

# 毛乌素沙地不同地下水位埋深下土壤水补给特征及影响因素

裴艳武<sup>1,2</sup>, 黄来明<sup>1,3\*</sup>, 邵明安<sup>1,2,3,4</sup>, 李荣磊<sup>1,2</sup>, 张应龙<sup>5</sup>

(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 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100049; 4. 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 杨凌 712100; 5. 陕西省神木县生态协会 神木 719399)

**摘 要:** 土壤水分是毛乌素沙地植被恢复与生态重建的关键因子, 揭示不同地下水位 (Groundwater Level, GWL) 埋深下土壤水的补给与转化特征对于提高水资源利用效率和植被可持续建设具有重要意义。试验通过定期测定毛乌素沙地东南缘圪丑沟流域沙柳 (GWL 范围 253~260 cm)、樟子松 (GWL 范围 87~93 cm) 和长柄扁桃林地 (GWL 范围 172~176 cm) 降水、土壤水及地下水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ , 分析了不同 GWL 埋深下 3 种林地土壤水补给特征及其影响因素。结果表明: 沙柳、樟子松及长柄扁桃林地土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  均位于当地大气水线的下方, 且 3 种林地土壤水线斜率 (5.69~7.13) 均小于当地大气水线斜率 (7.79), 表明各林地土壤水均在不同程度上受当地降水的补给。监测期间沙柳林地 0~20 cm 土壤水、樟子松和长柄扁桃林地 0~40 cm 土壤水均表现出重组分同位素贫化轻组分同位素富集的现象, 且与降水同位素呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 表明不同林地浅层土壤水 (<40 cm) 更易受降水补给的影响。不同林地深层土壤水 (沙柳林地 180 cm 以下, 樟子松林地 60 cm 以下, 长柄扁桃林地 120 cm 以下)  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的均值与地下水接近, 且随深度增加土壤水重组分同位素逐渐贫化并趋于稳定 (变异系数 < 10%)。根据不同深度土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  和地下水  $\delta^{18}\text{O}$  之间的相关关系, 得出监测期间 3 种林地 (沙柳、樟子松和长柄扁桃林地) 地下水向上补给土壤水的深度范围分别为 73~80、27~33 和 52~56 cm。因此, 毛乌素沙地浅层地下水对深层土壤水的补给可在一定程度上缓解旱季土壤水分亏缺, 为保障该区人工固沙植被生长提供潜在的水分来源。

**关键词:** 土壤; 水; 稳定同位素; 地下水; 分布特征; 毛乌素沙地

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.013

中图分类号: S728.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0108-09

裴艳武, 黄来明, 邵明安, 等. 毛乌素沙地不同地下水位埋深下土壤水补给特征及影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 108-116. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.013 <http://www.tcsae.org>  
Pei Yanwu, Huang Laiming, Shao Ming'an, et al. Characteristics and their influencing factors of water recharge under different groundwater levels in the Mu Us Sandy Land of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 108-116. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.013 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

在干旱半干旱地区, 土壤水是控制植被结构和生态系统演化的主要限制因子<sup>[1-2]</sup>, 而土壤水分供需平衡是维持土壤-植被系统健康发展的基础<sup>[3]</sup>。降水和地下水作为土壤水的潜在补给来源, 其时空变化对土壤水分的供给和剖面分布有着重要的影响。因此, 研究干旱半干旱地区土壤水的补给与转化特征对于优化区域水资源管理和促进生态系统可持续发展具有重要意义<sup>[4]</sup>。

土壤水中氢氧稳定同位素组成 ( $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ ) 受大气降水及水分在土壤中的蒸发、入渗等多种因素影响<sup>[5]</sup>。此

外, 一些存在浅层地下水的地区土壤水氢氧同位素组成及其剖面分布还受地下水位 (Groundwater Level, GWL) 季节波动的影响<sup>[6]</sup>。同位素技术作为“指纹”为辨识土壤水分的补给来源和运移规律提供了有效手段。与传统方法相比, 氢氧稳定同位素作为示踪剂具有灵敏度高和准确性好等特点, 对于水分补给来源具有良好的指示作用<sup>[7]</sup>。近年来, 随着氢氧稳定同位素技术的发展与应用, 众多学者对土壤水氢氧同位素分布特征进行了研究, 为揭示区域土壤水的补给来源与转化规律提供了依据。田立德等<sup>[8]</sup>对青藏高原中部那曲地区不同深度土壤水稳定同位素变化规律进行了研究, 结果表明表层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  受降水影响最为明显, 而随着土壤深度的增加, 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  受地下水的影响逐渐增强。张小娟等<sup>[9]</sup>通过对元阳梯田水源区降水及其 4 种典型植被类型 (乔木林、灌木林、荒草地和荒地) 下土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  进行分析, 揭示了研究区土壤水的下渗机制。结果表明: 乔木林和荒草地由于受到优先流的影响, 深层 (80~100 cm) 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  要高于表层 (<40 cm) 土壤, 而灌木林与荒地受活体流下渗的影响, 深层 (80~100 cm) 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  低于表层 (<40 cm) 土壤。Gazis 等<sup>[10]</sup>分析了美国汉诺威地区附近

收稿日期: 2021-02-04 修订日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601221); 国家重点研发计划重点专项课题 (2016YFC051605); 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)

作者简介: 裴艳武, 博士生, 研究方向为土壤水分-植被互馈关系。

Email: peiyanwuxn@163.com

\*通信作者: 黄来明, 博士, 副研究员, 研究方向为土壤时空变化与土壤水分生态环境效应。Email: huanglm@igsrr.ac.cn

6 个不同地点降水和不同土地利用方式下土壤水中  $\delta^{18}\text{O}$  分布特征, 结果表明, 浅层土壤水 (小于 20 cm) 由于受到蒸发作用相对富集重同位素 ( $\delta^{18}\text{O}$  值较高), 而富集轻同位素的较大降水事件 ( $\delta^{18}\text{O}$  值较低) 可通过活塞流的方式快速与浅层土壤水进行混合。相反, 深层土壤水残留时间较长 (大于 4.5 个月), 只有经过持续较长时间的雪融水和大量降水后才得到更新。Gazis 等<sup>[10]</sup>进一步指出即使是在较小的空间尺度下, 土壤水同位素组成也会因局部排水状况和土壤性质不同而发生变化。姬王佳等<sup>[11]</sup>研究了陕北黄土区 4 种土地利用方式 (农地、草地、灌木地和乔木地) 下土壤水的氢氧稳定同位素分布特征, 结果表明, 4 个样地土壤水氢氧稳定同位素值在浅层 (0~3 m) 和深层 (>12 m) 土壤均无明显差异, 而在中层 (3~12 m) 差异较大。不同样地土壤水可能接受不同强度降水的补给, 农地和草地也可被强度小的降水事件补给, 而沙柳地和杨树地可能主要接受夏秋季暴雨补给。上述研究表明不同地区土壤水分补给机制及同位素分布特征因降水量、土壤类型、植被种类、地形等多因素差异而不同。因此, 在干旱半干旱地区研究典型环境下土壤水分的补给特征对于因地制宜提高水资源利用效率和植被可持续建设具有重要意义。

毛乌素沙地位于黄土高原北部, 是中国四大沙地之一, 也是中国土地沙化最为严重的地区。自 20 世纪 90 年代以来该地区进行了大规模的植树造林活动, 使得该地区的生态环境得到有效改善。然而, 大规模植树造林严重消耗了土壤水分, 使得土壤水分供需矛盾加剧, 部分人工林已出现退化现象。土壤水分作为植物重要的水分来源对区域植物群落的演替具有重要作用。然而关于该地区季节性干旱频发、地下水位周期性波动下不同林地土壤水同位素分布及补给特征尚不清楚, 而探讨这一问题了解该地区不同地下水位埋深下土壤水循环和补给机制的基础。因此本研究以毛乌素沙地东南缘圪丑沟小流域不同水位埋深下典型治沙植物 (沙柳 (GWL 范围 253~260 cm)、樟子松 (GWL 范围 87~93 cm) 和长柄扁桃 (GWL 范围 172~176 cm) 林地) 为研究对象, 通过定期测定当地降水、土壤水及地下水中  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ , 分析不同 GWL 埋深下 3 种林地土壤水补给特征及其影响因素, 以期探明毛乌素沙地土壤水的补给来源和转化特征提供依据。

## 1 材料和方法

### 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°48'~38°54'N, 109°11'~109°29'E), 该流域位于陕西省神木市锦界镇西南约 23 km 处 (图 1), 海拔为 1 250~1 280 m。年均气温约为 9.2 °C, 大于 10 °C 的积温约为 3 150 °C, 年均降水量为 420 mm, 暴雨相对集中, 集中分布在 7—9 月, 占全年降水量的 60%~75%。流域内地形起伏较小, 土壤类型主要为干旱砂质新成土<sup>[12]</sup>。流域内 GWL 较浅, 不同林地 GWL 呈现明显的季节波动 (图 2)。

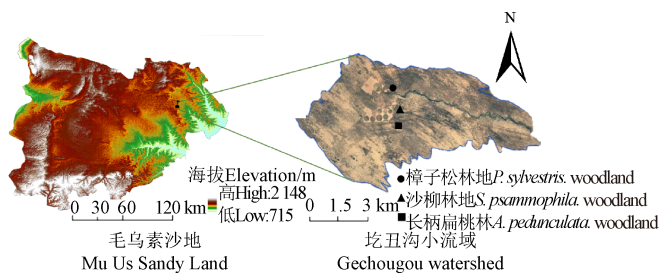
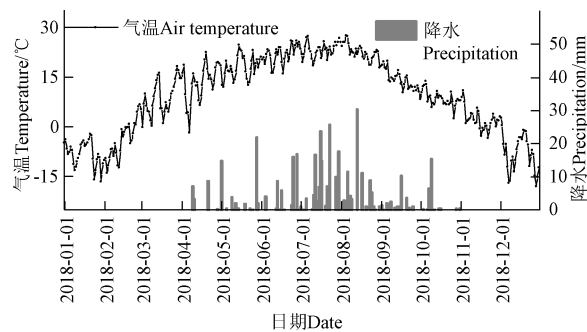


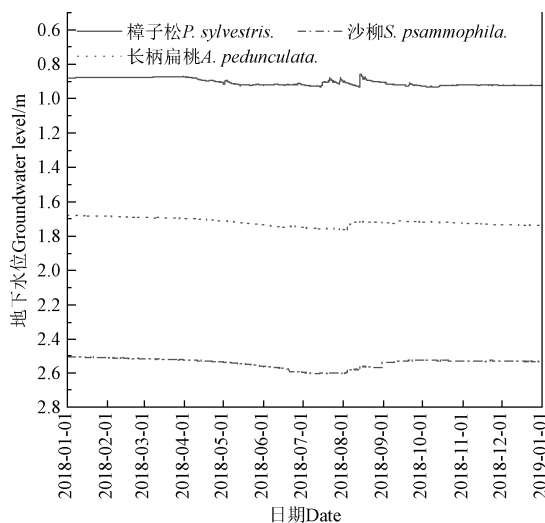
图 1 毛乌素沙地高程和圪丑沟流域卫星图

Fig.1 Elevation map of Mu Us Sandy Land and satellite map of Gechougou small watershed



a. 气温与降水

a. Air temperature and precipitation



b. 地下水位

b. Groundwater level

图 2 监测期间圪丑沟流域气温、降雨量和不同林地地下水位变化

Fig.2 Variations in air temperature, precipitation and groundwater level in various woodlands during the monitored period in the Gechougou watershed

关于毛乌素沙区地下水来源目前尚无定论, 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, 另一种观点认为地下水的主要补给源是通过断裂带输入的外源水<sup>[13]</sup>, 因此关于该流域地下水的来源问题暂不做讨论。近年来, 由于大规模植树造林活动的开展, 使得该区域植被盖度显著增加, 然而, 大规模的植树造林破坏了局部原有的生态水文格局, 使得土壤水分供需矛盾加剧, 流域内不同 GWL 埋深下的固沙植物部分已出现退化现象。目前, 流域内植被类型主要以人工林、草为主, 落叶灌木包括沙柳 (*Salix*

*psammophila*)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.)、长柄扁桃 (*Amygdalus pedunculata* Pall.)，常绿乔木樟子松 (*Pinus sylvestris* L. var.) 和多年生草本沙蒿 (*Artemisia desertorum* Spreng.) 等。本研究采用稳定同位素技术，选取圪丑沟小流域的典型治沙植物 (沙柳、樟子松和长柄扁桃) 为研究对象，系统分析不同 GWL 埋深下 3 种林地土壤水同位素分布特征及影响因素。在试验初期对

3 种林地典型植物样地进行调查，各林地植物生长状况和耗水特征见表 1。在试验开始前对各林地剖面土壤物理性质进行调查，调查结果详见表 2。在各林地分别安装地下水位仪 (HOBO probes, U20-001-04, Onset, Bourne, USA,  $\pm 0.1$  cm) 用于自动监测 GWL 的季节变化特征，同时在流域内安装小型气象站用于监测和获取气象参数。

表 1 林地植物生长状况  
Table 1 Vegetation growth status of the woodland

优势植物 Dominant plant	植被类型 Vegetation type	年龄 Age/a	株高 Plant height/m	基茎 Basic stem/mm	平均冠幅 Average crown/m×m	盖度 Coverage/%	月均蒸腾量 Monthly transpiration/mm
沙柳 <i>S. psammophila</i>	灌木	10~12	1.50±0.35	10.03±2.02	1.50×1.35	60.15±2.13	102.12 <sup>[14]</sup>
樟子松 <i>P. sylvestris</i>	乔木	18~20	4.40±0.80	175.0±45.0	3.40×4.80	73.40±4.60	190.62 <sup>[15]</sup>
长柄扁桃 <i>A. pedunculata</i>	灌木	15~18	1.30±0.58	13.74±5.15	1.80×1.10	50.32±7.76	104.04 <sup>[16]</sup>

注：乔木林地选取 3 个样方 (10 m×10 m)；灌木林地选取 3 个样方 (5 m×5 m)。

Note: Three plots (10 m×10 m) were selected in arbor forest; three plots (5 m×5 m) were selected in shrub forest.

表 2 林地土壤物理性质  
Table 2 Soil physical properties of the woodland

土层 Soil layer/cm	容重 Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(cm·h <sup>-1</sup> )	田间持水量 Field water holding capacity/(g·g <sup>-1</sup> )	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
0~20	1.55±0.06	25.40±3.62	0.15±0.007	0.89±0.96	1.11±1.17	98.00±1.13
21~40	1.65±0.06	18.22±2.43	0.15±0.006	0.45±0.79	0.46±0.79	99.09±0.58
41~60	1.62±0.05	19.82±3.12	0.15±0.005	0.89±1.14	0.82±0.88	98.29±1.02
61~90	1.65±0.03	17.74±2.14	0.15±0.005	0.52±0.90	0.40±0.70	99.07±0.60
91~120	1.67±0.04	17.02±3.02	0.15±0.004	0.64±1.11	0.52±0.72	98.84±1.12

注：表中各性质数值为 3 种林地平均值。

Note: The values of each property in the table are the average values of the three woodlands.

## 1.2 样品采集

试验期间 (6—11 月) 于每月中旬定期采集沙柳、樟子松和长柄扁桃林地各土层土壤水和地下水样品。采用土钻法对土壤样品进行采集，0~60 cm 每间隔 20 cm 采集一次，60 cm 以下至地下水界面每间隔为 30 cm 采集一次，每个林地各采集 3 次重复。将采集后的土壤样品分为 2 份，一份置于棕色玻璃瓶 (30 mL) 中用于测定氢氧稳定同位素组成，另一份置于铝盒中带回实验室烘干后用于土壤质量含水率的测定。降水样品按降雨事件采集。地下水样品取自各林地水位观测井 (井口直径  $D = 10$  cm)，将采样瓶放入观测井中距水面约 40 cm 处采集地下水样品，采样前对采样瓶进行润洗，每次采集 3 次重复。将上述用于同位素测定土壤、降水以及地下水样品用封口膜密封后放于 -20 °C 冰箱冷冻保存。

## 1.3 样品测定

利用低温冷冻抽提系统提取土壤水，采用液态水同位素分析仪 (LGR 测量精度： $\delta^{18}\text{O}$  为  $\pm 0.3\text{‰}$ ， $\delta^2\text{H}$  为  $\pm 1\text{‰}$ ) 对土壤水、地下水和降水氢氧同位素组成 ( $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ ) 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 (Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW) 同位素浓度的千分差计算获得

$$\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left( \frac{R_{\text{样}}}{R_{\text{VSMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中  $R_{\text{样}}$  为待测样品的氢或氧同位素组成， $R_{\text{VSMOW}}$  为国际标准物平均海洋水的氢或氧同位素组成。

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

$$\delta_{\text{p,mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \text{PPT}_i}{\sum_{i=1}^n \text{PPT}_i} \quad (2)$$

式中  $\delta_i$  (‰) 和  $\text{PPT}_i$  (mm) 分别表示每次降水事件的同位素组成和降雨量。

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

$$\delta_{\text{i,mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \text{SWC}_i}{\sum_{i=1}^n \text{SWC}_i} \quad (3)$$

式中  $\delta_i$  表示土壤水  $\delta^2\text{H}$  或  $\delta^{18}\text{O}$  (‰)， $\text{SWC}_i$  代表各土层土壤储水量 (mm)。

## 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 2021 制图软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 监测期间不同林地降水、土壤水和地下水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 统计描述

表 3 为沙柳、樟子松和长柄扁桃林地 6—11 月降水、土壤水和地下水中  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值统计比较。表 3 显示各水源  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  加权平均值大小依次为降水>土壤水>地下水，其中降水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  加权平均值显著高于地下水 ( $P < 0.05$ )，而土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  加权平均值与地下水

相近，这表明土壤水受地下水的补给作用大于降水对土壤水的稀释和混合作用。与土壤水和地下水相比，降水相对富集重组分同位素，这是由于降水在到达地面之前受强烈的蒸发作用而产生同位素非平衡分馏现象。3 种林地土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值接近，且变异系数 ( $< 25\%$ ) 均

低于降水 (表 3)。这是由于降水进入土体后与土壤水中轻组分同位素发生了不同程度的混合，使得混合后的土壤水趋于富集轻组分同位素。地下水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  变异系数显著低于降水和土壤水 (表 3)，表明研究区地下水氢氧同位素组成相对稳定。

表 3 研究区各林地监测期间不同水源  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$

Table 3 $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of different water sources in various woodland during the monitored periods in the study area %											
水分来源 Water source	植被类型 Vegetation type	$\delta^2\text{H}$					$\delta^{18}\text{O}$				
		最小值 Min	最大值 Max	加权平均值 Weighted average	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient variation	最小值 Min	最大值 Max	加权平均值 Weighted average	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient variation
降水 Precipitation	—	-144.81	-6.60	-55.74	32.05	0.58	-18.86	-2.07	-8.10	4.05	0.49
土壤水 Soil water	沙柳	-96.94	-42.65	-72.22	13.61	0.19	-12.85	-0.79	-9.25	2.32	0.25
	樟子松	-83.62	-48.57	-64.09	9.29	0.14	-10.83	-5.48	-8.29	1.34	0.17
	长柄扁桃	-93.17	-36.57	-65.28	13.59	0.20	-12.29	-4.38	-8.50	1.94	0.23
地下水 Groundwater	沙柳	-86.42	-71.82	-78.46	5.48	0.07	-10.86	-9.74	-10.38	0.47	0.04
	樟子松	-65.63	-61.80	-64.27	1.50	0.02	-8.87	-7.83	-10.03	0.43	0.04
	长柄扁桃	-70.45	-62.01	-66.53	3.85	0.06	-9.60	-7.74	-10.99	1.11	0.10

在全球降水中由于氢氧同位素组成存在平行分馏效应，因此降水中氢氧同位素组成呈现一定的线性关系，Craig<sup>[17]</sup>将其定义为大气水线，大气水线的截距和斜率能够在一定程度上反映区域气候条件和降水情况。本研究结果表明研究区当地大气水线为  $\delta^2\text{H} = 7.79\delta^{18}\text{O} + 8.87$  (图 3)，其斜率和 Y 轴截距均略小于全球大气水线 ( $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ )<sup>[17]</sup>。研究区氢氧同位素组成表现为重组分相对富集，表明该地区气候相对干燥，蒸发作用较为强烈高于全球平均水平<sup>[18]</sup>。3 种林地 (沙柳、樟子松和长柄扁桃) 土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值大部分分布在大气水线的右侧，其斜率介于 5.69~7.13 之间，截距介于 -19.95~-5.11 之间，且均小于当地大气降水线，表明降水在转化为土壤水之前经历了一定程度的蒸发富集现象。这与姬王佳等<sup>[11]</sup>在陕北黄土区对当地降水和土壤水氢氧同位素值分析的结果一致。邢丹等<sup>[19]</sup>同样研究表明同时期荒漠地区土壤水同位素较降水富集重组分。相对于樟子松和长柄扁桃林地，沙柳林地的土壤水线斜率更接近与当地降水线，且显著高于其它两个林地。这可能与不同植被冠层截留和局部微环境的差异有关<sup>[20]</sup>。

2.2 不同林地土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  剖面分布特征

检测期间沙柳、樟子松和长柄扁桃林地土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  垂直分布特征如图 4 所示。由于沙柳、樟子松和长柄扁桃林地土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  存在较好的线性相关关系 (图 3)，因此本文以氧同位素为例阐述检测期间土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  剖面分布动态变化特征。3 种林地土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  值剖面分布随着深度的加深表现出不同的季节变化特征 (图 4)。研究区旱季 (6 月、10 月和 11 月)，不同林地土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  值随着深度的加深均呈逐渐减小的趋势，表层土壤水重组分同位素最为富集 (图 4)。在这一期间降水分布相对较少，土壤水受蒸发作用影响大于降水对土壤水的补给作用，重组分同位素相对富集。这与该时期土壤含水率的剖面变化特征 (图 5) 相吻合。随着雨季 (7—9 月) 降水量的增加，这一情况得到显著改善，3 种林地 (沙柳、樟子松和长柄扁桃) 雨季 (7—9 月) 土壤剖面  $\delta^{18}\text{O}$  平均值分别低于旱季 (6 月、10 月和 11 月) 0.81‰~2.67‰、0.50‰~3.32‰和 1.26‰~2.95‰ (图 5)。这一时期降水在转化为土壤水过程中对土壤中“老水”稀释混合作用频繁，使得土壤水表现为轻组分同位素相对富集而重组分同位素相对贫化。

为进一步量化降水和地下水对土壤水的补给深度将不同土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水或地下水  $\delta^{18}\text{O}$  (月加权平均值) 进行了相关分析 (图 6)。从图 6 可以看出，沙柳林地 0~20 cm 土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水  $\delta^{18}\text{O}$  显著相关 ( $P < 0.05$ )，而樟子松和长柄扁桃林地 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水  $\delta^{18}\text{O}$  均显著相关 ( $P < 0.05$ )，而其它土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水  $\delta^{18}\text{O}$  未发现相关关系 ( $P > 0.05$ )。因此，可以认为降水对沙柳林地土壤水的平均补给深度主要集中在 0~20 cm 土层，对樟子松和长柄扁桃林地土壤水的平均补给深度主要集中在 0~40 cm 土层。相对于樟子松和长柄扁桃，沙柳林地降水补给土壤水的深度较浅，这可能是由于沙柳冠幅较大且密度较高，冠层截流较强导致雨水对土壤水的补给减少，此外，沙柳林地表层广泛分布苔藓层也可能是导致该林地降水补给较浅的一个重要影响因素。除降水对土壤水补给外，地下水也是该地区土壤水的另一重要补给来源。如图 5 所示

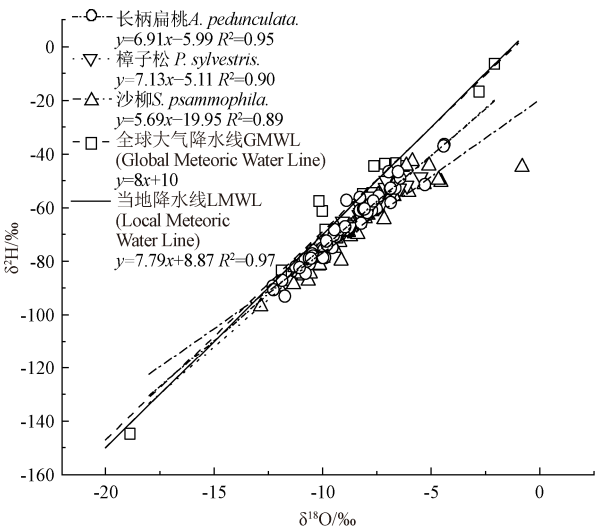
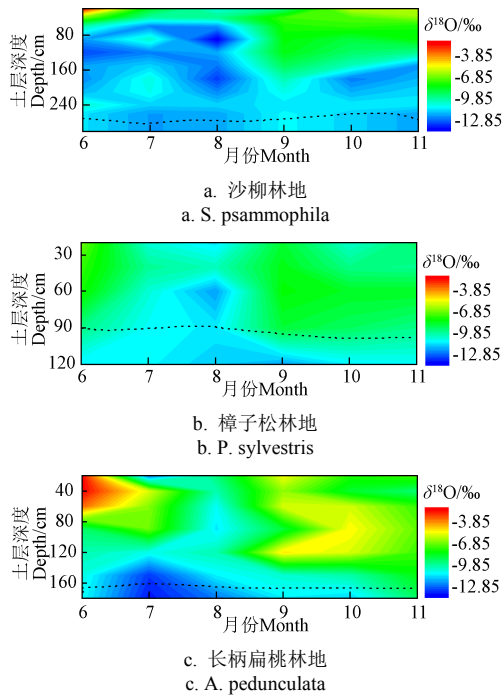


图 3 圪丑沟流域各水源  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  回归关系  
Fig.3 Regression relationship between  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of various water sources in the Gechougou watershed





注：图中虚线为浅层地下水位。

Note: The dash line in the figure represents the groundwater level.

图4 监测期间各林地土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water in various woodlands during the monitored periods

沙柳林地 >180 cm 土壤水、樟子松林地 >60 cm 土壤水和长柄扁桃林地 >120 cm 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值分别为 -10.22‰, -8.53‰ 和 -10.83‰, 均与地下水  $\delta^{18}\text{O}$  平均值 (-10.38‰, -8.69‰ 和 -10.99‰) 接近。相关性分析表明沙柳林地 180~210 cm 土层和 210~240 cm 土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  均与地下水  $\delta^{18}\text{O}$  显著相关 ( $P < 0.05$ ), 而樟子松林地 60~90 cm

土层、长柄扁桃林地 120~150 cm 土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与地下水  $\delta^{18}\text{O}$  具有显著的相关关系 (图 6,  $P < 0.05$ )。因此, 可以认为沙柳林地 180 cm 以下土壤受到地下水补给影响显著, 而樟子松林地 60 cm 以下土壤和长柄扁桃林地 120 cm 以下土壤受到地下水补给影响显著。此外, 由于不同季节 GWL 处于波动状态, 因此根据监测期间 GWL 动态变化特征, 同时结合地下水的补给深度, 可以计算出地下水向上补给土壤水的深度和范围。计算表明 3 种林地(沙柳、樟子松和长柄扁桃) GWL 变化范围分别为 253~260、87~93 和 172~176 cm, 因此不同林地地下水向上补给土壤水的深度和范围分别约为 73~80、27~33 和 52~56 cm。不同林地地下水补给土壤水的深度和范围不同, 一方面可能与林地所处的沙丘部位和 GWL 不同有关, 另一方面可能与不同植被根系生物量在不同土层中的含量 (图 7) 及耗水量不同有关, 未来仍需进一步研究。

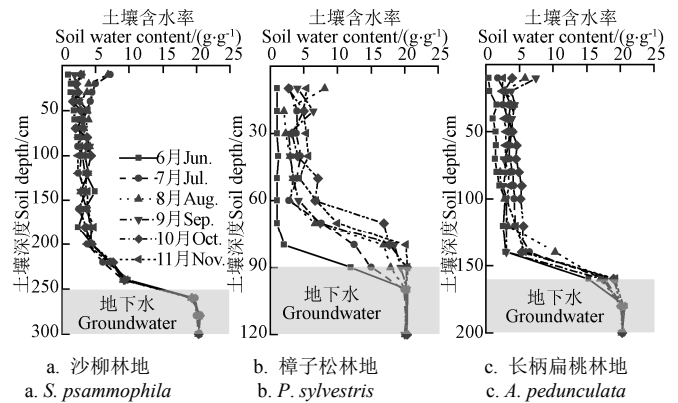
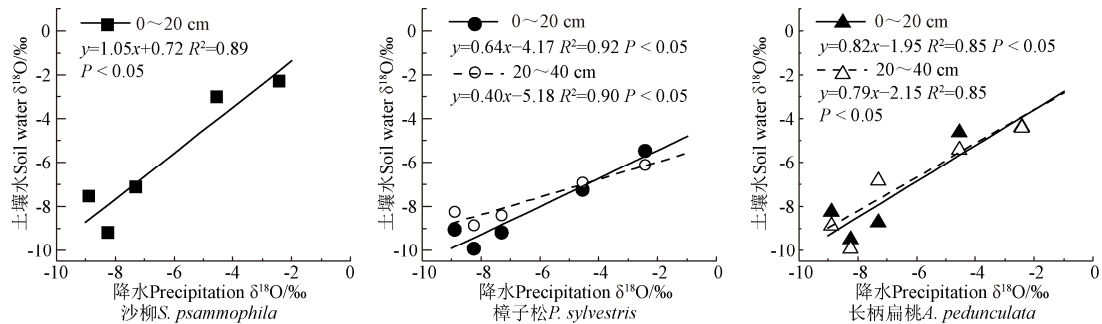
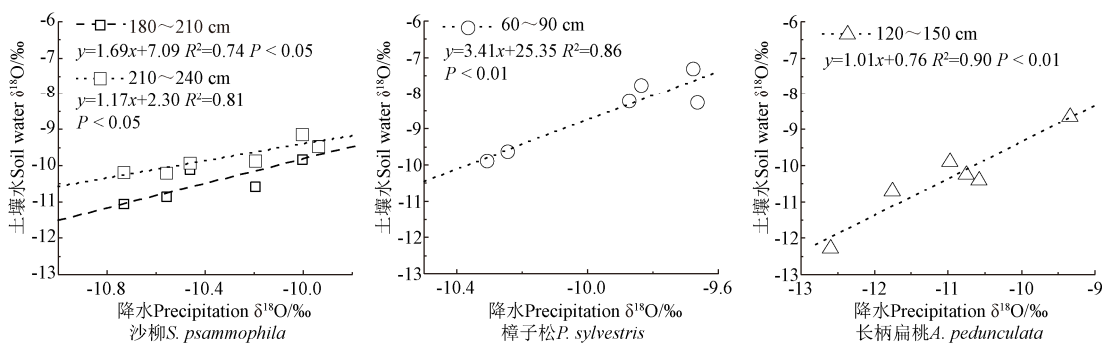


图5 监测期间各林地土壤含水率剖面分布

Fig.5 Distribution of soil water content in various woodlands during the monitored periods



a. 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水  $\delta^{18}\text{O}$  相关性  
a. Correlation of  $\delta^{18}\text{O}$  between soil water and precipitation



b. 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与地下水  $\delta^{18}\text{O}$  相关性  
b. Correlation of  $\delta^{18}\text{O}$  between soil water and groundwater

图6 监测期间各林地土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  与降水和地下水  $\delta^{18}\text{O}$  相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of  $\delta^{18}\text{O}$  between soil water and precipitation or groundwater in various woodlands during the monitored periods

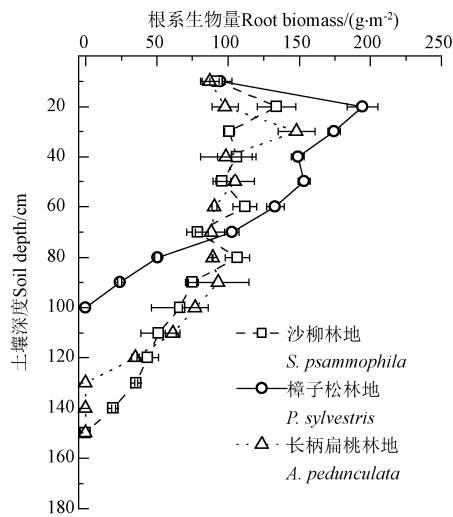


图 7 各林地根系生物量的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of root biomass in various woodlands

### 3 讨论

#### 3.1 降水的入渗补给特征

在干旱半干旱地区降水是土壤水的重要补给来源。本研究结果显示 3 种林地（沙柳、樟子松和长柄扁桃）土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值大部分位于当地大气水线的右侧，且不同林地土壤水线斜率（5.69~7.13）均小于当地大气水线斜率（7.79）（图 3），表明降水在转化为土壤水的过程中存在一定程度的蒸发分馏现象。这与前人<sup>[11,21]</sup>在该地区研究的结论一致。雨季（7—9 月），降水相对较为频繁，各林地浅层土壤水得到快速补充，平均土壤含水率（<40 cm）显著高于旱季（6 月，10 月和 11 月）（图 4）。当降水事件发生后，各林地表层土壤含水率（<40 cm）迅速达到 0.20 g/g，高于田间持水量（约为 0.15 g/g），表明降水在向下入渗过程中主要以重力水的形式向下运动并与土壤中原有“老水”发生混合和稀释致使土壤水氢氧同位素组成表现为轻组分富集<sup>[22]</sup>。Hsieh 等<sup>[23]</sup>认为降水补给开始于土壤表层，并逐渐向下补给，0~40 cm 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  的变异性大于 40 cm 以下土壤。本文研究结果与 Hsieh 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。王锐等<sup>[24]</sup>研究发现黄土高原长武塬区 0~10 cm 土壤水直接受大气降水影响，雨水的稀释作用导致 0~10 cm 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  降低。本研究降水与各林地 0~40 cm 土壤水氧同位素相关性分析表明降水与各林地浅层土壤水氧同位素存在显著的相关关系。这表明浅层土壤水更易受到降水补给的影响。这与张军红等<sup>[25]</sup>对毛乌素沙地西缘流动沙丘浅层土壤水的动态变化研究结论一致。Dansgaard<sup>[26]</sup>在热带及中纬度地区的研究结果表明，受降水的补给浅层土壤水表现出重组分同位素贫化轻组分同位素富集的现象，降水量与土壤水同位素值呈负相关关系。随着土壤水的进一步入渗，土壤水由以重力水向下入渗的方式转变为以薄膜水扩散方式从高含水率土壤向低含水率土壤扩散运动，此时进一步与“老水”混合稀释，氢氧同位素组成亦表现为重组分相对富集。雨季土壤含水率剖面分布特征进一步印证了这一结论。此外，本研究根系采样结果显示（图 7），3

种植物（沙柳、樟子松和长柄扁桃）土壤表层（<40 cm）根系生物量占总根系生物量的 75.23~80.46%，这有利于形成降水入渗通道，且研究区土壤质地以砂土为主，因此，当降雨强度较大时该地区土壤水分运动可能主要以优先流<sup>[27]</sup>的形式向下入渗。Konz 等<sup>[28]</sup>发现瑞士中部山地不同土地利用方式下 10~35 cm 土壤含水率对降水响应较深层土壤水更快，并强调表层植物根系活动和疏松质地是主要影响因素，Gazis 等<sup>[10]</sup>同样指出降水入渗土壤的方式受土壤质地、孔隙、植物类型以及降雨强度等多种影响呈现出不同的运动方式。

#### 3.2 地下水位动态变化对土壤水的补给影响

在本研究区域，土壤水的补给除降水外，浅层地下水也是土壤水重要的补给来源。过去的研究表明荒漠地区浅层地下水是土壤水重要补给来源同时也是荒漠植物赖以生存的基础<sup>[29-30]</sup>。GWL 的时空变化直接影响深层土壤水的补给与分布特征，从而影响植被的生长与演替<sup>[31]</sup>。地下水与其临近的土壤通常处于不断的水分交换与循环过程。刘君等<sup>[32]</sup>在呼和浩特西南部研究表明深层土壤水与浅层地下水的水分交换十分活跃，使得深层土壤水氢氧同位素组成与地下水接近。本研究结果表明 3 种林地地下水与相邻土层土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  显著相关（图 6），且地下水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  组成相对稳定。冯蕴等<sup>[33]</sup>在浑善达克沙地南缘研究结果同样表明与地下水相邻土层中土壤水氢氧同位素组成处于相对平稳状态， $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  同样具有弱的变异特征。这进一步表明浅层地下水对深层土壤水氢氧同位素分布具有显著影响。因此，浅层地下水作为重要水分来源对研究地区土壤水的补给具有导向作用。

浅层地下水对土壤水的补给主要通过毛管作用力来补给相邻土层<sup>[34-35]</sup>。然而本研究区土壤类型为砂土，毛管孔隙大，毛管重力水上升作用有限，对浅层土壤的补给可能主要以膜扩散的方式由高含水量向低含水率方向扩散运动。而氢氧同位素值在剖面上表现为逐步接近地下水氢氧同位素值<sup>[36]</sup>。本研究结果显示，在旱季（6 月，10 月和 11 月）随着土壤深度的增加，土壤水氢氧同位素重组分逐渐贫化。地下水在向上补给土壤水过程中，氢氧同位素发生分馏作用，其轻组分逐步贫化。这进一步印证了这一结论。依据不同土层土壤水氢氧同位素与地下水同位素组成结合土壤含水率的剖面分布特征可以得到土壤水的补给深度和范围。本研究结果显示 3 种林地（沙柳、樟子松和长柄扁桃）地下水向上补给土壤水的深度和范围分别为 73~80、27~33 和 52~56 cm。不同林地地下水补给土壤水的深度和范围不同，一方面可能与林地所处的沙丘部位与 GWL 不同有关，另一方面可能与植物根系剖面分布及耗水差异有关。这需要进一步研究。

#### 3.3 展望

降水、土壤水和地下水是陆地生态系统水资源的主要存在形式。毛乌素沙地蒸发强烈，在降水季节分布不均的气候条件下，土壤水成为当地植物生存发展最为重要的限制因子。本文采用氢氧稳定同位素分析技术，通过定期测定降水、土壤水和地下水的氢氧同位素组成，

分析了不同 GWL 埋深下土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  剖面分布动态变化特征及其影响因素,同时结合土壤含水率探讨了土壤水的补给来源和运移规律。本研究结果显示:研究区降水主要补给浅层土壤水(沙柳林地 0~20 cm、樟子松和长柄扁桃林地 0~40 cm),而不同埋深地下水主要补给深层土壤水(沙柳林地 180 cm 以下,樟子松林地 60 cm 以下,长柄扁桃林地 120 cm 以下)。由于毛乌素沙地气候干旱、降水季节分布不均,浅层地下水对深层土壤水的补给可为人工固沙植物生长提供重要的水分来源。然而,随着全球气候暖干化<sup>[37]</sup>,区域植被生长面临的干旱胁迫将日益加剧<sup>[38-39]</sup>。特别是毛乌素沙地近年来大规模开展植树造林,可能进一步加剧植被耗水与土壤供水之间的矛盾,从而威胁区域生态安全和植被可持续发展。因此,未来需查明毛乌素沙地地下水资源储量以及来源,并明确不同固沙植物吸水来源与耗水量,从而做到“以水定林,量水而行”,促进毛乌素沙地人工生态系统健康与可持续发展。

#### 4 结 论

本研究通过定期测定毛乌素沙地圪丑沟小流域 3 种林地(沙柳、樟子松和长柄扁桃)降水、土壤水和地下水氢氧同位素组成,研究了不同地下水位埋深下土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  剖面分布动态变化特征及其影响因素,并定量分析了降水和地下水对不同林地土壤水的补给深度和范围。监测期间(6—11月)沙柳林地 0~20 cm 土壤水、樟子松和长柄扁桃林地 0~40 cm 土壤水均表现出重组分同位素贫化轻组分同位素富集的现象,且与降水同位素呈显著相关关系( $P < 0.05$ ),表明不同林地浅层土壤水( $< 40$  cm)更易受到降水补给的影响。3 种林地深层土壤水(沙柳林地 180 cm 以下,樟子松林地 60 cm 以下,长柄扁桃林地 120 cm 以下)与地下水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的均值接近,且土层深度接近地下水时土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  逐渐贫化,并趋于稳定。不同埋深地下水(沙柳林地地下水位范围 253~260 cm、樟子松林地地下水位范围 87~93 cm、长柄扁桃林地地下水位范围 172~176 cm)向上直接补给土壤水的深度范围分别为 73~80、27~33 和 52~56 cm。毛乌素沙地浅层地下水对深层土壤水的补给可在一定程度上缓解旱季土壤水分亏缺,为保障该区人工固沙植被生长提供潜在的水分来源。

#### 参 考 文 献

- [1] Gao X, Wu P, Zhao X, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2011, 87(3): 357-367.
- [2] 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.
- [3] Chen Y. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 10(8): 739-741.
- [4] 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]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 291: 106790.
- [5] 宋献方, 王仕琴, 肖国强, 等. 华北平原地下水浅埋区土壤水分动态的时间序列分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 145-155.  
Song Xianfang, Wang Shiqin, Xue Guoqiang, et al. Time series analysis of soil water dynamics in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(1): 145-155. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周天河, 赵成义, 俞永祥, 等. 基于稳定氢氧同位素的胡杨与柽柳幼苗水分来源研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 241-246.  
Zhou Tianhe, Zhao Chengyi, Yu Yongxiang, et al. Study on the water source of *Populus euphratica* seeding and *Tamarix ramosissima* seeding based on stable hydrogen and oxygen Isotope technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 241-246. (in Chinese with English abstract)
- [7] 詹沪成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 327-335.  
Zhan Lucheng, Chen Jiansheng, Zhang Shiyin. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 327-335. (in Chinese with English abstract)
- [8] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 289-295.  
Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, et al. Stable isotope in soil water in the middle of Tibetan Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3): 289-295. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 等. 元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2102-2108.  
Zhang Xiaojuan, Song Weifeng, Wu Jinkui, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of soil water in the water source area of Yuanyang Terrace[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2102-2108. (in Chinese with English abstract)
- [10] Gazis C, Feng X. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths[J]. Geoderma, 2004, 119(1/2): 97-111.
- [11] 姬王佳, 黄亚楠, 李冰冰, 等. 陕北黄土区深剖面不同土地利用方式下土壤水氢氧稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4143-4149.  
Ji Wangjia, Huang Yanan, Li Bingbing et al. Oxygen and hydrogen stable isotope compositions of soil water in deep loess profile under different land use types of northern Shaanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4143-4149. (in Chinese with English abstract)
- [12] 龚子同, 张甘霖, 陈忠诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 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.  
Chen Jiansheng, Wang Ting, Chen Qianqian, et al. Discussion on the origin of groundwater in the Ordos Basin[J]. Geological Review, 2013, 59(5): 900-908. (in

- Chinese with English abstract)
- [14] 丁越焄, 杨劼, 张仲平, 等. 毛乌素沙地主要建群植物蒸腾耗水特性的研究[J]. 中国草地学报, 2011, 33(4): 37-43. Ding Yuehui, Yang Jie, Zhang Zhongping, et al. Studies on characteristics of water consumption of main constructive species in Mu Us desert by transpiration[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(4): 37-43. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张劲松, 孟平, 孙惠民, 等. 毛乌素沙地樟子松蒸腾变化规律及其与微气象因子的关系[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 45-50. Zhang Jinsong, Meng Ping, Sun Huimin, et al. Transpiration rule of *Pinus sylvestris* L.var. *mongolica*. and its relation to the Canopy Micrometeorology in Mu Us Sandy Area[J]. Forest Research, 2006, 19(1): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [16] Pei Y W, Huang L M, Shao M A, et al. Responses of *Amygdalus pedunculata* Pall. in the sandy and loamy soils to water stress[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12: 791-805.
- [17] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [18] 徐学选, 张北赢, 田均良. 黄土丘陵区降水-土壤水-地下水转化实验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 16-22. Xu Xuexuan, Zhang Beiyang, Tian Junliang. Experimental study on the precipitation-soil water-groundwater transformation in loess hilly region[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 16-22. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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. Xing Dan, Xiao Jiujun, Han Shiyu, et al. Water absorption source analysis of mulberry roots based on stable isotopes in rocky desertification area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(15): 77-84. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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]. New Phytologist, 2018, 219: 1300-1313.
- [21] 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.
- [22] 孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 等. 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 100-105. Sun Xiaoxu, Chen Jiansheng, Shi Gongxun, et al. Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 100-105. (in Chinese with English abstract)
- [23] Hsieh J C C, Chadwick O A, Kelly E F, et al. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration[J]. Geoderma, 1998, 82(1): 269-293.
- [24] 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. Wang Rui, Liu Wenzhao, Song Xianfang. Study on soil water dynamics on loess tableland based on stable hydrogen oxygen isotopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 134-137. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张军红, 吴波, 杨文斌, 等. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1597-1603. Zhang Junhong, Wu Bo, Yang Wenbin, et al. Soil moisture characteristics of *Artemisia ordosica* community at different succession stages in Mu US sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1597-1603. (in Chinese with English abstract)
- [26] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [27] 李荣磊, 陈留美, 邵明安, 等. 黄土高原不同土质和植被类型下  $\text{Cl}^-$  运移特征及影响因素[J/OL]. 土壤学报: 1-12[2021-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200803.0950.002.html>. Li Ronglei, Chen Liumei, Shao Mingan, et al.  $\text{Cl}^-$  transport and its influencing factors in soil as affected by soil texture and vegetation cover in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 1-12[2021-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200803.0950.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- [28] Konz N, Baenninger D, Konz M, et al. Process identification of soil erosion in steep mountain regions[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(117): 675-686.
- [29] Synder K A, William D C. Water resources used by riparian trees varies among stream types on the Pedro River, Arizona[J]. Agricultural and Forest Metrology, 2000, 105(1/2/3): 227-240.
- [30] 王金哲, 张光辉, 严明疆, 等. 干旱区地下水功能评价与区划体系指标权重解析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 133-143. Wang Jinzhe, Zhang Guanghui, Yan Mingjiang, et al. Index weight analysis of groundwater function evaluation and zoning system in arid areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 133-143. (in Chinese with English abstract)
- [31] Chen Y N, Li W H, Chen Y P, et al. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 538-545.
- [32] 刘君, 聂振龙, 段宝谦, 等. 氢氧稳定同位素指示的呼和浩特地区土壤水的补给特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 145-150. Liu Jun, Nie Zhenlong, Duan Baoqian, et al. Characteristics of stable isotope ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) in soil water in Hohhot area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(10): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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(4): 27-31. Feng Yun, Jia Debin, Li Xuesong, et al. Study on water sources of poplar in arid and semi-arid regions based on



- Stable Isotopes[J]. Water Saving Irrigation, 2019(4): 27-31. (in Chinese with English abstract)
- [34] Caldwell H, Richards M. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots[J]. Oecologia, 1989, 79(1): 1-5.
- [35] Rao W, Chen X, Meredith K T, et al. Water uptake of riparian plants in the lower Lhasa River Basin, South Tibetan Plateau using stable water isotopes[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(16): 3492-3505
- [36] Dai A G. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [37] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 146-152.
- Yao Yubi, Wang Yirong, Li Yaohui, et al. Climate warming and drying and its environmental effects in the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2005, 27(5): 146-152. (in Chinese with English abstract)
- [38] 曹艳萍, 庞营军, 贾晓红. 2001—2016 年毛乌素沙地植被的生长状况[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 29-37.
- Cao Yanping, Pang Yingjun, Jia Xiaohong. Vegetation growth in Mu US sandy land from 2001 to 2016[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 29-37. (in Chinese with English abstract)
- [39] Liste H H, White J C. Plant hydraulic lift of soil water-implications for crop production and land restoration[J]. Plant and Soil, 2008, 313(1/2): 1-17.

## Characteristics and their influencing factors of water recharge under different groundwater levels in the Mu Us Sandy Land of China

Pei Yanwu<sup>1,2</sup>, Huang Laiming<sup>1,3\*</sup>, Shao Ming'an<sup>1,2,3,4</sup>, Li Ronglei<sup>1,2</sup>, Zhang Yinglong<sup>5</sup>

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

**Abstract:** Water and soil conservation have been highly critical to the vegetation restoration and ecological reconstruction in the arid and semi-arid regions, particularly in southeastern China. Thus, it is necessary to characterize the soil water recharge and movement under different Groundwater Levels (GWL) for water use efficiency and sustainable agriculture. In this study, the hydrogen and oxygen isotopic compositions ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) of rain water, soil water and groundwater were measured in three different woodlands (i.e., *Salix psammophila* woodland with GWL range of 253-260 cm, *Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv. woodland with GWL range of 87-93 cm and *Amygdalus pedunculata* Pall. woodland with GWL range of 172-176 cm) in the Gechougou watershed in the southeastern edge of Mu Us Sandy Land. The characteristics and influencing factors of soil water recharge were clarified in three types of woodland. Results showed that the  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water were plotted below the local meteoric water line, in *Salix psammophila*, *Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv., and *Amygdalus pedunculata* Pall. Woodland, where the slope of soil water line in the three types of woodlands (5.69-7.13) was less than that of the local meteoric water line (7.79), indicating that the soil water in each woodland was replenished by the local precipitation. The  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water in *Salix psammophila* (0-20 cm), *Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv. (0-40 cm), and *Amygdalus pedunculata* Pall. Woodland (0-40 cm) exhibited the depletion of heavy isotopes and enrichment of light isotopes in monitoring period, while significantly positive correlated ( $P < 0.05$ ) with the hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation, indicating that the shallow soil water ( $< 40$  cm) under different woodlands was more easily replenished by the precipitation. The mean values of  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of deep soil water in different types of woodlands (*Salix psammophila* ( $> 180$  cm), *Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv. ( $> 60$  cm), and *Amygdalus pedunculata* Pall. Woodland ( $> 120$  cm)) were close to those of the groundwater, where the  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water tended to be more stable ( $\text{CV} < 10\%$ ) with the increase of depth. The depth ranges of soil water recharged by groundwater were about 73-80, 27-33, and 52-56 cm, respectively, during the monitored period in the three types of woodlands (*Salix psammophila*, *Pinus sylvestris* L. var., and *Amygdalus pedunculata* Pall. woodland), according to the correlations of  $\delta^{18}\text{O}$  between soil water and groundwater (i.e., in term of how easily the  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water were mixed and displaced with the fluctuating groundwater). Consequently, the shallow soil water ( $< 40$  cm) in the three woodlands was mainly recharged by precipitation, especially in the rainy season, whereas, the deep soil water (27-80 cm above the GWL) was dominantly recharged by groundwater. Therefore, the deep soil water recharge by shallow groundwater can be expected to alleviate the deficit of soil water in the dry season, in turn providing potential water sources for vegetation growth in the study area. In any way, the shallow and deep sources of soil water were inevitable prerequisites for the construction of sand-fixing plants under the arid climate in the southeastern edge of Mu Us Sandy Land.

**Keywords:** soils; water; stable isotope; groundwater; distribution characteristics; Mu Us Sandy Land