

DOI: 10.20103/j.stxb.202505081106

马海涛,秦伟春,韩梦洁,刘佳原,金甜,马红彬,沈艳,邱开阳,郑翔,王国会.不同柠条种植密度对荒漠草原灌草系统植物水分利用策略的影响.生态学报,2026,46(10): - .

Ma H T, Qin W C, Han M J, Liu J Y, Jin T, Ma H B, Shen Y, Qiu K Y, Zheng X, Wang G H. The effect of different planting densities of *Caragana korshinskii* on plant water use strategies in silvopasture systems in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(10): - .

不同柠条种植密度对荒漠草原灌草系统植物水分利用策略的影响

马海涛^{1,2,3}, 秦伟春⁴, 韩梦洁^{1,2,3}, 刘佳原^{1,2,3}, 金甜^{1,2,3}, 马红彬^{1,2,3}, 沈艳^{1,2,3}, 邱开阳^{1,2,3}, 郑翔^{1,2,3}, 王国会^{1,2,3,*}

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, 银川 750021

2 宁夏大学宁夏草业工程技术研究中心, 银川 750021

3 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

4 宁夏罗山国家级自然保护区管理局, 吴忠 751999

摘要:荒漠草原灌丛化过程加剧了水分消耗,导致荒漠草原水资源愈加亏缺,确定合理的灌丛密度对该地区植被建植和生态恢复具有重要意义,然而荒漠草原灌丛化植被水分利用策略对不同密度的响应目前尚未明确。基于氢氧稳定同位素技术,结合贝叶斯混合模型(MixSIAR),分析中间锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*)的水分利用策略差异性。结果表明:(1)土壤含水量随种植密度升高呈降低趋势,其中 T_1 (1200株/hm²)与 T_2 (1600株/hm²)的土壤平均含水量高于 T_3 (2352株/hm²)与 T_4 (3076株/hm²), T_1 在生长季后期(8—10月)浅层土壤含水量显著高于 T_3 。(2)不同种植密度灌草系统随生长季变化对不同土层水分来源存在显著差异,5月和7月份 T_1 、 T_2 优先利用浅层土壤水分(0—40 cm)吸收比例范围为20.60%—27.97%,而 T_3 、 T_4 则利用中深层土壤水分(40—300 cm)吸收比例范围为20.23%—23.53%;短花针茅在 T_3 、 T_4 主要依赖0—20 cm土壤水分,吸收比例范围为34.83%—58.47%。(3)短期充足降雨可显著改变荒漠草原灌草植物的水分利用策略,在降水较多的6月和8月份,柠条和牛枝子主要利用浅层土壤水分。本研究揭示荒漠草原灌草系统植物水分利用对密度的响应策略,为该区域生态恢复中灌丛的科学配置提供理论依据与数据支撑。

关键词:荒漠草原;灌丛化;氢氧同位素;吸水比例;水分利用策略

The effect of different planting densities of *Caragana korshinskii* on plant water use strategies in silvopasture systems in desert steppe

MA Haitao^{1,2,3}, QIN Weichun⁴, HAN Mengjie^{1,2,3}, LIU Jiayuan^{1,2,3}, JIN Tian^{1,2,3}, MA Hongbin^{1,2,3}, SHEN Yan^{1,2,3}, QIU Kaiyang^{1,2,3}, ZHENG Xiang^{1,2,3}, WANG Guohui^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Innovative High Efficiency Production Mode of Forage Grass, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4 Ningxia Luoshan National Nature Reserve Management Bureau, Wuzhong 751999, China

Abstract: The encroachment of shrubs in desert grasslands exacerbates water consumption, leading to increasingly severe

基金项目:国家自然科学基金青年项目(32301504);宁夏自然科学基金优秀青年项目(2024AAC05013);宁夏重点研发计划项目(2023BSB03072)

收稿日期:2025-05-08; 网络出版日期:2026-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggh2022@nxu.edu.cn

water scarcity in these regions. Determining appropriate shrub density is crucial for vegetation establishment and ecological restoration. However, the response of water use strategies in desert grassland shrub—encroached vegetation to different densities remains unclear. In this study, hydrogen and oxygen stable isotope techniques combined with a Bayesian mixing model (MixSIAR) were applied to analyze differences in water use strategies among *Caragana korshinskii*, *Stipa breviflora*, and *Lespedeza potaninii*. The results showed that: (1) Soil moisture content decreased with increasing planting density. The average soil moisture content in T₁(1200 plants/hm²) and T₂(1600 plants/hm²) was higher than that in T₃(2352 plants/hm²) and T₄(3076 plants/hm²). In the late growing season (August to October), the shallow soil moisture content in T₁ was significantly higher than that in T₃. (2) As the growing season progressed, significant differences in water sources from various soil layers were observed among the shrub—grass systems under different planting densities. In May and July, T₁ and T₂ preferentially utilized shallow soil water (0—40 cm), with absorption proportions ranging from 20.60% to 27.97%, while T₃ and T₄ relied more on middle and deep soil water (40—300 cm), with absorption proportions ranging from 20.23% to 23.53%. *Stipa breviflora* in T₃ and T₄ primarily depended on soil water from 0—20 cm, with absorption proportions ranging from 34.83% to 58.47%. (3) Short—term sufficient rainfall significantly altered plant water use strategies in the desert grassland shrub—grass system. In June and August, when precipitation was relatively high, *Caragana korshinskii* and *Lespedeza potaninii* mainly utilized shallow soil water. This study revealed the response strategies of plant water use to density in desert grassland shrub—grass systems, providing a theoretical basis and data support for the scientific allocation of shrubs in ecological restoration in this region.

Key Words: desert grassland; shrub encroachment; hydrogen and oxygen isotopes; water absorption ratio; water use strategy

全球气候变化背景下,草原灌丛化引发的植物水分利用策略分异已成为生态水文学研究的前沿热点^[1]。对于干旱半干旱地区草原灌丛是生态系统植被的重要表现形式,可引发生态系统的级联效应,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。荒漠草原灌丛化引起的木本植物扩张通过根系生态位重构改变土壤水分时空格局,其与草本植物的水分竞争机制直接调控生态系统水文平衡^[2]。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的过程中氢氧同位素不发生分馏^[3-5],因此对比植物木质水分和土壤水分中的氢同位素(氘— δD)或氧同位素($\delta^{18}O$)可以定量分析出植物水分利用特征。

不同种植密度会对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,现有研究表明,种植密度通过调控冠层截留、根系构型及种间竞争强度,显著影响木本植物的水分获取策略^[6]。高密度种植可能诱导深根系物种优先利用深层土壤水(>1.5 m),而低密度个体则倾向于竞争表层资源(0—30 cm),这种策略分化可能加剧生态系统尺度水分利用的“生态位极化”^[7-8]。北美疏林草原灌丛化植物在低密度(<1000 株/hm²)时优先利用深层地下水($\delta^{18}O = (-8.2 \pm 0.7)\text{‰}$),而高密度(>2000 株/hm²)个体则转向竞争表层土壤水(0—30 cm, $\delta^{18}O = (-5.3 \pm 1.1)\text{‰}$),揭示出显著的水分生态位压缩现象^[9]。此外苏荣霞等^[10]研究结果表明不同间距柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)灌丛引入,丰富度、均匀度、优势度指数随着密度的增加而增大;吕婷等^[11]研究表明,当有降雨补给时灌丛植被主要利用 40 cm 以上的土壤水分,而退耕 30 年之后的柠条锦鸡儿并没有明显的退化现象,但退耕 30 年的天然草地细裂叶莲蒿更依赖于降雨补充的表层土壤水分。然而,关于灌丛化植物在不同密度梯度下对土壤水份利用及补给的动态耦合机制,仍存在显著知识缺口。

宁夏盐池县位于我国北方农牧交错带,因长年降雨量少且蒸发强,为典型的雨养区域,当地水资源匮乏生态环境总体处于水分亏缺状态^[12]。降雨量是影响该地区植被生长和土壤水分含量的主要因素,也是该地区

草原荒漠化的根本原因,土壤水分同时也是决定该地区生态系统结构与功能的关键因子^[13]。在干旱半干旱的地区的人工种植灌丛生态系统中,密度对土壤水分的影响以及对生态系统的作用尤为重要,高密度种植必然会加剧土壤匮乏;然而植物对水源利用现象必然会影响植物种群的自然分布格局,继而影响生态系统的水量平衡。因此,如何确定适宜的柠条灌丛密度,提高土壤水资源利用效率,是荒漠草原区植被持续建设亟需解决的关键科学问题。而解决问题的关键在于厘清柠条灌丛密度调控灌草系统水分变化特征的机制。基于此,本研究于2024年4月—10月在宁夏盐池县以不同人工柠条种植密度的灌草系统为研究对象,通过监测大气降水、土壤水分动态变化、植物木质部水、以及土壤水氢氧同位素以期确定有利于土壤水资源持续高效利用的柠条灌丛适宜密度,并阐明荒漠草原灌草系统水分利用策略对该地区植被建植具有重要的理论意义和现实需求。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

野外定位观测试验在盐池北部荒漠草原宁夏回族自治区野外科学观测研究站开展。该地区南靠黄土高原,北邻毛乌素沙地,平均海拔 1450 m,属于典型的温带大陆性气候,多年平均气温 8.1℃,多年平均无霜期有 162 d 左右。研究区常年干旱少雨,多年平均降水量 250—350 mm,7—9 月的降水量约占全年降水量 80%,多年平均潜在蒸发量 2132 mm。研究区草地类型为荒漠草原,地貌为缓坡丘陵,土壤类型主要为灰钙土,土壤结构松散,肥力低,含沙量大。pH 值为 7.5—8.5,有机碳含量为 7.90 g/kg,全氮含量为 0.24 g/kg。粘粒含量为 0.10%—1.42%,粉粒含量为 21.00%—35.50%,砂粒含量为 60.78%—78.06%。研究区主要优势植物有柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*)^[14]。

1.2 试验设计

选择研究区典型柠条种植推广模式,种植方式为条带种植,2 行为一个种植带,4—8 m 为带间距、1 m 行间距。基于团队前期对研究区荒漠草原植被和土壤等基况调查,试验选择不同柠条种植密度的灌草系统(柠条灌丛密度分别为 T_1 (1200 株/hm²)、 T_2 (1600 株/hm²)、 T_3 (2352 株/hm²)、 T_4 (3076 株/hm²)为研究对象,灌草系统带间的优势草本植物分别为:短花针茅和牛枝子等。总试验区为 62 m×56 m,在不同柠条种植密度灌草系统样地内分别设置 1 个试验区,每个试验区包含 2 个完整的柠条带,每个试验区内设置 4 个试验小区,共计 16 个试验小区。在每个试验区中间 2 个种植带上分别选择具有代表性的 4 株柠条进行标记用于长期监测,同时在 2 个带间的草本植被分别布设 3 个 0.5 m×0.5 m 的长期观测样方,进行各项指标的测定。

1.3 样品采集与测定

(1) 土壤水分测定:每个试验小区选择一个种植带并在行间距等距离布设 2 个 TDR 水分管(直径 4 cm,长度 200 cm),在带间等距离布设 2 个 TDR 水分管(直径 4 cm,长度 200 cm),共计 24 个 TDR 水分管。每 20 cm 为一层,测定频率为 15 d。

(2) 植物和土壤样品采集:2024 年生长季内每月采集短花针茅(5—8 月)和牛枝子(7—8 月)植物木质部样品,同期采集 0—200 cm 土壤样品。采集牛枝子各选取一次植物木质部和土壤样品。在每个试验小区固定样方附近选取 5 株直径 0.2—0.3 cm 优势草本植物(短花针茅和牛枝子),剪取长度 10—15 cm 完全硬化的茎干,迅速将其放入小瓶(80 mL)中保存,用封口膜密封。同时在所选草本下方地势均一的地点,采集 0—20 cm、20—40 cm、40—100 cm 土层土壤样品放入小瓶(80 mL),用封口膜密封。2024 年 5—8 月,每月各选取一次植物木质部和土壤样品。在每个不同的密度样地内分别选取树龄、冠幅相似地径相近且生长状况良好的 3 棵植株,剪取 4—6 cm 长度的 1 年生及以上成熟枝条,之后将去除韧皮部和形成层的枝条样品立即放入小瓶中(80 mL)并密封。同时在所选柠条下方地势相对均一的地方采集 0—20 cm、20—40 cm、40—100 cm、100—200 cm、200—300 cm 土层土壤样品放入小瓶(80 mL)并密封。所有植物和土壤样品采集结束后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,用于水分的提取。

(3) 降水样的采集: 在无林空旷地内放置 3 个标准雨量筒(直径 20 cm 的圆桶上放置漏斗, 下端与雨量筒相连, 漏斗口放置一个乒乓球, 防止降水样品蒸发) 收集降水量大于等于 0.1 mm 的降水样品, 每次降水结束, 立即将 3 个标准雨量筒中的降水样品混合后转入 10 mL 玻璃样品瓶中, 并用 Parafilm 封口膜密封后放入保温箱中带回实验室, 置于冰箱(4℃) 中冷藏保存待测。

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直 $\pm 1\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 值的测试误差不超过 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

1.5 数据处理

采用 SPSS 双因素方差分析对不同种植密度及不同月份之间灌草复合系统土壤含水量进行分析。对不同种植密度灌草复合系统的柠条、短花针茅和牛枝子的木质部水和各土层土壤水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的差异性进行分析。采用直观对比法定性分析柠条、短花针茅和牛枝子的主要吸水层位, 用贝叶斯混合模型(MixSIAR) 计算三种植物对潜在水源的吸水比例。将 0—20 cm、20—40 cm、40—100 cm 草本土层土壤水氢氧同位素作为数据来源, 短花针茅、牛枝子茎秆水数据作为混合数据; 同理将 0—20 cm、20—40 cm、40—100 cm、100—200、200—300 cm 的柠条土层土壤水氢氧同位素作为数据来源, 柠条茎秆水数据作为混合数据。将 R 语言中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^[15]。柠条、短花针茅、牛枝子都为常见的荒漠草原旱生植物, 因此根系吸收水分时不发生氧同位素的分馏, 故可采用稳定氢氧同位素计算植物水分来源。所有数据统计分析在 SPSS 26.0 软件中完成, 图表均用 Origin 2023 软件绘图。所有图表数据均为平均值 \pm 标准差。

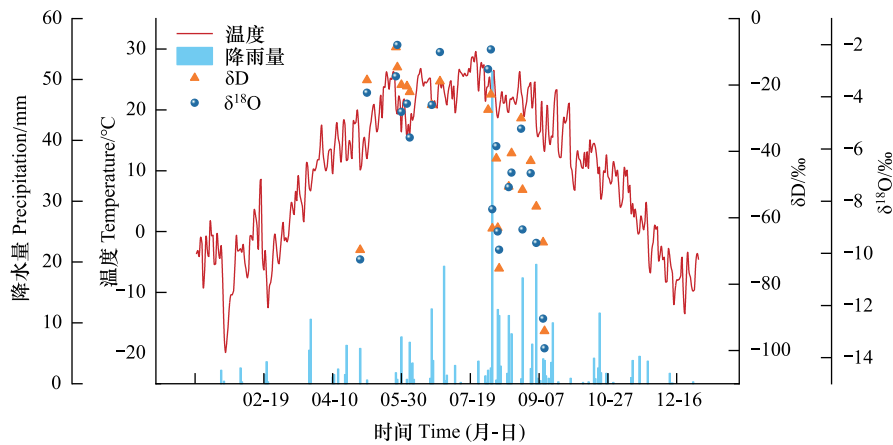
2 结果与分析

2.1 不同种植密度灌草系统降雨、温度及土壤含水量动态变化特征

2024 年, 研究期间全年降雨总量为 559.21 mm。降水集中于 8—9 月降雨量达 446.34 mm, 占全年的 79.8% (图 1)。此外, 研究期间最高气温出现在 7 月, 月平均气温为 25.15℃, 极端最高气温达 36.71℃ (7 月 22 日)。研究期间雨水 δD 和 $\delta^{18}O$ 均随时间成波动变化趋势。

如表 1 所示, 灌草系统平均土壤含水量为 8.96%, T_1 — T_4 灌草系统的土壤含水量变化趋势一致如下: 9 月 > 8 月 > 10 月 > 7 月 > 6 月 > 4 月 > 5 月。 T_1 、 T_3 灌草系统 8—10 月份土壤含水量显著高于 4—7 月份 ($P < 0.05$); T_4 灌草系统 8—10 月份土壤含水量显著高于 4、5 月份 ($P < 0.05$); 4、6、7、9、10 月份 T_1 灌草系统土壤含水量显著高于 T_3 ($P < 0.05$)。

不同柠条种植密度灌草系统土壤含水量总体表现为 (图 2): 随土壤深度增加 T_1 — T_4 土壤含水量趋于增加—减小—增加的变化趋势, 整个生长季表层土壤 (0—40 cm) 含水量波动较小, T_1 表层土壤含水量为 11.47% 均高于 T_2 (9.65%)、 T_3 (10.27%)、 T_4 (9.57%), 中层土壤 (40—140 cm) 土壤含水量波动较大, T_2 土层 40—60 cm 土壤水分均高于 T_1 、 T_3 、 T_4 , 其最高值出现在 9 月份 18.08%, 5 月份 T_3 土层 120—140 cm 土壤水分最低为 5.12%。研究区中 T_1 — T_4 深层土壤水分变化范围为: 6.44%—15.44%、5.85%—18.08%、5.12%—17.35%、5.

图1 研究区气温、降雨量和降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的动态分布Fig.1 Dynamic distribution of temperature, rainfall, and precipitation δD and $\delta^{18}O$ in the study area

59%—16.62%。生长季初期和中期(4—7月份)中深层土壤含水量总体表现趋势为增加—减小—增加;而生长季后期(8—10月份)中深层土壤含水量则表现为逐渐降低。深层土壤(140—200 cm)含水量在整个生长季呈持续上升趋势, T_1 — T_4 变化范围为:7.91%—12.70%、6.64%—13.41%、4.62%—11.38%、6.12%—14.18%。

表1 不同柠条种植密度灌草系统土壤含水量变化

Table 1 Changes in soil moisture content in shrub-encroached grassland with different planting densities of *Caragana korshinskii*

| 月份 Month | 不同柠条种植密度灌草系统土壤含水量/% Soil water content of shrub-encroached grassland with different planting densities of <i>Caragana korshinskii</i> | | | |
|--------------|--|----------------|---------------|----------------|
| | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 |
| 4月 April | 8.55±0.17 Ca | 7.67±0.24 BDab | 6.75±0.80 Bb | 7.59±1.21 Cab |
| 5月 May | 8.28±0.40 Ca | 7.38±0.19 Da | 6.47±0.96 Ba | 5.71±0.93 Ca |
| 6月 June | 8.71±0.19 Ca | 7.67±0.16 BDab | 7.03±0.79 Bb | 7.68±1.02 BCab |
| 7月 July | 8.70±0.23 Ca | 7.82±0.20 Cab | 7.31±0.70 Bb | 7.85±1.04 BCab |
| 8月 August | 10.66±1.74 Ba | 10.68±0.08 Ba | 10.18±0.93 Aa | 10.09±1.18 ABa |
| 9月 September | 12.31±0.26 Aa | 11.33±0.26 Aab | 10.75±0.61 Ab | 10.24±0.73 Aab |
| 10月 October | 9.91±1.77 Aa | 9.01±1.65 Bab | 8.33±1.87 Ab | 8.81±1.51 ABab |

表中 T_1 , 种植密度 1200 株/hm² planting densities of 1200 plant/hm²; T_2 , 种植密度 1600 株/hm² planting densities of 1600 plant/hm²; T_3 , 种植密度 2352 株/hm² planting densities of 2352 plant/hm²; T_4 , 种植密度 3076 株/hm² planting densities of 3076 plant/hm²; 不同大写字母表示相同种植密度不同月份灌草系统土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同月份不同种植密度灌草系统土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 降水、土壤水分和植物茎干水分同位素特征

由研究区 5—8 月份降水同位素数据得出研究区大气降水线方程 (LMWL) 均值为 (图 3): $\delta D = 4.96\delta^{18}O - 5.16$ ($R^2 = 0.7811, P < 0.05$), 其斜率小于全球大气降水线方程 (GMWL): $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 表明研究区内降雨量少且蒸发量大。其中降雨的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-12.50 ± 1.14)‰—(-2.18 ± 0.17)‰, $\delta D = (-69.67 \pm 5.58)$ ‰—(-14.68 ± 6.07)‰, 变化浮动较大。土壤水线方程 (SWL) 均值为: $\delta D = 4.13\delta^{18}O - 33.83$ ($R^2 = 0.7942, P < 0.05$), 土壤水的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-11.61 ± 1.05)‰—(1.09 ± 0.02)‰, $\delta D = (-97.28 \pm 1.35)$ ‰—(-38.01 ± 1.50)‰。在整个生长季内, 不同柠条种植密度灌草系统中植物水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化基本一致 (图 4), 柠条的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-8.09 ± 0.384)‰—(-3.72 ± 0.43)‰, $\delta D = (-67.69 \pm 1.51)$ ‰—(-38.20 ± 0.43)‰。短花针茅的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-6.72 ± 0.23)‰—(-0.52 ± 0.46)‰, $\delta D = (-50.04 \pm 0.76)$ ‰—(-20.71 ± 5.61)‰。牛枝子的同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ (-6.26 ± 0.47)‰—(-0.5 ± 0.41)‰, $\delta D = (-50.10 \pm 1.52)$ ‰—(-31.34 ± 6.75)‰。通过对比植物水、土壤水线及同位素变化范围, 皆分布土壤水附近,

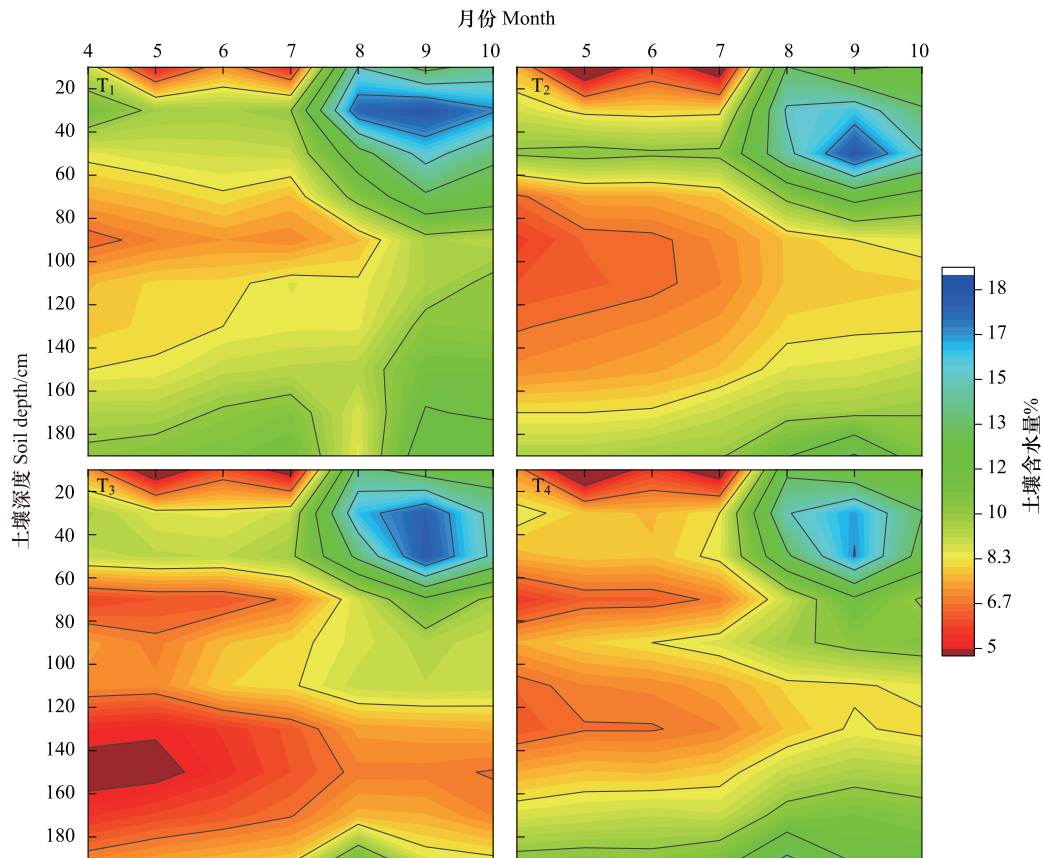


图2 土壤含水量时空动态变化特征

Fig.2 Characteristics of spatiotemporal dynamic changes in soil water content

图中 T_1 , 种植密度 1200 株/ hm^2 planting densities of 1200 plant/ hm^2 ; T_2 , 种植密度 1600 株/ hm^2 planting densities of 1600 plant/ hm^2 ; T_3 , 种植密度 2352 株/ hm^2 planting densities of 2352 plant/ hm^2 ; T_4 , 种植密度 3076 株/ hm^2 planting densities of 3076 plant/ hm^2

说明灌草系统植物在生长过程中主要利用土壤水。

将试验区采集的柠条茎干水氢氧同位素对比分析发现,植物水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 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。土壤水分同位素组成随土壤深度和灌草复合系统植物种类的不同而变化(图4)。不同种植密度灌木 5—7 月不同土层深度 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势类似,0—300 cm 逐渐贫化,8 月份 0—40 cm 土层 $\delta^{18}\text{O}$ 随土层深度的增加出现逐渐富集化,40—300 cm 土层又出现贫化现象。研究区内短花针茅在 5、6 月份 0—100 cm 土层 $\delta^{18}\text{O}$ 随土层深度的增加逐渐贫化,与牛枝子 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势类似 7 月份 T_4 与 8 月份 T_2 、 T_4 种植密度土壤 0—40 cm 土层 $\delta^{18}\text{O}$ 出现富集化现象,并随土层深度增加又呈现出富集化现象,可能是浅层土壤受到降水中贫化的同位素值的影响。

2.3 灌草系统植物水分来源解析

在干旱半干旱地区灌草复合系统中,植物对不同土层水分利用存在显著差异。基于氢氧稳定同位素 (δD 、 $\delta^{18}\text{O}$) 特征及同位素质量守恒原理的分析表明,随不同种植密度及月份的变化,三种灌丛植物在不同种植密度和月份中对各土层水分的利用具有明显差异。利用直接对比法可初步确定植物的吸水层位(图4),植物对各潜在水源的利用率需要模型计算获得。如图5、图6和图7所示,不同柠条种植密度对不同土层土壤水分利用率存在显著性差异。5 月份灌木 T_1 主要吸收 0—40 cm 土壤水分,0—20 cm、20—40 cm 土层 T_1 土壤水分利用率为 27.97%、23.27% 高于 T_2 — T_4 , T_2 主要吸收 40—100 cm、100—200 cm 土壤水分,利用率为 21.27%、19.77%, T_3 、 T_4 则主要依赖 200—300 cm,利用率为 20.03%、22.33%。短花针茅的木质部水同位素主要波

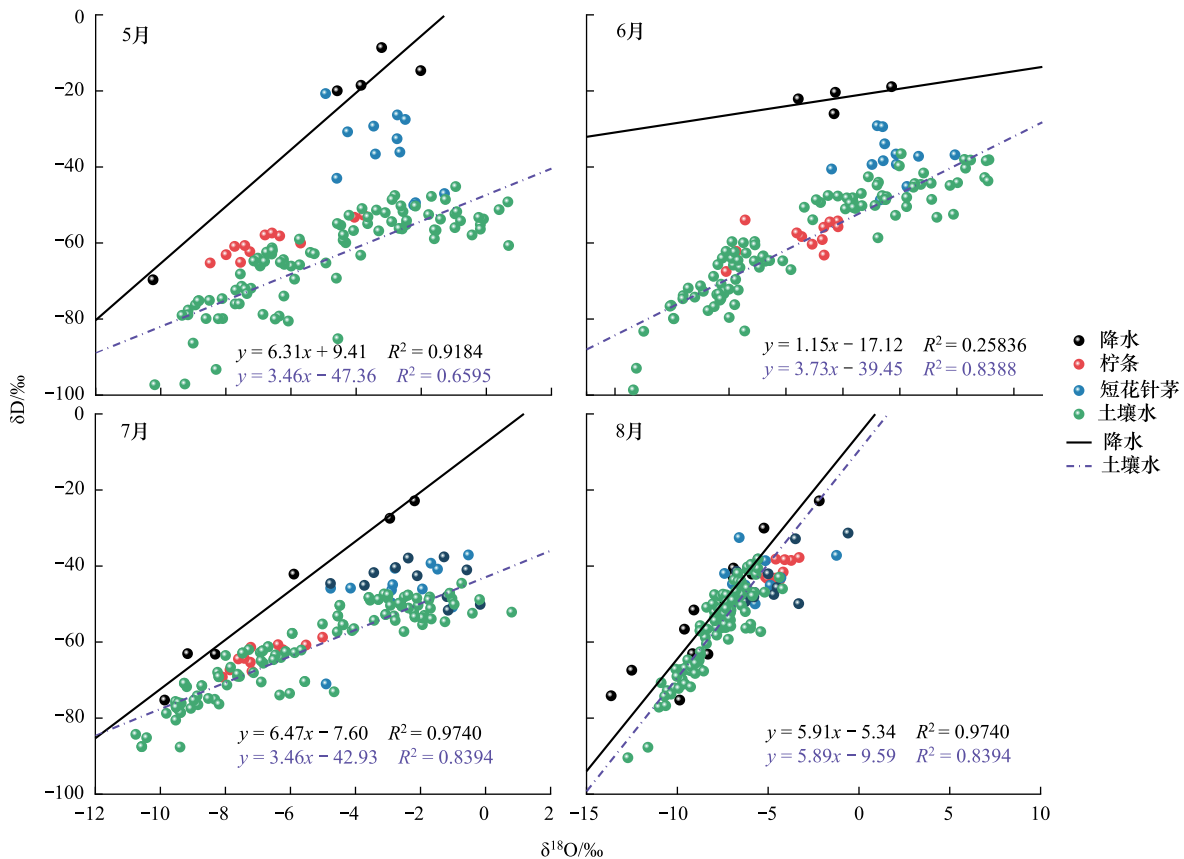


图3 研究区大气降水线、土壤水线及植物茎干水和土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in atmospheric precipitation line, soil water line, plant stem water, and soil water in the study area

动范围在 0—40 cm 土层土壤水同位素值区间波动,主要利用浅层土壤水分贡献率范围为 32.67—46.27%,而 T_2 土层 0—20 cm 对土壤水的利用率高达 46.27% 高于 T_1 、 T_3 、 T_4 。随种植密度增加短花针茅对浅层土壤水分的利用率呈先增后降再升的动态变化。6 月份 T_1 、 T_3 、 T_4 灌草系统中柠条仍以吸收 0—100 cm 土壤水为主,各土层吸收比例范围为 20.50%—26.43%,其中 T_4 密度下柠条对 0—20 cm、20—40 cm 土层水分吸水比例 26.43% 高于 T_1 — T_3 , T_2 则主要利用中深层土壤水分;短花针茅在种植密度 T_3 (56.43%)、 T_4 (58.47%) 对 0—20 cm 土壤水分利用率高于 T_1 (36.10%)、 T_2 (42.20%)。

7 月份,柠条水分利用模式表现出很强的可塑性,柠条 T_1 、 T_2 以 0—40 cm 主浅层土壤水分为主, T_3 、 T_4 主要利用中深层土壤水分(40—300 cm),且随密度增加,浅层水利用率递减,中深层水利用率递增。牛枝子在 T_4 密度下对 20—40 cm 土层水的利用率为 47.4%,而短花针茅则呈现相反趋势, T_1 、 T_2 主要吸收 20—40 cm 土层土壤水分,吸水比例分别为 45.20%、48.13%, T_3 、 T_4 更依赖 0—20 cm 土层土壤水(利用率 42.5%)。8 月份,受降雨补给影响,各密度下的柠条均对表层土壤水(0—40 cm)具有高度依赖,吸水比例范围为 20.73%—25.97%。短花针茅与牛枝在 0—20 cm 土层吸水比例相近,而在土层 20—40 cm 变现出差异性,种植密度 T_4 的短花针茅吸水比例(50.87%) 高于 T_1 — T_3 ;种植密度 T_1 的牛枝子吸水比例(51.27%) 高于 T_2 — T_4 。

3 讨论

3.1 荒漠草原不同密度灌草系统对土壤水分的动态调控机制

草地灌丛化过程中的水分合理利用是全球旱地生态系统面临的重要挑战,也是直接影响荒漠草原植被功

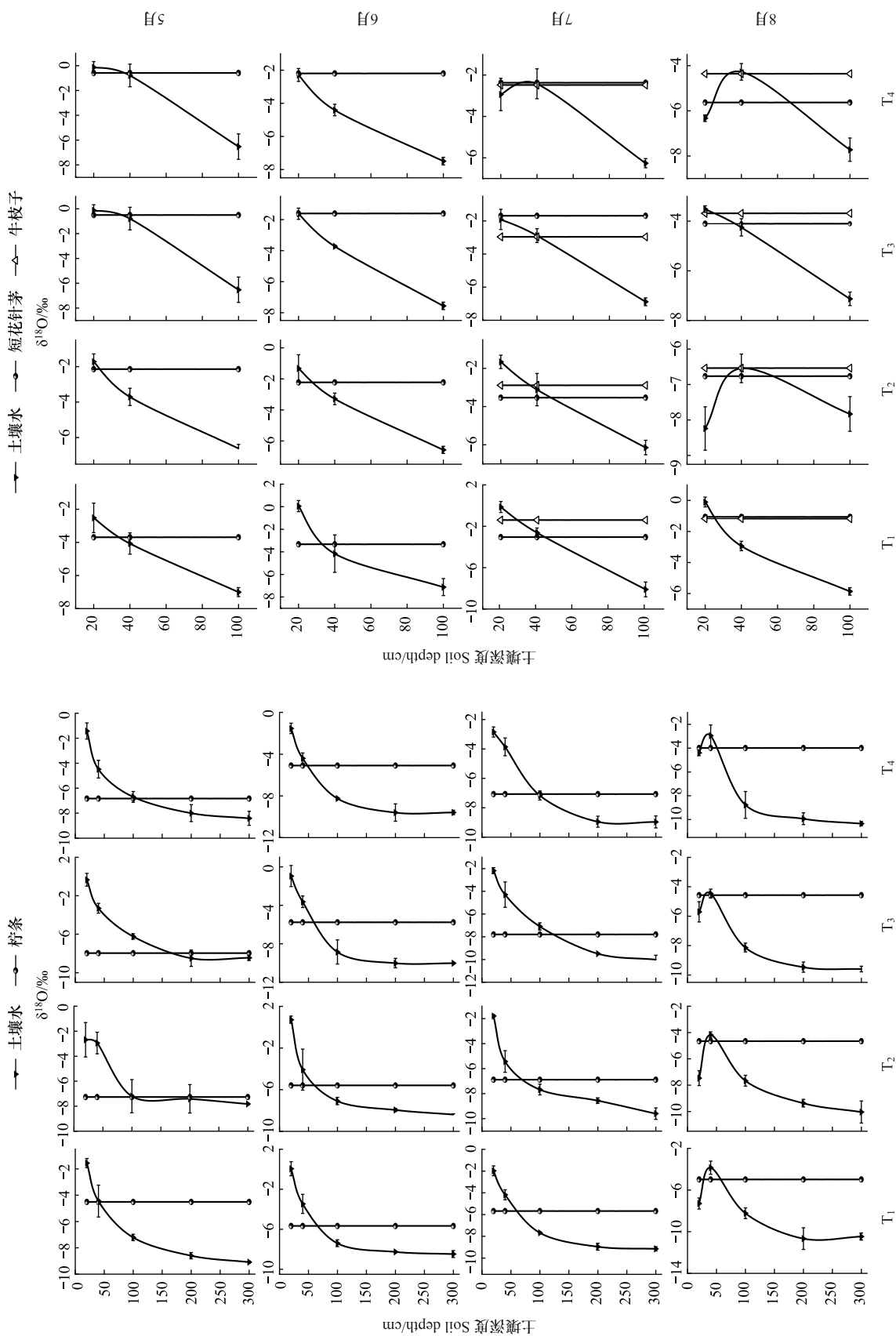


图4 灌木系统中三种植物 $\delta^{18}O$ 与土壤水 $\delta^{18}O$ 的分布
Fig.4 Distribution of $\delta^{18}O$ in three plants and soil water in shrub-encroached grassland

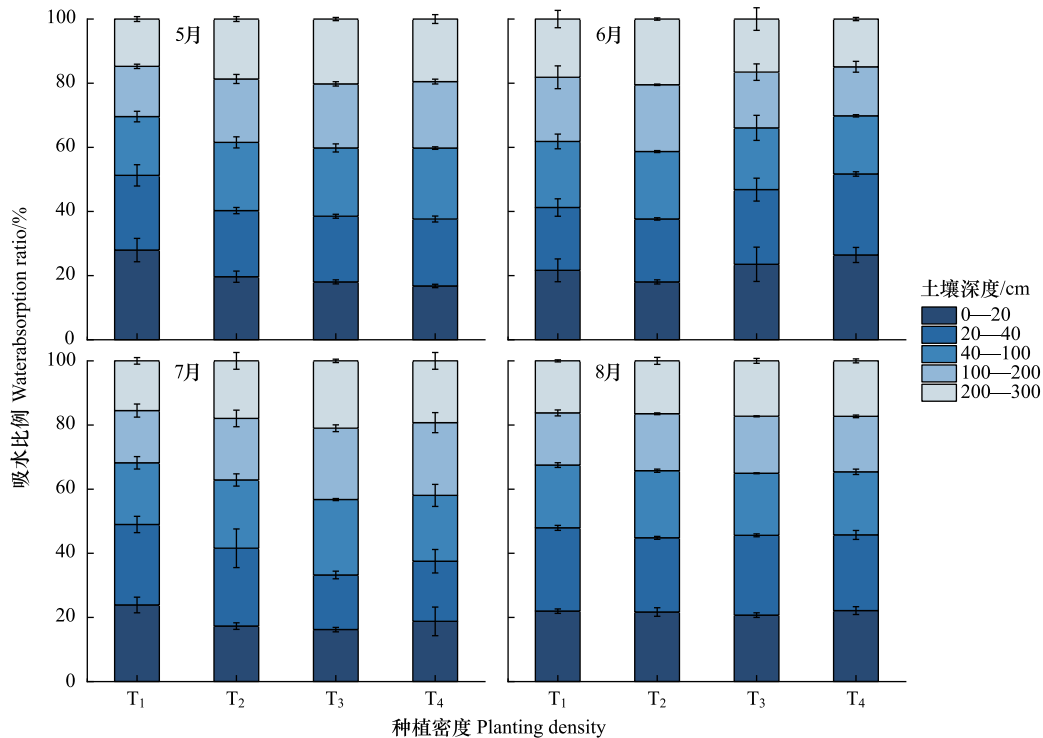


图5 不同柠条种植密度对不同土层水的吸收比例

Fig.5 The absorption ratio of water in different soil layers by different planting densities of *Caragana korshinskii*

图中 T₁, 种植密度 1200 株/hm² planting densities of 1200 plant/hm²; T₂, 种植密度 1600 株/hm² planting densities of 1600 plant/hm²; T₃, 种植密度 2352 株/hm² planting densities of 2352 plant/hm²; T₄, 种植密度 3076 株/hm² planting densities of 3076 plant/hm²

能性状、生态系统生产力及群落结构的关键限制因子^[16]。荒漠草原土壤水分大尺度上是有降雨量、植物群落特征、植物类型及植物分布格局和地形环境所控制,而小尺度上是有植被密度、土壤微生物及人为的干扰等因素的调控^[17-19]。地区性土壤水分也具有潜在规律性与季节性,本研究表明在整个生长季 4—10 月份随不同种植密度的变化灌丛浅层(0—40 cm)、中层(40—140 cm)土壤水分波动显著,而深层土壤水分(140—200 cm)波动较缓且呈现出蓄积—消耗—再蓄积的循环过程,这一水分动态与植被根系分布、蒸散耗水和降水入渗过程的相互作用密切相关。荒漠草原灌丛浅层土壤蒸发强烈、降雨、草本植物萌发期对表层土壤水分利用等都会引起表层土壤水分的波动。有研究表明,灌丛中灌木更倾向利用深层土壤水分,中层土壤水分既受灌木吸收(灌木可贡献 10%—30%的水分利用)的影响,也受草本植物(根系多分布于 0—60 cm)生长发育的耗水作用,从而导致中层土壤水分趋于多变且亏缺状态;而深层土壤则受外界因素较少,水分动态相对稳定^[20]。

从种植密度影响来看,总体上土壤含水量随密度升高呈下降趋势,本研究中发现不同密度灌草复合系统的土壤含水量总变化趋势符合这一规律性,但 2352 株/hm²、1600 株/hm²种植密度的深层土壤含水量小于 3076 株/hm²。这可能与种植条带间距和柠条根系特征及土壤机构特征有关,柠条根系属于主根和侧根均发育性从而具有庞大的根系,侧根伴随着主根逐渐增长,主根可在短时间形成较深的根系并会形成大量侧根及根毛,正是这种独特的根系特征有利于吸收不同深度土壤水分也更利于吸收深层土壤水分^[21-22]。对于间距相近的 2352 株/hm²、3076 株/hm²高密度种植的柠条在根系生长过程中垂直和水平面方向与土壤接触面积都会增加,必然会与土壤发生强烈的相互作用从而在土壤中会形成大孔隙,高密度从而改善灌丛水分入渗通道,减少地表径流,可通过大空隙通道增强降雨向深层的补给并贮存于深层土壤^[23]。高密度种植也可通过根系分泌有机质改善深层土壤结构对深层土壤水分起到保水作用^[24-25],种内水分竞争激烈,灌木转向吸收深层土

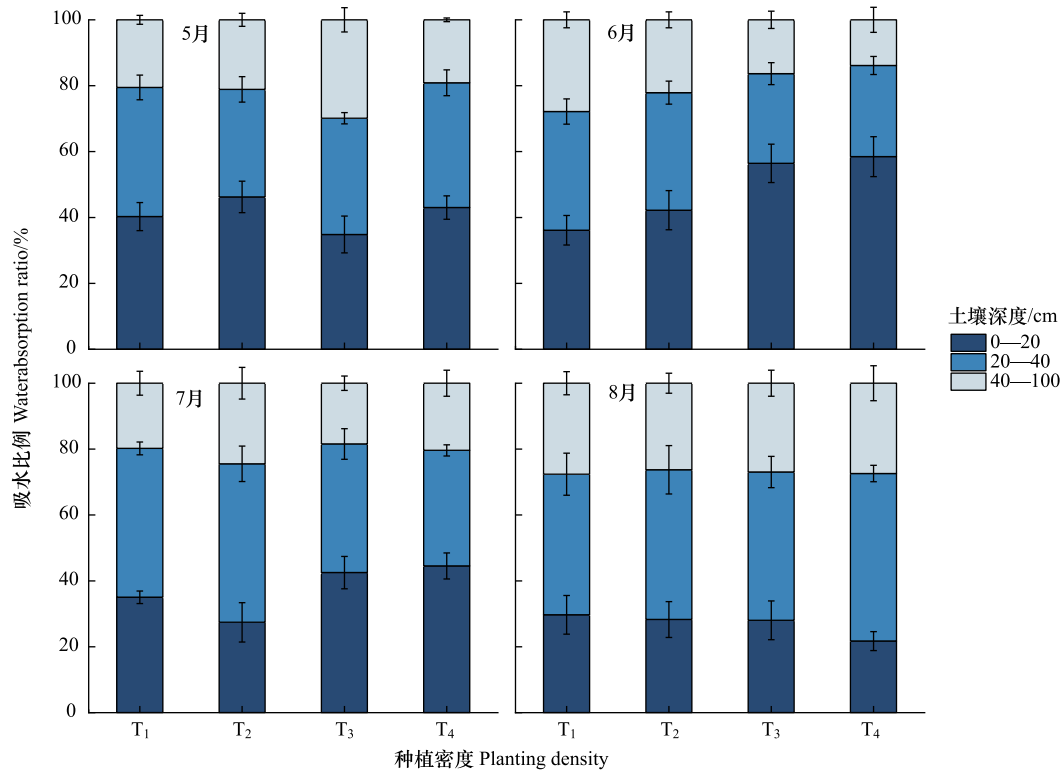


图 6 不同柠条种植密度灌草系统中短花针茅对不同土层水的吸收比例

Fig.6 The absorption ratio of water in different soil layers by *Stipa breviflora* in different planting densities of *Caragana korshinskii* in shrub-encroached grassland

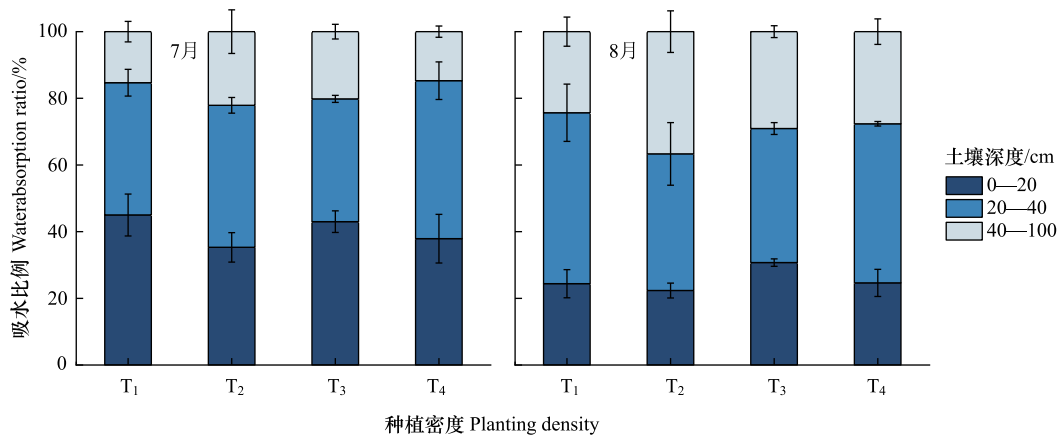


图 7 不同柠条种植密度灌草系统中牛枝子对不同土层水的吸收比例

Fig.7 The absorption ratio of water in different soil layers by *Lespedeza potaninii* in different planting densities of *Caragana korshinskii* in shrub-encroached grassland

壤水,浅层水分被草本强烈消耗,但由于根系改善土壤结构和入渗,特定条件下深层贮水反而得到补充,在一定程度上缓解由于植物耗水增加带来的水分胁迫,体现出系统自我调节的生态机制。低密度 1200 株/hm²系统水分竞争较弱,土壤水分保持相对较高,尤其浅层水分受草本与灌木共利用,波动明显但恢复较快。中密度 1200 株/hm²水分竞争开始显现,中层水分利用增强,土壤含水量介于低高密度之间。

3.2 种植密度对灌丛化植物水分利用策略及其水分平衡的启示

本研究发现 5、6 月份不同密度灌草系统土壤水氢氧同位素(δD 、 $\delta^{18}O$)随土壤深度的增加逐渐贫化现象,这主要受入渗和蒸发的影响,此现象与 Wang 等研究结果一致^[26]。灌丛土壤水氢氧同位素(δD 、 $\delta^{18}O$)因 7、8 月份降雨与强烈蒸发的影响 7 月份草本植物土壤水和 8 月份灌木、草本植物土壤氢氧同位素随土壤深度的增加呈现贫化—富集波动现象。种植密度显著影响植物水分利用策略:5—7 月,低密度的柠条主要吸收浅层土壤水分,高密度则更倾向利用深层土壤水分,这与 Chen 等在黄土高原灌丛水分利用策略研究结果一致^[27];灌草中草本则与灌木出现了相反的结果。这是因为在柠条在生长季初期高密度灌丛可能会导致种间竞争激烈促使深层土壤中主根和部分侧根更倾向吸收中深层土壤水分,并为规避种内竞争,依据最优分配理论将资源投向深层根系,扩大水分摄取生态位;而草本则强化对浅层水分的快速利用,形成生态位互补,减缓竞争压力。低密度柠条竞争相对较小并且根系更倾向利用集中浅层土壤发达的侧根系吸收土壤水分。灌木通过“肥岛效应”改变土壤结构和水文过程,创造优先路径,改善自身水分环境;草本则利用灌丛冠下降水再分配和微地形集水,提高浅层水可用性^[28]。7 月份高密度灌草系统牛枝子,对 20—40 cm 土壤水分利用率为 47.4% 高于短花针茅,但 8 月份两种草本植物对 20—40 cm 土壤水分利用又出现了反差现象。这与两种草本的生理特性有关,草本的生理特性可以适应水分竞争及生存环境从而优先吸收浅层土壤水分,草本这种利用水分策略反映出对环境的一种竞争和适应机制^[29]。一般当土壤含水量大于 8% 时,才能满足草本植物的生长发育,若浅层土壤水分小于 8% 时,草本植物吸水策略则会由浅层向深层演变^[30]。有研究表明^[31],牛枝子在土壤含水量阈值 10% 时,满足生理指标且抗旱生理达到最强。短花针茅对土壤水分的响应与吕浩等研究结果一致^[32]。针茅属的须根系集中分布于 0—40 cm 土层,根际效应使短花针茅高效利用浅层土壤水分并灵活运用降水入渗的优先流效应^[33]。同时种植密度是影响牧草生长的主要因素,不同密度筛可以选出具有不同吸水策略的植物功能群,草本如短花针茅则通过提高水分利用效率或物候调节(如缩短生命周期)来应对水分胁迫并且不同密度对株高、相对叶绿素含量和花序数有显著影响^[34]。种植密度对牛枝子和短花针茅生长空间和光照有直接影响,增加种植密度,牛枝子和短花针茅的生长空间和光照受到影响,导致植株间竞争激烈,可直接对草本植物水分利用策略做出响应^[35]。

随柠条灌丛发育,其耗水量增加可能导致土壤含水量持续低于萎蔫系数,引发荒漠草原生态系统土壤旱化现象,并在土壤深层中形成永久土壤干层。这一过程体现了植被—水分反馈中的正向调节机制,可能最终导致系统状态转换。因此合理的控制种植密度、掌握密度阈值并遵循生态阈值以期达到土壤水分动态平衡和提高生态系统的修复能力和抗逆能力是对当地植被恢复和生态安全具有意义。

4 结论

本研究初步探讨不同柠条种植密度对荒漠草原灌草系统植物水分利用策略的影响。研究表明:柠条种植密度调控灌草系统植物的水分利用生态位,降雨事件驱动植物水分来源的共性转变。在低密度灌草系统中,柠条优先利用 0—40 cm 浅层土壤水分,优势草本植物短花针茅则主要依赖 20—40 cm 土层的土壤水分,二者水分利用区间存在一定重叠;在高密度灌草系统中,柠条的水分利用深度向 40—300 cm 中深层土层拓展,而优势草本植物牛枝子则集中吸收 20—40 cm 土层的土壤水分,灌草系统中灌木和草本植物间水文生态位呈现明显分离状态。在降雨较多的 6 月和 8 月,无论柠条种植密度高低,灌草系统中植被的水分来源均一致转变为 0—40 cm 浅层土壤水,表明短期充足降雨可显著改变荒漠草原灌草植物的水分利用策略,使其优先利用浅层新增土壤水分。

参考文献(References):

- [1] Hao R F, Yu D Y. Optimization schemes for grassland ecosystem services under climate change. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 1158-1169.
- [2] 马学喜, 高英志. 灌丛化对草地土壤水文过程影响的研究进展. *草业学报*, 2025, 34(4): 212-222.
- [3] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, Adams H D, Collins A D, Dickman L T, Newman B D, Stockton E A, McDowell N G. Warming combined

- with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees. *New Phytologist*, 2017, 213(2): 584-596.
- [4] Marfia A M, Krishnamurthy R V, Atekwana E A, Panton W F. Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(6): 937-946.
- [5] 林光辉. 稳定同位素生态学: 先进技术推动的生态学新分支. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 119-122.
- [6] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, Roger E, Reynolds J F, Whitford W G. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 709-722.
- [7] Hoekstra N J, Finn J A, Hofer D, Lüscher A. The effect of drought and interspecific interactions on depth of water uptake in deep- and shallow-rooting grassland species as determined by $\delta^{18}\text{O}$ natural abundance. *Biogeosciences*, 2014, 11(16): 4493-4506.
- [8] Fort F, Volaire F, Guilioni L, Barkaoui K, Navas M L, Roumet C. Root traits are related to plant water-use among rangeland Mediterranean species. *Functional Ecology*, 2017, 31(9): 1700-1709.
- [9] Archer S R, Peters D P C, Burruss N D, Yao J. Mechanisms and drivers of alternative shrubland states. *Ecosphere*, 2022, 13(4): e3987.
- [10] 苏荣霞, 马彦平, 王红梅, 赵亚楠, 李志丽. 荒漠草原不同间距灌丛引入对土壤细菌碳源利用和胞外酶活性的影响. *草业学报*, 2023, 32(11): 93-105.
- [11] 吕婷, 赵西宁, 高晓东, 潘燕辉. 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. *植物生态学报*, 2017, 41(2): 175-185.
- [12] 程中秋, 张克斌, 刘建, 常进, 王晓, 王黎黎, 苏鹏飞. 宁夏盐池荒漠草原区天然草地植物生态位研究. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 36-40, 47.
- [13] 韦丽军, 卞莹莹, 宋乃平. 宁夏盐池县草场退化因素分析. *水土保持通报*, 2007, 27(1): 122-125, 154.
- [14] 黄飞, 刘静, 王博, 李志刚. 灌枝覆盖对宁夏荒漠草地土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2025, 45(7): 3218-3228.
- [15] 张宇, 张明军, 王圣杰, 郭蓉, 车存伟, 杜勤勤, 马转转, 苏鹏燕. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1356-1368.
- [16] 韩磊, 韩永贵, 黄晓宇, 高阳, 孙兆军. 氢氧稳定同位素示踪旱区植物水分来源与利用策略. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(3): 435-441.
- [17] Yang A L, Zhang H, Yang X J, Zhang X P. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on vegetation NPP in the Qilian Mountain. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2023, 29(1): 202-221.
- [18] 罗立娇, 高晓东, 赵连豪, 安庆蓉, 马南方, 赵西宁. 黄土丘陵区植被群落水分利用策略对干旱胁迫的响应. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 280-288.
- [19] Duniway M C, Snyder K A, Herrick J E. Spatial and temporal patterns of water availability in a grass-shrub ecotone and implications for grassland recovery in arid environments. *Ecohydrology*, 2010, 3(1): 55-67.
- [20] Darrouzet-Nardi A, D'Antonio C M, Dawson T E. Depth of water acquisition by invading shrubs and resident herbs in a *Sierra Nevada meadow*. *Plant and Soil*, 2006, 285(1): 31-43.
- [21] 牛西午, 丁玉川, 张强, 徐强. 柠条根系发育特征及有关生理特性研究. *西北植物学报*, 2003, 23(5): 860-865.
- [22] 梁海斌, 史建伟, 李宗善, 牛俊杰. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 87-93.
- [23] Li X-Y, Yang Z-P, Li Y-T, Lin H. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133-1144.
- [24] 张燕燕. 黄土丘陵沟壑区土壤微生物生物量及群落代谢多样性研究——以甘肃定西龙滩流域为例[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2009.
- [25] 杨阳, 刘秉儒, 宋乃平, 杨新国. 人工柠条灌丛密度对荒漠草原土壤养分空间分布的影响. *草业学报*, 2014, 23(5): 107-115.
- [26] Wang J, Fu B J, Lu N, Zhang L. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 27-37.
- [27] Chen Z X, Wang G H, Pan Y H, Shen Y Y, Yang X L. Determination of the water-use patterns for two xerophyte shrubs by hydrogen isotope offset correction. *Tree Physiology*, 2024, 44(1): tpad124.
- [28] 梁燊, 刘亚斌, 石川, 庞景豪, 李国荣, 朱海丽, 胡夏嵩. 黄土区不同龄期灌木柠条锦鸡儿根系的分布特征及其固土护坡效果. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 114-124.
- [29] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰等水与非等水行为. *植物生态学报*, 2017, 41(9): 1020-1032.
- [30] 王力, 邵明安, 张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 436-442.
- [31] 王占军, 季波, 纪童, 蒋齐. 5种豆科牧草抗旱性研究与评价. *草业学报*, 2023, 32(10): 187-199.
- [32] 吕浩, 王兴, 宋乃平, 陈娟, 张艺斐, 吴旭东, 余殿, 杨新国, 王磊, 陈林. 荒漠草原4种典型草本植物群落土壤水分动态对极端干旱降水的响应. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 145-152.
- [33] Lv G Y, Wang Z Y, Guo N, Xu X B, Liu P B, Wang C J. Status of *Stipa breviflora* as the constructive species will be lost under climate change in the temperate desert steppe in the future. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107715.
- [34] 连彩云, 马忠明, 王智琦, 薛亮, 唐文雪, 罗双龙. 膜下微喷灌条件下水氮耦合对制种玉米产量及水肥效应的影响. *寒旱农业科学*, 2025(1): 39-46.
- [35] 贺文骅, 海涛, 刘计璇, 赵鑫, 邹岩, 孙雪, 苏一诺, 于森, 王贺, 谢佳铭, 廖壮, 李红. 不同种植密度对野大麦产量及牧草品质的影响. *饲料博览*, 2023(6): 1-6, 11.