

## 黄土沟壑区不同地貌部位植被用水策略

洪远明<sup>1</sup>, 贾国栋<sup>1,2</sup>, 武昱鑫<sup>1</sup>, 王堃莹<sup>1</sup>, 田梦晗<sup>1</sup>, 余新晓<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 探究黄土沟壑区小流域内不同地貌部位(黄土塬、沟坡、台地和河岸带)下不同植被的水分利用来源, 为黄土高原植被恢复和管理提供理论依据。[方法] 通过连续定期采集植物茎秆水、分层土壤水及降水样品, 结合氢氧稳定同位素分析和MixSIAR模型, 定量解析了植被对0—300 cm不同深度土壤水分的利用策略。[结果] (1) 流域内0—300 cm土壤含水量及土壤水同位素值呈现出显著的空间异质性, 4个地貌部位生长季内土壤平均含水量表现为河岸带刺槐(17.9%±5.3%)>台地刺槐(13.1%±4.2%)>台地樱桃(12.5%±3.4%)>黄土塬刺槐(12.1%±3.6%)>沟坡刺槐(11.5%±2.9%)>沟坡侧柏(11.3%±3.1%)。(2) 黄土塬和沟坡区刺槐和侧柏整体上利用0—60 cm表层水比例较大, 平均利用率分别为49.4%和57.0%, 其次是60—140 cm浅层土壤水, 140—220 cm和220—300 cm土层利用率逐渐减少; 台地地区刺槐和樱桃对表层土壤水利用率更高, 平均利用率分别为63.1%和65.3%; 河岸带刺槐对220—300 cm深层土壤水利用比例最大, 利用率达42.3%; (3) 雨月(7—9月)4种地貌部位下植被表层水利用比例高达84.9%; 进入旱月(6月、10月), 随着降水减少, 植被的水分利用深度从0—60 cm转为60—140 cm或者更深的土层。[结论] 黄土沟壑区植被的水分利用模式受地貌和降雨等条件的影响其水分利用有一定差异, 黄土塬和沟坡地区植被对表层和浅层水依赖性强; 台地地区植被在雨月主要依赖浅层土壤水, 旱月可以相对均匀利用其他层土壤水。河岸带地区深层水丰富, 植被对深层土壤水的吸收比例增加。

**关键词:** 土壤水; 氢氧稳定同位素; 不同地貌部位; 黄土区植被水分来源

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0199-12

### Plant water use strategies in different geomorphological locations of loess gullied region

Hong Yuanming<sup>1</sup>, Jia Guodong<sup>1,2</sup>, Wu Yuxin<sup>1</sup>, Wang Kunying<sup>1</sup>, Tian Menghan<sup>1</sup>, Yu Xinxiao<sup>1,2</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil & Water Conservation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] This study investigates the water use sources of different vegetation types located at various geomorphological locations (loess tableland, gully slope, terrace, and riparian zone) in a small watershed of the loess gullied region, aiming to provide a theoretical basis for vegetation restoration and management on the Loess Plateau. [Methods] Samples of plant stem water, stratified soil water, and precipitation were collected continuously and periodically. Hydrogen and oxygen stable isotope analysis and the MixSIAR model were used to quantitatively analyze the water use strategies of vegetation for soil water at different depths (0—300 cm). [Results] (1) Soil water content and isotopic composition in the 0—300 cm soil layer exhibited significant spatial heterogeneity across the watershed. The average soil water content during the growing season at the four geomorphological locations followed the order: riparian zone with *Robinia pseudoacacia* (17.9%±5.3%)> terrace with *R. pseudoacacia* (13.1%±4.2%)> terrace with *Cerasus pseudocerasus* (12.5%±3.4%)> loess

收稿日期: 2025-07-02

修回日期: 2025-08-03

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243202); 国家自然科学基金项目(42277062); 国家自然科学基金项目(42230714)

第一作者: 洪远明(2001—), 男, 广东湛江人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与森林生态水文研究。E-mail: hym11212023@163.com

通信作者: 余新晓(1961—), 男, 甘肃平凉人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水土保持与生态水文研究。E-mail: yuxinxiao111@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

tableland with *R. pseudoacacia* ( $12.1\% \pm 3.6\%$ ) > gully slope with *R. pseudoacacia* ( $11.5\% \pm 2.9\%$ ) > gully slope with *Platycladus orientalis* ( $11.3\% \pm 3.1\%$ ). (2) On the loess tableland and gully slopes, *R. pseudoacacia* and *P. orientalis* primarily utilized surface soil water (0—60 cm), with average utilization rates of 49.4% and 57.0%, respectively, followed by shallow soil water (60—140 cm). Utilization of water from deeper layers (140—220 cm and 220—300 cm) progressively decreased. On terraces, *R. pseudoacacia* and *C. pseudocerasus* relied more heavily on surface soil water, with average utilization rates of 63.1% and 65.3%, respectively. In the riparian zone, *R. pseudoacacia* utilized deep soil water (220—300 cm) the most, with a utilization rate of 42.3%. (3) During the rainy season (July—September), vegetation across all four geomorphological locations predominantly used surface water (0—60 cm), with a utilization proportion reaching 84.9%. In the dry season (June—October), as precipitation decreased, vegetation shifted its water uptake from 0—60 cm to 60—140 cm or even deeper soil layers. [**Conclusion**] Vegetation in the loess gullied region exhibits distinct water-use patterns influenced by geomorphological conditions and rainfall. Vegetation in the loess tableland and gully slopes demonstrates strong dependence on surface and shallow soil water. On terraces, plants primarily rely on shallow soil water during the rainy season but can utilize water from different soil layers more evenly during dry months. In riparian zones where deep soil water is abundant, vegetation shows increased absorption of deep soil water.

**Keywords:** soil water; hydrogen and oxygen stable isotopes; different geomorphological locations; vegetation water sources in loess region

土壤水分在自然环境水文循环过程中起着十分重要的作用,是植物生长、生态系统功能维持和水文循环的关键要素<sup>[1]</sup>。植被在水文循环中通过多重机制调控水分运动,体现在蒸腾驱动、降水截留再分配、径流调控和地下水补给等途径<sup>[2]</sup>,同时,植被水分吸收不仅受到降水、蒸散等气候因子主导,由于植物与环境之间的相互作用存在显著的时空异质性,其水分吸收特征在时间和空间上也表现出明显的差异化响应<sup>[3]</sup>。分析黄土区域植被在未来气候条件下的生长动态和适应机制,探讨不同地貌中植物水分来源的差异具有重要意义。

降水、地形、土壤质地和植被等地表特征通常被认为是决定土壤水分分布的主控因素<sup>[4]</sup>,区域环境条件的差异导致植物对水分的利用策略存在空间分异特征<sup>[5]</sup>。黄土高原黄土区生态环境较为脆弱,水土流失问题严重,生态环境问题凸显,有限的土壤水分是植被分布的主要限制性因子,也是植被—土壤水—地下水系统中非常关键的因子,在生态系统和水文过程中占有重要地位<sup>[6-7]</sup>。土壤水分的分布在不同地形环境下会存在显著差异,且土壤水分的变化随着地形异质性的增加而增加,相对于陡峭起伏的沟壑斜坡,平缓的坡面可能有着更好的水分利用环境<sup>[8]</sup>,土壤性质和植被恢复状况也受土壤水分分布的差异影响。Chen等<sup>[9]</sup>探讨黄土高原干旱区不同季节和坡向对柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用方式的影响。结果表明阳坡柠条锦鸡儿在5月主要吸收0—20 cm土层水分,7月和9月主要利用了0—20 cm

和20—80 cm土层的水分。高彩欣等<sup>[10]</sup>研究定量分析阶地平原、土石山地、丘陵沟壑区塬面及丘陵沟壑区河谷4种地貌类型下的典型植物水分利用策略,发现同一种植物在不同生境下生长,其水分利用模式具有生境特异性;而不同物种在同一生境下,其水分利用模式具有物种特异性。张晓梅等<sup>[11]</sup>以甘肃泾川中沟小流域不同坡位刺槐人工林为研究对象,研究表明塬面刺槐林的土壤含水量最大,沟台刺槐林居中,梁坡刺槐林土壤水分最低。田丽慧等<sup>[12]</sup>通过研究高寒沙地不同地貌部位下固沙植物乌柳的水分来源,发现不同地貌部位下乌柳的水分来源有一定差异。尽管植物水分利用策略在不同生态系统中的区域及全球尺度格局已得到广泛研究,但是对不同地貌部位下多种植被的水分来源分析不足,尤其对复杂地形下典型植物的水分利用策略认识有限。在气候和地形条件复杂的黄土高原地区,不同地貌下不同植被和同一植被的水分利用特征仍需深入研究,这也是探索黄土沟壑区植物与水分关系的关键环节。

因此,本研究选取黄土沟壑区流域的典型植被为研究对象,采用氢氧稳定同位素示踪技术,系统解析不同地貌部位下植物木质部水、土壤水及降水的同位素特征,定量揭示典型植物的水分利用规律。研究旨在重点解决以下问题:(1)对比分析不同地貌条件下植物水与潜在水源的氢氧同位素组成差异。(2)基于贝叶斯混合模型定量评估各潜在水源对植物水分利用的相对贡献比例,揭示植物被在不同地貌下的用水策略。本研究成果可为黄土高原生态修

复工程中的植被恢复人工林和经济林配置优化与适应性管理提供科学支撑。

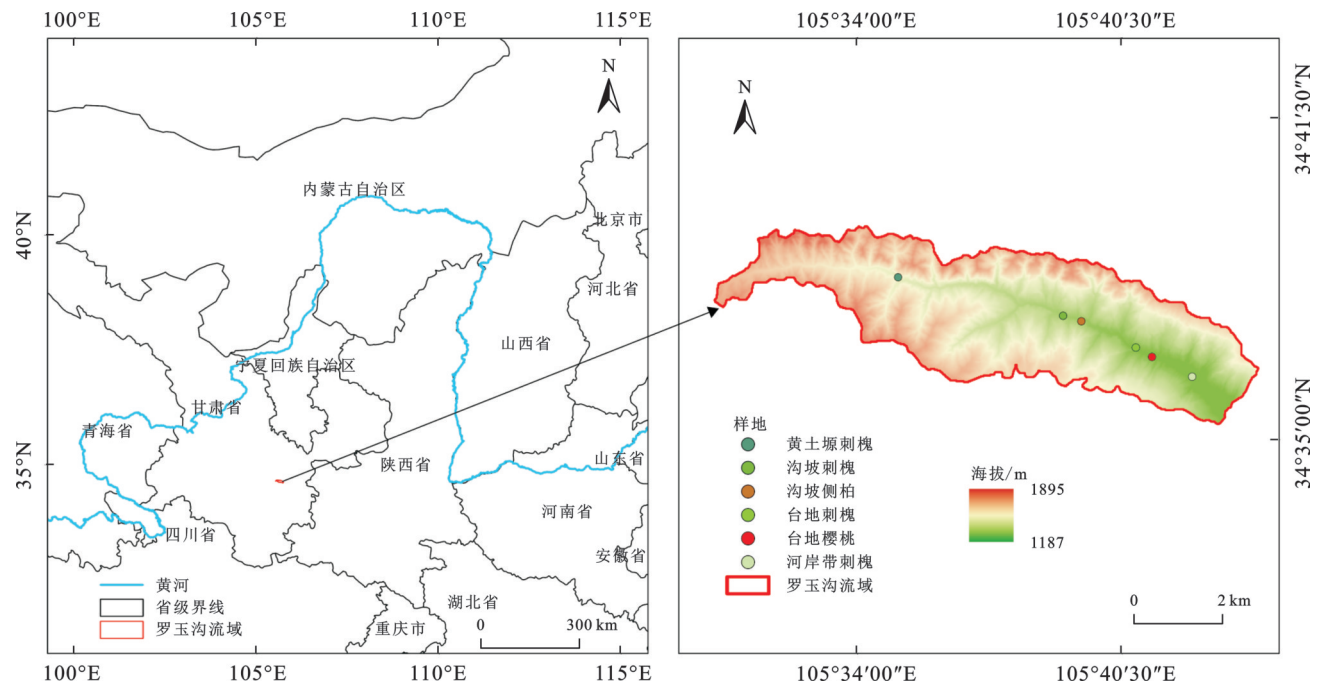
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究的开展区域为甘肃省天水市罗玉沟小流域(图1),属于典型的黄土丘陵沟壑地貌区,地形破碎,可分为黄土塬、沟坡、台地和河岸带;其气候类型和地质地貌在黄土区具有典型性和代表性,气候类型为温带大陆性气候且位于干旱半干旱气候过渡地带,地处中国两大流域(黄河流域和长江流域)交汇处(34°34′—34°40′N,105°30′—105°45′E)。该区域气候特点是夏季降水密集,冬季少雨干燥,年平均温度 10.8℃,年平均降水量 491.7 mm,降水分布不均匀,多年平均无霜期 183 d。区域内土壤类型较为单一,主要是冲积灰褐色土、黑砂土和粗骨质土;土地利用类型有草地、农地、果园和林地。自然植被

覆盖度约为 48% 且长势较好;各土地利用类型中,乔木类多为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等;经济林为苹果树(*Malus pumila* Mill)、杏树(*Prunus armeniaca*)、樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)等;草本类主要有小冠花(*Coronilla varia*)、荆条(*Vitex negundo var. heterophylla*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。

研究区土壤基本性质情况由表 1 所示。土壤颗粒分级采用国际制质地分级标准,土壤机械组成各样地均以粉粒含量为最高,具体表现为黏粒(<0.002 mm)含量为 6.1%~10.4%,粉粒(0.002~0.02 mm)含量为 69.2%~82.0%,砂粒(>0.02 mm)含量为 11.9%~20.4%。各样地土壤容重在 1.2~1.4 g/cm<sup>3</sup>;土壤水稳性团聚体(湿筛中>0.25 mm 的团聚体)含量表现差异不大,总体范围在 60.0% 左右。同时,各样地总孔隙度与土壤容重呈现相反的规律,土壤总孔隙度范围在 40.1%~50.4%。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2023)2767 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

表 1 研究区土壤基本性质

Table 1 Fundamental soil properties in study area

样地	土壤机械组成/%			土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤水稳性 团聚体含量/%	土壤总孔隙度/ %
	粉粒	砂粒	黏粒			
黄土塬	73.51±1.74	17.21±0.95	9.28±0.81	1.41±0.06	58.69±2.69	45.97±1.09
沟坡	69.17±2.96	20.42±2.03	10.41±1.01	1.59±0.08	59.58±0.44	40.13±1.84
台地	82.01±2.84	11.87±1.77	6.12±1.12	1.39±0.05	59.61±2.54	47.77±1.59
河岸带	77.21±5.27	14.48±0.85	8.31±1.88	1.22±0.02	53.84±1.89	50.35±0.15

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 本研究选取研究区流域内不同地

貌部位的植被为研究对象,植被样地基本信息如表 2 所示。每个地貌部位选择不同植被的样地,分别为

黄土塬刺槐(YCH)、黄土塬农田(YNT);沟坡刺槐(GPCH)、沟坡侧柏(GPCB);台地刺槐(TDCH)、台地樱桃(TDYT);河岸带刺槐(HADCH)、河岸带草地(HADCD);农田和草地作为土壤水分的对照植被,不

考虑其水分吸收利用。其中人工林刺槐、侧柏样地为10 m×10 m,经济林樱桃、农田和草地为5 m×5 m,乔木林郁闭度70%左右,草地盖度85%左右。各样地的植物种及相关特征在黄土区较有代表性。

表2 不同地貌部位下植被样地基本信息

Table 2 Basic information of vegetation plots in different geomorphological locations

地貌部位	样地	林龄/a	株行距/m	坡度/(°)	坡向	海拔/m	郁闭度
黄土塬	刺槐	30	2.9×2.9	15	阳坡	1490	0.68
	农田	—	—	15	阳坡	1460	—
沟坡	刺槐	30	2.9×2.9	25	阳坡	1320	0.72
	侧柏	25	3.5×2.9	25	阳坡	1310	0.45
台地	刺槐	30	2.9×2.9	0	阳坡	1280	0.70
	樱桃	18	3.3×3.7	0	阳坡	1240	0.60
河岸带	刺槐	30	2.9×2.9	5	阳坡	1190	0.52
	草地	—	—	5	阳坡	1180	—

1.2.2 样品采集 本研究对研究区流域内同位素样品的采样时间为2024年5—10月,在每月的典型晴天和降雨后1~3 d进行采样,保证在生长季内每月至少采集3次以上。在所选样株距离树木约50 cm附近,在0—300 cm土层中利用土钻间隔20 cm进行土壤分层采集对应的土壤样品,每层取3个重复。采集的每层土壤一部分装入50 ml塑料离心管中,用Parafilm M®封口膜密封做好标记,放置在冰箱中冷冻(-10℃)保存,进行同位素测定;另一部分置于铝盒中,在烘箱中105℃下烘干12 h至土壤恒重,用来测算每层的土壤含水量。

在样地内分别随机选取3株生长状态良好、具有代表性的树木,从每株树的不同方向切割小枝直径约为4~7 mm的非绿色和木栓化的茎段,每株树木采集3个样品,将枝条的树皮和韧皮部组织剥去放于50 ml塑料离心管中,用封口膜进行密封同时上面做好标记,用Parafilm M®膜进行密封,标记取样信息并带回实验室,放置在冰箱中冷冻(-10℃)保存,用于同位素测定分析,采样频次与土壤样品一致。

在样地内同样选择生长状态良好、具有代表性的树木,以样木为中心,距样木0.5 m处清除地表凋落物后,按土层深度分层采集土壤根系样本。将采集的根系密封保存并送至实验室冷冻保存,保存的根系解冻后通过镊子选取细根(直径≤2 mm),并利用滤纸去除表面残留水分,然后将根系放入烘箱烘干以测根系干重。

分别在每块样地林内随机布设漏斗型降水收集装置,在漏斗口上方放置乒乓球,防止雨后水分蒸发,观测期间主要收集降雨量>1 mm的降水分别过滤并装入50 ml塑料离心管中,取3个重复样品,均用

Parafilm M®膜密封做好标记,置于冰箱中-10℃冷冻保存,用于降水氢氧同位素测定。

1.2.3 气象因子观测 在固定监测样地布设小型气象站(Onset, USA),同步记录降水量(mm)、气温(℃)、相对湿度(%)、太阳辐射(W/m<sup>2</sup>)、大气压强(kPa)、风速(m/s)等,观测频率为1次/15 min。

### 1.3 测定项目

1.3.1 土壤含水量测定 将采集的土壤铝盒放入烘箱,在105℃恒温条件下烘干12 h至恒重,测定烘干前后铝盒的重量,土壤含水率(W,%)为:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \quad (1)$$

式中:W为土壤质量含水率(%);m<sub>1</sub>为外采的原状土鲜重和铝盒重(g);m<sub>2</sub>为烘干后的土壤干重和铝盒重(g);m<sub>3</sub>为铝盒重(g)。

1.3.2 根系样品测定 用根系扫描仪(爱普生V850PRO扫描仪)对根系进行根长和根表面积测定,根生物量密度(D<sub>w</sub>,g/m<sup>3</sup>)、根长密度(D<sub>L</sub>,m/m<sup>3</sup>)和根比表面积密度(D<sub>A</sub>,m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)表示为:

$$D_w = W_d/V_s \quad (2)$$

$$D_L = L_r/V_s \quad (3)$$

$$D_A = A_r/V_s \quad (4)$$

式中:D<sub>w</sub>为根生物量密度(g/m<sup>3</sup>);D<sub>L</sub>为根长密度(m/m<sup>3</sup>);D<sub>A</sub>为根比表面积密度(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>);W<sub>d</sub>为根干质量(g);L<sub>r</sub>为根长(m);A<sub>r</sub>为细根表面积(m<sup>2</sup>);V<sub>s</sub>为土壤体积(m<sup>3</sup>)。

1.3.3 同位素样品测定 土壤样品在上机前于-10℃冰箱冷冻,土壤水和植物木质部样品中的水分使用Li-2100全自动真空冷凝抽提系统进行提取,提取后的水样同降水样品一同置于-10℃冷冻。采

用液态同位素分析仪(LGR-LWIA, USA)测定各水体中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 比率,以维也纳标准平均大洋水(VSMOW)为标准, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测定结果的精确度分别为 $\pm 0.3\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ ,表示为:

$$\delta X = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (5)$$

式中: $\delta X$ 为 $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$ ;  $R_{\text{sample}}$ 为样品中 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 同位素比值; $R_{\text{standard}}$ 为VSMOW中 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的同位素比值。

所有数据均通过光谱污染校正曲线进行修正,以去除有机污染物对氢氧稳定同位素值的影响。

#### 1.4 数据处理

本研究采用单因素方差分析(ANOVA)对不同深度根系指标、不同深度土壤含水量、氢氧稳定同位素值和水分利用率进行显著性检验。使用MixSIAR模型计算各层土壤水对植物水分的贡献率。根据该地区植物根系分布深度、土壤受降雨和蒸发的影响程度<sup>[7]</sup>,将土壤划分为4个层次,分别为表层(0—60 cm)、浅层(60—140 cm)、中层(140—220 cm)、深层(220—300 cm),将土壤含水量相似的相邻土层合并后,新土层的水同位素值为相邻土层水同位素平均值。具体的计算公式如下:

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1 \quad (6)$$

$$X = \sum_{i=1}^n C_i X_i \quad (7)$$

式中: $X$ 为植物未栓化茎干木质部水分的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ;  $C_i$ 为不同水源对植物水分利用的贡献率; $X_i$ 为不同水源水分的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ;  $n$ 为植物潜在水分来源总数。

## 2 结果与分析

### 2.1 气象因子变化特征

研究区气象因子由图2所示。研究区1—10月降水量呈现显著的季节性波动,总降水量为545.2 mm,最高月降雨量为8月(160.8 mm)。月平均气温经历了先增加后减小的过程,月平均相对湿度随着降水事件的变化而变化,降水多的月份相对湿度较高,而降水较少的月份相对湿度相对降低。对研究区生长季5—10月气象因子进行统计可知(表3),2024年5—10月共发生53场不同降雨,降水量变化情况为8月(160.8 mm) > 9月(77.8 mm) > 5月(74 mm) > 7月(68.6 mm) > 6月(30.4 mm) > 10月(19.2 mm);研究区雨季集中在7—9月,降雨量占生长季降雨量的71.3%。根据降雨量情况结合近几年的月平均降雨

数据,研究将7—9月划分为雨月,6月和10月划分为旱月,5月为旱雨季过渡月。监测期间,气温经历了先增加后减小的过程。生长季内最低月平均气温为11.6℃,而最高月平均气温为23.0℃,生长季内平均气温为18.9℃。月平均相对湿度随着降水时间的变化而变化,7—9月受降水影响,相对湿度较高,大部分时段维持在77.9%~85.1%范围内;6月和10月降水较少,相对湿度较低,大部分时段低于70%。

表3 研究区2024年生长季气象因子统计

Table 3 Statistics of meteorological factors in study area during 2024 growing season

月份	月降雨量/ mm	降水天数/ d	月平均 气温/℃	月平均相对 湿度/%
5	74.0	6.0	18.1	67.7
6	30.4	5.0	20.3	69.0
7	68.6	7.0	21.5	85.1
8	160.8	20.0	23.0	77.9
9	77.8	9.0	19.2	79.6
10	19.2	6.0	11.6	81.9

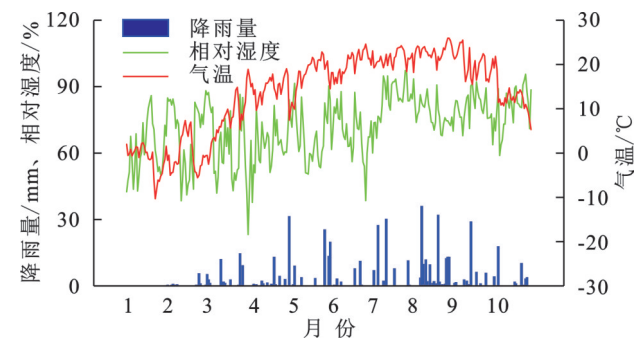


图2 研究区2024年1—10月气象因子变化

Fig. 2 Variation of meteorological factors in study area from January to October of 2024

### 2.2 不同地貌部位植被土壤含水量变化特征

由图3可知,不同地貌部位的同一植被和同一地貌部位不同植被土壤含水量的变化趋势不同。2024年生长季节内黄土塬刺槐、沟坡刺槐和台地刺槐土壤含水量范围为10.0%~16.9%;河岸带刺槐土壤含水量相对于其他3种地貌部位显著增加,土壤含水量范围为12.0%~22.6%。沟坡侧柏和台地樱桃含水量范围分别为9.0%~16.8%和10.0%~15.3%。对4个地貌部位植被生长季的平均土壤含水量统计可得,平均土壤含水量排序为河岸带刺槐(17.9%±5.3%) > 台地刺槐(13.1%±4.2%) > 台地樱桃(12.5%±3.4%) > 黄土塬刺槐(12.1%±3.6%) > 沟坡刺槐(11.5%±2.9%) > 沟坡侧柏(11.3%±3.1%)。

降雨对不同地貌部位刺槐、侧柏和樱桃的表层及浅层土壤含水量均有一定影响。雨月0—140 cm土层平均土壤含水量(黄土塬刺槐:13.2%±4.8%,沟坡刺槐:12.0%±2.6%,沟坡侧柏:12.8%±3.1%)高于旱月平

均土壤含水量(黄土塬刺槐:  $12.4\% \pm 4.8\%$ , 沟坡刺槐  $11.6\% \pm 2.2\%$ , 沟坡侧柏:  $11.7\% \pm 1.6\%$ )。台地刺槐和台地樱桃雨月 0—140 cm 土层平均土壤含水量分别为  $14.6\% \pm 3.6\%$  和  $13.5\% \pm 3.2\%$ , 也高于旱月平均土壤含水量( $12.5\% \pm 2.8\%$ )和( $11.0\% \pm 1.6\%$ )。河岸带刺槐雨月和旱月 0—140 cm 土层平均土壤含水量差异不显著, 分别为  $15.3\% \pm 3.8\%$  和  $15.1\% \pm 3.4\%$ 。

4 个地貌区的土壤含水量的垂直变化也不相同, 黄土塬刺槐、沟坡侧柏和沟坡刺槐 0—140 cm 土层的土壤含水量最高, 随着土层深度加深, 土壤含水量逐渐降低; 台地刺槐和台地樱桃土壤含水量随着土层深度的增加均表现出先降低再升高再降低的趋势。随着土层深度加深, 河岸带刺槐土壤含水量呈现出先降低再升高的变化趋势, 这是深层受河水补给影响所致。

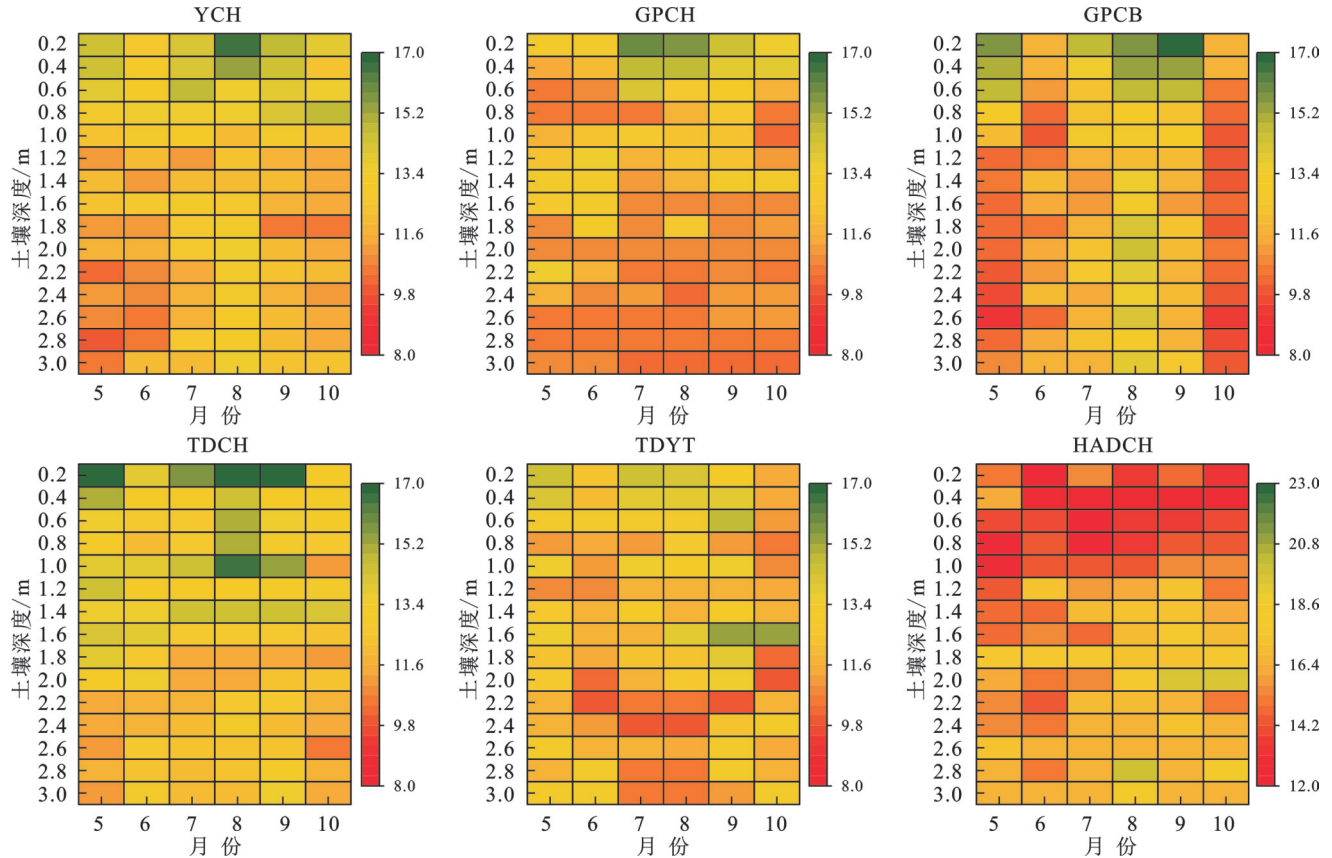


图 3 研究区不同地貌部位下植被不同土层含水率变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of moisture content across different soil layers of vegetation at various geomorphological locations in study area

### 2.3 不同地貌部位土壤和植物水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征

研究区不同地貌部位下植被不同土层的土壤同位素值变化特征图 4 所示。可以看出, 不样地土壤水氢氧同位素随土层深度变化趋势类似, 表现为 0—60 cm 表层和 60—140 cm 浅层土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的季节变化最大, 其土壤水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值在雨月显著低于旱月, 受到降雨显著影响, 同位素值贫化现象明显; 而较为稳定的土壤水氢氧同位素值在 200—300 cm 被观测到。黄土塬和沟坡植被的土壤水同位素值相较于台地和河岸带, 在土壤表层和浅层同位素值较高, 富集明显, 蒸发强烈。台地植被土壤水同位素在土壤表层和浅层受到降雨显著影响, 同位素值较负, 贫化现象明显; 河岸带植被的土壤水同位素值则更接近降水特征, 表层蒸发效应较弱, 在深层贫化现象不明显。

研究区的降水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  范围分别为  $-87.4\text{‰} \sim -7.3\text{‰}$  和  $-13.1\text{‰} \sim -2.3\text{‰}$ , 均值分别为  $-61.69\text{‰}$  和  $-9.03\text{‰}$ 。由图 5 可知, 该区域的大气降水线 (LMWL) 为  $\delta^2\text{H} = 7.39\delta^{18}\text{O} + 4.51$  ( $R^2 = 0.92, n = 48, p < 0.01$ ), 大气降水线斜率和截距均低于全球大气降水线 (GMWL) ( $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ ) 及西北地区大气降水线 ( $\delta^2\text{H} = 7.56\delta^{18}\text{O} + 5.05$ )。这表明降水在下降过程中存在蒸发分馏现象, 导致氢氧同位素的富集, 数据表现为大气降水线的斜率和截距较低, 且重同位素相对富集。在 4 个不同地貌区土壤水线 (SWL) 大多集中 LMWL 的附近或其右下方, 并且 SWL 的斜率和截距均低于 LMWL 的斜率和截距, 这表明降水补给是各区域土壤水的主要来源, 同时土壤水进行了二次蒸发。此外, 黄土塬刺槐、沟坡刺槐、沟坡侧柏、台地刺槐、台地樱桃和河岸带刺槐的

木质部样品  $\delta^2\text{H}$  的范围分为  $-58.1\text{‰} \sim -51.7\text{‰}$ ,  $-65.9\text{‰} \sim -51.2\text{‰}$ ,  $-61.6\text{‰} \sim -43.4\text{‰}$ ,  $-73.6\text{‰} \sim -61.5\text{‰}$ ,  $-74.3\text{‰} \sim -45.4\text{‰}$  和  $-56.5\text{‰} \sim -50.9\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  的范围分为  $-7.5\text{‰} \sim -6.0\text{‰}$ ,  $-6.4\text{‰} \sim -3.9\text{‰}$ ,  $-7.7\text{‰} \sim -6.8\text{‰}$ ,  $-8.9\text{‰} \sim -7.0\text{‰}$ ,  $-10.3\text{‰} \sim$

$-5.1\text{‰}$  和  $-8.1\text{‰} \sim -6.8\text{‰}$ 。不同地貌区植被的木质部样品同位素主要分布在 LMWL 和 SWL 附近,植物水与土壤水的氢氧稳定同位素值也存在着重叠,表明植被水分的主要来源是不同深度的土壤水,同时也受降水的影响。

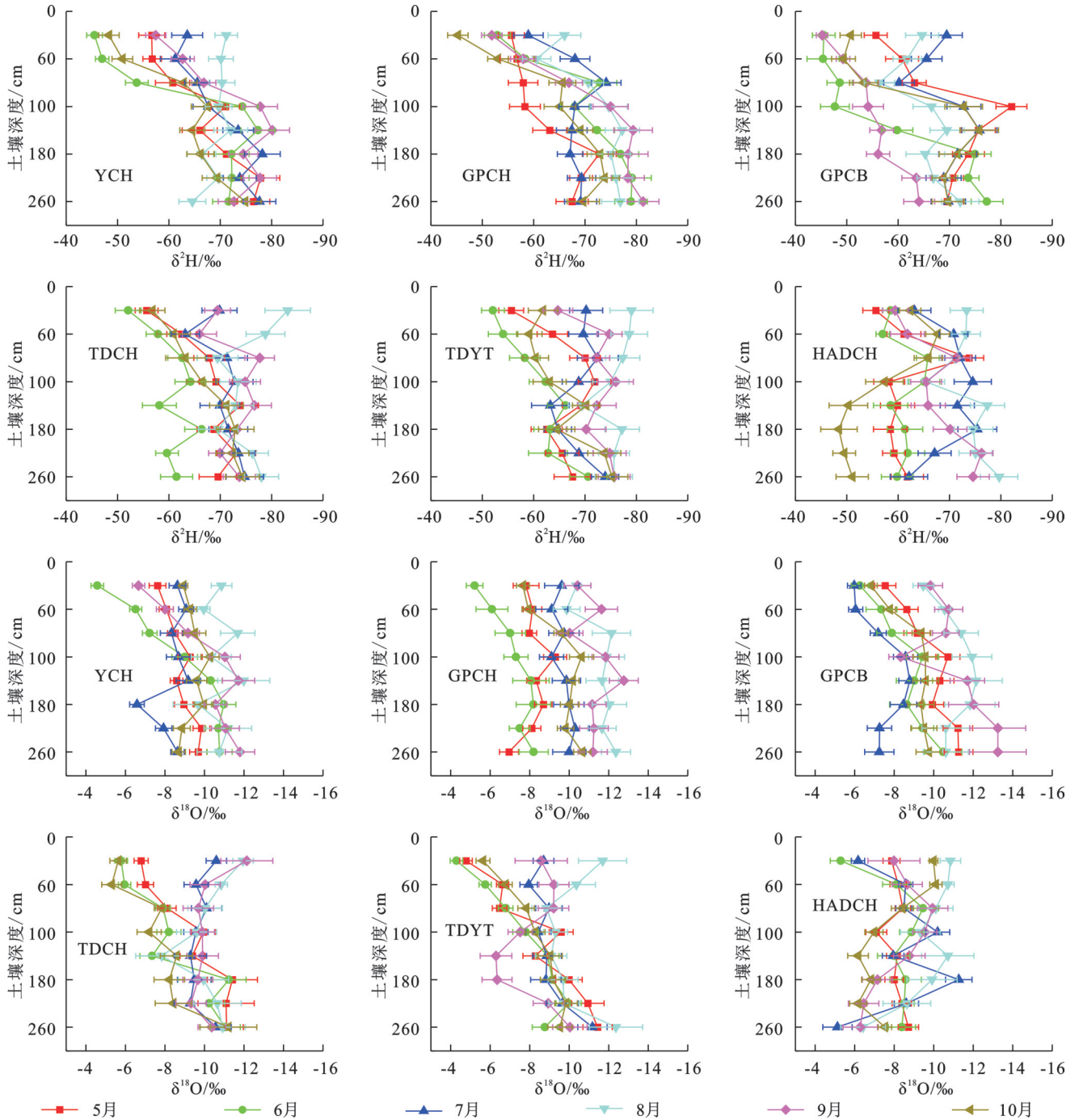


图4 研究区不同地貌部位下植被不同土层  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in different soil layers of vegetation at various geomorphological locations in study area

#### 2.4 不同地貌部位植被根系分布特征

由图6可知,流域内4种典型地貌部位刺槐、侧柏和樱桃的根生物量密度、根长密度和根表面积密度在0—300 cm土层均随土层深度增加而呈现下降趋

势,0—140 cm土层的根系分布较丰富,都是根系生物量密度、根长密度和根表面积密度分布最大的土层。黄土塬刺槐、沟坡刺槐、台地刺槐和河岸带刺槐在0—

140 cm 土层的根系生物量约占根系总生物量密度的 82.8%, 88.1%, 78.7% 和 87.0%; 沟坡侧柏和台地樱桃在 0—140 cm 土层的根系生物量约占根系总生物量的 91.9% 和 90.1%。同时对不同地貌部位下植被的平均根长密度统计可得, 0—300 cm 土壤剖面内平均根长密度从大到小依次为台地刺槐 ( $1\ 705.4 \pm 286.5\ \text{m/m}^3$ ) > 河岸带刺槐 ( $1\ 520.7 \pm 250.4\ \text{m/m}^3$ ) >

黄土塬刺槐 ( $1\ 363.6 \pm 260.7\ \text{m/m}^3$ ) > 沟坡侧柏 ( $1\ 136.4 \pm 223.7\ \text{m/m}^3$ ) > 沟坡刺槐 ( $908.1 \pm 221.9\ \text{m/m}^3$ ) > 台地樱桃 ( $690.9 \pm 128.4\ \text{m/m}^3$ )。4 种地貌类型下刺槐 0—300 cm 土壤剖面内和侧柏的平均根比表面积密度没有明显差异, 分别为  $(3.3 \pm 0.8)\ \text{m}^2/\text{m}^3$ ,  $(3.1 \pm 1.1)\ \text{m}^2/\text{m}^3$ , 樱桃 0—300 cm 土壤剖面内平均根比表面积密度最小, 为  $(1.72 \pm 0.6)\ \text{m}^2/\text{m}^3$ 。

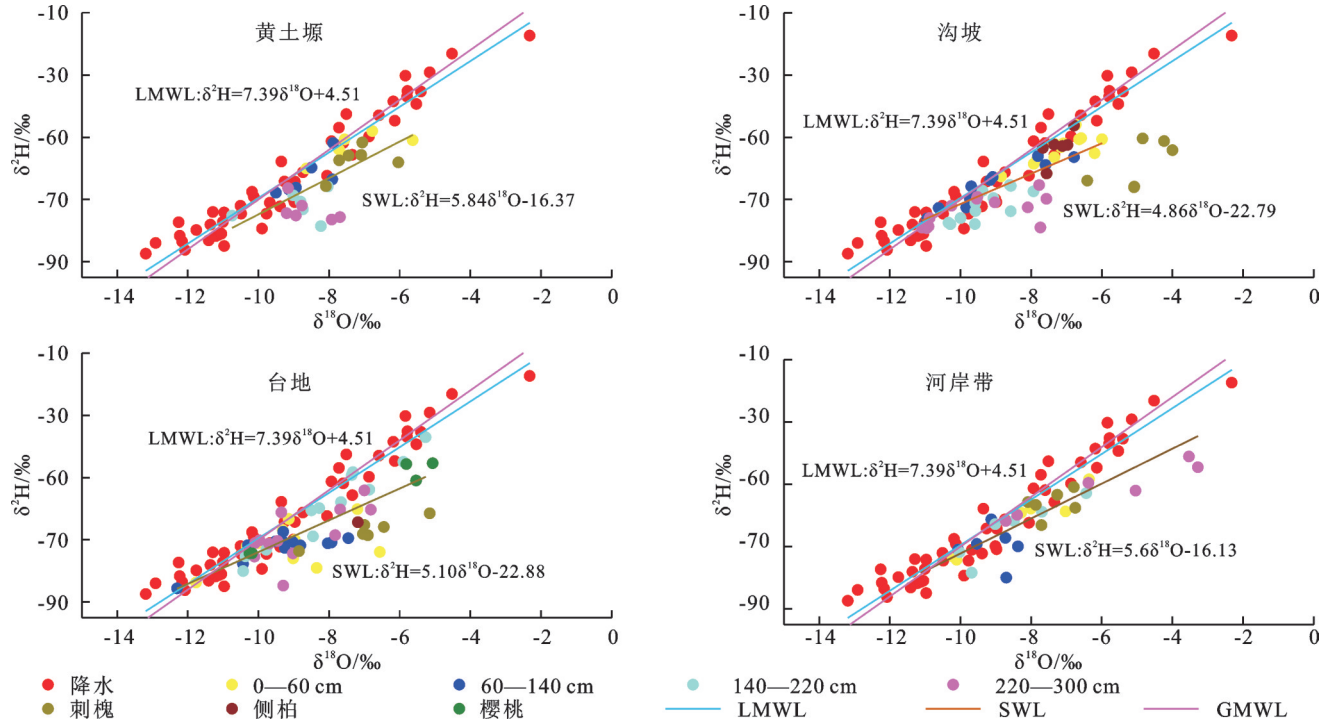


图5 研究区不同地貌部位下大气降水、土壤水以及植物水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric precipitation, soil water, and plant water under different geomorphological locations in study area

## 2.5 不同地貌部位植被水分利用深度

采用 MixSIAR 混合模型量化了不同地貌部位下不同植被类型植物水分来源比例的变化特征。由图 7 可知, 不同植被水分利用策略在空间上存在差异。在空间分布上, 黄土塬刺槐、沟坡刺槐和台地刺槐对 0—60 cm 表层土壤水平均利用率分别为 57.5%, 49.4% 和 65.3%, 是植物的主要吸水层, 60—140 cm 浅层土壤水平均利用率分别为 17.4%, 27.4% 和 14.1%, 而对 220—300 cm 深层土壤水的利用率最低, 分别为 13.7%, 10.9% 和 12.9%。河岸带刺槐对 220—300 cm 深层土壤水平均利用率最大, 为 42.3%, 0—60 cm 次之, 低于其他地貌和植被类型的 0—60 cm 表层土壤水平均利用率, 仅为 26.3%。沟坡侧柏和台地樱桃对 0—60 cm 表层土壤水和 60—140 cm 浅层土壤水平均利用率分别为 54.1%, 65.3% 和 28.6%, 11.5%, 而 220—300 cm 深层土壤水平均利用率与刺槐相比明显降低, 仅为 7.4% 和 7.1%。

不同地貌部位的植被水分利用率在雨月和旱月

也有显著差异。在雨月, 黄土塬刺槐、沟坡刺槐和台地刺槐对 0—60 cm 表层土壤水的利用率最大, 利用率为 33.6%~84.6%, 其他土层土壤水分利用相对均匀; 沟坡侧柏雨月也主要利用 0—60 cm 表层土壤水, 利用率为 46.0%~74.1%, 其次利用 60—140 cm 浅层土壤水, 利用率为 14.2%~29.6%, 140 cm 以下土壤水利用比例逐渐降低。台地樱桃对 0—60 cm 表层土壤水利用率为 50.2%~82.6%。在旱月, 刺槐 0—60 cm 表层土壤水吸收比例降低, 沟坡刺槐 10 月份对 0—60 cm 表层土壤水利用率仅为 21.5%, 刺槐逐渐转向利用浅层和深层土壤水, 利用率高达 43.3%。沟坡侧柏和台地樱桃也转向吸收 60—140 cm 浅层土壤水, 利用率为 42.2%~46.5%。

虽然刺槐和樱桃旱月对 0—60 cm 表层土壤水利用率都降低, 但是刺槐也能够相对均匀利用其他三层土壤水, 台地樱桃则显示出明显的浅层吸水策略, 对 220—300 cm 深层土壤水利用比率仅为 3.1%~10.7%。

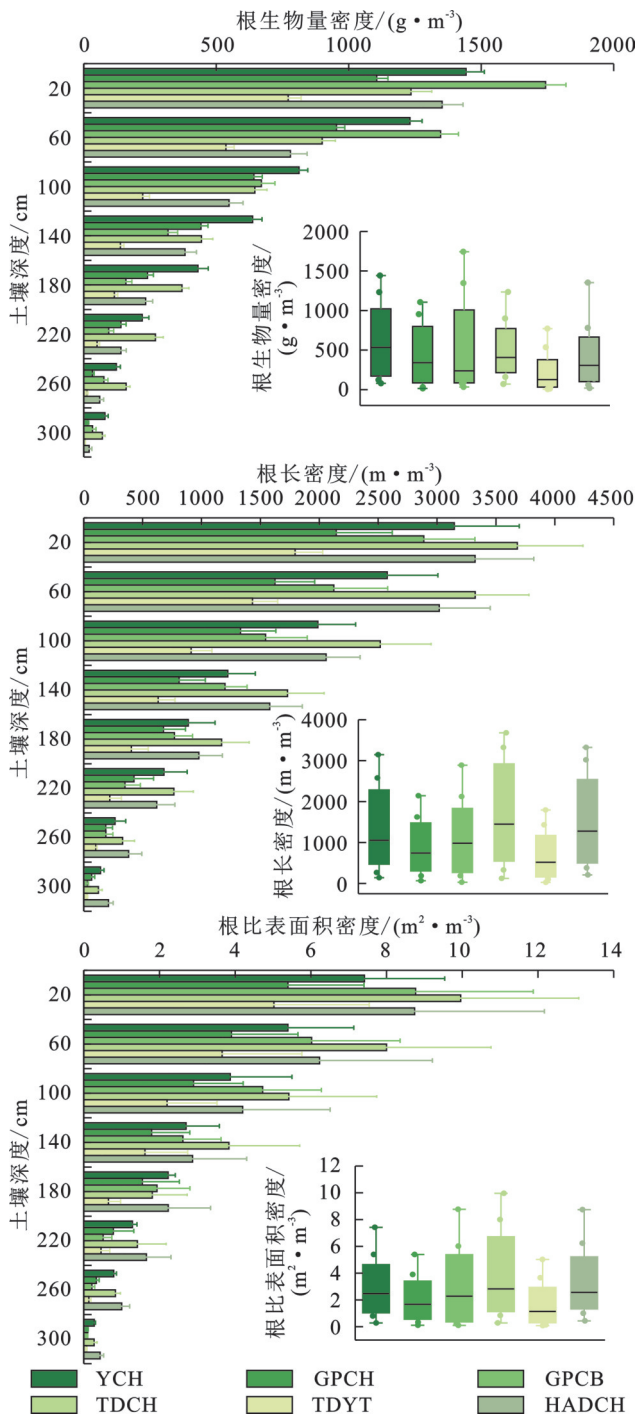


图6 研究区不同土层深度植被的细根生物量密度、根长密度、根比表面积密度

Fig. 6 Fine root biomass density of vegetation, Root length density of vegetation, Root specific surface area density of vegetation in study area

### 3 讨论

#### 3.1 不同地貌部位下土壤水及同位素对降雨的响应

在不同地貌部位下,土壤水及其 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有明显的差异性,而降雨作为土壤水分的主要补给来源,也进一步影响土壤含水量和 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。研究区7—9月为降雨丰富的季节,相对湿度较高,土

壤浅层蒸发作用较弱,同时降雨对浅层土壤水进行补给,导致土壤水稳定同位素逐渐减小,引起土壤水稳定同位素贫化,这种现象在台地地区体现得最明显。而在6月和10月,降水减少,强烈的蒸发作用导致土壤水稳定同位素显著富集,这对黄土塬和沟坡地区影响最大。这与Pei等<sup>[13]</sup>对樟子松、长柄扁桃和沙柳水分来源研究中,土壤水及 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 对降水响应的变化一致。由此可知,即使处于同一降水区域,由于地形特征的差异,降水和太阳辐射会进行空间上的重新分配,进而影响区域的小气候条件及土壤水分的空间分布<sup>[14]</sup>,这些因素最终导致土壤水分状况及植物水分利用来源存在差异。

#### 3.2 不同地貌部位下植被用水模式差异影响因素分析

在干旱和半干旱黄土地区,地貌一定程度上影响着土壤水分的初始分布,同时降水季节变化也调节其动态变化,而植被的根系分布则决定了植被能否有效利用这些水分<sup>[15-16]</sup>。在本研究中,土壤水和植物水同位素表现出显著的季节性差异,植被的水分利用方式也随这些因素而进行调节。因此,植被水分利用模式在地貌特征、水分状况和根系分布等多种因素的影响下,就会导致相同树种在不同地貌区的水分利用策略存在明显差异,而不同树种在相同地貌区的水分利用方式也存在明显不同。

地貌部位通过影响坡面的光照、气温和降水等性质,使土壤水分存在较大差异,进而决定植被水分利用的垂直分层特征<sup>[17]</sup>。研究结果显示,黄土塬刺槐和沟坡刺槐对0—60 cm表层水平平均利用率分别为47.8%和45.3%,随着土层深度的加深,土壤水利用比例逐渐减少,220—300 cm深层土壤水平平均利用率仅为13.7%和10.9%。这主要是因为黄土塬和沟坡作为黄土高原典型侵蚀地貌,土壤机械组成以粉粒含量为最高,其土壤水分条件较差,蒸发强烈,水分容易流失,易形成干土层,且受限于地形排水不畅,导致浅层土壤水分滞留时间短,蒸发强烈<sup>[18]</sup>。因此,植被通过发育浅根系快速捕获表层水分,形成浅层优先的吸水策略。这也与马建业等<sup>[19]</sup>研究的沟坡不同下垫面植被类型具有相似的水分利用策略。台地刺槐和台地樱桃的水分利用呈现浅层主导、中层补充的特征。台地刺槐和台地樱桃0—60 cm表层土壤水平平均利用率为60.7%和65.3%,高于黄土塬和沟坡地区。其中,台地刺槐60—140 cm,140—220 cm和220—300 cm的土壤水平平均利用率差异较小,分别为14.1%,9.9%和12.9%,反映出台地土壤水分的垂直分层特性。这种水分利用模式与台地坡度较低,地势平坦,表层受降水影响大,土层较厚,降水能够通过土壤空隙和植物根系快速入渗<sup>[20]</sup>,但由于缺乏深层水补给,植被也主要依赖

表层和浅层水。与其他 3 个地貌部位的刺槐相比,河岸带刺槐展现出独特的深层水分利用策略,220—300 cm 深层土壤水利用率高达 42.3%,远超其他地貌部位。这一现象可能是河岸带特殊的地形水文条件:邻近河流的地下水位稳定,深层土壤水通过毛管上升作用持续补给,形成较稳定的水分来源。河岸带刺槐对

0—60 cm 浅层土壤水利用率为 26.3%,对表层土壤水的利用也较大。这与陈小丽等<sup>[21]</sup>研究也基本一致。河岸带植物都会倾向于选择离植株更近的浅层土壤水;但浅层土壤水分不足时,怪柳等灌木类植物以及植株高大的乔木会更倾向于利用深层土壤水,这也与干旱半干旱区河岸带高大乔木的水分利用策略相符合。

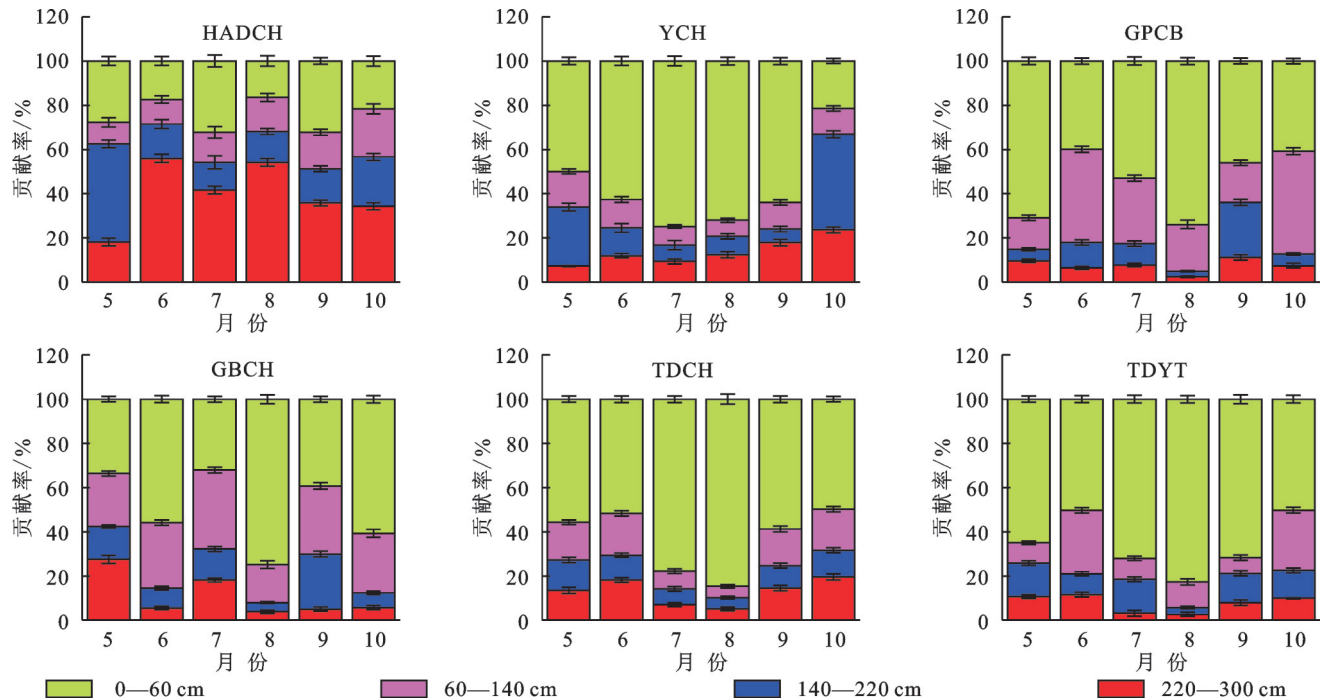


图7 研究区不同地貌部位下植被各月土壤水贡献率

Fig. 7 Monthly soil water contribution rate of vegetation at different geomorphological locations in study area

降雨输入通过改变土壤水分的垂直空间分布进而影响树木的水分利用策略。本研究中,不同地貌部位下的刺槐、侧柏和樱桃的水分利用呈现显著的季节性。在雨月,3种树种均主要利用0—60 cm表层土壤水,在台地地区的刺槐树种最明显,利用率高达84.9%。进入旱月,随着降水减少,植被吸水逐渐转向更深层的水源。在研究区时段内,土壤水垂直分布和降雨也影响着各植被的吸水深度。植被表层的土壤水分和土壤水利用在降水充沛的季节都较高,而在降水减少的季节,植被通过吸收深层土壤水分维系其正常生长,这与前人的研究较为相似。周雅聃等<sup>[22]</sup>研究表明,在高降雨的条件下植物主要依赖于浅层土壤水,其利用比例最高,在低降雨量时,植物对深层土壤水的利用率显著提高;吴应明等<sup>[23]</sup>研究了刺槐和侧柏人工林在晋西黄土区不同土壤水分条件下的水分利用来源,在降水较多的月份,刺槐和侧柏都主要利用0—40 cm土壤水,利用率分别达 $68.0\% \pm 2.4\%$ 和 $77.0\% \pm 2.4\%$ 。与研究不同的一点是,同样都生长在台地的刺槐旱月除了利用表层土壤水,也能够均匀利用其他三层土壤水,使其能够更好地通过调节吸水深度应对水分胁迫,而樱桃在旱月表现出对浅层水的依赖性可能使其更易受干旱影响。

植物主要通过根系获取水分,不同树种水分来源的差异也与其根系在土壤中的空间分布特征有关<sup>[24]</sup>,而林木细根的生物量密度及其形态特征可作为评估植株水土资源利用效率的重要指标<sup>[25]</sup>。本研究中4个地貌部位下刺槐、侧柏和樱桃的根系主要分布于0—140 cm土层,随着土层深度的加深,根系分布逐渐减少。其中人工林刺槐和侧柏的根系在0—60 cm土层占比超过80%,而经济林樱桃根系分布与生态林刺槐和侧柏不同,主要分布于0—20 cm浅层。其树种的根系分布特征与同地区的其他研究结果基本一致<sup>[26-27]</sup>。这种根系分布格局导致三者在不同地貌部位下几乎都对浅层土壤水分的依赖性较强,尤其在干旱条件下,浅层水分的快速补给特性更符合其根系吸收生理需求。植物根系分布特征与其水分获取策略密切相关,深根系植物通过延伸至深层土壤获取稳定性水源,显著提升水分利用效率并增强抗旱性。本研究中,刺槐、侧柏和樱桃植物对浅层土壤水分利用表现出的较强依赖性,在干旱的季节又能利用较深层的土壤水分也进一步证明了以上观点。

3.3 不同地貌部位下植被水分利用模式的生态启示  
在黄土沟壑干旱和半干旱地区,土壤水分的有效

性对植被恢复的可持续性十分重要<sup>[28]</sup>。若引入的植物与当地水分条件不适宜,可能导致植物过度消耗土壤水分,进而形成土壤干层,会使该区域水资源利用效率降低并加剧干旱胁迫风险。因此,植物水分利用模式必须考虑植被恢复的可持续性,如何根据当地水分条件来引种合适的植被十分重要。程立平等<sup>[29]</sup>研究发现黄土塬区降水入渗具有自上而下活塞式下渗的特征,农田和荒草地土地利用方式下会对深层土壤水分或地下水形成补给;赵宝转等<sup>[30]</sup>以陇东黄土残塬沟壑区不同地貌部位(塬面、梁坡、沟台)的人工刺槐林地和林间撂荒地作为研究对象,研究发现塬面适宜种植刺槐,梁坡更适宜种植林木,沟台则种草优于种树。与以往研究基本一致,本研究中黄土塬和沟坡地区土壤水分较少,蒸发强烈,土壤侵蚀较为严重,适合引入人工林刺槐和草本植物等,这些植被能够有效利用有限的水分,从而能够更好地生存。在台地地区,表层土壤水分受降雨影响较大,表层水分充足,植被可以充分利用这些水分,樱桃等经济林被认为是适宜种植的树种。河岸带地区靠近水源,深层地下水丰富,则更适合种植耐涝的树种。因此,人工林和草本植物应优先布局于水分胁迫强的黄土塬和沟坡地区,经济林则适合水分条件稳定的台地地区。

## 4 结论

(1) 不同地貌部位下不同土层土壤水的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值差异显著,黄土塬和沟坡的土壤水同位素值表层和浅层水分同位素值较高,富集更明显,季节变化大。台地的土壤水同位素值表层蒸发效应较弱,受降雨影响大,贫化现象明显。

(2) 不同地貌部位和不同植被水分利用模式差异明显,黄土塬、沟坡及台地的植被都主要利用表层和浅层土壤水。不同的是,台地植被雨月表层土壤水利用比率相对升高,受降雨影响大,其他层土壤水利用比率相对均匀。河岸带植被由于靠近河水,深层受河水影响大,主要利用深层土壤水。

(3) 植被的水分利用策略受到降雨和植被根系的一定影响。在雨月,刺槐、侧柏和樱桃表层土壤水较高,对其利用率也高;而在降雨减少的月份,刺槐、侧柏和樱桃表层土壤水降低,表层土壤水利用率相对雨月也降低,植被转向吸收更深层的水分。人工林刺槐和侧柏在旱季能更好通过调节吸水深度应对水分胁迫,而经济林对浅层水的依赖性使其更易受干旱影响。

本研究揭示了黄土高原“地貌—水分—植被”的耦合机制,揭示了在不同地貌部位下不同植被水分利用模式的差异和影响因素,结合不同植被的用水

模式策略,可为黄土地区植被恢复和树种选择提供理论基础和数据支撑。

### 参考文献 (References):

- [1] 张岁梦,叶丽敏,周肆智,等.南方丘陵区马尾松—麻栎群落水分利用来源及其影响因素[J].应用生态学报,2023,34(7):1729-1736.  
Zhang S M, Ye L M, Zhou Y Z, et al. Water use sources and its influencing factors of *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima* community in hilly region of Southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(7):1729-1736.
- [2] Zhao Y, Dai J, Tang Y, et al. Illuminating isotopic offset between bulk soil water and xylem water under different soil water conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022,325:109150.
- [3] Wang J, Fu B, Wang L, et al. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,288:108020.
- [4] Dong J, Ochsner T. Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns [J]. Water Resources Research, 2018, 54(3): 2199-2211.
- [5] Shi P, Gai H, Liu W, et al. Links of apple tree water uptake strategies with precipitation and soil water dynamics in the deep loess deposits [J]. Journal of Hydrology, 2023,623:129829.
- [6] 杨梅焕,王添晴,李扬,等.黄土高原植被水分利用效率时空变化及其对不同影响因子的响应强度[J].水土保持研究,2025,32(3):159-169.  
Yang M H, Wang T Q, Li Y, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water use efficiency on the Loess Plateau and its response intensity to different influencing factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(3):159-169.
- [7] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2021,35(1):181-187.  
Zhao D Y, Bi H X, Hou G R, et al. Soil moisture dynamics of typical plantation in loess region of west Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):181-187.
- [8] 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.
- [9] Chen Z, Wang G, Pan Y, et al. Water use patterns differed notably with season and slope aspect for *Caragana korshinskii* on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021,198:105028.
- [10] 高彩欣,孙从建,陈伟,等.生态恢复背景下黄土高原东部地区典型植物用水策略[J].地理研究,2024,43(8): 1958-1976.  
Gao C X, Sun C J, Chen W, et al. Typical plant water

- use strategies in the eastern part of the loess plateau under the background of ecological restoration[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(8):1958-1976.
- [11] 张晓梅, 邸利, 史再军, 等. 甘肃泾川中沟小流域不同坡位刺槐人工林土壤水分特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(5):1300-1308.  
Zhang X M, Di L, Shi Z J, et al. Soil Moisture characteristics of *robinia pseudoacacia* plantations at different slope positions in Zhonggou minor Basin, Jingchuan County, Gansu Province [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5):1300-1308.
- [12] 田丽慧, 汪海娇, 张登山, 等. 高寒沙地典型固沙植物在沙丘不同地貌部位的水分利用特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(15):6215-6226.  
Tian L H, Wang H J, Zhang D S, et al. Water use patterns for a typical afforested shrub among topographic positions in an alpine desert of Qinghai-Tibet Plateau using stable isotopes tracers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15):6215-6226.
- [13] Pei Y, Huang L, Shao M, et al. Patterns and drivers of seasonal water sources for artificial sand-fixing plants in the northeastern Mu Us sandy land, Northwest China [J]. *Pedosphere*, 2024, 34(1):63-77.
- [14] Ran M, Tian H, Yang G, et al. Source water apportionment using stable isotopes for typical riparian plants along the manas river in Xinjiang, Northwest China[J]. *Water*, 2023, 15(5):927.
- [15] 吕婷, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(2):175-185.  
LV T, Zhao X N, Gao X D, et al. Soil water use strategy of dominant species in typical natural and planted shrubs in Loess Hilly Region [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(2):175-185.
- [16] 祝维, 周欧, 孙一鸣, 等. 混交林内毛白杨和刺槐根系吸水的动态生态位划分[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(3):389-403.  
Zhu W, Zhou O, Sun Y M, et al. Dynamic niche partitioning in root water uptake of *Populus tomentosa* and *Robinia pseudoacacia* in mixed forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(3):389-403.
- [17] 王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. *地球与环境*, 2016, 44(4):391-397.  
Wang Y Q, Shao M A, Hu W, et al. Spatial variations of soil moisture in the critical zone of the Loess Plateau [J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(4):391-397.
- [18] 单燕, 索立柱, 王洁, 等. 黄土高原样带典型地貌类型坡面土壤水分分布特征及其差异[J]. *土壤*, 2024, 56(3):593-600.  
Shan Y, Suo L Z, Wang J, et al. Distribution characteristics of soil water on slopes in typical landform types on Loess Plateau[J]. *Soils*, 2024, 56(3):593-600.
- [19] 马建业, 李占斌, 马波, 等. 黄土高原丘陵区不同植被恢复方式下土壤水分特征: 以桥子沟流域为例[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4):8-15.  
Ma J Y, Li Z B, Ma B, et al. Soil water characteristics under different vegetation recovery modes in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau: a case study of the qiaozigou watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4):8-15.
- [20] 马耘秀, 夏露, 范毅, 等. 不同土地利用和地形条件对黄土丘陵区土壤水分的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(9):77-84.  
Ma Y X, Xia L, Fan Y, et al. The combined effects of land usage and topography on soil moisture change in a Loess Area [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(9):77-84.
- [21] 陈小丽, 陈亚宁, 陈亚鹏. 黑河下游荒漠河岸林植物水分利用关系研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8):972-979.  
Chen X L, Chen Y N, Chen Y P. Relationship among water use of different plants in Heihe River riparian forests [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8):972-979.
- [22] 周雅聃, 陈世莘, 宋维民, 等. 不同降水条件下两种荒漠植物的水分利用策略[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(8):789-800.  
Zhou Y D, Chen S P, Song W M, et al. Water use strategies of two desert plants along a precipitation gradient[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(8):789-800.
- [23] 吴应明, 韩璐, 刘柯言, 等. 晋西黄土区不同土壤水分条件下刺槐和侧柏人工林的水分利用来源[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(3):588-596.  
Wu Y M, Han L, Liu K Y, et al. Water source of *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations under different soil moisture conditions in the Loess Plateau of Western Shanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3):588-596.
- [24] Liu Z, Yu X, Jia G. Water uptake by coniferous and broad-leaved forest in a rocky mountainous area of northern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265:381-389.
- [25] 卫朝阳, 张建军, 赖宗锐, 等. 晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(10):22-32.  
Wei Z Y, Zhang J J, Lai Z R, et al. Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations in loess area of Western Shanxi Province, northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(10):22-32.
- [26] Ji J, Kokutse N, Genet M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability: a case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and *Arborvitae* (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2012, 92:139-154.