

黄土丘陵区植被群落水分利用策略对干旱胁迫的响应

罗立娇^{1,2}, 高晓东^{1,3}, 赵连豪^{1,2}, 安庆蓉⁴, 马南方¹, 赵西宁^{1,3}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院大学,北京 100049;
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探讨气候变化下灌草群落中主要植物水分来源差异及动态变化。以黄土高原典型自然恢复植物(油蒿、苜蓿与藜)为研究对象,通过减少自然降水的 15%(中度干旱)与 30%(极端干旱)来控制干旱程度,研究植物水分利用来源与生长对干旱胁迫的响应特征。将植被群落潜在水源划分为浅层(0—20 cm)、中层(20—60 cm)与深层(60—120 cm)土壤水,采用稳定水同位素技术与 MixSIAR 模型定量分析不同干旱胁迫程度(减雨 30%、减雨 15%与对照)下植被根系水分吸收特征。结果表明:(1)土壤水与植物水中稳定氢氧同位素值(δD 和 $\delta^{18}O$)均位于当地大气降水线的右下方,说明土壤水同位素受蒸发影响发生富集;(2)3 种典型植物在遭遇干旱胁迫时,其水分利用来源均可灵活转换于不同土层之间,呈浅层土壤水分利用比例减少,中层与深层土壤水分利用比例增加的规律,且随干旱胁迫程度增大愈加明显;(3)不同植被响应干旱胁迫的水分利用策略不同,平地,减雨 30%、减雨 15%及 CK 处理下油蒿均主要利用浅层土壤水(贡献率分别为 48.2%,52.7%,57.6%),而藜分别主要利用来自中层(43.5%)、浅层(49.6%)与浅层土壤水(53.6%);坡地,减雨 30%、减雨 15%及 CK 处理下油蒿均主要利用浅层土壤水(贡献率分别为 42.5%,44.5%,58.1%),而苜蓿分别主要利用来自中层(40.9%)、中层(46.7%)与浅层土壤水(53.9%)。这表明半干旱黄土丘陵区植被群落主要物种可通过可塑性转换水分来源以应对干旱胁迫,并在空间上分割群落水源以有效缓解对水分资源的竞争压力,从而通过在水分资源利用上的生态位分化促进物种间的共存。

关键词: 气候变化; 干旱胁迫; 稳定同位素; 水分来源; MixSIAR 模型

中图分类号: S715.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)01-00280-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.036

Response of Water Use Strategies of Vegetation Community to Drought Stress in the Loess Hilly Region

LUO Lijiao^{1,2}, GAO Xiaodong^{1,3}, ZHAO Lianhao^{1,2}, AN Qingrong⁴, MA Nanfang¹, ZHAO Xining^{1,3}

(1.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 2.University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 4.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To explore the differences in water sources and dynamic changes of major plants in shrub communities under climate change, the response characteristics of water use sources and growth of typical natural recovery plants (*Artemisia ordosica*, *Medicago Sativa* and *Chenopodium album*) to drought stress in the Loess Plateau were studied. And the droughts were controlled by reducing natural precipitation by 15% (moderate drought) and 30% (extreme drought). The potential water sources of vegetation communities were divided into shallow (0—20 cm), middle (20—60 cm) and deep (60—120 cm) soil water. The stable water isotope technique and MixSIAR model were used to quantitatively analyze the water absorption characteristics of vegetation roots under different drought stress levels (30%, 15% and the control). The results showed that: (1) The stable hydrogen and oxygen isotope values (δD and $\delta^{18}O$) of soil water and plant water were both located at the lower right of the local atmospheric precipitation line, which indicated that the isotope of soil water was enriched by evaporation. (2) Water sources of three typical plants could be flexibly converted to different soil layers under drought stress, specifically, the proportion of shallow soil moisture utilization decreased, while the proportion of middle and deep soil moisture utilization increased, which became more

obvious with the increase of drought stress levels. (3) Different vegetation responded to drought stress through different water use strategy, *Artemisia ordosica* mainly used shallow soil water (contribution rates were 48.2%, 52.7% and 57.6%, respectively) under flat land, rainfall reduction of 30%, 15% and CK treatments, while *Chenopodium album* mainly used middle (43.5%), shallow (49.6%) and shallow soil water (53.6%), respectively. In slope land, rainfall reduction of 30%, 15% and CK treatment, *Artemisia ordosica* mainly used shallow soil water (contribution rates were 42.5%, 44.5% and 58.1%, respectively), while *Medicago Sativa* mainly used the middle (40.9%), middle (46.7%) and shallow (53.9%) soil water. This indicated that the main species of vegetation community in semi-arid loess hilly region could respond to drought stress by converting water sources through plasticity. And the community water sources were divided in space to effectively reduce the competitive pressure on water resources, which would promote the coexistence of species through niche differentiation in water resources utilization.

Keywords: climate change; drought stress; stable isotope; water-use source; MixSIAR model

在干旱、半干旱地区,水是影响植被生长状况、分布格局及生物多样性的关键限制因子,极端稀少及时空分布不均的大气降水对植被生存发育至关重要^[1-2]。全球气候变暖背景下,极端天气事件发生频率与程度不断加剧^[3],极端干旱降低水分可利用性以及植被生产力,并带有植物枯萎甚至死亡等不可逆转的风险^[4]。黄土高原年降水量少且时空分布不均,呈逐年降低的趋势^[5-6],水源不足是黄土高原植被恢复与生态环境重建的主要限制因子^[7]。虽然每次降水事件的降水量分布不均,但均可被植被群落中的不同植物转化利用^[8]。植物对水分的吸收和利用模式一定程度上反映生态系统对环境水分状况发生改变时的响应结果^[9],因此,亟需厘清极端干旱下自然恢复植被群落的水分利用特征,以尽可能降低气候变化对生态恢复的可持续性带来的负面影响。

稳定氢氧同位素技术因其破坏性小、精确度高等优点被广泛应用于评估植物水分利用策略^[10]。植物各潜在水源的稳定氢氧同位素组成不同^[11-12],因此,通过对比各潜在水源与植物木质部水的同位素组成可判断出植物主要水分来源^[13-14],并且可结合多源混合模型(如 MixSIAR 模型、IsoSource 模型)进一步量化各潜在水源对植物的贡献比例^[15]。近年来,干旱、半干旱地区借助稳定同位素技术探索植被水分利用特征的研究主要集中于生态林、人工林与天然灌草等,但关于典型自然恢复植被群落的研究较为薄弱^[16-17]。

稳定氢氧同位素技术在判别植物主要水分来源中已取得显著成果,但也有研究^[18]发现,稳定氢同位素在旱生与盐生环境易发生分馏,相反,有关氧同位素分馏的报道鲜有发现。因此,本文研究基于稳定氧同位素示踪技术研究黄土高原极端干旱下自然恢复植被群落水分来源及其对不同潜在水源的利用模式,以期明确植被群落水分利用策略对极端干旱的响应机制,为气候变化条件下黄土高原生态系统恢复的可持续发展提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省榆林市米脂县银州镇远志山(37°39'N,109°49'E)。该区为典型黄土高原丘陵沟壑区,属典型的温带半干旱大陆性季风气候,平均海拔为 1 049 m。年均气温、年均最高和最低气温分别为 8.5,38.2,−25.5 ℃,多年平均日照时间 2 761 h,无霜期 162 天。多年平均降水量 451.6 mm,年内分配不均,49%以上降水集中于 7—8 月^[19]。土壤类型为黄绵土,质地为粉质砂壤土,土层深厚,地下水埋深在 50 m 以下,无法被植被吸收利用。土壤风蚀沙化明显,水土流失严重。植被组成简单,群落郁闭度低,包含柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、酸枣(*Zizyphus jujuba*)等灌木植物,苜蓿(*Medicago Sativa*)、藜(*Chenopodium album*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等草本植物(表 1)。

表 1 试验区监测样地基本信息

地形	地理坐标	海拔/m	优势物种	坡度/(°)	坡向
平地	37°39'N,110°22'E	975.5	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)、藜(<i>Chenopodium album</i>)、酸枣(<i>Zizyphus jujuba</i>)		半阳坡
坡地	37°39'N,110°22'E	958.2	苜蓿(<i>Medicago Sativa</i>)、油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)、猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	30	半阳坡

1.2 试验设计

本试验设置 2 m×2 m 的样地共 24 个,其中 P1~P15 样地选取于平地,X1~X9 选取于坡地。由于试

验站点靠近绥德地区,对绥德 1960—2020 年共 60 年的降水数据进行分析。计算其年总降水量的经验频率以判断干旱年与湿润年^[20],极端干旱年和中度干

旱年的降水量分界点分别为 307,398 mm,分别对应于平均降水量减少 30%与减少 15%的降水量。因此本试验设置减雨 15%(中度干旱)与减雨 30%(极端干旱)2 个处理,裸地为对照组。通过搭建减雨棚,安装亚克力“V”形槽将雨水引流至样地外以达到减雨目的,其中减雨 15%与减雨 30%的减雨棚分别安装 3 块和 6 块亚克力“V”形槽。用宽为 100 cm 的彩钢

板将每个处理包围,地下埋深 80 cm,露出地表 20 cm,以确保样地内水量平衡。安装便携式时域反射仪(TDR)以测量各处理根区下水分动态分布状况,每个减雨棚下安装 1 个 1.8 m 深 Trime 管,共 24 个。减雨棚搭建于 2020 年 8 月,经干旱处理 1 年后选取典型自然恢复的植被为研究对象,坡地:油蒿与苜蓿;平地:藜与油蒿。各处理植被基本信息见表 2。

表 2 不同处理的植被基本信息

地形	植被种类	指标	减雨 30%			减雨 15%			CK		
			8 月	9 月	10 月	8 月	9 月	10 月	8 月	9 月	10 月
平地	藜(<i>Chenopodium album</i>)	平均基径/cm		6.8±0.5a			7.8±1.3a			9.5±0.3b	
		平均株高/cm		96.6±10.5a			98.4±11.2a			134.1±10.8b	
		地上生物量/g		4.6±2.9a			6.5±4.1a			8.8±3.7a	
		基径/cm	6.5±0.3a	6.8±0.3a	7.2±0.6a	7.5±1.3a	7.8±1.4a	7.9±1.4a	9.2±0.2a	9.5±0.1ab	9.8±0.3b
		株高/cm	83.6±2.9a	101.8±5.9b	104.4±4.7b	86.6±6.8a	103.5±8.2b	105.0±7.9b	128.7±12.2a	136.3±11.0a	136.3±10.7a
		地上生物量/g		5.3±4.1a			13.9±4.9b			15.2±7.5b	
坡地	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)	平均基径/cm		8.3±0.9a			9.0±1.7a			9.4±1.0a	
		平均株高/cm		101.9±8.3a			116.8±8.8ab			120.2±10.4b	
		地上生物量/g		5.3±4.1a			13.9±4.9b			15.2±7.5b	
		基径/cm	8.1±1.0a	8.3±0.9a	8.5±0.9a	8.7±1.8a	9.1±1.8a	9.2±1.8a	9.1±1.3a	9.5±1.0a	9.6±1.0a
		株高/cm	98.0±7.6a	100.8±9.3a	104.3±8.8a	113.2±9.5a	117.8±10.7a	119.5±10.4a	119.7±10.2a	120.0±12.6a	121.0±13.0ba
		地上生物量/g		7.9±2.2a			10.9±2.5a			15.6±2.9b	
平地	苜蓿(<i>Medicago Sativa</i>)	平均株高/cm		74.0±1.9a			84.8±2.5b			99.5±5.7c	
		地上生物量/g		7.9±2.2a			10.9±2.5a			15.6±2.9b	
		株高/cm	70.0±4.4a	75.7±1.8a	74.2±1.8a	83.0±2.6a	86.1±1.7a	85.1±4.6a	97.3±6.4a	100.2±7.2a	100.8±3.7a
		平均基径/cm		7.1±0.3a			8.8±1.5ab			10.1±0.8b	
		平均株高/cm		64.6±4.0a			91.1±5.5b			95.0±6.3b	
		地上生物量/g		6.3±5.8a			9.2±6.9b			19.9±4.7b	
坡地	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)	基径/cm	6.9±0.1a	7.0±0.3a	7.3±0.2ab	8.5±1.9ab	9.9±1.5ab	9.2±1.8b	9.7±0.6c	10.1±0.7c	10.6±1.1c
		株高/cm	58.7±8.5a	68.4±2.0a	66.9±2.1a	89.7±6.0a	92.5±5.0a	91.1±5.7a	93.7±6.4a	94.9±5.6a	96.4±7.1a

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示相同草种不同减雨梯度或不同月份间差异显著($p<0.05$)。

1.3 采样方法

1.3.1 土壤样品采集 由于研究区的降雨季节分布不均,为体现植被群落响应干旱胁迫的水分利用策略,确保采样前至少 3 天内无降水,分别于 2020 年 8 月 22 日、9 月 22 日与 10 月 16 日采样。每次采集点间隔>1 m,并在采样后立即回填。在各处理试验样地用土钻(40 mm)钻取 0—120 cm 的土壤,土壤分层设计为 0—20,20—60,60—120 cm,各处理分别取 3 个重复,共计 54 个土壤同位素样品。将每层的样品装入 100 mL 小瓶中,封口膜双层密封后储存于便携式冷却器以避免蒸发,进而防止同位素分馏。土壤样品带回实验室后,置于冷冻室(−20 ℃)保存。

1.3.2 植物样品采集 以各处理样方内的土壤采样点为中心,选取各类型植物 5~6 株。每个处理每种植物各 3 个重复。选取植物向阳面长势良好的枝条,剪取长为 10.0~15.0 cm、直径为 0.5~1.0 cm 完全硬化的茎干部分,迅速将样品装入 8 mL 取样瓶内密封,−20 ℃低温保存。

1.3.3 雨水采集 2021 年 8—10 月,监测每次降雨的起止时间、降雨量大小,并用 8 mL 玻璃样品瓶收

集降水,每次降雨采集 3 瓶作为重复,封口膜双层密封后置于 2~3 ℃冰箱冷藏保存。

1.3.4 土壤水分监测 采用 Trime-IPH 管式 TDR 土壤水分测量系统(北京聚盟致远科技有限公司)。TDR 测管于 2020 年 8 月布设完成,TDR 测管埋深为 180 cm,间隔 20 cm 测量 1 次。测量频率为 2 周 1 次,雨后加测。每次测量在 2 h 内完成,以减少测量时间造成的误差。

1.3.5 根系密度调查 2021 年 8 月,于植被生长旺盛期,距植株主干 5 cm 用土钻(直径 90 mm)以 10 cm 为 1 层取样,直至 100 cm 深处,共计取样 400 个。将土样带回实验室,清洗挑出样本中植物全部根系后进行扫描(CanoScan LiDE 110),并使用 WinRHIZO 根系图像分析软件(Regent 加拿大)筛选出植物细根根长($\varphi<2$ mm)。各土层细根根长除以对应土体体积,即为油蒿、苜蓿和藜的细根根长密度,各处理下各类草种各取 3 次重复。

1.4 水分抽提与同位素分析

利用低温真空蒸馏法(Li-2000,土壤—植物水分真空抽提系统)抽提植物木质部水分与土壤水分。

将抽提收集的水分储存于 2 mL 样品瓶,密封保存至 -2°C 冰箱直至分析。采用液态同位素分析仪(TIWA-45EP, Los Gatos Research, Mountain View, USA)测定土壤水和降水样品中的稳定氢、氧同位素比率,采用 Picarro 激光光谱测定植物木质部水分中稳定氢、氧同位素比率,并以相对于 V-SMOW 标准的千分值偏差表示:

$$\delta_x(\text{‰}) = (R_{sa} - R_{st}) / R_{st} \times 1000$$

式中: x 为元素名称; R_{sa} 为样品中元素的重轻同位素丰度之比; R_{st} 为国际通用标准样品中的重轻同位素丰度比率(‰);

液态水同位素分析仪的测试精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$), $\pm 0.5\text{‰}$ (δD)。Picarro 激光光谱的测试精度为 $\pm 0.1\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$), $\pm 0.4\text{‰}$ (δD)。植物水与土壤水分的抽提在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院水同位素实验室完成。植物水的测定在北京泰锶特测试技术有限公司进行,土壤水与降水在西北农林科技大学进行测定。

1.5 数据分析

本研究利用基于质量平衡的贝叶斯混合模型(MixSIAR 3.1.7)量化分析植物对不同土层水源的利用比例^[21]。近年来,MixSIAR 被广泛应用于依据植物木质部水和潜在水源中的氢和氧同位素确定植物水源。该地区地下水埋较深,植被无法吸收,因此由降水产生的不同土层土壤水被认为是植被的潜在水源。为便于模型计算,根据根系分布、土壤含水量及土壤水同位素组成,将土壤剖面水分为浅(0—20 cm)、中(20—60 cm)和深(60—120 cm)3 层,并代入 MixSIAR 模型确定各水源的贡献比例。将植物木质部水与各土层土壤水分同位素的平均值和相应标准差作为 MixSIAR 模型的输入数据^[22-24]。TDF 数据设为 0,假设吸水过程中不发生稳定氧同位素分馏。MCMC 运算时长设置为“very long”,以提高计算的精度,输出结果为各潜在水源所对应的平均贡献率^[21]。

采用 Microsoft Excel 2016 软件和 SPSS 22.0 软件对数据进行整理分析,Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 降水量及降水的稳定同位素变化

2021 年 5—10 月,试验区降水量、降水 $\delta^{18}\text{O}$ 及平均每日气温变化见图 1。5—10 月间共有 48 场次降水事件,其中 33.3% 以上降水事件的降水量 $< 5\text{ mm}$,年总降水量为 194.2 mm,年平均气温为 10.69°C ,降水主要集中于 5,10 月。5 月 15 日为单次最大降水量,达 26.8 mm。降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-15.26\text{‰} \sim 2.20\text{‰}$ 范围内波动,且幅度较大,加权平均值为 -9.49‰ ,并呈小降水事件 $\delta^{18}\text{O}$ 值贫化,大降水事件富集的现象。降水中的稳定同位素值与降水量及其日平均气温间的

相关分析显示,无降水量及温度效应。图 2 为降水、土壤水以及植物水分的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 的线性相关关系。对试验区降水样品中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 进行回归分析发现,当地大气降水线(LMWL: $\delta\text{D} = 6.95\delta^{18}\text{O} - 8.394.85$, $R^2 = 0.921$, $p < 0.001$)的斜率与截距小于全球降水线(GMWL: $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$),表明该地区降水受蒸发影响。各处理下的土壤水分线位于当地降水线右下侧,表明该地区的土壤水分来自降水,并经历了与蒸发相关的富集过程。

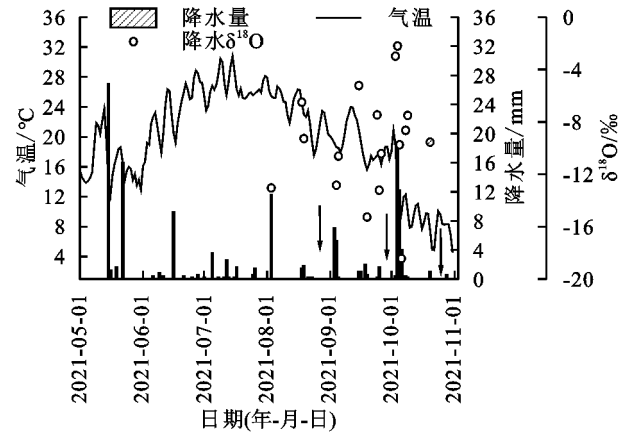


图 1 降水量、降水稳定氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$)及日平均气温变化

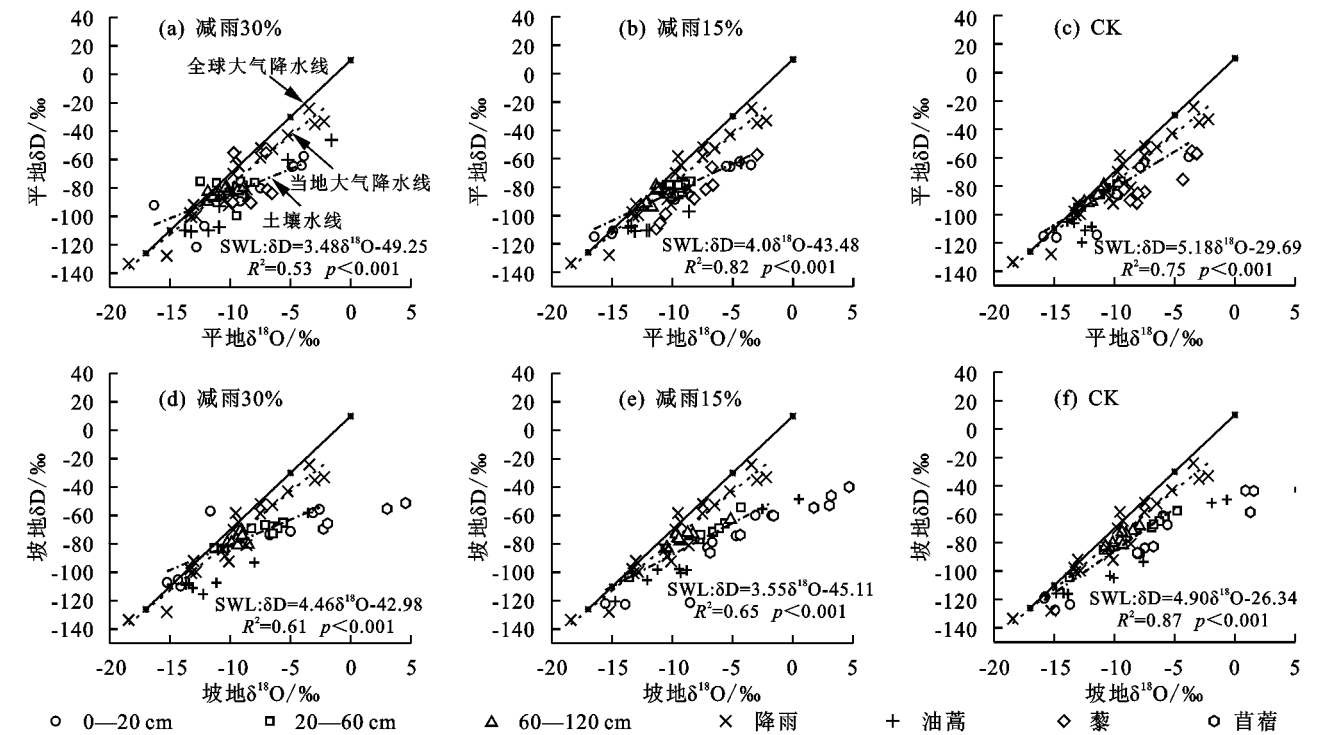
2.2 不同干旱胁迫处理土壤含水量与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

不同干旱胁迫下样地的土壤含水量随土层深度和时间的变化见图 3。减雨 30%、减雨 15% 及 CK 等 3 个处理的土壤水分含量随时间变化规律一致,且主要受降水与蒸发等因素的共同影响。大致可分为 3 个区间:浅层(0—20 cm)土壤水分含量受蒸发与降水影响较大,并且随时间变化有较明显的波动;中层(20—60 cm)土壤水分含量受蒸发与降水的影响较小,其随时间变化的波动程度相较于浅层较小;深层(60—120 cm)土壤水分含量的变化趋势较稳定,且各处理深层土壤含水量均处于较低水平。平地,减雨 30% 与减雨 15% 处理下,0—120 cm 土层平均土壤含水量相较于 CK 分别减少 28.6% 和 18.9%;坡地,减雨 30% 和减雨 15% 处理下,0—120 cm 土层平均土壤含水量相较于 CK 分别减少 34.3% 和 24.6%。

7,8,9 月水源补给较少,减雨 30%、减雨 15% 及 CK 等 3 个处理的土壤含水量均较低且相对稳定,随着 10 月雨水的大量补给,浅层与中层土壤含水量明显增高,且达到最高值。深层土壤含水量在不同的采样日期之间均处于较低水平。

各处理下 $\delta^{18}\text{O}$ 变化规律一致,因此将 3 个处理一同分析。减雨 30%、减雨 15% 及 CK 土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随采样时间与土层深度的变化情况见图 4。受蒸发富集以及近期贫化降水同位素值的影响,浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化明显,且与其他土层具有显著差异($p <$

0.01)。中层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动幅度较浅层较 小。深层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在各月间无显著变化。



注:全球大气降水线用实线表示,当地大气降水线用短线表示,土壤水线用短点划线表示; $\delta^{18}\text{O}$ 表示氧稳定同位素比率; δD 表示氢稳定同位素比率。

图 2 2021 年研究区大气降水、土壤水分和植物水的 δD — $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

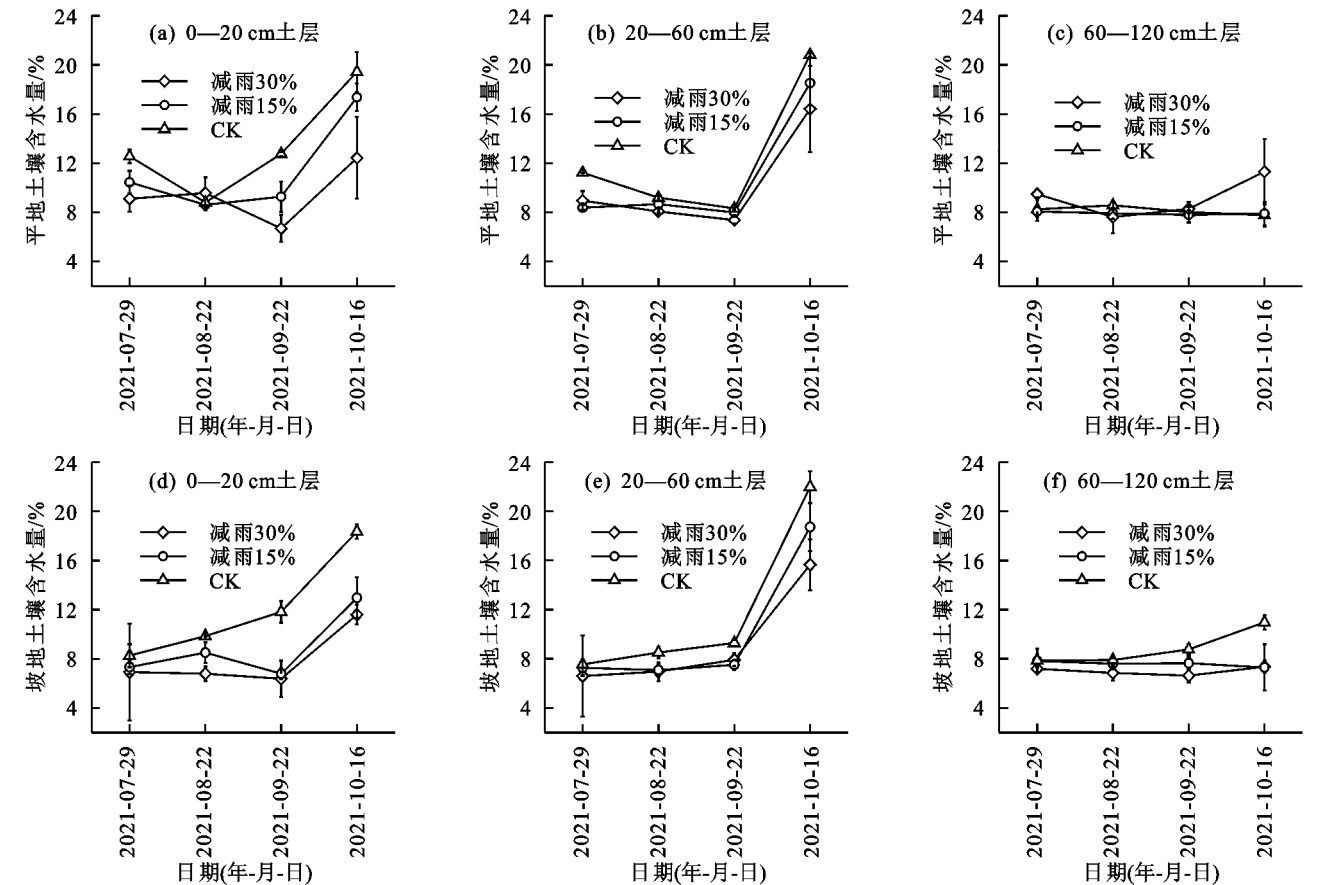


图 3 不同干旱胁迫下样地土壤含水量时空变化

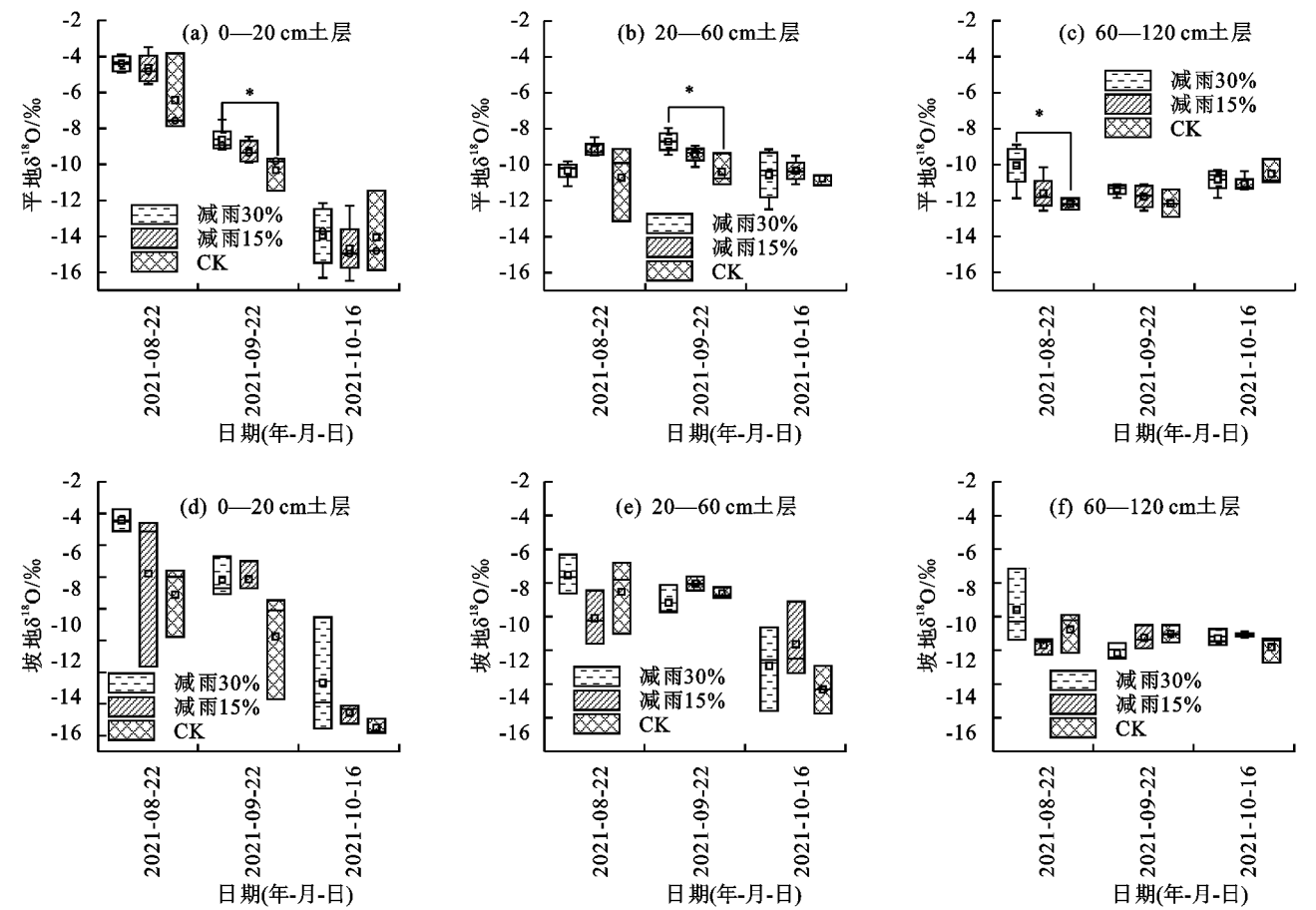
2.3 各干旱胁迫处理植物茎稳定同位素与土壤水分利用来源

基于 MixSIAR 模型的水源贡献结果见图 5。平

地,浅层土壤水分对油蒿的贡献最大(减雨 30%、减雨 15%及 CK 处理下浅层土壤水对油蒿的贡献率分别为 48.2%,52.7%,57.6%);减雨 15%与 CK 处理

下浅层土壤水对藜的贡献率最大(分别为 49.6%和 53.6%),减雨 30%处理下中层土壤水对藜的贡献率最大(43.5%)。减雨 30%处理下,油蒿与藜在 8 月的主要水分来源均来自于浅层(63.4%和 40.4%),油蒿在 9 月与 10 月分别主要利用来自深层与浅层的土壤水(53.6%和 57.8%),藜则主要利用来自于浅层与中层的土壤水(44.8%和 55.4%);减雨 15%处理下,油蒿与藜在 8 月主要吸收浅层土壤水(72.2%和 72.3%),

油蒿在 9 月主要利用来自深层的土壤水(50.5%),而在 10 月则主要利用浅层土壤水(61.4%),藜在 9 月与 10 月分别利用浅层与中层土壤水(53.1%和 44.1%);CK 处理下,油蒿在 8 月主要吸收浅层土壤水(85.2%),9 月主要吸收深层的土壤水(50.1%),10 月对浅层土壤水的吸收增加至 62.3%。藜在 8 月与 9 月主要吸收浅层土壤水(86.3%和 46%),10 月主要吸收深层土壤水(50.9%)。



注:框图中□为平均值;—为中位值;箱体为 25%~75%;工为 1.5IQR 内的范围;* 表示极显著相关($p<0.01$)。

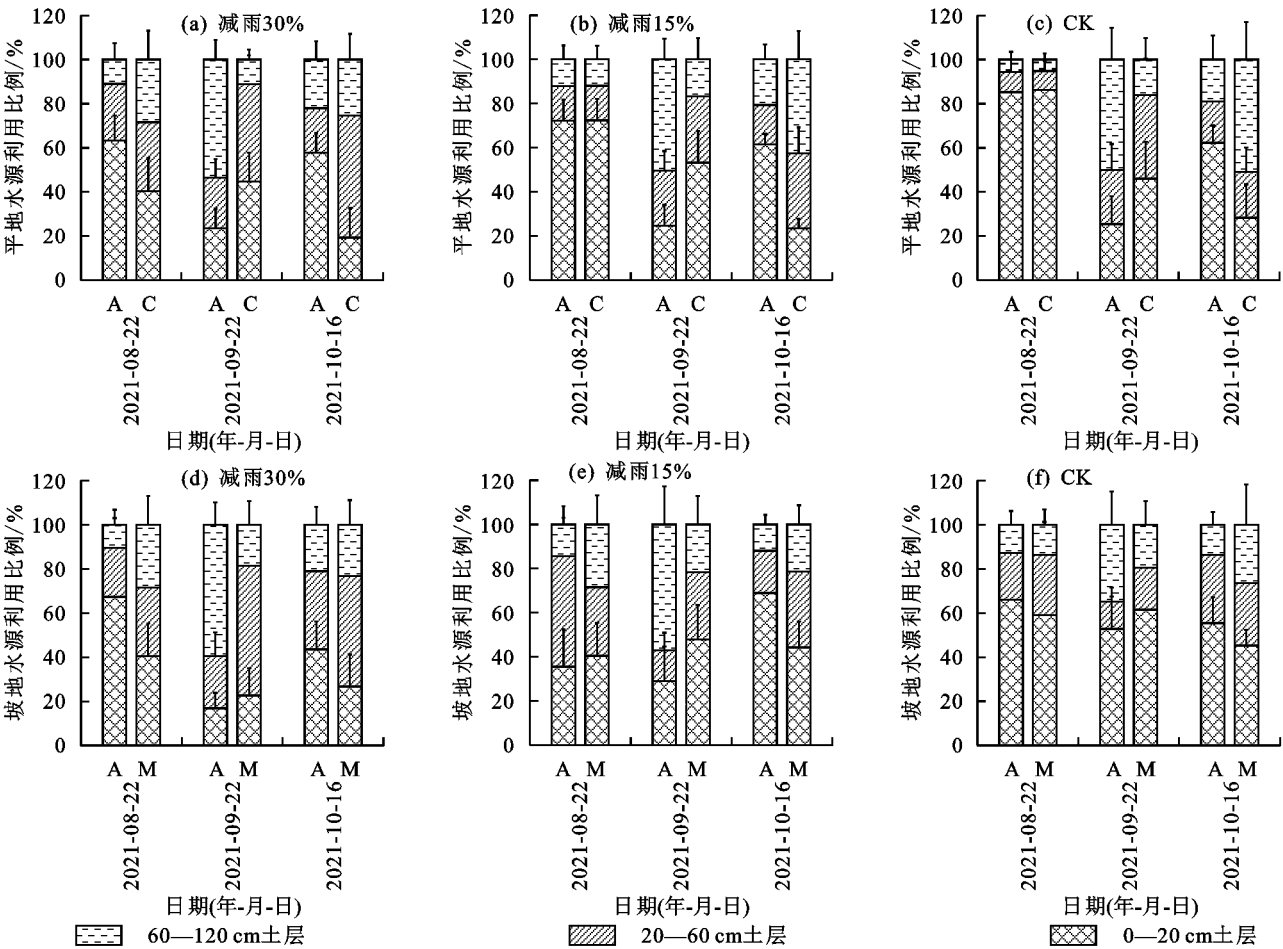
图 4 不同土层深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

坡地,减雨 30%、减雨 15%与 CK 处理下的油蒿主要利用浅层的土壤水,其中各处理贡献率分别为 42.5%,44.5%,58.1%。减雨 15%与减雨 30%处理下的苜蓿主要利用中层土壤水(40.9%和 46.7%),对照组的苜蓿主要利用浅层土壤水(53.8%)。减雨 30%处理下,油蒿在 8 月主要利用浅层土壤水(67.4%),9 月主要利用深层土壤水(59.5%),而在 10 月主要来自浅层土壤水分(43.5%)。苜蓿在 8 月主要利用浅层土壤水(40.4%),在 9 月与 10 月则主要利用中层土壤水(58.9%与 50.0%);在减雨 15%处理下,8 月,油蒿与藜的水分利用均主要来自于中层土壤水(50.0%),苜蓿主要利用浅层土壤水(40.4%)。9 月,油蒿主要利用深层土壤水(57.1%),苜蓿主要利用浅层土壤水(47.9%)。10 月,油蒿与苜蓿分别利用来自浅层与中

层的土壤水(68.9%和 61%);CK 处理下,油蒿与苜蓿在 8,9,10 月均主要利用来自于 0—20 cm 土层的土壤水。其中浅层土壤水在 8,9,10 月对油蒿的贡献率分别为 66%,52.8%,55.4%,对苜蓿的贡献率分别为 59.4%,61.5%,40.7%;中层土壤水在 8,9,10 月对油蒿的贡献率分别为 21.2%,12.3%,30.9%,对苜蓿的贡献率分别为 27.3%,19.1%,25.5%;深层土壤水在 8,9,10 月对油蒿的贡献率分别为 12.8%,34.9%,13.7%,对苜蓿的贡献率分别为 13.7%,19.4%,23.8%。

3 讨论

土壤含水量及土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值因受降水补给及蒸散损失的影响^[21]而不断波动(图 3)。土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈随着土层深度的增加而迅速减小并最终趋于稳定的趋势(图 4),前人^[17,25-26]的研究中也发现类似结果。



注：A 为油蒿；C 为藜；M 为苜蓿；误差棒为标准误差。

图 5 不同干旱胁迫处理下植被对 3 个土层潜在水源利用比例的时间变化

因浅层土壤通常伴有强烈的蒸发作用发生,表现为浅层土壤含水量低,且 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值较高,这与本研究 10 月浅层土壤水分含量高但土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低的趋势相反(图 4)。这是由于采样前期连续性降雨, $\delta^{18}\text{O}$ 受雨水中偏负同位素组成的影响。与此相似,吕婷等^[16]关于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的研究中也出现不同土层土壤水分含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 变异幅度不同的现象,并随着土层的增加,变异幅度减弱,最后趋于稳定。不同干旱程度下的土壤含水量及其 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异明显,依据稳定同位素质量守恒定律,这意味着植被群落在遭遇干旱胁迫时吸收来自不同土层深度的水分,且主要吸收利用的水分来源不断变化。

在群落的演替与发展过程中,水热资源是决定物种分布的关键因子^[27]。本研究发现,未经减雨处理的油蒿对浅层土壤水分的利用程度高于苜蓿与藜,苜蓿与藜对深层土壤水分的利用比例高于油蒿,且 3 种植物均能保持协调生长。这与古丽哈娜提·波拉提别克等^[9]得出天山林区灌木群落主要树种在时间和空间上有效分割灌木丛水源,从而减缓水分资源的竞争压力,促进物种间共存的结果一致。但发生干旱胁迫时可能例外,出于对求生的本能,水资源稀缺时的

植物对可利用水分的竞争格外激烈^[18]。本研究中苜蓿根系相当发达,且大部分细根分布于地表 0—80 cm 土层之中,油蒿、藜等植物大部分细根分布于地表 0—60 cm 土层之中,并呈现出减雨处理下植被分布在浅层的细根少于对照组分布于浅层的细根,分布在中层、深层的细根多于对照,此现象在减雨 15% 处理下较为明显(图 6),可能是由于减雨 30% 处理引起的极端干旱环境迫使植物部分根系发生不可逆转的栓塞甚至死亡^[28]。植被的生存环境不同,其竞争对象与竞争程度也不尽相同,推测这可能是植物对干旱胁迫程度的变化所作出的适应性改变。傅思华等^[29]研究古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落的水分来源时发现,梭梭根系具有二态性,5 月主要利用浅层(20—40 cm)、深层(100—300 cm)土壤水及地下水,而 8 月主要利用深层(160—350 cm)土壤水及地下水,这一研究发现验证上述推测结果。已有研究^[30-31]也发现,干旱区的土壤水分具有一定异质性,植物通过延长根系至深层土壤以响应根区土壤水分的异质性,从而延长在旱季生长的这一现象。

平地与坡地,浅层土壤水分对油蒿生长发育的贡献最大,且减雨 30%、减雨 15% 与对照的贡献率依次递减(图 5),可能是油蒿受到干旱胁迫从而调整自身的水分

利用策略,选择较深层水源维持生长,且胁迫越强,植被对深层水分的利用越大。减雨 15%与对照处理下浅层土壤水对藜的贡献率最大,分别为(49.6%和 53.57%),减雨 30%处理下中层土壤水对藜的贡献率最大(43.53%),表明藜在遭遇干旱胁迫时,主要的水分利用来源由浅向深转换。坡地,减雨 15%与减雨 30%处理下的苜蓿主要利用中层土壤水(40.87%和 46.67%),对照组的苜蓿主要利用浅层土壤水(53.77%)。说明苜蓿在受到干旱胁迫加剧时表现出水源利用的转化特征。黄土高原六道沟流域的沙柳(*Salix cheilophila*)与柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)在应对干旱时也出现类似结果,5—6 月二者均主要利用深层土壤水,7—9 月柠条锦鸡儿主要

水分来源为表层与浅层土壤水,而沙柳主要水分来源于浅层^[26]。藜与苜蓿在干旱环境下,主要利用中层与深层土壤水,油蒿则对浅层土壤水利用较多,说明当油蒿与苜蓿或者藜同时利用剖面重叠区域的土壤水分时,油蒿对上层水分更具有竞争优势。李巧燕等^[32]在鄂尔多斯高原草地灌丛化阶段研究发现相似情况,草本植物对上层土壤剖面的水分更具竞争优势,而灌木主要利用中层和深层土壤水分。植物自身具有向水性、水力再分配等能力,可通过调整土壤水分吸收深度以应对极端干旱等气候事件^[19]。因此,发生干旱时,水分来源能灵活转化于不同土层土壤水的植物,对于干旱与半干旱环境具有较高的适应能力。

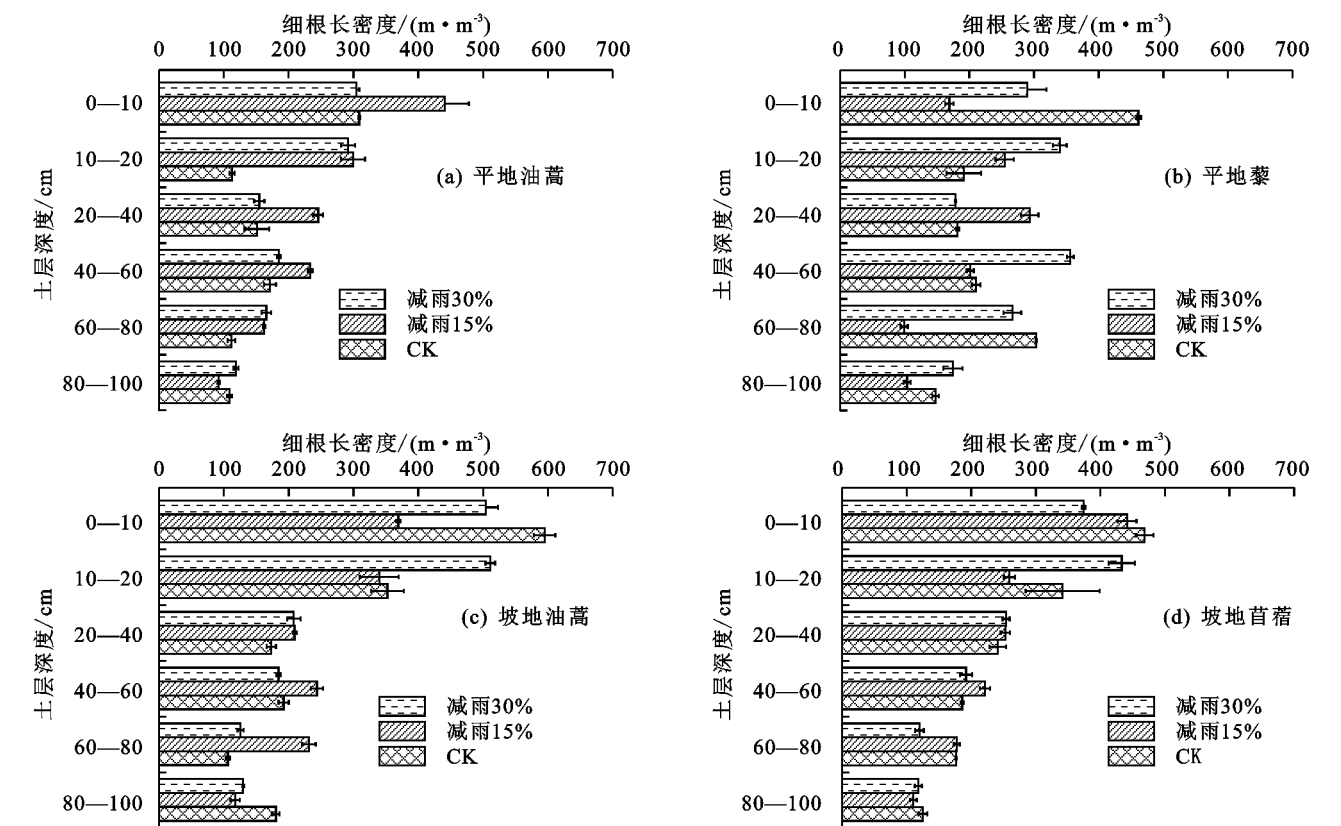


图 6 不同干旱胁迫下植物细根根长密度随着土层深度的变化特征

4 结论

(1)研究区大气降水线($\delta D=6.95\delta^{18}O-8.394.85$, $R^2=0.921$, $p<0.001$)的斜率与截距均小于全球大气降水线,表明研究区受干旱与强烈蒸发的影响,且降水不足,重同位素发生富集。土壤水分线位于当地降水线右下侧,表明该地区的土壤水分主要来自降水,并经历与蒸发相关的富集过程。

(2)植被根系对干旱引起的浅层土壤含水量变化最为敏感($p<0.05$),当浅层土壤含水量不足时,植被根系可通过吸收更深层的土壤水以维持自身蒸腾耗水的需求。3 种典型植物在遭遇干旱胁迫时,其水分利用来源均可灵活转换于不同土层之间,呈浅层土壤水分利用比例减少,中层与深层土壤水分利用比例增加的规律,且随干旱胁迫程度增大愈加明显。

(3)平地,减雨 30%、减雨 15%及 CK 处理下油蒿均主要利用浅层土壤水,而藜分别主要利用来自中层、浅层与浅层土壤水;坡地,减雨 30%、减雨 15%及 CK 处理下油蒿均主要利用浅层土壤水,而苜蓿分别主要利用来自中层、中层与浅层土壤水,3 种典型植物水分利用模式反映它们可通过可塑性转换水分来源以应对干旱胁迫,并在空间上分割群落水源以有效缓解对水分资源的竞争压力,从而通过在水分资源利用上的生态位分化促进物种间的共存。

参考文献:

[1] 刘自强,余新晓,贾国栋,等.北京土石山区典型植物水分来源[J].应用生态学报,2017,28(7):2135-2142.
[2] Chen L X, Zhang Z Q, Zeppel M, et al. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semi-arid plantation[J].International Journal of Biometeorol-

- ogy, 2014, 58(7): 1569-1581.
- [3] IPCC. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[S]. UK: IPCC, 2019: 5-15.
 - [4] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
 - [5] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 236-244.
 - [6] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. Temperature and precipitation changes over the Loess Plateau between 1961 and 2011, based on high-density gauge observations[J]. Global and Planetary Change, 2015, 32(1): 1-10.
 - [7] Palacio S, Montserrat-Martí G, Ferrio J P. Water use segregation among plants with contrasting root depth and distribution along gypsum hills[J]. Journal of Vegetation Science, 2017, 28(6): 1107-1117.
 - [8] 许素寒, 朱雅娟, 吴彩霞, 等. 鄂尔多斯高原 3 个水土保持树种的水分利用策略[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2885-2892.
 - [9] 古丽哈娜提·波拉提别克, 常顺利, 李红梅, 等. 天山林区 4 种主要灌木夏季水分来源差异[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 1-11.
 - [10] 赵西宁, 李楠, 高晓东, 等. 基于¹⁸O 示踪的不同树龄枣树土壤水分利用特征分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 135-142.
 - [11] 邓文平, 章洁, 张志坚, 等. 北京土石山区水分在土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中的稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2171-2178.
 - [12] 丁丹, 贾文雄, 马兴刚, 等. 祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1348-1356.
 - [13] 张欢, 曹俊, 王化冰, 等. 张北地区退化杨树防护林的水分利用特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1381-1388.
 - [14] 朱雅娟, 赵雪彬, 刘艳书, 等. 青海共和盆地沙柳 (*Salix psammophila*) 和乌柳 (*Salix cheilophila*) 的水分利用过程[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 281-287.
 - [15] Wu H W, Li J, Zhang C C, et al. Determining root water uptake of two alpine crops in a rainfed cropland in the Qinghai Lake watershed: First assessment using stable isotopes analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 113-121.
 - [16] 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.
 - [17] 周艳清, 高晓东, 王嘉昕, 等. 柴达木盆地灌区枸杞根系水分吸收来源研究[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(2): 400-409.
 - [18] 付昕宇, 刘华民, 于晓雯, 等. 岱海湖滨带湿地植物水分来源及利用策略研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 42-49.
 - [19] 张行, 梁小英, 刘迪, 等. 生态脆弱区社会-生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466.
 - [20] Gao X D, Li H C, Zhao X N. Impact of land management practices on water use strategy for a dryland tree plantation and subsequent responses to drought[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(1): 439-452.
 - [21] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. Peer J, 2018, 6: e5096.
 - [22] Wang J, Fu B J, Wang L X, 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: e108020.
 - [23] Zhao Y L, Wang Y Q, He M N, et al. Transference of *Robinia pseudoacacia* water-use patterns from deep to shallow soil layers during the transition period between the dry and rainy seasons in a water-limited region[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 457: e1127.
 - [24] Barbeta A, Jones S, Clav'e L, et al. Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a riparian forest [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(4): 2129-2146.
 - [25] Cao X Q, Yang P L, Engel B A, et al. The effects of rainfall and irrigation on cherry root water uptake under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 197: 9-18.
 - [26] 杨国敏, 王爱, 王力. 六道沟流域 2 种典型灌木不同季节水来源及利用效率[J]. 西北植物学报, 2018, 38(1): 140-149.
 - [27] 闫利军, 米福贵, 郭郁频, 等. 草地早熟禾幼苗对矿井再生水灌溉的生理响应[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 1031-1037.
 - [28] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, et al. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees[J]. New Phytologist, 2017, 213(2): 584-596.
 - [29] 傅思华, 胡顺军, 李浩, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 群落优势植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1024-1032.
 - [30] 高晓东, 黄土丘陵区小流域土壤有效水时空变异与动态模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院 (教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
 - [31] Zhou H, Zhao W Z, Zheng X J, et al. Root distribution of *Nitraria sibirica* with seasonally varying water sources in a desert habitat [J]. Journal of Plant Research, 2015, 128(4): 613-622.
 - [32] 李巧燕, 来利明, 周继华, 等. 鄂尔多斯高原草地灌丛化不同阶段主要植物水分利用特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 89-96.