

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.019

引用格式:马海涛,马瑞,韩梦洁,等.宁夏罗山不同海拔高度山地草原优势植物水分利用来源研究[J].草地学报,2026,34(6):2161—2172

MA Hai-tao, MA Rui, HAN Meng-jie, et al. Study on water use strategies of dominant plants in mountainous grasslands at different altitudes in Luoshan, Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2161—2172

宁夏罗山不同海拔高度山地草原优势植物水分利用来源研究

马海涛^{1,2,3}, 马瑞⁵, 韩梦洁^{1,2,3}, 田小龙^{1,2,3}, 马海燕^{1,2,3}, 马红彬^{1,2,3,4},
沈艳^{1,2,3,4}, 王国会^{1,2,3,4*}

(1. 宁夏大学农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学宁夏草牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021; 5. 宁夏罗山国家级自然保护区管理局, 宁夏 吴忠 751999)

摘要:本研究以宁夏罗山自然保护区温性草原不同海拔优势植物(海拔2374 m—藁草(*Carex aridula*)、海拔2132 m—大针茅(*Stipa grandis*)、海拔1823 m—大针茅、海拔1566 m—短花针茅(*Stipa breviflora*))为对象,采集优势植物的木质部水、降水、0~100 cm土层的土壤水进行稳定氢(氘- δD)氧($\delta^{18}O$)同位素的测定,结合贝叶斯MixSIAR混合模型定量分析植物对潜在水源的利用率。结果表明:土壤水 $\delta^{18}O$ 空间分异显著,随海拔升高总体减小,高海拔土壤水同位素值显著低于低海拔。不同海拔优势植物在生长季(6—7月)的水分利用模式呈现显著差异。高海拔藁草由6月主要吸收40~60 cm(23.8%)转向7月0~20 cm(26.9%);中海拔大针茅从6月对0~100 cm土壤水分吸收比例范围为15.9%~22.3%,转为7月集中于0~40 cm;低海拔短花针茅稳定利用0~20 cm土层(27.8%~32.4%)。本研究为罗山温性草原优势物种水分利用与水分平衡提供了重要的科学依据。

关键词:温性山地草原;海拔高度;优势植物;氢氧同位素;水分利用来源

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2161-12

Study on Water Use Strategies of Dominant Plants in Mountainous Grasslands at Different Altitudes in Luoshan, Ningxia

MA Hai-tao^{1,2,3}, MA Rui⁵, HAN Meng-jie^{1,2,3}, TIAN Xiao-long^{1,2,3}, MA Hai-yan^{1,2,3}, MA Hong-bin^{1,2,3,4},
SHEN Yan^{1,2,3,4}, WANG Guo-hui^{1,2,3,4*}

(1. Key Laboratory of Innovative High Efficiency Production Mode of Forage Grass, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 4. Cultivation Base of State Key Laboratory for Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 5. Ningxia Luoshan National Nature Reserve Management Bureau, Wuzhong, Ningxia 751999, China)

Abstract: This study was conducted in the temperate steppe of Ningxia Luoshan Nature Reserve. The dominant plant species at different altitudes were selected as research objects: *Carex aridula* at 2374 m, *Stipa grandis* at 2132 m and 1823 m, and *Stipa breviflora* at 1566 m. Xylem water from the dominant plants, precipitation, and soil water from the 0-100 cm layer were collected. The stable hydrogen (δD) and oxygen ($\delta^{18}O$) isotopic compositions were determined. The MixSIAR mixing model was employed to quantitatively analyze the

收稿日期:2025-09-16;修回日期:2025-12-07

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32301504);宁夏重点研发计划项目(2023BSB03072);宁夏罗山自然保护区第三次综合科考项目;宁夏自然科学基金项目(2023AAC05020)和宁夏青年科技人才托举工程培养项目资助

作者简介:马海涛(1999-),男,回族,宁夏银川人,硕士生研究生,主要从事草地生态、资源与环境方向研究,E-mail:1608562770@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: wanggh2022@nxu.edu.cn

utilization ratios of plants to potential water sources. The results showed that: (1) Soil water $\delta^{18}\text{O}$ exhibited significant spatial heterogeneity, generally decreasing with increasing altitude, with significantly lower isotopic values in soil water at high altitudes compared to low altitudes. (2) The water use patterns of dominant plants at different altitudes showed significant differences during the growing season (June-July). *Carex aridula* at high altitude shifted its main water absorption source from the 40-60 cm soil layer (23.8%) in June to the 0-20 cm layer (26.9%) in July. *Stipa grandis* at mid-altitude changed from absorbing water from all soil layers (0-100 cm) with proportions ranging between 15.9% and 22.3% in June to concentrating water uptake in the 0-40 cm layer in July. *Stipa breviflora* at low altitude stably utilized water from the 0-20 cm shallow soil layer, with a utilization proportion between 27.8% and 32.4%. This study provides an important scientific basis for understanding the water use strategies of dominant species and the water balance in the Luoshan temperate steppe ecosystem.

Key words: Temperate mountainous grassland; Altitude; Dominant plant; Hydrogen isotope; Water sources

群落中优势物种通常占据较大的生物量,可以反映生态系统功能和能量流动与物质循环^[1]。然而,温性草原的优势草本植物对环境因素变化较为敏感^[2],是衡量生态系统稳定性和恢复功能的有力指标^[3-4]。植物对土壤水分的利用来源是响应环境因子的重要生态适应机制。在干旱半干旱地区,降水作为土壤水分的主要补给来源,成为制约植被生长状态、群落分布格局及区域生物多样性的关键限制性因子。对于该类区域而言,草原是生态系统植被的重要组成形式,其水分利用状况可引发生态系统级联效应,进而对生物多样性、土壤碳氮循环、水文过程及生态系统服务产生深远影响。草地是干旱半干旱地区的主要生态系统类型,在防风固沙、水土保持和水源涵养等方面具有重要作用^[5-7]。干旱半干旱地区(降水量 200~500 mm)占全球陆地面积的 41%,其植被生长受水分胁迫显著制约。植物通过形态、生理和生态策略适应有限水资源,例如:在干旱半干旱降水梯度响应方面,短花针茅因形态和结构特征的影响具有稳定的水分利用效率;蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)的抗脱水性较强,具有较强的生态适应策略;甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)通过调解 $\delta^{13}\text{C}$ 值、脯氨酸含量使得水分利用效率最高;牛枝子(*Lespedeza potaninii*)有较强的渗透调节能力则表现出灵活的用水模式^[8]。典型优势群落植被影响着水分在土层上的分布及地表的蒸散状况,使土壤有效水向浅层分配。而不同的来源水分在土壤不同深度的分配以及入渗深度,可以决定地表植被的生活型,从而影响地表植被的建群种、优势种及草原的演替方向^[9]。植物水分来源和水源变化特征会因植物类型、生长季节和地理环境等不同而存在较大的差异。

氢氧同位素技术为研究植物水分利用特征提供可靠且准确的方法,可以定量、直观地揭示传统

生态学方法无法解决的问题,并得到了广泛的应用和发展。植物通过根系吸收土壤水分过程中氢氧同位素不发生分馏^[10-12],因此对比植物木质水分和土壤水分中的氢同位素(δD)或氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)可以定量分析出植物水分利用特征。研究表明氢同位素(δD)和氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)存在着明显的海拔效应,随海拔升高而逐渐减小^[13]。植物在不同海拔梯度下的水分利用策略呈现出适应性分化且受到多重环境因子及植被特性的共同调控,低海拔地区植物常表现出对浅层土壤水的依赖,而高海拔物种则倾向于利用深层土壤水或融雪水,如庐山地区利用氢氧同位素技术研究发现,低海拔松树在雨季后期转向深层土壤水,而高海拔同类物种则更多依赖中层土壤水,这种差异与根系分布和土壤水分动态密切相关^[14]。在降雨充足的情况下油蒿对浅层土壤水的利用比例最高,主要利用 0~50 cm 土层中的水源;在年降水量相对较低情况下,主要利用水源为深层土壤水和地下水^[15]。在荒漠草原研究发现,在降雨较少时期牛枝子、远志(*Polygala tenuifolia*)、赖草(*Leymus secalinus*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、短花针茅主要利用 5~20 cm, 40~60 cm 两个土层的土壤水;在降雨较多时期种牛枝子、远志、赖草、银灰旋花、短花针茅主要吸收 5~20 cm 土层土壤水^[16]。不同的海拔高度因降雨、温度驱动土壤水分和优势物种的组成有着显著性影响。青海湖流域不同海拔高度土壤水分,随海拔高度增加,流域土壤含水量不断增加且在生长季旺季增加的最为显著^[17]。

在宁夏贺兰山不同海拔梯度下水分利用策略研究发现,土壤含水量随着海拔高度的增加逐渐增加^[18]。当前学界对于干旱半干旱地区植物水分利用来源的研究已取得一定进展,相关成果多聚焦于典型草原、荒漠草原等均质生境,或针对灌木、一年生

草本等特定生活型植物的水分适应机制展开。然而对山地草原作为该区域兼地形复杂性与植被异质性的特殊群落类型,尤其针对丛生禾草、莎草科等关键群系,其水分利用来源如何响应海拔梯度变化及土壤水分动态,尚不明确。这一认知缺口不仅制约了我们对山地生态系统水文过程与植物适应性机制的深入理解,也影响了该地区植被恢复与水资源管理来源的科学制定。从而难以支撑山地草原生态系统水分管理与植被恢复的实践需求,亟待开展针对性的深入探究。罗山自然保护区是我国西北部温带草原与荒漠分界线,是宁夏“三山”生态屏障防护体系的重要组成部分,也是宁夏中部干旱带上唯一的水源涵养林区和区域绿色生态屏障。因此,本研究以宁夏罗山自然保护区温性草原不同海拔梯度的优势植物为研究对象,开展优势植物土壤水分利用特征及土壤土层吸收比例的特点,揭示罗山保护区温性草原优势植物水分利用来源,以期罗山山地草原植被水分利用及其生态水文过程研究提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于宁夏罗山国家级自然保护区(37°11′~37°25′ N, 106°04′~106°24′ E),属于宁夏回族自治区吴忠市同心县和红寺堡开发区境内,位处于草原与荒漠的过渡带,海拔 1566.0~2374.0 m,总面积 33 710.0 hm²,由南北走向的大、小罗山两个山体构成(图1)。气候为温带干旱大陆性气候,干燥少雨。年平均日照 2881.5 h,年平均气温 8℃~10℃。年平均降雨量为 261.8 mm,降雨量主要集中在 7—9 月,约占全年降雨量 60%(图2)。年平均蒸发量为 2460 mm。试验区土壤主要为灰钙土,主要分布植物物种有大针茅(*Stipa grandis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、著状亚菊(*Ajania achilleoides*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)。

1.2 样品采集与测定

基于团队前期对宁夏罗山植被垂直分布格局的调查,综合考虑植物群落的典型性,2023年4月在宁夏罗山自然保护区,沿海拔分布建立调查及取样

线。选取如图1所示随海拔梯度逐层降低的4种优势植物群落:T₁(海拔 2374 m)优势植物—藁草、T₂(海拔 2132 m)优势植物—大针茅、T₃(海拔 1823 m)优势植物—大针茅、T₄(海拔 1566 m)优势植物—短花针茅作为试验样地。在每个研究区布设3个样地,每个样地间隔 50 m 以上,并在每个样地内随机设置3个 1 m×1 m 的草本样方。

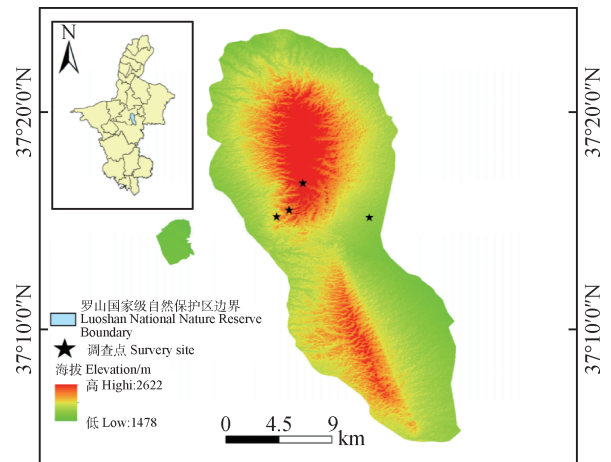


图1 试验样地海拔高度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elevation in the experimental plots

(1)植物样的采集:海拔 T₁~T₄ 的优势植物分别为藁草、大针茅、大针茅、短花针茅,于 2023 年 6 月 9 日,7 月 13 日均在雨后两天内在每个试验小区固定样方附近选取 10 株优势草本植物,剪取长度 5 cm 完全硬化的茎干,迅速将其放入小瓶(30 mL)中保存,用封口膜密封。

(2)土壤样品的采集:植物样品采集的同时在内优势草本植物冠层下,选择 3 个土壤取样点。采用直径 4 cm 土钻收集 0~100 cm 的土壤,每 20 cm 一层。将各点土壤样品放入小瓶(30 mL),用封口膜密封。

(3)降水样的采集:在每次降水事件发生时进行降水样品的收集,且样品均用 0.22 m 孔径的过滤器过滤。

试验区内所有采集的植物、土壤和降水样品均放入装有冰袋的冷冻箱中,带回实验室并保存在 -20℃ 冰箱中,以提取植物的木质部水分。最后采用液态水同位素分析仪(LGR912-0008, Los Gatos Research, Inc, USA)测定提取的土壤水样品和降水样品的稳定氢氧同位素(δD 或 δ¹⁸O)比值。生长季内在试验区内采用标准雨量计(DJ-0359, 点将科技, 上海, 中国)收集降雨和空气温度数据,详细信息见图2。

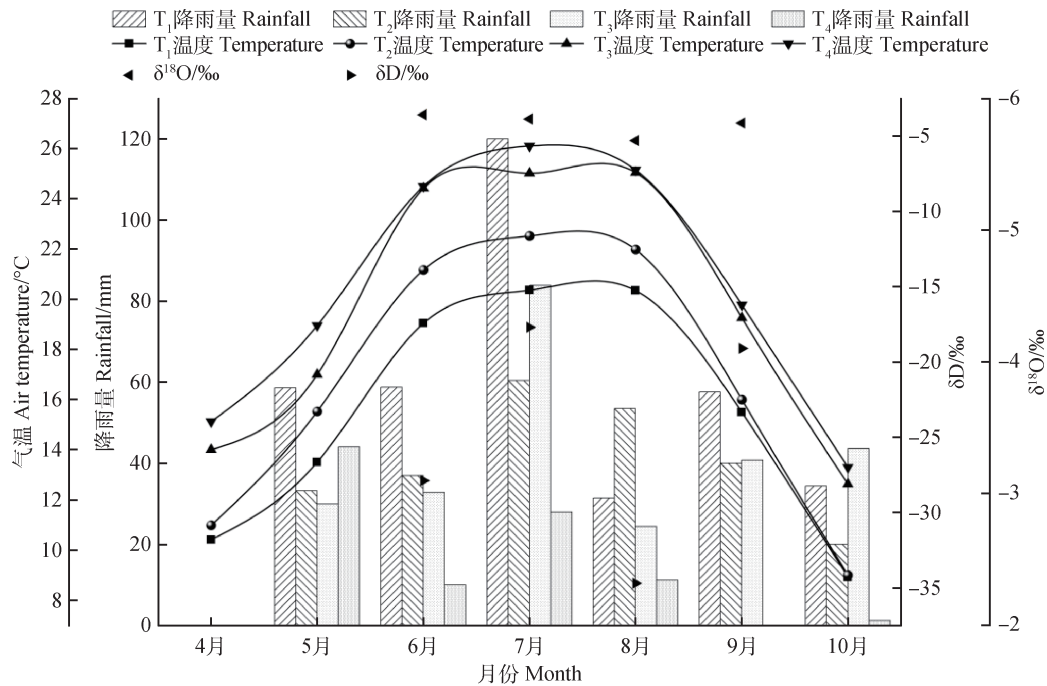


图2 研究区气温、降雨量和降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的变化

Fig. 2 Changes in temperature, rainfall, and precipitation δD and $\delta^{18}O$ in the study area

1.2.1 土壤水分特征的测定 2023年6月5,9,20日,7月5,13,20日在每个试验小区固定草本监测样方外按“S”型设置5个样点,利用土钻(直径4 cm)采集0~100 cm土壤样品,每20 cm一层。采用烘干法将土壤用烘箱在105℃下烘干至恒重测定土壤含水量。

1.3 稳定同位素分析

采用水分真空抽取系统(LI2000,五通道抽提,北京,中国)提取植物水和土壤水。植物水氢(δD)氧($\delta^{18}O$)同位素测定采用稳定同位素比值仪器(Isoprime100, Isoprime Limited, UK)测定植物水样品的稳定同位素比值;土壤水氢氧同位素测定采用同位素质谱仪(Isotope Ratio MS, DELTA Q, 上海, 中国)测定土壤水的氢氧同位素组成。

稳定同位素比值计算如下:

$$\delta^{18}O \text{ 或 } \delta D = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}$$

式中, δD 或 $\delta^{18}O$ 是样品的氢或氧的同位素值, R_{sample} 是采集样品中氢(氧)的重同位素与轻同位素的丰度之比, R_{standard} 为是VSOMW中氢(氧)的重同位素与轻同位素的丰度之比。 δD 值的测试误差不超过 $\pm 1\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 值的测试误差不超过 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

植物水分来源使用贝叶斯混合(MixSIAR)模型进行分析,将0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,

60~80 cm,80~100 cm土层土壤水氢氧同位素作为数据来源,薹草、大针茅、短花针茅的木质部水数据作为混合数据,分馏数据设置为“0”,马尔卡夫链蒙特卡罗运行步长设置为normal,模型误差选取“process only(N=1)”。在数据输出时必须检查模型是否收敛,不收敛则继续增加运行步长直至收敛使用Gelman-Rubin和Geweke测试模型是否收敛^[19]。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对同一海拔高度下不同土层土壤含水量的差异性进行分析;对不同海拔高度下优势物种的木质部水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 、土壤水分的差异性进行分析。所有数据统计分析在SPSS 26.0软件中完成,图表均用Origin2023软件绘图。所有图表数据均为平均差±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同海拔高度优势植物土壤水分变化

6月份,研究区降水呈现显著的海拔分异特征($P < 0.05$), T_1 海拔降水量(58.82 mm)显著高于 T_2 (37.06 mm), T_3 (32.84 mm)和 T_4 (10.39 mm)。降水量的显著差异直接影响了表层土壤水分(0~20 cm),表现为各海拔梯度该层土壤含水量均显著增加

($P < 0.05$)。在优势植物冠层下, 0~20 cm 土层土壤含水量亦存在显著海拔差异($P < 0.05$): T_2 (大针茅, 12.88%)与 T_3 (大针茅, 11.57%)显著高于 T_1 (藁草)和 T_4 (短花针茅)。20~80 cm 土层, 海拔 $T_1 \sim T_3$ 优势植物土壤含水量较高, 均显著高于海拔 T_4 , 80~100 cm 土层, 海拔 T_1, T_2 和 T_4 优势植物土壤含水量较高, 分别为 13.6%, 13.9% 和 7.6%, 均高于海拔 T_3 (含水量 6.5%), 提高了 1.1%~7.4% ($P < 0.05$)(图 3)。

7 月份, T_1 海拔降水量(120.03 mm)同样显著高于 T_2 (60.45 mm), T_3 (83.94 mm)和 T_4 (28.27 mm) ($P < 0.05$)。相应地, 在优势植物冠层下, 0~20 cm 土层土壤含水量表现出与降水一致的海拔格局。 T_1, T_2 和 T_3 海拔的土壤含水量均显著高于 T_4 ($P < 0.05$), 其增幅分别为 12.55%, 7.62% 和 5.90% (相对于 T_4)。40~80 cm 土层, 海拔 T_2, T_3 土壤含水量相较于 T_1 显著提高了 0.4%~4.3%, 0.3%~10.8%; 80~100 cm 土层, 海拔 T_2 含水量最高为 8.9%, 相较于海拔 T_1 和 T_4 提高了 0.8%~3.3%。

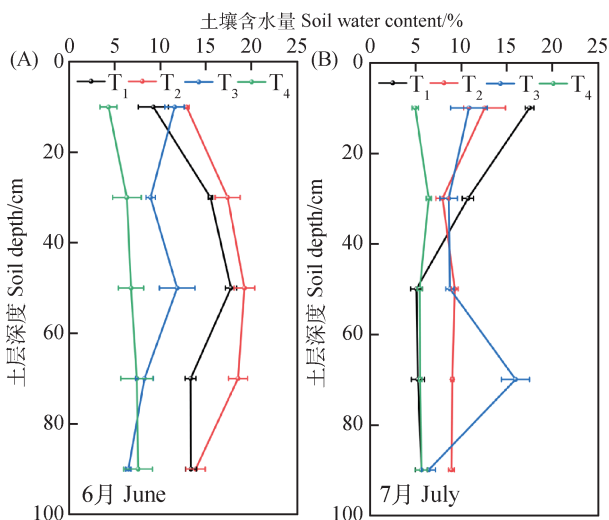


图 3 土壤含水量空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation characteristics of soil water content.

2.2 不同海拔高度优势植物水、土壤水和降水氢氧同位素的变化

在植物生长旺盛季, 6 月和 7 月, 对采集的降水、植物水、土壤水的氢氧稳定同位素值进行线性拟合, 结果表明, 大气降水氢氧稳定同位素的线性拟合曲线高于植物水和土壤水。由研究区降水同位素数据得出研究区大气降水线方程(LMWL)为: $\delta D =$

$7.44\delta^{18}O + 7.36$ ($R^2 = 0.6252, P < 0.001$), 其斜率小于全球大气降水线方程(GMWL): $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 说明研究区内降雨量少且蒸发量大(图 4)。其中海拔 $T_1 \sim T_4$ 降雨的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-5.81 ± 3.13)‰ ~ (-1.26 ± 0.22)‰, $\delta D = (-57.6 \pm 5.8)$ ‰ ~ (1.0 ± 0.1)‰。随海拔增加波动较为明显, 总体变化趋势为随海拔增加 $\delta^{18}O$ 逐渐减小。土壤水的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-14.35 ± 1.55)‰ ~ (3.89 ± 0.01)‰, $\delta D = (-110.5 \pm 20.2)$ ‰ ~ (-9.2 ± 0.1)‰。植物的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-10.93 ± 1.7)‰ ~ (-1.19 ± 1.03)‰, $\delta D = (-76.5 \pm 4.5)$ ‰ ~ (-14.8 ± 3.6)‰。通过对比植物水、土壤水线及同位素变化范围, 都分布土壤水附近, 说明优势植物在生长过程中主要利用土壤水。随着海拔高度的增加, 植物水、土壤水 $\delta^{18}O$ 值逐渐减小; 随着土层深度的增加, 土壤水 $\delta^{18}O$ 值呈现先减小后增加的趋势(图 5)。

将试验区植物生长旺盛期(6 月, 7 月)采集的植物水氢氧同位素, 对比分析发现, 植物水中 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ 之间存在交点, 这表明植物水分的稳定同位素的组成主要是受土壤水影响(图 5)。不同海拔优势植物冠层下 0~100 cm 土壤水 $\delta^{18}O$ 的垂直分布特征存在显著差异。6 月份, 海拔 $T_1 \sim T_4$ 优势植物 $\delta^{18}O$ 逐渐增加, T_1 优势植物-藁草 0~100 cm 土壤 $\delta^{18}O$ 值随深度增加总体呈现增加趋势; T_2 优势植物-大针茅 0~100 cm 土壤 $\delta^{18}O$ 呈现先减小后增加; T_3 优势植物-大针茅 0~100 cm 土壤 $\delta^{18}O$ 值随深度变化表现出明显的波动特征, 呈现“减小-增加-减小-增加”的交替变化模式; T_4 优势植物-短花针茅 0~100 cm 土壤 $\delta^{18}O$ 随深度增加总体呈现减小趋势。 T_1 主要吸收 40~60 cm 土层的土壤水分, T_2 优势植物主要吸收 0~20 cm 土层的土壤水分, T_3 优势植物主要吸收 0~20 cm, 80~100 cm 土层的土壤水分, T_4 优势植物主要吸收 20~40 cm 土层的土壤水分。7 月份, 海拔 $T_1 \sim T_3$ 优势植物 $\delta^{18}O$ 逐渐增加, T_1 优势植物-藁草 0~100 cm 土壤 $\delta^{18}O$ 值随深度增加呈现“低-高-低”的波动特征; $T_2 \sim T_4$ 优势植物-大针茅 0~100 cm 土壤 $\delta^{18}O$ 值随深度增加呈现逐层递减。海拔 $T_1 \sim T_3$ 优势植物主要吸收 0~20 cm 土层的土壤水分, 海拔 T_4 优势植物主要吸收 20~40 cm 土层的土壤水分(图 4)。

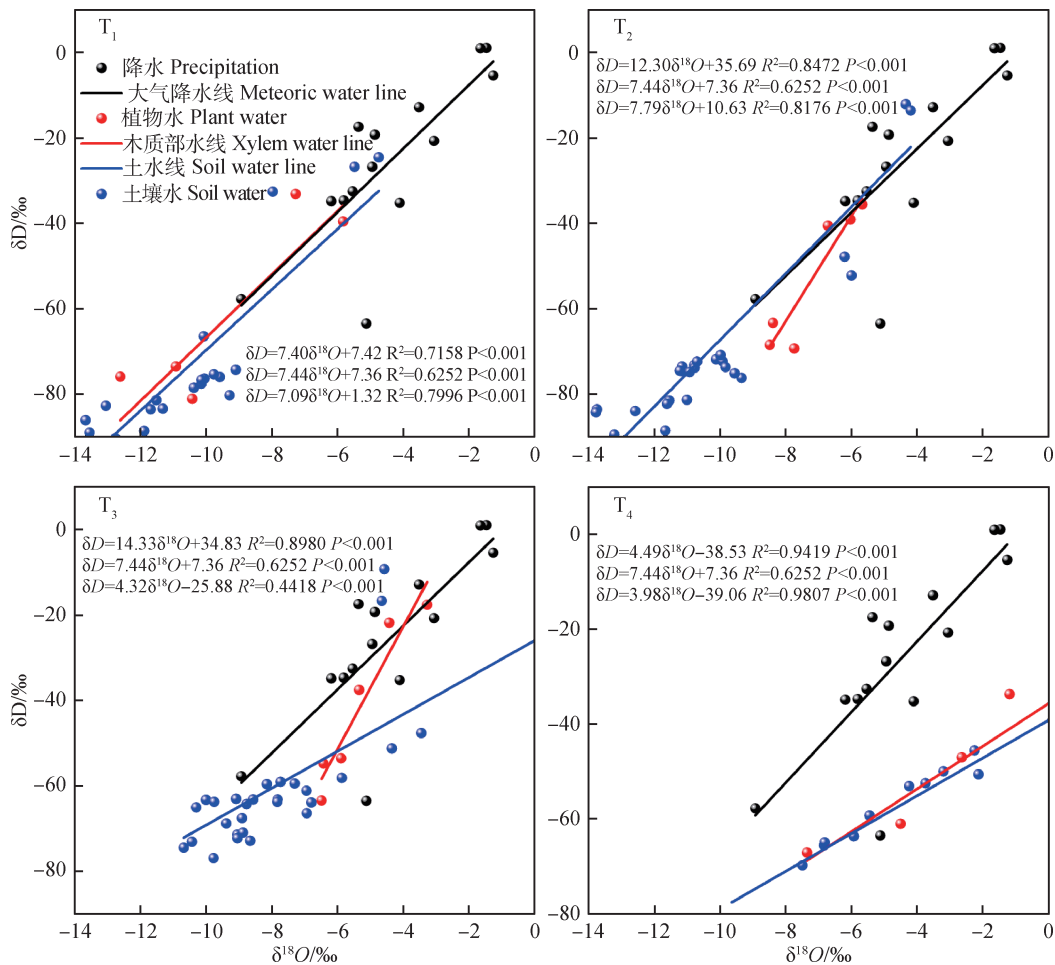


图4 土壤水和植物水与大气降水的分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of soil water and plant water and atmospheric precipitation

2.3 不同海拔高度优势植物水分利用来源

整合6月份,7月份数据结果并基于MixSIAR模型计算不同海拔优势植物对不同土层土壤水分吸收比例(图6)。6月份,海拔T₁优势植物主要吸收20~40 cm,40~60 cm土层的土壤水分,吸收比例分别为23.8%,22.6%;海拔T₂优势植物吸收0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm,80~100 cm土层的土壤水分,吸收比例分别为21.4%,15.9%,21.3%,20.5%,20.9%;海拔T₃优势植物吸收0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm,80~100 cm土层的土壤水分,吸收比例分别为21.1%,16.1%,22.3%,19.7%,20.7%;海拔T₄优势植物吸收0~20 cm土层的土壤水分,吸收比例为32.4%。7月份,海拔T₁优势植物吸收0~20 cm,40~60 cm土层的土壤水分,吸收比例分别为26.9%,21.1%;海拔T₂优势植物吸收0~40 cm土层土壤水分,吸收比例分别为28%,20%;海拔T₃优势植物吸收0~60 cm土层土壤水分,吸收比例为26.4%,19.8%,

19.7%;而海拔T₄优势植物吸收0~20 cm土层的土壤水分,吸收比例为27.8%。综上所述,6月份,海拔T₁~T₄优势植物可吸收利用多个土层的土壤水分;7月份,海拔T₁~T₄优势植物主要吸收利用土层(0~20 cm)的土壤水分。

3 讨论

3.1 海拔高度对土壤水分的影响

在本研究中,不同海拔生态系统中,优势物种形成受到多方面的影响因素,如环境因素、种间竞争和土壤含水量^[20-21]。其中土壤含水量影响最为剧烈,土壤水分是限制植被以及优势植物形成的重要因素,同时土壤含水量对植物的生长发育决定性作用^[22-23]。适宜的土壤含水量通常因植物种类、生育阶段以及土壤质地等因素而异。

本研究中,不同海拔高度对不同土壤深度的土壤含水量存在着显著影响,这明确揭示了海拔梯度

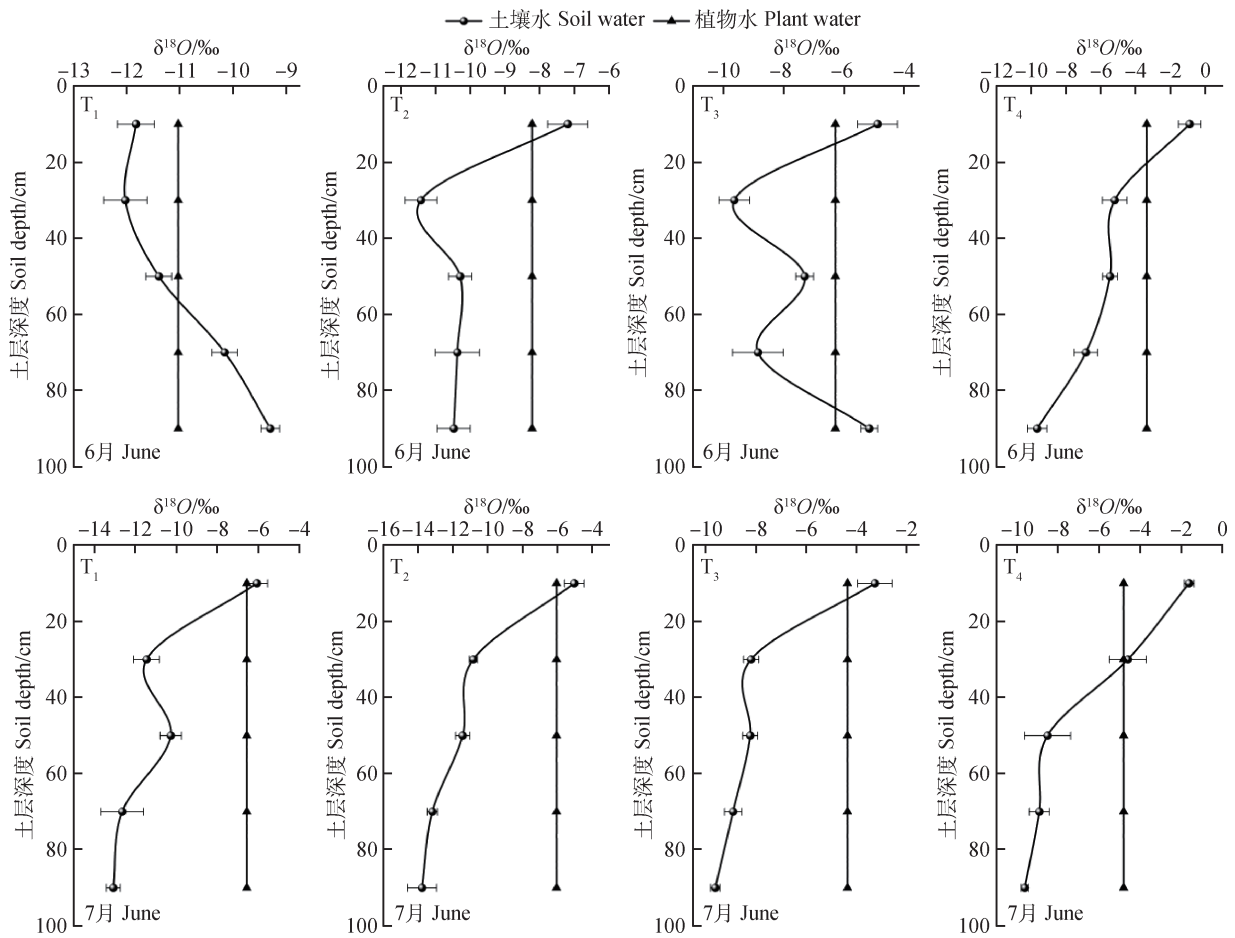
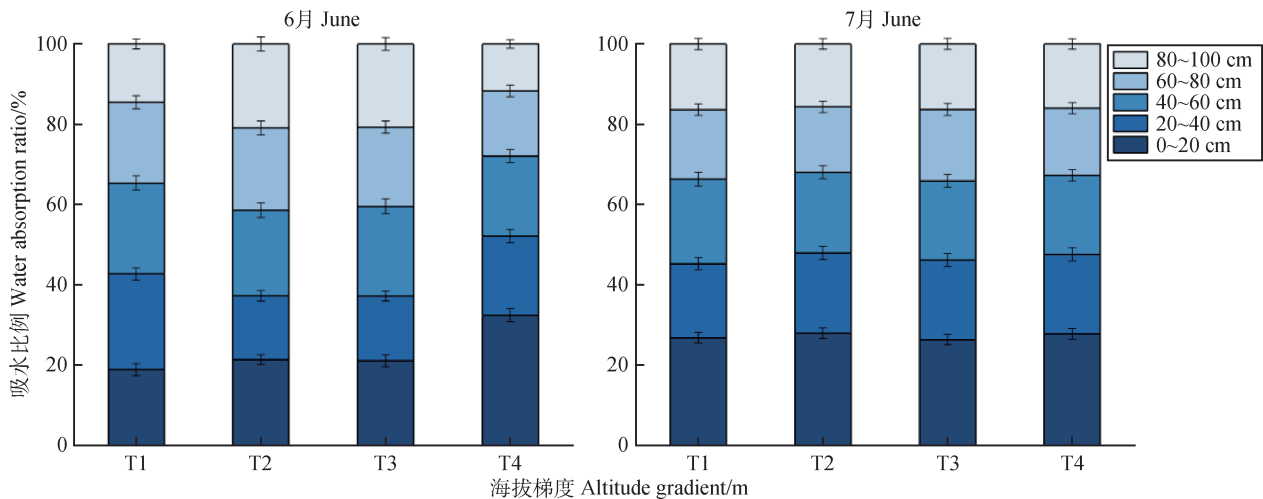
图5 不同土壤深度植物水 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ 的分布Fig. 5 Distribution of plant water $\delta^{18}O$ and soil water $\delta^{18}O$ at different soil depths

图6 不同海拔高度优势植物对不同土层土壤水的吸收比例

Fig. 6 The absorption ratio of dominant plants to soil water in different soil layers at different altitudes

通过调控温度和降水等环境因子,主导了土壤水分的空间分异格局,同时也说明海拔通过环境因素主导土壤水分的空间分异,随降雨量增加土壤含水量升高与之相对应的水分利用比例增大。总体来看,海拔高度的增加使土壤水分随土壤深度的增加呈

现先增加后减小的趋势。此变化趋势反映了不同海拔带土壤水分补给与消耗之间的动态平衡关系。6月份,土层0~80 cm,海拔2374 m,海拔2132 m,海拔1823 m的土壤水分均显著高于海拔1566 m。这可能是因为,在生长季初期,高海拔地区较低的温

度导致地表蒸散耗水较弱,从而使土壤得以保持较高湿度;而低海拔地区温度较高,蒸散作用更为强烈,导致浅层土壤水分流失较快^[23-24]。7月份,海拔2132 m,1823 m,1566 m的40~80 cm土层土壤含水量显著高于海拔2374 m,植物蒸腾耗水成为更重要的驱动力。高海拔(2374 m)的植被在7月可能进入生长旺期,其强烈的蒸腾作用大量消耗中层土壤水,导致该层土壤含水量相对低于中海拔地区。海拔2374 m,1566 m的80~100 cm土层土壤含水量显著高于海拔2132 m,1823 m。植物水分利用来源与蒸散量有关,蒸腾作用是土壤耗水的主要方式之一,处于生长季中期的大针茅(6,7月份)蒸散量、耗水量可达到最大值^[24]。受蒸散量和耗水量的影响,海拔2132 m土壤含水量较海拔1566 m小^[25]。极端气候的变化导致降雨量发生频繁且不均匀,从而打破土壤水分及土层的供需平衡^[22]。本研究中,7月份降雨量较6月多,导致高海拔较低海拔浅层土壤的水分含量高。然而,海拔高度并非直接决定土壤水分,而是通过塑造一个由“气候-土壤-植被”构成的协同系统,综合调控着水分的空间分布与动态循环,是决定山地生态系统水文过程与植物适应的关键。

3.2 优势植物耗水时空变化特征

在生态系统中,水资源是群落演替和发展的关键因素,并且决定优势物种的形成与分布^[26]。不同生境优势物种会反应出对环境的响应对策和适应方式^[27]。本研究中6月份海拔1566 m优势植物—短花针茅相较于7月份主要吸收40~60 cm土层的土壤水分,7月份因降雨充沛,表层土壤含水量较高并且赋予土壤浅层。短花针茅进而优先吸收浅层土壤水分,这是对水分竞争及生存环境的适应所表现出的生理特性^[28-29]。这与前人的研究结果一致^[30],在探究荒漠草原优势物种功能群水分利用中发现,短花针茅在生长季初期主要吸收20~60 cm土壤水分,而在生长季旺期主要吸收0~20 cm的土壤水分。短花针茅用水分来源同时受不同物候期根系生长与功能的影响从而反映出对环境的一种竞争和适应机制,6月末7月短花针茅处于繁殖期的后期,此时根系以浅层密集分布为主,繁殖期后期低海拔区域降雨量充足,受到蒸发量影响^[24-25]促使短花针茅繁殖后期浅层土壤保水率较好促使短花针茅吸收0~20 cm土壤水分高于其他土层土壤含

水量。然而在低海拔区域,浅层土壤水分状况能够决定温性草原中优势植物的水分利用来源,进而维系群落生物量的稳定^[31]。研究表明植物利用土壤水分也存在着季节效应,同时利用土壤水分也是对不同季节土壤含水量、气候变化的响应^[32]。温林生等^[33]研究不同海拔梯度下植物水分利用策略发现,海拔1287 m区,雨季表层(0~10 cm)土壤水分对蜡瓣花(*Corylopsis sinensis*)的贡献率为68.5%,旱季仅占9.0%,海拔1078 m区,随雨旱交替,蜡瓣花从主要吸收利用浅层土壤(0~20 cm,74.4%)土层变为均匀用水。本研究中,不同海拔梯度气温有所差异,海拔升高显著降低温度,气温升高不仅会影响土壤水分蒸散,还会影响植物的需水量、蒸腾耗水特性和水分利用效率,海拔梯度产生的热量条件会作用于植物生长发育,进而影响其水分利用来源。7月份气温可使针茅属植物气孔导度(g_s)和蒸腾速率(T_r)显著增大,净光合速率(P_n)无显著变化,叶片水分利用效率略有下降;土壤蒸发量大且针茅属耗水量较大,其个体水平水分利用效率较低,这种生理变化及用水来源是植物特性是对环境因子变化与植物对水分消耗和干物质制造的一种权衡的表现。本研究发现在7月份不同海拔优势植物主要利用土层(0~20 cm)的土壤水分且随着土层深度的增加吸水的比例呈下降趋势,这也说明了生长季旺季有海拔因素共同作用的环境因子促使优势植物利用浅层土壤水分。这也可能反应了季节和气温变化对土壤水分利用及分配的响应机制,但需要更多的研究来证实这一假设。

3.3 海拔高度对优势植物水分利用来源的影响

在本研究中不同海拔优势植物用水模式存在显著差异。海拔2132 m,1823 m优势植物—大针茅主要吸收0~20 cm的土层水分;大针茅($T_2 \sim T_3$)在6月表现出“多土层利用”特征(T_2 对5个土层的吸收比例均衡,15.9%~21.4%; T_3 对各土层吸收比例16.1%~22.3%),而短花针茅(T_4)吸水范围较窄(6月仅20~40 cm,7月集中于0~20 cm);藁草(T_1)则呈现“季节切换”模式(6月中层为主,7月浅层为主)。相比于短花针茅(T_4)则吸收深层土壤水分,这不仅与海拔有关也与物种属性有关。因两种针茅6月份和7月份物候期不同,7月份处于抽穗期的大针茅主要依赖0~20 cm土层的水分,这一特征是其根系分布、生理调控与生境水分条件协同作用

的结果,确保了抽穗期对水分的高效获取。大针茅($T_2 \sim T_3$)作为丛生禾草,根系较浅(集中于0~80 cm),故6—7月均以中浅层吸水为主,且能灵活拓展至多个土层以适应水分波动;短花针茅(T_4)为旱生小型禾草,根系浅且分布密集,仅能高效利用近地表有限水分。在温性草原中比较七种针茅属对环境的适应性中表明,大针茅对降雨敏感,降水会迅速促进其生长发育及生物量的积累;短花针茅则是通过增加根冠比和调解渗透物质方式促进根系吸水能力和保水能力,进而更适应干旱少雨的低海拔区域^[31]。针茅属类植物旱季和雨季的根系对环境的适应性并不显著,对于根系的再生有着相对稳定性,进而对土壤水分和群落的生物量具有相对稳定性^[34-35],这与刘万弟等^[36]的结果一致,针茅属植物群落随着海拔梯度的增加逐渐减少随着海拔梯度的增加,藁草成为了优势植物。表明藁草作为莎草科植物,可能具有更深的须根系,使其在6月降水较少时可吸收40~60 cm中层水,7月降水充足时快速转向浅层,体现更强的水分利用可塑性;藁草的维管束数量和厚壁机械组织发达,导致藁草具有较强的抗压力及弹性从而有效的抵抗外力;维管束组织结构发达可以更好的支撑植物叶片,不会发生萎蔫现象且藁草的叶片主脉厚度和导管直径较针茅属大,有利于水分的运输从而提高对于干旱胁迫的能力且海拔2374 m为中海拔梯度,植被更容易形成高大的植株体,从而更能适应中海拔生存环境^[37-42]。

海拔梯度变化引发水热条件、土壤特性等环境因子差异,导致不同海拔的优势物种形成不同水分利用来源差异,并且随海拔增加和降雨变化,优势植物的吸收水源也存在明显差异性。具体表现为,6月份,不同海拔梯度优势植物主要利用多个土层的土壤水分,海拔2132 m,1823 m优势植物对土层的吸水比例基本一致,海拔2374 m,1566 m优势植物对土层的吸水比例随土层深度增加整体呈下降趋势。有趣的是,本研究中,2132 m,1823 m优势植物都为大针茅但在不同海拔梯度下土壤水分的贡献率随海拔梯度的增加呈现先减后增的趋势。从而说明植物水分利用的对策存在差异性与土壤水分、气候、土壤养分条件、物种差异等因素有关^[43-44]。本研究发现不同海拔高的三种优势物种在生长季旺期主要利用土壤表层水分,这也许与不同海拔土壤养分、有机质和降雨有关。Yu等^[45]分析不同海拔土壤养分发现,浅层土壤的有机质较多且分布区域

广泛,有机质会对浅层土壤水分的含量起到保水作用且更有利植物吸收与利用^[46-48]。不难解释优势植物为何在优先利用浅层土壤水。

尽管本研究揭示了罗山温性草原优势植物水分利用的海拔分异规律及季节性变化特征,但仍存在一些不足之处。首先,本研究在生长季内的采样频率为每月两次,虽然能探究出不同海拔水分利用的规律性,但可能忽略了降水等短期气候事件引起的植物水源瞬时切换的动态过程,和整个生长季植物水分来源的差异性。未来研究可通过增加采样频率,特别是在降水事件前后进行连续监测,以更精细地揭示植物水分利用的短期动态响应机制。其次,更加注重监测整个生长季的水分来源动态变化。本研究主要基于氢氧稳定同位素技术,未来可结合植物生理指标(如叶片水势、叶片光合速率)的同步观测,以及土壤物理参数(如含水量、水势)的连续监测,从机理上更全面地阐释环境因子调控植物水分利用来源的过程。

4 结论

本研究基于宁夏罗山温性山地草原不同海拔梯度3种优势植物,分析不同海拔梯度优势植物水分利用来源,发现降水呈现显著的海拔差异分布特征($T_1 > T_2 \approx T_3 > T_4$),并显著驱动了表层(0~20 cm)土壤含水量的空间差异;6—7月份不同海拔梯优势植物对不同土层水分利用来源存在显著差异,6月份,0~20 cm土层海拔1566 m优势植物吸收比例为32.4%显著高于海拔2374 m,2132 m,1823 m;7月份,海拔2374 m,2132 m,1823 m,1566 m优势植物主要利用土壤表层(0~20 cm)的水分,吸收比例分别为26.9%,28.0%,26.4%,27.8%。且随着土层深度的增加,吸水的比例呈下降趋势但浅层土壤优势植物吸水比例随海拔梯度呈现显著非线性响应,表现为先降低、后增加再递减的多相波动特征。降水同位素值随海拔升高而降低;土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 垂直分布模式存在显著的海拔和季节差异,揭示了不同水分来源与运移过程。优势植物水分利用来源呈现明显的海拔差异性:高海拔藁草水分来源为“中层和浅层”,中海拔大针茅优先利用浅层土壤水,而低海拔短花针茅则主要利用浅层水。海拔作为核心驱动因子,通过直接作用和间接调控水热因子及不同土层土壤水分间接作用,共同影响不同优势植物

水分利用效率。本研究为罗山生态环境保护与治理、生态水文过程提供了重要的理论提供了一定参考。

参考文献

- [1] 雷军,杨道虎,刘红梅,等. 黑河流域中游荒漠典型区域植被生物量及其影响因素[J]. 中国沙漠,2021,41(1):203-208
LEI J, YANG X H, LIU H M, et al. Vegetation biomass and its influencing factors in typical desert areas in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021,41(1):203-208
- [2] 杨玉婷,石玉林,李战刚,等. 陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系[J]. 生态学报,2020(18): 6542-6551
YANG Y T, SHI Y L, LI Z G, et al. Characteristics of herb community under the “three north” shelterbelt in northern Shaanxi and its relationship with stand structure and soil nutrients[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020(18):6542-6551
- [3] 马克平. 生物多样性与生态系统功能的实验研究[J]. 生物多样性, 2013(3):247-248
MA K P. Experimental study on biodiversity and ecosystem function[J]. Biodiversity Science, 2013(3):247-248
- [4] 韩磊,韩永贵,黄晓宇,等. 氢氧稳定同位素示踪旱区植物水分来源与利用策略[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(3): 435-441
HAN L, HAN Y G, HUANG X Y, et al. Hydrogen and oxygen stable isotope tracer plant water source and water use strategy in arid region[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020,47(3):435-441
- [5] YANG A L, ZHANG H, YANG X J, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on vegetation NPP in the Qilian Mountain[J]. Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 2023,29(1):202-221
- [6] 王茹,李锦荣,董雷,等. 基于空间分布的草原化荒漠地区红砂种群水分利用策略研究[J]. 水土保持学报, 2023(5): 270-278
WANG R, LI J R, DONG L, et al. Study on water use strategy of red sand population in grassland desert area based on spatial distribution[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023(5):270-278
- [7] 罗立娇,高晓东,赵连豪,等. 黄土丘陵区植被群落水分利用策略对干旱胁迫的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 280-288
LUO L J, GAO X D, ZHAO L H, et al. Response of water use strategy of vegetation community to drought stress in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):280-288
- [8] 胡海英,李惠霞,倪彪,等. 宁夏荒漠草原典型群落的植被特征及其优势植物的水分利用效率[J]. 浙江大学学报, 2019(4):460-471
HU H Y, LI H X, NI B, et al. Characteristic of typical vegetation community and water use efficiency of dominant plants in desert steppe of Ningxia[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2019(4):460-471
- [9] 胡小文,王彦荣,武艳培,等. 荒漠草原植物抗旱生理生态学研究进展[J]. 草业学报, 2004, 13(3):9-15
HU X W, WANG Y R, WU Y P, et al. Research progress on eco-physiological responses of desert grassland plants to drought conditions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(3): 9-15
- [10] 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
- [11] PU T, HE Y Q, ZHANG T, et al. Isotopic and geochemical evolution of ground and river waters in a karst dominated geological setting: A case study from Lijiang basin, South-Asia monsoon region[J]. Applied Geochemistry, 2013, 33:199-212
- [12] 林光辉. 稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支[J]. 植物生态学报, 2010(2):119-122
LIN G H. Stable isotope ecology: a new branch of ecology resulted from technology advances[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010(2):119-122
- [13] 王鹏. 青藏高原东南缘植物水分利用策略及影响因素研究[D]. 成都:成都理工大学, 2023:17-20
WANG P. Water use strategies and influencing factors of plants on the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. [D]. Chengdu University of Technology, 2023:17-20
- [14] 牛云明,贾国栋,王欣,等. 庐山不同海拔植物蒸腾水龄动态及用水策略[J]. 植物生态学报, 2024, 48(9):1104-1117
NIU Y M, JIA G D, WANG X, et al. Dynamic changes of transpiration water age and water utilization strategies for trees at different altitudes in Lushan area[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(09):1104-1117
- [15] 周雅聃,陈世苹,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 in north-western China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8):789-800
- [16] 张浩. 降水量变化对荒漠草原植物群落物种水分利用策略的影响[D]. 银川:宁夏大学, 2024:20-30
ZHANG H. Effects of precipitation changes on water use strategies of plant community species in desert steppe[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024:20-30
- [17] 刘磊,李小雁,蒋志云,等. 青海湖流域不同海拔高度土壤水分时空变化特征[J]. 资源科学, 2017, 39(2):263-275
LIU L, LI X Y, JIANG Z Y, et al. [J]. Variation in soil water content along different altitude gradients in the Qinghai Lake Watershed[J]. Resources Science, 2017, 39(2): 263-275
- [18] 黄业芸,邱开阳,朱亚超,等. 贺兰山不同海拔植被生物量与土壤分形特征和土壤水分的相关关系[J]. 草业学报, 2023, 32(12):24-35

- HUANG Y Y, QIU K Y, ZHU Y C, et al. Correlation between vegetation biomass and soil fractal characteristics and soil moisture at different elevations in the Helan Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(12):24-35
- [19] 苏闯, 张芯毓, 马文红, 等. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释[J]. *山地学报*, 2018, 36(5):699-708
- SU C, ZHANG X Y, MA W H, et al. Altitudinal pattern and environmental interpretation of species diversity of scrub community in the Helan Mountains, China[J]. *Mountain Research*, 2018, 36(5):699-708
- [20] 韩彬, 樊江文, 钟华平. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(4):553-562
- HAN B, FAN J W, ZHONG H P. Grassland biomass of communities along gradients of the Inner Mongolia grassland transect [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (4) : 553-562
- [21] 张宇, 张明军, 王圣杰, 等. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4):1356-1368
- ZHANG Y, ZHANG M J, WANG S J, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxy gen isotope[J]. *Chinese Journal of Ecology* 2020, 39 (4) : 1356-1368
- [22] QI W, JIA P, LUO S W, et al. Disentangling the effects of environmental and communities' factors on species' biomass inequality in Qinghai-Tibetan grassland systems[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122:107309
- [23] 马全林, 鱼泳, 陈芳, 等. 干旱区沙漠化逆转过程土壤水分的空间异质性特征[J]. *干旱区地理*, 2010, 23(5):716-724
- MA Q L, YU Y, CHEN F, et al. Spatial heterogeneity of soil water content in the reversion process of desertification in arid area[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5): 716-724
- [24] 陈林, 杨新国, 王磊, 等. 荒漠草原不同植物群落蒸散组分特征及其环境因子影响分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(1): 330-342
- CHEN L, YANG X G, WANG L, et al. Characteristics of evapotranspiration components of different plant communities in desert steppe and its relationship with environmental factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(1): 330-342
- [25] 袁小环, 武菊英, 滕文军, 等. 青绿苔草蒸散特性及与其他草坪地被的比较研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(1):40-44
- YUAN X H, WU J Y, TENG W J, et al. Evapotranspiration characteristics of *Carex leucochlora* and comparison with other turfs and groundcovers[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 40-44
- [26] 邵雪蓉, 陈世仁, 陈应群, 等. 植物水分利用效率与植物功能性群落结构的关系研究综述[J]. *世界林业研究*, 2024, 37(1): 37-44
- SHAO X R, CHEN S R, CHEN Y Q, et al. A review of the relationship between plant water use efficiency and plant functional community structure [J]. *World Forestry Research*, 2024, 37(1): 37-44
- [27] ENQUIST B J, NIKLAS K J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants [J]. *Science*, 2002, 295(5559):1517-1520
- [28] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰, 等. 植物水分调节对策: 等水与非等水行为[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(9):1020-1032
- LUO D D, WANG C K, JIN Y, et al. Plant water-regulation strategies: Isohydric versus anisohydric behavior [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(9): 1020-1032
- [29] 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
- FU X Y, LIU H M, YU X W, et al. Water sources and use strategies of plants in lake Daihai wetland [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*[J]. 2020, 34(12): 42-49
- [30] 陈晓莹, 陈林, 杨新国, 等. 荒漠草原不同功能群优势植物的水分利用特征[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(8):2119-2130
- CHEN X Y, CHEN L, YANG X G, et al. Water utilization characteristics of dominant plant species from different functional groups of desert steppe [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8): 2119-2130
- [31] 袁野梅, 柳隽瑶, 高秀丽, 等. 温带草原7种针茅植物根系特征及其对环境因子变化的适应[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8784-8794
- YUAN Y M, LIU J Y, GAO X L, et al. Root traits of seven *Stipa* species and their relations with environmental factors in temperate grasslands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (21): 8784-8794
- [32] ZHANG Y, ZHANG M J, QU D Y, et al. Water use strategies of dominant species (*Caragana korshinskii* and *Reaumuria soongorica*) in natural shrubs based on stable isotopes in the loess hill, China [J]. *Water*, 2020, 12(7):1923
- [33] 温林生, 邓文平, 邓力维, 等. 庐山不同海拔植物季节水分利用策略[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4):341-348
- WEN L S, DENG W P, DENG L W, et al. Seasonal water utilization strategies of plants at different altitudes in the lushan mountain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 341-348
- [34] GAO X L, LIU X Q, MA L N, et al. Root vertical distributions of two *Artemisia species* and their relationships with soil resources in the Hunshandake desert, China [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(6):3112-3119
- [35] 张蕊, 赵学勇, 左小安, 等. 荒漠草原沙生针茅(*Stipa glareosa*)群落物种多样性和地上生物量对降雨量的响应[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(2):45-52
- ZHANG R, ZHAO X Y, ZUO X A, et al. Responses of the *Stipa glareosa* community species diversity and above-ground biomass to precipitation in the Desert-steppe Region in Northern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39 (2) : 45-52.
- [36] 刘万弟, 李小伟, 黄文广, 等. 宁夏草原针茅属植物群落物种多样性和生产力格局及影响因素研究[J]. *草业学报*, 2021, 30(1):12-23
- LIU W D, LI X W, HUANG W G, et al. Community diversity,

- patterns of productivity, and factors influencing them in *Stipa* in Ningxia grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30 (1): 12-23
- [37] 韩戴宇,李英博,鞠志新. 6种苔草属植物叶片的力学特性及微观结构[J]. *草业科学*, 2023, 40(8): 2082-2090
HAN D Y, LI Y B, JU Z X. Microstructure and tensile properties of leaves of six *Carex* species [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(8): 2082-2090
- [38] VENTURAS M D, SPERRY J S, HACKE U G. Plant xylem hydraulics: what we understand, current research, and future challenges [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2017, 59 (6): 356-389
- [39] 康萨如拉,牛建明,张庆,等. 短花针茅叶片解剖结构及与气候因子的关系[J]. *草业学报*, 2013, 22(1): 77-8
KANG S, NIU J M, ZHANG Q, et al. Anatomical structure of *Stipa breviflora* leaves and its relationship with environmental factors [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 77-86
- [40] 刘红茹,冯永忠,王得祥,等. 延安城区10种阔叶园林植物叶片结构及其抗旱性评价[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(10): 2053-2060
LIU H R, FENG Y Z, WANG D X, et al. Evaluation of leaf structure and drought resistance of ten broad-leaved garden plants in Yan'an urban area [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(10): 2053-2060
- [41] 许秀丽,李云良,谭志强,等. 鄱阳湖湿地典型中生植物水分利用来源的同位素示踪[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(6): 1749-1760
XU X L, LI Y L, TAN Z Q, et al. Isotopic tracing of water use sources of typical mesophytic plants in Poyang Lake wetland [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(6): 1749-1760
- [42] 华巾帼,樊榕,刘婉婷,等. 白马雪山莎草科胡萝卜状根植物的功能性状及环境响应[J]. *草地学报*, 2023, 31(2): 433-440
HUA J G, FAN R, LIU W T, et al. Functional traits of Cyperaceae plants with dauciform roots and their environmental responses in baima snow Mountain [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(2): 433-440
- [43] EHLERINGER J R, DAWSON T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073-1082
- [44] 白天军,邓文平,旷远文,等. 庐山不同海拔日本柳杉年轮宽度对气候因子的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 57-66
BAI T J, DENG W P, KUANG Y W, et al. Response of tree ring width in *Cryptomeria japonica* to climatic factors at different elevations in Lushan Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1): 57-66
- [45] YU F Z, ZHANG Z Q, CHEN L Q, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon in subtropical forests of mountain Lushan, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(9): 545
- [46] DRAKE P L, COLEMAN B F, VOGWILL R. The response of semi-arid ephemeral wetland plants to flooding: linking water use to hydrological processes [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6 (5): 852-862
- [47] 刘效东,乔玉娜,周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. *植物生态学报*: 2011(12): 1209-1218
LIU X D, QIAO Y N, ZHOU G Y. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(12): 1209-1218.
- [48] 孙志强,韩春雪,李海港. 荒漠草原土壤呼吸及其组分对持续干旱及再湿润的响应[J]. *草地学报*, 2025, 33(2): 535-546
SUN Z Q, HAN C X, LI H G. Responses of Soil Respiration and its Components to Persistent Drought and Rewetting in Desert Steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 535-546

(责任编辑 彭露茜)