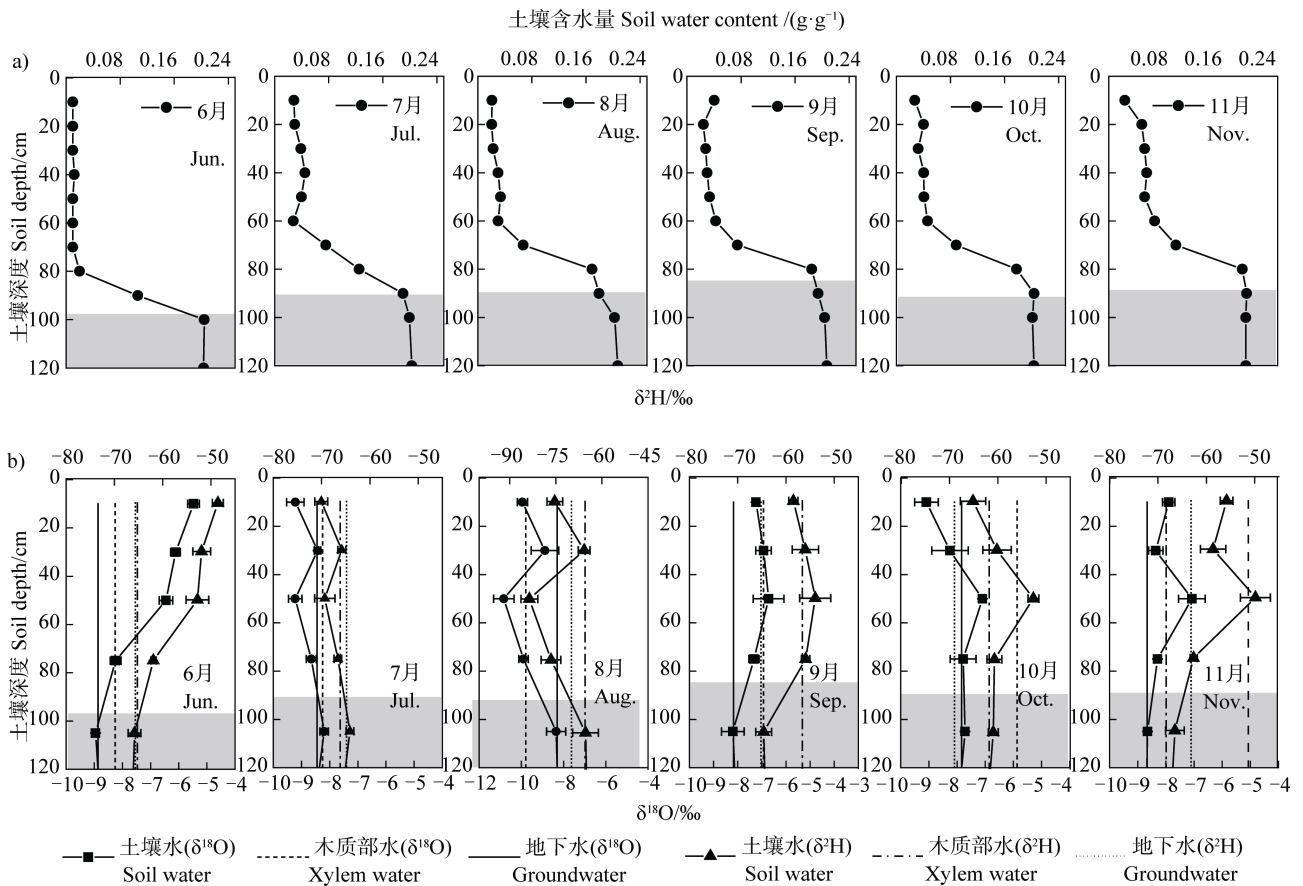


图 3 樟子松林地 6—11 月不同水分来源稳定同位素 δ²H 和 δ¹⁸O 关系, N 为样本数

Fig. 3 Stable isotopic δ²H and δ¹⁸O from different water sources in *P. sylvestris*. forestland from June to November, the capital N represents the number of samples



注：阴影区域表示地下水。Note: The shaded area represents the shallow groundwater.

图4 樟子松林地6—11月土壤水分含量(a)与不同水源氢氧同位素组成($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)(b)剖面分布特征

Fig. 4 Dynamics of soil water content (a) and distribution of hydrogen and oxygen isotope compositions ($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)(b) in different water sources in *P. sylvestris* forestland from June to November

份“拐点”起始深度(60 cm或70 cm)以下至地下水位(80~100 cm)以上土壤含水量快速增加并接近饱和含水量(0.20 g·g⁻¹),这是由于地下水受毛管力作用上升引起的。该土层主要受地下水周期性波动影响在时空上表现为强变异(CV > 20%),土壤含水量介于0.08~0.14 g·g⁻¹。依据土壤含水量和土壤水同位素的时空分布特征将土壤剖面划分为活跃层(0~30 cm)、稳定层(30 cm至“拐点”起始深度)和近饱和层(“拐点”起始深度至地下水位)便于后续同位素分析。

不同月份樟子松林地土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面分布特征表现出明显的季节变化特征。6月随着土壤深度的增加, $\delta^2\text{H}$ 呈现出持续递减的趋势,同位素组成中 $\delta^2\text{H}$ 值由-48.57‰降低至-66.31‰,与地下水 $\delta^2\text{H}$ 值接近。这是由于地表蒸发作用强烈,因此表层土壤水氢氧同位素重组分富集;同时地下水受水

势梯度作用向低水势方向运动补给土壤水过程中与原有的土壤水发生混合,从而导致剖面下部土壤水氢氧同位素轻组分相对富集。7—11月随着土壤深度的增加 $\delta^2\text{H}$ 在剖面土壤上表现出波动特征, $\delta^2\text{H}$ 值介于-49.83‰和-83.62‰之间,月均变异系数为14%。近饱和层同位素($\delta^2\text{H}$)值介于-62.16‰和-67.36‰之间,与地下水 $\delta^2\text{H}$ 值接近,其变异系数为9%,显著低于活跃层和稳定层同位素($\delta^2\text{H}$)月均变异系数(14%)。这时近饱和层受地下水的影响显著,地下水在向近饱和层补给的过程中与该土层原土壤水混合作用强烈。不同月份 $\delta^{18}\text{O}$ 在剖面土壤上的分布特征与 $\delta^2\text{H}$ 在土壤剖面上的分布特征相似(图4)。

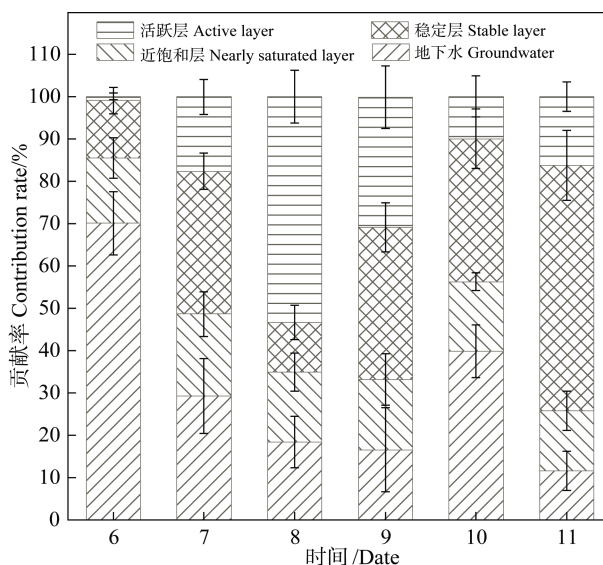
植物根系吸收土壤水分过程中,氢氧同位素一般不发生分馏^[12]。当植物木质部水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与某一层土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 接近时,可以大致判断出植物主要吸水层^[28]。如图4所示,6—11月份

樟子松木质部水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均有交汇或接近, 但随不同月份交汇或接近点深度不同。6 月樟子松木质部水组成与近饱和层土壤水和地下水同位素组成相近, 表明樟子松以利用近饱和层土壤水和地下水为主。7—9 月随着降水的增加以及地下水位的抬升, 土壤水与降水和地下水混合作用增强, 樟子松木质部水氢氧同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 值与剖面土壤水氢氧同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 值接近, 交汇点由近饱和层土壤水和地下水逐步向上移动至活跃层和稳定层, 表明樟子松根系吸水逐步转变为以吸收活跃层和稳定层土壤水为主。10—11 月随着降水的减少, 土壤水与降水以及地下水混合作用逐渐减弱, 土壤水补给相对较少, 樟子松木质部水氢氧同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 值与稳定层土壤水氢氧同位素($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 值相近, 樟子松主要以利用稳定层土壤水为主。

2.3 樟子松对各潜在水源的利用比例

图 5 表示樟子松林地 6—11 月不同水分来源对樟子松根系吸水贡献。樟子松 6—11 月对不同土层土壤水(活跃层、稳定层、近饱和层)和地下水的吸收比例存在显著差异且随季节呈现规律性变化特征。6 月份, 樟子松对地下水的利用比率最高(70.10%), 其次为近饱和层(15.40%)和稳定层(13.60%), 活跃层最低(1.00%)。6 月, 降水相对较少(图 2), 受蒸发和樟子松耗水影响, 活跃层, 稳定层土壤含水量维持在较低水平(图 4), 不能够满足樟子松用水需求, 因此樟子松主要以利用近饱和层土壤水和地下水为主。此外樟子松根系已延展至地下水(图 6), 为其大量利用地下水提供了保障。雨季(7—9 月)土壤含水量随降雨量增加而增加, 近饱和层土壤水和地下水对樟子松根系吸水贡献呈显著降低趋势, 即由 70.10% 逐步降低至 16.60%, 而稳定层和活跃层土壤水对樟子松根系吸水的贡献逐渐增加, 分别介于 11.80%~35.90% 和 17.60%~53.30% 之间。随着雨季结束降水减少(10 月), 地下水对樟子松吸水贡献再次短暂增加, 达到 39.90%(图 5), 然而随着 11 月, 樟子松对水分需求减少, 地下水对樟子松吸水贡献进一步降低至 11.60%, 而稳定层对樟子松的吸水贡献增加至最大(58.00%)。这与樟子松蒸腾作用减弱有关。进入 11 月气温进一步降低, 樟子松活性减弱, 需水量减少, 相对较高的土壤含水量为樟子松提供了充足的

水源。纵观 6—11 月樟子松对不同潜在水源的吸收利用比率平均表现为: 稳定层(31.10%) > 地下水(31.00%) > 活跃层(21.50%) > 近饱和层(18.00%), 表明该流域稳定层土壤水和地下水是樟子松根系吸水的重要来源。



注: 由于地下水位波动, 图中各月份各土层分布不一。6—11 月活跃层均为 0~30 cm。6—11 月稳定层分别为 30~85、30~80、30~80、30~70、30~80 和 30~75 cm。6—11 月近饱和层分别为 85~95、80~90、80~90、75~85、80~90 和 75~90 cm。6—11 月地下水分为 >95、>90、>90、>85、>90 和 >90 cm。Note: The soil layers were distributed differently in various months because of the fluctuant water level. The active layer was 0~30 cm generally from June to November; the stability layers were 30~85, 30~80, 30~80, 30~70, 30~80 and 30~75 cm respectively; the nearly saturated layers were 85~95, 80~90, 80~90, 75~85, 80~90 and 75~90 cm respectively and the groundwater layers was >95, >90, >90, >85, >90 and >90 cm respectively from June to November.

图 5 樟子松林地 6—11 月不同水分来源对樟子松根系吸水贡献

Fig. 5 Contribution of different water sources to root water uptake of *P. sylvestris* from June to November

3 讨论

3.1 土壤水分布与樟子松根系吸水来源动态变化

毛乌素沙地不同时期降水分配不同, 导致土壤水时空分布产生季节性差异。本试验表明在降水相对较少的 6 月, 樟子松林地活跃层和稳定层土壤含水量均维持在较低水平(0.01~0.02 g·g⁻¹)(图 4), 无法满足樟子松用水需求, 土壤水分供耗矛盾突出。

而 Iso-source 模型计算表明 6 月樟子松根系主要吸收 > 90 cm 土壤水 (15.40%) 和地下水 (70.10%)，因此旱季樟子松根系更偏向于利用深层土壤水。这与 Yang 等^[29]得出亚热带针叶林木在季节性干旱环境下偏向于利用深层土壤水的结论一致。方杰等^[30]对科尔沁沙地丘间低地樟子松人工林水分利用来源进行了研究，同样发现樟子松在旱季以利用深层土壤水和地下水为主。7—9 月随着降水频率和降雨量增加，雨水补给土壤水作用明显，活跃层和稳定层土壤含水量显著增加 (约为 $0.04 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)。雨季 (7—9 月) 樟子松对活跃层及稳定层土壤水的吸收利用比例之和分别为 51.30%、65.10% 和 66.70%。樟子松 6 月水分来源由以吸收 > 90 cm 土壤水和地下水为主逐步上移转变为以吸收活跃层和稳定层土壤水为主。苏文旭等^[31]研究同样发现浑善达克沙地杨树在雨季存在吸水深度上移的特征。一方面，土壤水接受降水的快速补充为樟子松提供了充足水源 (图 4)，另一方面，植物吸收利用活跃层和稳定层土壤水降低了能量消耗^[32]，此外，樟子松发达的根系为其在雨季充分截留由雨水转化而来的土壤水提供了保障 (图 6)。10—11 月随着降水的再次减少，气温显著下降 (图 2)，土壤含水量维持在相对较高的水平。樟子松在经历短暂的主要利用利用近饱和层土壤水和地下水的过程 (10 月) 后再次转变为以吸收活跃层和稳定层土壤水为主 (11 月)。这可能与植物根系吸水存在滞后效应有关^[32]。此外，气温降低 (图 2)，樟子松需水能力减小加之相对高的土壤含水量满足了樟子松对土壤水分供应的需求。观测期间内 (6—11 月)，从旱季 (6 月、10 月和 11 月) 至雨季 (7—9 月) 樟子松林地活跃层、稳定层和近饱和层土壤水存在较大变异。Iso-source 模型计算表明旱季至雨季各土层对樟子松根系吸水的贡献分别由 1.00% 增加至 53.30% (活跃层)、11.80% 增加至 58.00% (稳定层) 和 14.20% 至 29.40% (近饱和层) (图 5 和图 6)。而土壤含水量 6 至 11 月亦呈现增加的趋势，土壤含水量与樟子松对土壤水分的吸收利用比例呈现正相关关系 ($R^2=0.71$, $P<0.05$)，这与 Li 等^[33]的研究结论一致。

3.2 根系分布和地下水季节变化对樟子松水分利用的影响

根系是植物获取土壤水分的重要器官，根系分

布特征主要取决于土壤水分在空间上的分布以及根系自身形态的可塑性^[34]，其分布特征在一定程度上决定了植物水分利用来源^[35]。本研究根系调查表明距基茎不同距离处樟子松根系在土壤剖面上随着土壤深度的增加均呈现逐渐降低的趋势 (图 6)，其中 0~60 cm 土层根系占总根系生物量的 93.30%~95.40%，部分根系已接近或达到地下水界面 (图 5)。发达的根系网络可以有效拦截并吸收土壤中的水分^[36] (图 6)。本研究表明由旱季 (6 月) 到雨季 (7—9 月) 樟子松根系对活跃层和稳定层土壤水的吸收分别增加 16.60%~52.30% 和 20.10%~23.30%，而对近饱和层土壤水的吸收比例分别降低 4.00%~6.10%。10—11 月樟子松根系对活跃层和稳定层土壤水的吸收利用比例仍然维持在较高水平，分别为 43.80% 和 74.20% (图 6)。樟子松在不同季节根系吸水来源不同，表明樟子松发达的根系对其充分利用土壤水分具有重要作用，这可能与樟子松根系具有功能上的二态性有关^[37]。在干旱半干旱区生态系统中大多数植物 (主要为灌木和乔木) 均具有功能上的二态根系，旱季植物主根系吸收利用深层土壤水或地下水，雨季则主要通过侧根系统充分吸收浅层土壤水^[38]，与草本植物通过改变根系形态的可塑性不同^[39]。本试验樟子松在不同时期其根系吸水来源在不同土层间发生转变，进一步印证其根系具有二态性。樟子松这种根系功能上的二态性为其充分适应干旱环境，提高获取水分竞争力提供了有利支撑。此外，樟子松根系根尖大量的根系分泌物与真菌^[40]共生，也有利于在旱季其根系对土壤水分甚至地下水的获取。

地下水作为土壤水的重要补给水源在 SPAC 水循环中扮演着重要的作用 (图 6)。本研究在土壤水分相对亏缺的旱季 (6 月)，樟子松根系吸水来源约 70.10% 的水分来自地下水 (图 5 和图 6)，旱季地下水是樟子松根系吸水的主要水源。随着雨季 (7—9 月) 降水事件增多，土壤含水量增加，樟子松对地下水的依赖逐步下降最低至 16.60%，然而由于地下水位波动抬升使得近饱和层位置向上移动约 15 cm (图 4)，使得该土层土壤水对樟子松根系吸水的平均贡献率由 6 月的 15.40% 增加至 29.40%，平均为 6 月份近饱和层土壤水贡献率的 1.35 倍。随着降水事件的减少，10 月地下水位出现短暂的回落 (向

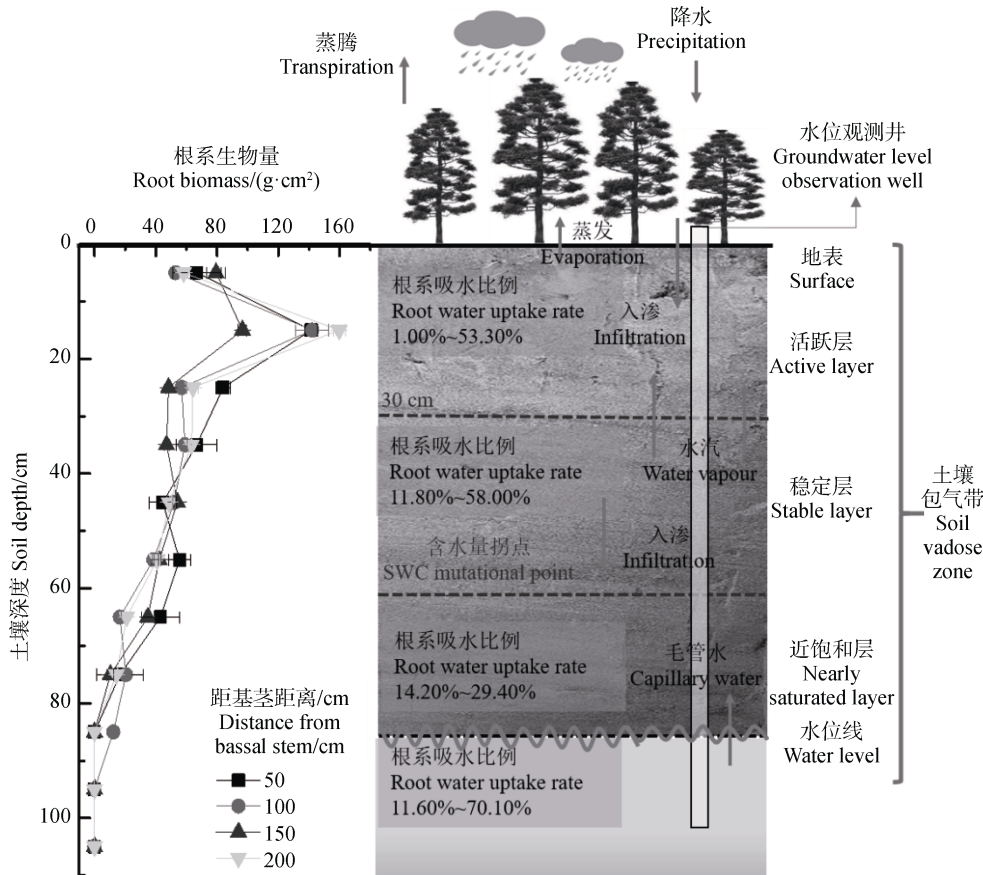


图 6 樟子松林地水分循环与土壤剖面特征示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water circulation and soil profile characteristics of *P. sylvestris* forestland

下回落约 5 cm), 此时地下水对樟子松根系吸水的贡献再次增加 (39.90%), 为雨季 (7—9 月) 地下水贡献的 2.2 倍 (图 4), 表明地下水季节性波动改变了近饱和层的相对位置, 从而间接影响了樟子松根系对不同水分来源的吸收利用比例, 地下水位波动对樟子松根系获取不同水分来源具有导向作用。这与周海等^[41]对荒漠植物泡泡刺的水分来源研究结论类似。Chen 等^[20]对塔里木河下游不同地下水位条件下各物种根系吸水来源进行了研究, 结果同样表明地下水位差异是导致同一时期不同植物获取水分来源发生变化的主要原因。

4 结 论

毛乌素沙地东南边缘地处水蚀风蚀交错带, 降水稀少、蒸发量大, 降水和地下水是植物维持正常生命活动的重要水源。沙区植被恢复与生态重建对于治理土地沙化和荒漠化, 建设美丽中国具有重要

意义。然而, 大面积植树造林可能改变局部微气候, 破坏沙区原有的水文循环过程, 导致土壤水和地下水补给困难, 加剧区域水资源供需矛盾。特别是一些地区大面积引进高耗水人工林, 根系吸水深度不断延伸, 从而直接消耗宝贵的地下水资源。本文以樟子松人工林为研究对象, 通过稳定同位素技术定量分析了樟子松对不同水源的吸收利用比例及其季节性变化特征, 发现樟子松在旱季对深层土壤水和地下水的吸收比例高达 85.50%, 因此, 大面积种植樟子松可能对地下水资源的可持续性具有潜在威胁。随着气候暖干化和大规模植树造林, 黄土高原地区植被恢复已接近该地区水资源植被承载力阈值。与黄土高原相比, 毛乌素沙区土壤水分供需矛盾更加突出, 未来需进一步研究该区不同类型和不同生长年限植物根系吸水来源、动态变化特征及其影响因素, 在此基础上探讨沙区水资源植被承载力阈值, 为沙区植被合理配置和提高水资源利用效率提供依据。

参考文献 (References)

- [1] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [2] Liu Y H, 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 (6): 380—386.
- [3] Li X Y. Mechanism of coupling, response and adaptation between soil, vegetation and hydrology in arid and semiarid regions[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2011, 41 (12): 1721—1730. [李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41 (12): 1721—1730.]
- [4] Xu H, Li Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285 (1/2): 5—17.
- [5] Delzon S, Loustau D. Age-related decline in stand water use: Sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129 (3/4): 105—119.
- [6] Mares R, Barnard H R, Mao D Q, et al. Examining diel patterns of soil and xylem moisture using electrical resistivity imaging[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 327—338.
- [7] Jin Y R, Lu K X, Li P, et al. Research on soil water movement based on stable isotopes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 792—801. [靳宇蓉, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 792—801.]
- [8] Dai J J, Zhang X P, Luo Z D, et al. Variation of stable isotopes in soil water under *Cinnamomum camphora* woods in Changsha and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1514—1525. [戴军杰, 章新平, 罗紫东, 等. 长沙地区樟树林土壤水稳定同位素的变化及影响因素[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (6): 1514—1525.]
- [9] 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.
- [10] Hardanto A, Röhl A, Hendrayanto, et al. Tree soil water uptake and transpiration in mono-cultural and jungle rubber stands of Sumatra[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 397: 67—77.
- [11] Zhang B J, Li Z X, Wang Y, et al. Characteristics of stable isotopes and analysis of water vapor sources of precipitation at the northern slope of the Qilian mountains[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (12): 5272—5285. [张百娟, 李宗省, 王昱, 等. 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. *环境科学*, 2019, 40 (12): 5272—5285.]
- [12] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water[J]. *Nature*, 1991, 350(6316): 335—337.
- [13] Chang E H, Li P, Zhang T G, et al. Root systems distribution and water use pattern of vegetation from abandoned croplands during dry and wet season in Loess Hilly Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 129—138. [常恩浩, 李鹏, 张铁钢, 等. 旱季雨季对黄土丘陵退耕区植被根系分布及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (24): 129—138.]
- [14] Zhang T G, Li Z B, Li P, et al. Response characteristics of soil water use patterns by different plants to precipitation in rocky mountainous areas[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1461—1467. [张铁钢, 李占斌, 李鹏, 等. 土石山区不同植物土壤水分利用方式对降雨的响应特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (5): 1461—1467.]
- [15] Wang Y L, Liu L C, Gao Y H, et al. Analysis of water sources of plants in artificial sand-fixation vegetation area based on large rainfall events[J]. *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[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (4): 1053—1060.]
- [16] Wang Y Y, Chen Y P, Li W H, et al. Water sources of typical desert riparian plants in the lower reaches of Tarim river[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(6): 1150—1157. [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.]
- [17] Liu S B, Chen Y N, Chen Y P, et al. Study on the depth of water uptake by *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of the Heihe River, based on the stable isotope techniques[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (3): 729—739. [刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究[J]. *生态学报*, 2016, 36 (3): 729—739.]
- [18] Han X Y, Yang G, Qin F C, et al. Spatial and temporal dynamic patterns of sandy land in Mu Us in the last 30 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (5): 144—150, 157. [韩雪莹, 杨光, 秦富仓, 等. 毛乌素沙地近 30 年沙漠化土地时空动态演变格局[J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (5): 144—150, 157.]
- [19] Wen G S, Wang L H, Ji C X. Changes of groundwater level in *Sabina vulgaris* community in Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20 (2): 266—271. [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): 266—271.]
- [20] 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 International*, 2016, 23 (17): 17404—17412.
- [21] Tian X X. Research for isotope in ground water, mid-north area, Artoce basin[J]. *Geology of Inner Mangolia*, 1994 (Z1): 90—97. [田孝先. 鄂尔多斯盆地北中部地区地下水同位素研究[J]. 内蒙古地质, 1994 (Z1): 90—97.]
- [22] Chen J S, Wang T, Chen X X, et al. Discussion on the origin of groundwater in the orods basin[J]. *Geological Review*, 2013, 59 (5): 900—908. [陈建生, 王婷, 陈茜茜, 等. 鄂尔多斯自流盆地地下水来源争议问题讨论[J]. 地质论评, 2013, 59 (5): 900—908.]
- [23] Chen J S, Liu X Y, Wang C, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of Northern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66 (2): 505—517.
- [24] Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C. Pedogenesis and soil taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007. [龚子同, 张甘霖, 陈志诚. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [25] Jia G, Yu X, Deng W, et al. Determination of minimum extraction times for water of plants and soils used in isotopic analysis[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, 10 (3): 1035—1040.
- [26] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136 (2): 261—269.
- [27] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133 (3465): 1702—1703.
- [28] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 167 (1/4): 351—368.
- [29] 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.
- [30] Fang J, Wei Y F, Liu S, et al. Stable isotopic analysis on water utilization sources of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in inter-dune lowland in Horqin Sandy Land[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30 (9): 1894—1900. [方杰, 魏雅芬, 刘帅, 等. 科尔沁沙地丘间低地樟子松人工林水分利用来源的稳定同位素解析[J]. 生态学杂志, 2011, 30 (9): 1894—1900.]
- [31] Su W X, Jia D B, Feng Y, et al. Analysis of water use characteristics of poplar trees in Otindag Sandy Land[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37 (2): 357—363. [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.]
- [32] Wu X, Zuo Q, Shi J C, et al. Introducing water stress hysteresis to the Feddes empirical macroscopic root water uptake model[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 106293.
- [33] Li Q Q, Dong B D, Qiao Y Z, et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (10): 1676—1682.
- [34] Musa A, Zhang Y H, Cao J, et al. Relationship between root distribution characteristics of Mongolian pine and the soil water content and groundwater table in Horqin Sandy Land, China[J]. *Trees*, 2019, 33 (4): 1203—1211.
- [35] Li C J, Tang J Y, Gao P, et al. Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along the Taklimakan desert highway[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 1180—1187. [李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52 (5): 1180—1187.]
- [36] Schenk H J, Jackson R B. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics[J]. *Geoderma*, 2005, 126(1/2): 129—140.
- [37] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in Karst Region of Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420/421: 264—274.
- [38] Rossatto D R, de Carvalho Ramos 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 and Experimental Botany*, 2012, 77: 259—266.
- [39] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: Back to the roots![J]. *Oecologia*, 2013, 172 (3): 617—630.
- [40] Schwinning S. The ecohydrology of roots in rocks[J]. *Ecohydrology*, 2010, 3 (2): 238—245.
- [41] Zhou H, Zhao W Z, He Z B. Water sources of *Nitraria sibirica* and response to precipitation in two desert habitats[J]. *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[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (7): 2083—2092.]

(责任编辑: 檀满枝)