

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

吕浩^{1,2,3}, 王兴^{1,2,3}, 宋乃平^{1,2,3,4}, 陈娟^{1,2,4}, 张艺斐^{1,2,3},
吴旭东⁵, 余殿⁶, 杨新国^{1,2,3}, 王磊^{1,2,3}, 陈林^{1,2,3}

(1.宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 2.西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 3.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 4.宁夏大学农学院, 银川 750021; 5.宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002; 6.宁夏哈巴湖国家级自然保护区管理局, 宁夏 盐池 751500)

摘要: 为明晰荒漠草原典型植物群落土壤水分对极端干旱降水的响应。以 4 类典型植物群落(蒙古冰草、苦豆子、短花针茅、芨芨草)为研究对象, 于 2020—2021 年分别监测 4 类植物群落 0—120 cm 土壤含水量, 探讨其土壤水分在消耗期、恢复期和稳定期的动态特征及对降水的响应。结果表明: 土壤水分消耗期, 土壤含水量为 4.56%~7.87%, 呈亏缺状态, 并且随着极端干旱持续从土壤浅层 0—40 cm 向深层 80—120 cm 演变; 土壤水分恢复期, 较为集中的 V 级降水(单次 > 20 mm)能够恢复深层 80—120 cm 土壤水分, 随着极端干旱持续, 4 类植物群落土壤水分的恢复主要呈现在浅层 0—40 cm; 土壤水分稳定期, 随着极端干旱持续 4 类植物群落各层土壤含水量均 < 10%。综合比较 4 类植物群落, 短花针茅群落土壤含水量在各时期相对较高, 且浅层和深层土壤水分恢复具有同步性, 可在水分限制区域植被恢复保育具有一定参考价值。

关键词: 极端干旱; 土壤水分动态; 典型植物群落; 荒漠草原

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0145-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.06.019

Response of Soil Moisture Dynamics in Four Typical Herbaceous Communities to Extreme Drought Precipitation in the Desert Steppe

LÜ Hao^{1,2,3}, WANG Xing^{1,2,3}, SONG Naiping^{1,2,3,4}, CHEN Juan^{1,2,4}, ZHANG Yifei^{1,2,3},
WU Xudong⁵, YU Dian⁶, YANG Xinguo^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}, CHEN Lin^{1,2,3}

(1.School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021; 3.Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021; 4.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021; 5.Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002; 6.Ningxia Habahu National Nature Reserve Administration, Yanchi, Ningxia 751500)

Abstract: To clarify the response of soil moisture to extreme drought precipitation in typical plant communities in the desert steppe. In this study, the soil water content of four typical plant communities (*Agropyron mongolicum*, *Sophora alopecuroides*, *Stipa breviflora*, and *Achnatherum splendens*) in this region is studied. The 0—120 cm soil water content of these communities was monitored from 2020 to 2021, respectively, to analyze the dynamic characteristics of soil water content and its response to precipitation during the consumption, recovery, and stabilization periods. The results showed that during the soil water consumption period, the soil water maintained a deficit state of 4.56%~7.87%, and this state extended from 0—40 cm shallow soil layers to 80—120 cm deep soil layers with the continuous drought. During the soil moisture recovery period, the concentrated V grade precipitation (single > 20 mm) could restore the soil moisture in the depth of 80—120 cm, and the soil moisture was mainly recovered in the shallow layers of 0—40 cm with the continuous drought. During the soil moisture stabilization period, the soil water content in each layer of the four plant communities was > 10% as the drought continued. By comprehensive comparison of the four plant communities, the

收稿日期: 2023-04-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(32171872, 31901367); 宁夏农业科技资助创新项目(NGSB-2021-14-03)

第一作者: 吕浩(1996—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事退化草地生态系统修复研究。E-mail: 2522519222@qq.com

通信作者: 王兴(1986—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事退化草地生态系统修复研究。E-mail: wx08@nxu.edu.cn

soil water content of *Stipa breviflora* community was relatively high in each period, and the soil water recovery of this community was synchronized in the shallow layers and deep layers, which has important reference value for vegetation restoration and conservation in the water-restricted areas.

Keywords: extreme drought; soil moisture dynamics; typical plant communities; desert steppe

荒漠草原生态系统植被结构简单、生产力低、稳定性差,对自然或人为干扰响应较为敏感^[1]。历史上由于严酷的自然条件和过度人为干扰,该区域曾出现严重的植被退化、土地沙漠化,严重威胁区域和社会可持续发展^[2]。植被恢复是应对上述挑战的有效措施,通过围栏封育、草方格固沙、人工林建设等生态恢复实施,当前草地植被覆盖度得到提高,荒漠化得到逆转^[3]。然而,随着植被恢复年限增加,荒漠草原区域出现土壤干层、地下水位下降等恢复不可持续问题^[4]。降水是该区域植被恢复的主要水分来源^[5],气候与土壤生境共同决定荒漠草原植被类型的空间分布,尤其是降水—地表覆被—土壤水分构成的连续体界面是决定荒漠草原生态系统恢复的关键组成部分^[6]。因此,深入理解不同植被类型的土壤水分动态对降水的响应,对科学调控植被与土壤水分协同的可持续恢复具有重要意义。

土壤水分作为荒漠草原植被恢复的主要限制因素,其补给主要依赖于降水^[7]。较小降水事件(<5 mm)只能补给浅层(0—10 cm)土壤水分,但在植被覆盖度较高的区域却表现为无效降水;较大降水事件(>10 mm)的降水,能够对植被覆盖度较高的深层(>40 cm)土壤水分有一定的补给作用^[8-10]。然而,荒漠草原区 70%降水集中在植被生长季,且 >5 mm 的降水事件占据全年降水总量的 60%左右^[11]。生长季地表植被冠层、枯落物、土壤结皮对降水的截流作用使土壤水分恢复效应减弱,从而植被恢复需水与土壤水资源匮乏矛盾加剧,不利于恢复后的植被自我维持^[12-13]。

围绕上述植被与土壤水分的矛盾焦点,有研究^[14-15]表明,地表植被类型、覆盖度、蒸散发、物种组成等均可以影响不同土层土壤水分时空变化格局。植物群落优势种类型和覆盖度是影响降水对土壤水分补充恢复的关键因素,可作为植被与土壤水分协同恢复目标的重要优化参数^[16]。因此,降水量稀少且时空分布极不均匀的荒漠草原草区,土壤水分时空变化特征对降水事件响应的研究,需要充分考虑不同优势种的植被类型。当前研究^[17]多集中在灌木林地、草本植物群落降水的再分配过程。然而,对荒漠草原不同优势种草本植物群落土壤水分如何响应降水研究较少,尤其是面对连续极端干旱气候的研究鲜有报道。

不同植被类型土壤水分的匮乏与恢复,除降水因素外,还受到土壤自然属性(类型、质地等)、地形因素影响^[18]。例如,荒漠草原黏粉粒含量较高的地带性灰钙土,降水入渗困难,但具有较高的保水性能,而退

化生境粗砂粒含量较高的风沙土,降水入渗迅速,但土壤蓄水能力较差^[19];地势较低的区域容易形成湿地为代表的土壤水分高值分布区,地势较高的坡地由于地理位置、朝向、坡度不同,对浅层和深层土壤水分产生不同影响^[20]。此外,受土壤、地形因素影响,荒漠草原植物群落类型呈斑块镶嵌分布,为全面深入理解土壤水分动态提供天然实验室。

综上,在连续 3 年极端干旱的降水背景下(2019—2021 年),分别围绕荒漠草原蒙古冰草、苦豆子、短花针茅、芨芨草为优势种的 4 类典型植物群落为研究对象。2020—2021 年,针对每一类群落,开展土壤水分监测调查,分析不同植物群落类型中土壤水分的时间变化特征,探讨不同群落土壤水分恢复与消耗的差异性,揭示该区域 4 类典型植物群落对极端干旱降水的响应,为构建应对极端干旱事件发生的植被可持续恢复模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏哈巴湖自然保护区($37^{\circ}36'17''$ — $38^{\circ}02'04''$ N, $106^{\circ}53'23''$ — $107^{\circ}39'40''$ E)位于宁夏盐池县中北部海拔 1 300~1 622 m。该区属于中温带大陆性气候,年均降水量 296.0 mm,且分布不均匀,主要集中在 8—10 月,占全年降水量的 60%以上^[21]。区域年均蒸发量约 2 131 mm,为降水量的 7.2 倍,日照长,年平均日照时间 2 876 h,年平均气温 7.7 $^{\circ}$ C,年平均无霜期为 128 天。研究区的主要植物种有蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、细枝岩黄耆(*Hedysarum scoparium*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix cheilophila*)等,土壤类型主要为灰钙土与风沙土^[19]。

1.2 试验设计

本研究选择宁夏哈巴湖自然保护区 12 km $\times$ 12 km 景观单元为研究对象,自东向西,按照约 1 km $\times$ 1 km 的分辨率将其划分为不同的监测单元。在每个监测单元植被、土壤类型相对均匀的区域设置土壤水分(0—120 cm)监测点,于 2019 年布设草本群落 135 个,灌木群落 9 个。前期研究工作基于多元回归树和土壤理化属性调查数据,将草本植物群落土壤水分监测样点划分为蒙古冰草(67 个)、苦豆子(7 个)、短花针茅(45 个)、芨芨草(16 个)为优势种的 4 种典型群落^[22]。4 类群落包含地带性、隐域性、杂草类等类型,

在该区域具有典型性和代表性^[22]。

2020—2021年,在研究区域使用 Vantage Pro2 自动气象观测仪观测降水(mm),观测频率为 0.5 h,使用 Weather Link 软件下载数据。每年从 4 月 15 日至 11 月 15 日,采用时域反射仪(TDR)测定所有布设样点的土壤含水量,分为 6 层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120 cm)进行测定,测定频率为月中、月末各 1 次,每层土壤含水量 3 次重复。

1.3 数据处理

利用气象数据计算日降水量(mm)和总降水量(mm)。为便于统计分析,按降水量划分为 I~V 级(0—1, 1—5, 5—10, 10—20, >20 mm)^[11]。研究区域降水格局明显特征为研究区域降水分配不均,主要集中在 8—10 月;I~III 级降水事件(单次<10 mm)占全年降水次数的 60%以上,而总降水量不足全年总降水量的 30%;IV、V(单次>10 mm)级降水次数不足全年降水次数的 20%,而降水量达到全年总降水量的 50%以上(图 1)。

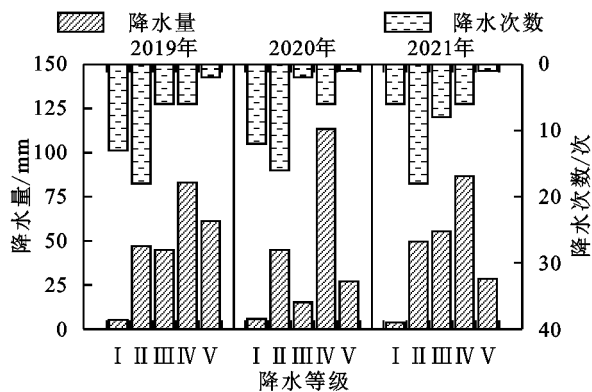


图 1 2019—2021 年研究区域降水特征

根据国际降水年型划分标准^[21](枯水年: $P_i < \bar{P} - 0.33\delta$;丰水年: $P_i > \bar{P} + 0.33\delta$),研究区域多年平均降水 296.0 mm(标准差 $\delta = 89.7$ mm),枯水年、丰水年的降水量临界值分别为 266.4, 325.6 mm。2019—2021 年研究区域总降水量分别为 257.3, 215.8, 224.1 mm(图 1)。2019 年已处于枯水年,随后 2 年总降水量分别减少 41.5, 33.2 mm,本试验将 2020—2021 年定义为极端干旱年份。

针对土壤水分季节变化,以往研究^[11]根据区域季节降水进行划分,将该区域内土壤水分季节变化分为土壤水分消耗期(4 月 1 日至 7 月 31 日)、土壤水分恢复期(8 月 1 日至 10 月 31 日)、土壤水分稳定期(11 月 1 日至翌年 3 月 31 日)。参考以往划分依据并结合实际野外定点监测,将土壤水分消耗期调整为 4 月 15 日至 7 月 31 日、土壤水分稳定期调整为 11 月 1—15 日,且土壤水分季节变化与干湿季降水同步(图 2)。

4 类植物群落各监测点土壤含水量的计算,首先以每层 3 次重复的平均值作为该土层土壤含水量值;

然后分别计算 3 个时期各层平均土壤含水量、消耗期消耗量、恢复期恢复量;最后采用 Kruskal-Wallis test 分析 3 个时期不同土层、不同群落之间土壤含水量差异性以及消耗量、恢复量的差异性,并用 Origin 21.0 软件对分析结果进行作图。

2 结果与分析

2.1 消耗期土壤水分动态特征

2020 年除芨芨草群落在 6 月土壤水分出现通体干旱外,4 类植物群落 0—40 cm 土层均为土壤干旱层,平均土壤含水量为 4.56%~7.87%,且土壤水分极值均在深层 80—120 cm,平均土壤含水量为 7.19%~9.93%(图 2)。相比 4—5 月植物返青期,6—7 月为植被生长旺盛期,4 类植物群落 0—120 cm 土层土壤水分消耗量为 -0.40%~1.33%(图 3)。不同土层对比,4 类植物群落在浅层 0—20 cm 土壤含水量显著低于其他土层($p < 0.05$),20—100 cm 土层间均无显著性差异($p > 0.05$)(图 4)。不同群落对比,短花针茅群落浅层 0—20 cm 土壤含水量显著高于其他 3 类植物群落($p < 0.05$),在 20—120 cm 土层只有短花针茅群落显著高于蒙古冰草群落($p < 0.05$)(图 5)。

2021 年 4 类植物群落土壤干旱层均出现在 6—7 月,且蒙古冰草群落与苦豆子群落土壤干旱层从浅层 0—40 cm 向深层 80—120 cm 演变,平均土壤含水量为 4.96%~7.22%(图 2)。短花针茅群落与芨芨草群落土壤干旱层仍为浅层 0—40 cm,平均土壤含水量为 5.35%~7.18%,深层 40—120 cm 土壤含水量为 7.51%~8.94%(图 2)。相比返青期,4 类植物群落 0—120 cm 土层土壤水分在生长旺季消耗量为 0.63%~4.58%,且各层土壤水分消耗量均高于上年,约为上年消耗量的 3~4 倍(图 3)。不同土层对比,4 类植物群落各层土壤含水量均无显著性差异($p > 0.05$)(图 4)。不同群落对比,显著性差异仅出现在浅层 0—20 cm,主要表现为短花针茅群落土壤含水量显著高于蒙古冰草群落与芨芨草群落($p < 0.05$),在 20—120 cm 土层 4 类植物群落间均无显著差异($p > 0.05$)(图 5)。

2.2 恢复期土壤水分动态特征

2020 年在集中 V 级降水事件下(单次>20 mm,累计 90.1 mm),4 类植物群落 0—120 cm 土层土壤含水量恢复到 11.69%~14.32%水平,恢复深度>80 cm(图 2)。相比土壤水分消耗期,4 类植物群落浅层 0—40 cm 土壤水分恢复较为明显($p < 0.05$),恢复量为 0.75%~7.53%(图 3)。此外,短花草群落土壤水分呈浅层 0—40 cm 与深层 40—80 cm 同步恢复(图 2)。不同土层对比,4 类植物群落浅层 0—40 cm 土壤含水量均显著高于其他土层($p < 0.05$)(图 4)。不同群落对比,芨芨草群落在浅层 0—40 cm 土壤含水

量显著低于其他 3 类植物群落($p < 0.05$)(图 5)。

2021 年无集中 V 级降水事件下(只发生 1 次 28 mm 降水事件), 4 类植物群落浅层 0—40 cm 土壤水分恢复到 8.37%~10.78% 水平(图 2)。相比土壤水分消耗期, 土壤水分在 0—40 cm 土层分别恢复量为 0.22%~1.89%(图 3), 而 40—120 cm 土层恢复量为

—1.27%~—0.30%(图 3)。不同土层对比, 芨芨草群落各土层间均无显著性差异($p > 0.05$), 其他 3 类植物群落在表层 0—20 cm 土壤含水量显著高于其他土层($p < 0.05$)(图 4)。不同群落对比, 且蒙古冰草群落深层 100—120 cm 土壤含水量显著低于其他 3 类植物群落($p < 0.05$)(图 5)。

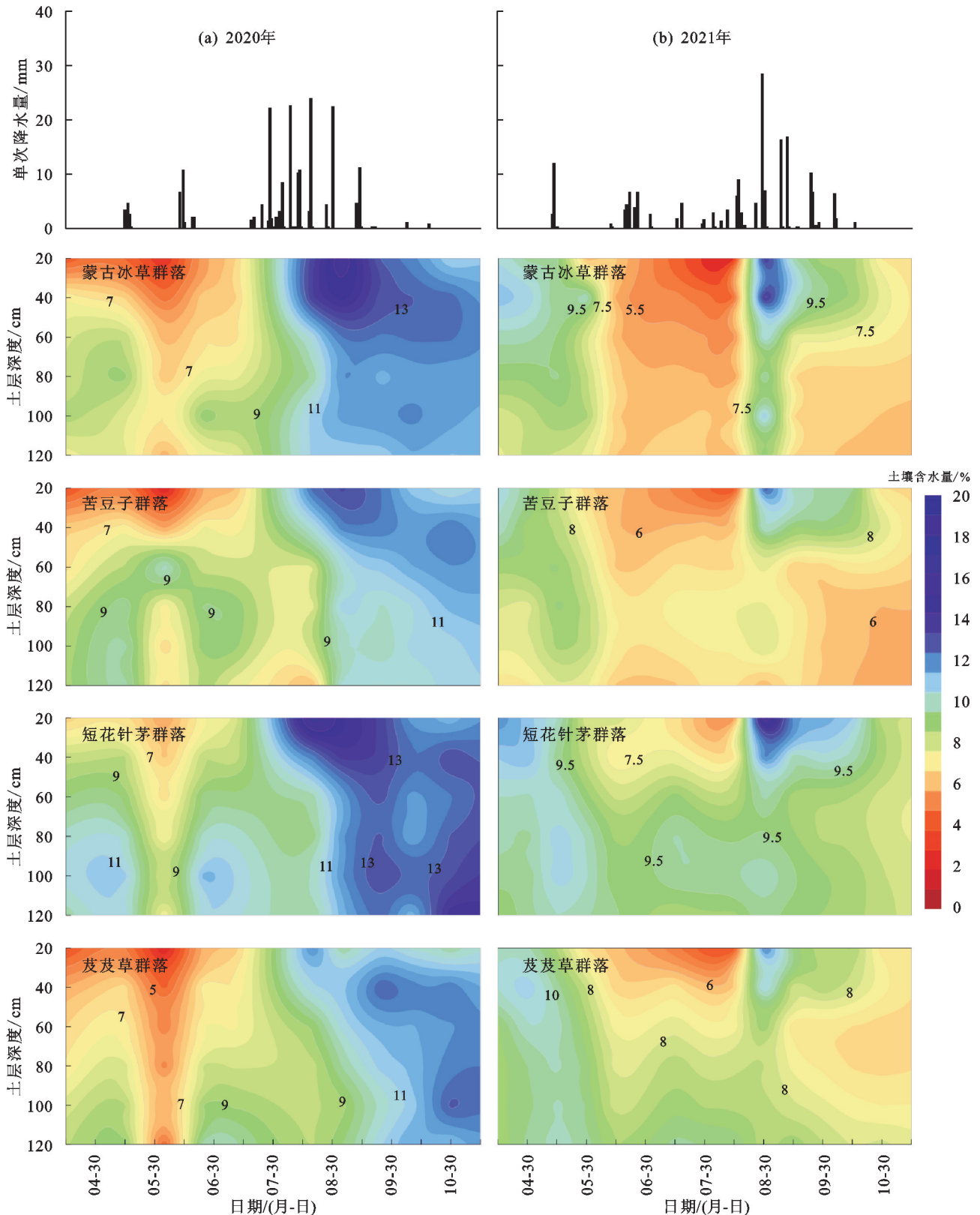
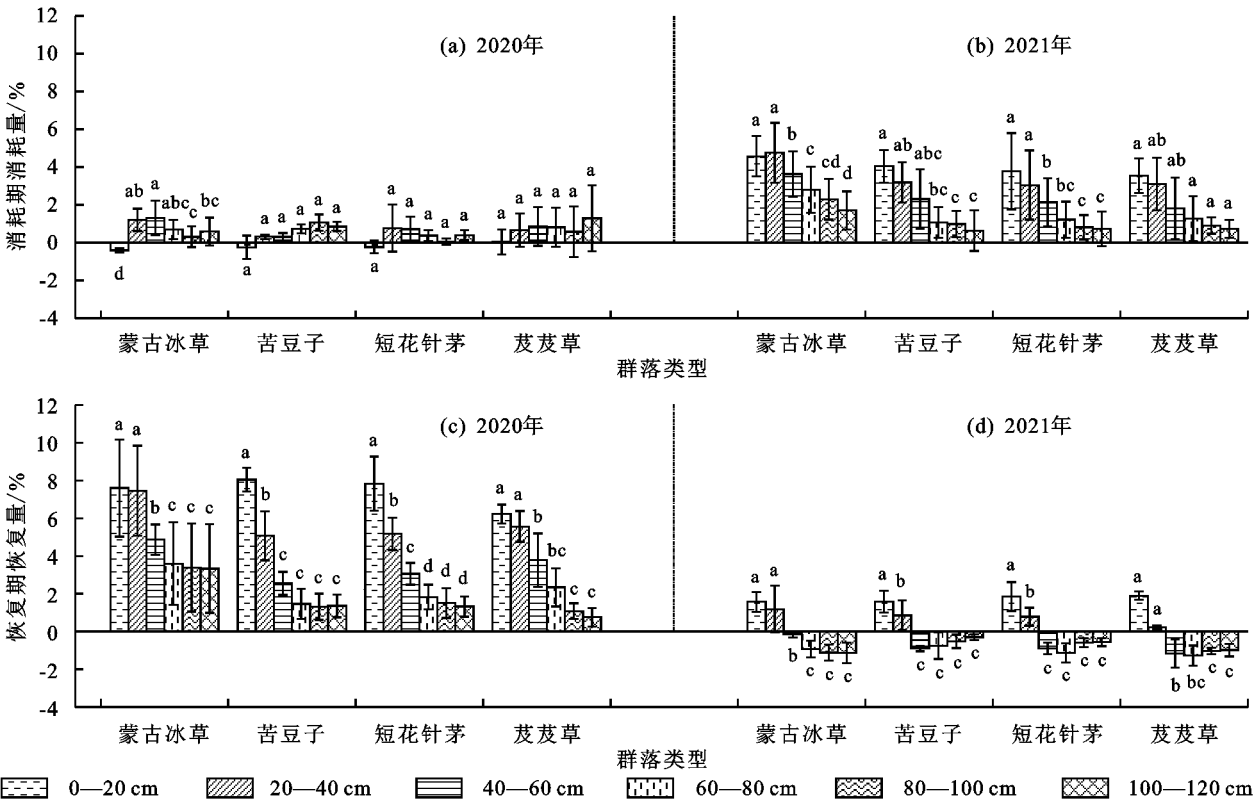


图 2 4 类植物群落土壤含水量动态



注:图柱上方不同小写字母表示同一群落不同土层间土壤含水量消耗量与恢复量差异显著($p<0.05$)。

图 3 4 类植物群落土壤水分消耗量与恢复量

2.3 稳定期土壤水分动态特征

2020 年,4 种群落平均土壤含水量为 9.87%~13.64%(图 2),且均在 0—20 cm 土层土壤含水量显著低于 20—40 cm 土层($p<0.05$)(图 4)。2021 年 4 类群落平均土壤含水量为 6.64%~8.81%(图 2),蒙古冰草群落在 0—60 cm 与 60—120 cm 土层呈现出显著性差异($p<0.05$);短花针茅在 20—40,40—100 cm 土层土壤含水量呈现出显著性差异($p<0.05$)(图 4)。不同群落对比,2020—2021 年土壤含水量在 4 类群落间均无显著性差异($p>0.05$)(图 5)。4 类植物群落年差异主要表现在年际间,2020 年 4 类群落各层土壤含水量均 $>10\%$,而 2021 年土壤含水量均 $<10\%$ (图 5)。

3 讨论

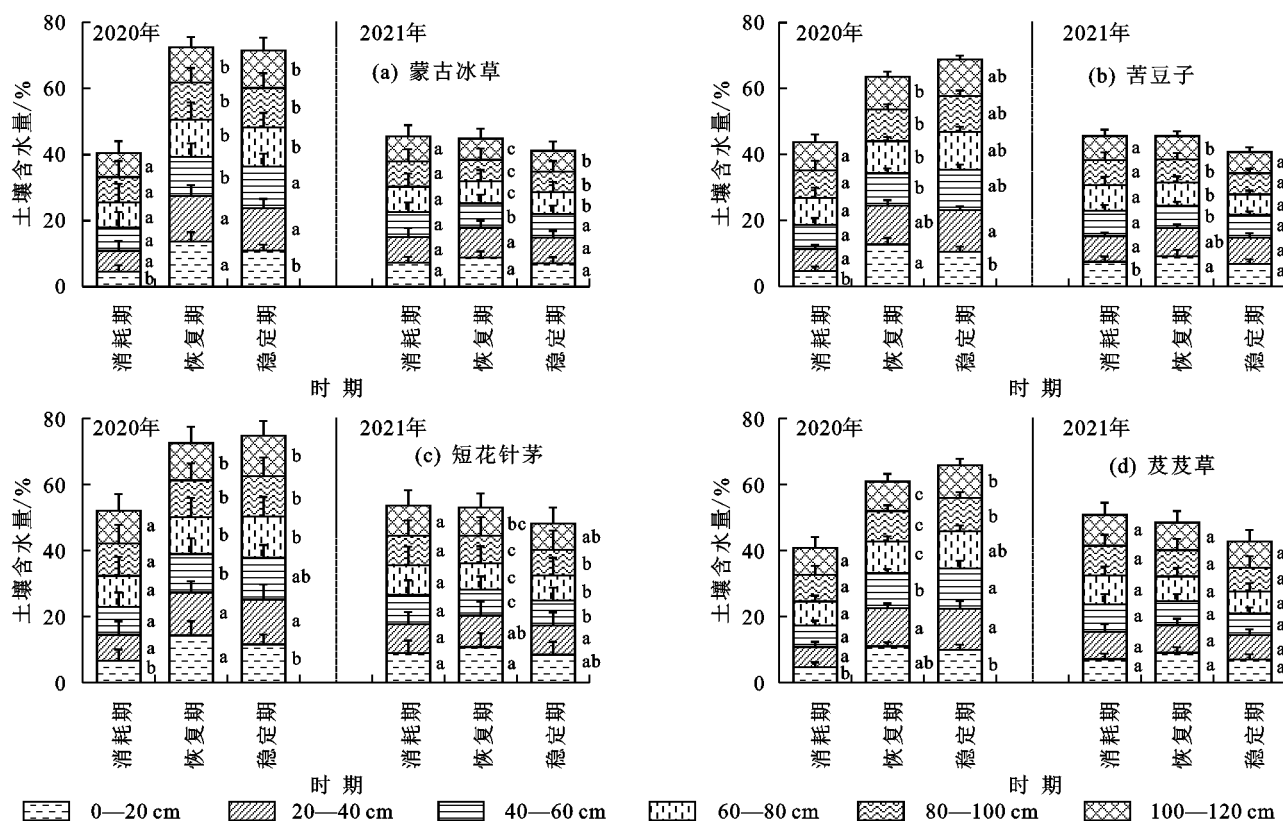
降水是荒漠草原生态系统土壤水分的主要来源,土壤水分的消耗主要包括旱季(4—7 月)蒸腾耗散与土壤蒸发^[16]。随着雨季(8—10 月)到来,气温与日照强度逐渐降低减弱土壤水分蒸发,同时植被生长活动减弱蒸腾耗水减少,土壤水分逐步得到补给与恢复,并最终在冬季保持相对稳定。

3.1 消耗期土壤水分对降水的响应

2020—2021 年消耗期 0—40 cm 土壤含水量维持在 4.00%~8.00%,有研究^[23]表明,草本植被生长一般要求土壤含水量在 8% 以上水平,因此该时期 0—40 cm 土层土壤含水量处于匮乏状态,且由浅层

向深层演变。此现象可以解释为土壤水分来源的显著减少,研究区域平水年降水量基本维持在 290 mm 左右^[11]。本研究自 2019 年 257 mm 降水量表明开始干旱发生(图 1),随后 2 年该时期降水量比平水年同期减少 30%~40%,干旱程度进一步加剧;同时,该时期以 I—III 级降水事件为主(单次 <10 mm),此降水特征在研究区 40%~50% 的植被覆盖下,通过植被冠层、枯落物和土壤结皮的截流过程^[12],极大地限制降水对土壤水分的补充与恢复。2021 年该时期土壤水分消耗总量是上年同时期的 3~4 倍(图 3),主要由于上年恢复期对土壤水分进行充分补充,适宜水分条件满足 4 类植物群落次年植物返青,随着植物迅速生长对水分需求的增加,从而对土壤水分消耗量远高于上年同期。

不同植物群落对比,短花针茅群落在该时期保持相对较高的含水量,主要是短花针茅群落生境为灰钙土^[24],富含 CaCO_3 可以与细颗粒物质进行结合,形成良好的胶结剂,对土壤水分的保持功能提升具有重要作用^[25]。芨芨草群落在 2020 年 0—120 cm 土层出现通体干旱,因为草本优势种植物根系分布和提取消耗,基于同位素水分利用的研究^[26]表明,干旱年份荒漠草原短花针茅、蒙古冰草、苦豆子对浅层 0—40 cm 土壤水分利用比例为 43.88%,80.48%,71.60%,芨芨草对深层土壤 80—140 cm 水分利用高达 30.00% 以上。



注:图柱上方不同小写字母表示同一时期不同土层间土壤含水量存在显著差异($p < 0.05$)。

图 4 4 类植物群落不同土层土壤含水量比较

3.2 恢复期土壤水分对降水的响应

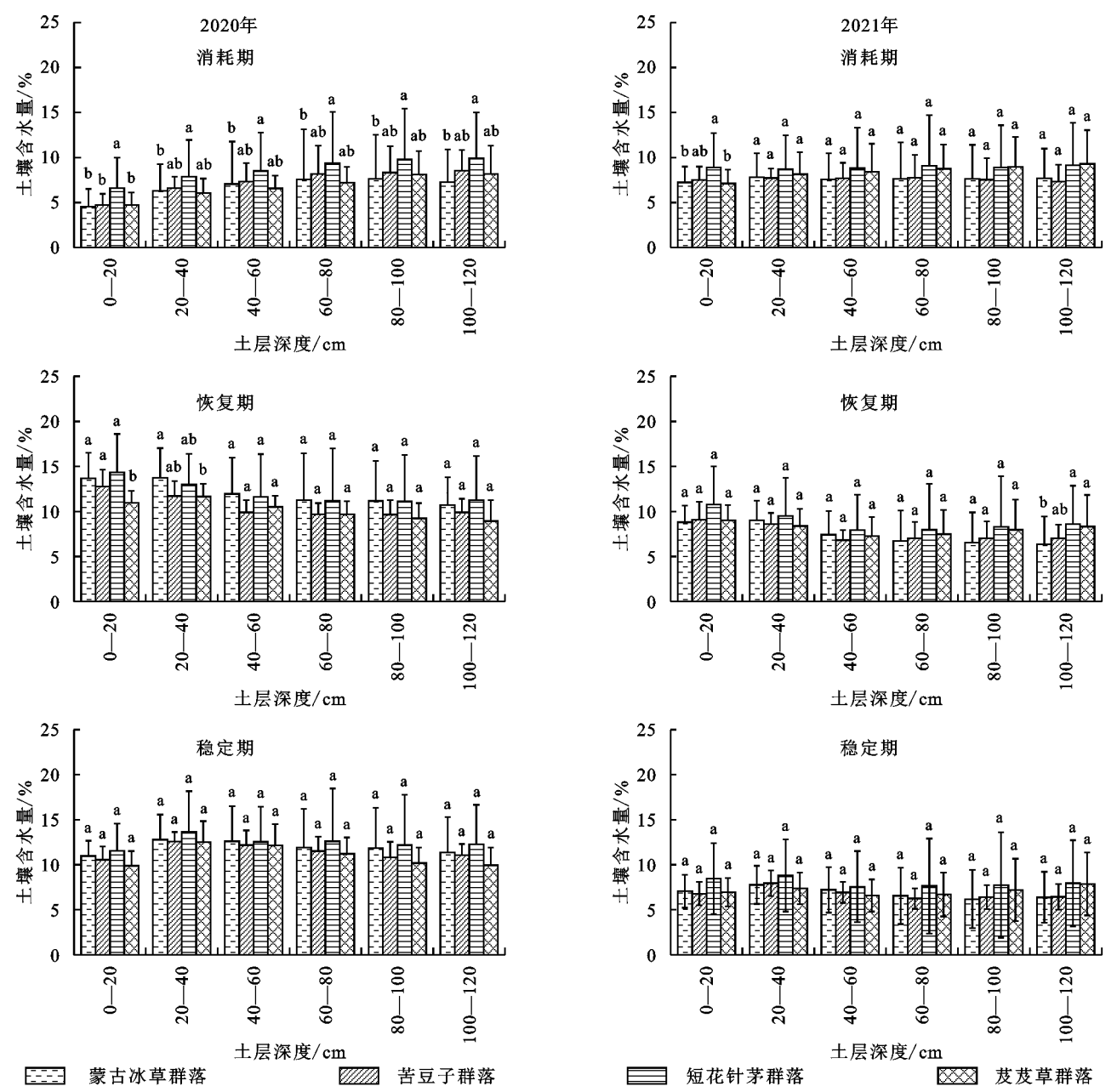
降水对荒漠草原土壤水分的补给具有一定阈值,降水量 >10 mm 才能启动对土壤水分的人渗补给过程^[8-9]。本研究发现,较为集中 V 级降水(单次 >20 mm)对土壤水分补充深度 >80 cm,无集中 V 级降水只能对浅层 0—40 cm 土壤水分起到补充作用。已有研究^[10]表明,单次 >20 mm 降水对提高土壤含水量和土壤贮水量起着关键作用,从而更容易被根系发育较深的植物利用,与本研究结果相同。但也有围绕毛乌素沙地不同演替阶段油蒿群落土壤水分研究^[27]发现, >20 mm 降水对土壤水分的补给深度不超过 60 cm,与本研究结果存在一定差异。可能是人工油蒿林建设主要针对流动沙化生境,油蒿灌丛对降水截留作用较大,因此,相同降水模式下降水对土壤水分的补充深度远小于本次研究。

除降水格局外,植被类型、土壤特性等因素均可影响土壤水分恢复的时空特征^[15]。本研究土壤垂直剖面浅层 0—40 cm 与深层 40—120 cm 土壤层水分恢复,在短花针茅群落中呈现同步性,但在其他 3 类群落中存在不同程度的异步性(图 2)。土壤水分恢复的垂直分布格局差异,可能与植物根系生长形成的土壤大孔隙度导致较高的渗透优先流有关^[28]。短花针茅具有在 0—40 cm 土层分布大量密集的须根

系^[24],根际效应可能导致较高的降水入渗优先流效应,在 2020 年充足的降水下保障浅层和深层土壤恢复的同步性。蒙古冰草群落与苦豆子群落生境一般以风沙土为主,土壤毛管孔隙度大^[29],大降水(单次 >20 mm)能够迅速入渗补给土壤水分,甚至出现爆发式恢复特征。2020 年芨芨草群落土壤含水量显著低于其他土层,主要有 2 种可能原因。首先,群落生境位于研究区低洼湿地^[30],湿地干涸容易引起土壤板结,土壤中毛管孔隙度小,导致土壤水分下渗减缓;其次,芨芨草灌丛直径一般为 80 cm,且该群落灌丛密集、覆盖度高,叶面对降水的截留相对较多,被截留的部分降水通过蒸发的形式直接返回大气,削弱降水对土壤水分补充和恢复。

3.3 稳定期土壤水分对降水的响应

土壤水分进入稳定期后,该研究区内群落植物大多凋零,植物对土壤水分的消耗减弱。因为冬季土壤逐渐形成冻土,所以在该时段土壤水分相对较稳定。只有 2020 年在表层(0—20 cm)土壤含水量低于 20—40 cm 土层,主要由于植被凋零地表裸露于空气中,表层土壤水分通过蒸发散失。土壤含水量差异主要体现在年际间,2020 年 4 类群落各层土壤含水量均 $>10\%$,而 2021 年均 $>10\%$,主要取决于前期土壤含水量^[14]。



注:图柱上方不同小写字母表示同一土层同一时期不同植物群落间土壤含水量差异显著($p<0.05$)。

图 5 不同植物群落土壤含水量比较

4 结论

(1)土壤水分消耗期,占比高达 70%左右的 I~III 降水(<10 mm)无法补充土壤消耗的水分,土壤水分维持在 4.56%~7.87%的亏缺状态。随着干旱持续,植物对土壤水分的消耗至少增加 3 倍,诱发土壤水分亏缺状态从浅层 0—40 cm 向深层 40—120 cm 演变,尤其体现在适宜沙土生境的蒙古冰草群落与苦豆子群落,地表植被系统崩溃风险大大增加。

(2)土壤水分恢复期,较为集中的 V 级降水事件(>20 mm)能够对深层 80—120 cm 土壤水分起到补充恢复。随着干旱持续,整体剖面 0—120 cm 土层土壤水分恢复转变为浅层 0—40 cm 土壤水分恢复,深层 40—120 cm 土壤水分匮乏。

(3)在土壤水分稳定期,受前期土壤含水量影响,4 类植物群落土壤含水量在 2020 年各层均>10%,而 2021 年均<10%。

(4)不同植物群落对比,短花针茅群落土壤水分始终保持相对较高,且浅层 0—40 cm 和深层 80—120 cm 恢复具有的同步性,应对未来极端干旱气候更加稳健,在植被恢复保育中具有一定参考价值。

参考文献:

[1] 宋乃平,杨明秀,王磊,等.荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化[J].生态学杂志,2014,33(10):2618-2624.
[2] 李新荣,赵洋,回嵘,等.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J].地理科学进展,2014,33(11):1435-1443.
[3] Liu J K, Bian Z, Zhang K B, et al. Effects of different

- fencing regimes on community structure of degraded desert grasslands on Mu Us desert, China[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(6): 3367-3377.
- [4] 潘庆民, 孙佳美, 杨元合, 等. 我国草原恢复与保护的问题与对策[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(6): 666-674.
- [5] Bhandari J, Pan X B, Dhruva Bijaya G C. Spatial and seasonal variation in rain use efficiency in semiarid grasslands of Inner Mongolia[J]. *Advances in Meteorology*, 2015(5): 1-7.
- [6] 宋一凡, 卢亚静, 刘铁军, 等. 荒漠草原不同雨量带土壤—植物—微生物 C、N、P 及其化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 4011-4023.
- [7] Guo R, Wang X K, Ouyang Z Y, et al. Spatial and temporal relationships between precipitation and ANPP of four types of grasslands in Northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1024-1030.
- [8] 常昌明, 牛建明, 王海, 等. 小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 260-265.
- [9] 罗叙, 李建平, 张翼, 等. 荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 142-150, 158.
- [10] 陈林, 宋乃平, 杨新国, 等. 荒漠草原不同土地利用类型土壤水分对降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 153-160.
- [11] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 198-206.
- [12] 乔文英, 安琪琪, 常小峰, 等. 黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 69-76.
- [13] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. The role of biological soil crusts in soil moisture dynamics in two semiarid ecosystems with contrasting soil textures[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 489: 74-84.
- [14] Dai L C, Fu R Y, Guo X W, et al. Soil moisture variations in response to precipitation across different vegetation types on the northeastern qinghai-tibet plateau [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: e854152.
- [15] Li X Y, Liu L C, Duan Z H, et al. Spatio-temporal variability in remotely sensed surface soil moisture and its relationship with precipitation and evapotranspiration during the growing season in the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(4): 1809-1820.
- [16] 郭亚飞, 张丽华, 赵锐锋, 等. 月尺度视角下荒漠草原植物群落特征对降水变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(7): 1895-1906.
- [17] 王正宁, 王新平, 刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 755-760.
- [18] Fu C F, Bian H Z, X J J, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture in different types of sand dune in the Mu Us Sandy Land, adjacent to north of Chinese Loess Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(4): e151.
- [19] 陈晓莹, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原两种类型土壤的水分动态对比[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1560-1570.
- [20] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3199-3217.
- [21] 周娟. 基于 GF-1/WFV 时间序列的荒漠草原猪毛蒿群落提取及时空特征研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [22] 王启学, 王兴, 余轩, 等. 荒漠区湿地植物群落分类排序及其与土壤环境因子的关系[J]. *草业科学*, 2023, 40(1): 37-45.
- [23] 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[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 436-442.
- [24] Lv G Y, Wang Z Y, Guo N, et al. Status of *Stipa breviflora* as the constructive species will be lost under climate change in the temperate desert steppe in the future[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: e107715.
- [25] 李虎, 贺婧, 刘冲, 等. 农田灰钙土中有机质和碳酸钙对 Zn 吸附—解吸行为的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(6): 1786-1793.
- [26] Chen J, Wang X, Song N P, et al. Water utilization of typical plant communities in desert steppe, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(9): 1038-1054.
- [27] 张军红, 吴波, 杨文斌, 等. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1597-1603.
- [28] Wu G L, Liu Y, Yang Z, et al. Root channels to indicate the increase in soil matrix water infiltration capacity of arid reclaimed mine soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 133-139.
- [29] 李国旗, 赵盼盼, 邵文山, 等. 围封条件下荒漠草原两种植物群落土壤理化性状与酶活性的研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(7): 49-59.
- [30] Wu H W, Li X Y, Li J, et al. Differential soil moisture pulse uptake by coexisting plants in an alpine *Achnatherum splendens* grassland community[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): e914.