

灌丛化对高寒草甸土壤水力性质的影响

尹霞^{1,2}, 李冬梅¹, 李易³, 王平¹, 刘淑英¹, 高永恒^{2,3}

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,兰州 730070;
2.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;3.中国科学院成都生物研究所,成都 610041)

摘要: 全球气候变化背景下,青藏高原高寒草甸灌丛化已经成为青藏高原植被景观的主要变化趋势。为了更好地认识和理解灌丛化与高寒草甸生态系统的关系,以青藏高原东缘川西锦鸡儿(*Caragana Erinacea* Kom)和金露梅(*Potentilla Fruticosa*)灌丛化高寒草甸为对象,采用环刀浸泡法和双环入渗法研究了其在未灌丛化、轻度灌丛化、中度灌丛化和重度灌丛化阶段土壤持水和入渗能力特征。结果表明:(1)2种灌丛化草甸土壤容重在中度灌丛化阶段最低,总孔隙度在中度灌丛化阶段最高。(2)随着灌丛化程度的增加,2种灌丛化草甸土壤含水量呈增加趋势,表现为在重度灌丛化阶段最高;土壤毛管持水量、田间持水量和最大持水量呈抛物线变化趋势,在中度灌丛化阶段最大。(3)2种灌丛化草甸土壤的初渗率、稳渗率和入渗速度随灌丛化程度的增加总体表现为增加趋势,其中在中度和重度灌丛化阶段显著高于未灌丛化阶段。(4)相关性分析表明,灌丛化草甸土壤的入渗指标与土壤含水量、非毛管孔隙度有显著相关关系。因此,高寒草甸灌丛化过程中,土壤水力性质的改变通常发生在中度和重度灌丛化阶段。

关键词: 高寒草甸; 灌丛化; 土壤持水; 土壤入渗

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0121-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.017

Effects of Shrub Encroachment on Soil Hydraulic Properties in Alpine Meadow

YIN Xia^{1,2}, LI Dongmei¹, LI Yi³, WANG Ping¹, LIU Shuying¹, GAO Yongheng^{2,3}

(1.College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 3.Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

Abstract: Under the background of global climate change, shrub development of alpine meadow has become the main trend of landscape change in Qinghai-Tibet Plateau. In order to better understand the relationship between shrub and alpine meadow ecosystem, this paper taking shrub alpine meadow of *Caragana Erinacea* Kom and *Potentilla Fruticosa* in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau as an example, characteristics of soil water holding capacity and infiltration capacity during non-shrub, mild shrub, moderate shrub and severe shrub were studied by using ring knife soaking method and double ring infiltration method. The results showed that: (1) Soil bulk density was the lowest and total porosity was the highest in moderate shrub stage. (2) With the increase of degree of shrub, soil water content of two kinds of shrub meadows showed an increasing trend, and it was the highest in heavy shrub stage. Soil capillary water capacity, field water capacity and maximum water capacity showed a parabolic trend, and maximum water capacity was the highest in moderate shrub stage. (3) The initial infiltration rate, stable infiltration rate and infiltration rate of two kinds of shrub meadow showed an increasing trend with increase of degree of shrub, and infiltration rates in moderate and severe shrub stages was significantly higher than that in non-shrub stage. (4) Correlation analysis showed that soil infiltration index was significantly correlated with soil water content and non-capillary porosity. Therefore, changes of soil hydraulic properties usually occur in moderate and severe shrub stages during alpine meadow shrub development.

Keywords: alpine meadow; shrubs; soil water retention; soil infiltration

灌丛化是指草原生态系统中出现灌木或木本物种密度、覆盖率和生物量增加而导致草本植物盖度减少的现象,是过去一个半世纪世界草原景观最重要的变化之一。全球有近 10%~20% 的地区正在经历灌丛化^[1],东非埃塞俄比亚的博拉娜区 82.8% 的草地遭受着灌丛的威胁^[2];我国内蒙古自治区以小叶锦鸡儿为主的灌丛化草地面积已经增长至 $5.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3],以鄂尔多斯高原草地灌丛化现象尤为严重^[4];青藏高原高寒草甸的灌丛化发展更为迅速,从 1990 年到 2009 年,分布面积约为 $0.48 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的青藏高原高寒草甸,已至少有 39% 的面积发生灌丛化^[5];在未来几十年,灌木植被向西北方向的明显扩展将会取代青藏高原的大部分高寒草甸和部分高寒草原^[6]。灌丛化的发展不仅改变了草地植物群落结构,还可能改变土壤环境条件,如土壤物理结构和水分的再分配^[7]。

灌丛化进程中,木本植物通过多种影响因素与土壤产生不同的作用机制,从而显著影响土壤水分分布^[8-9]。灌丛斑块有明显的“沃岛效应”,通常认为这种沃岛是靠植被在地表径流过程中对水和养分的聚集来维持的^[10],不同程度的灌丛化以及其下的土堆影响了地表径流的连续性,从而改变了地表和地下土壤水分的时空动态^[11]。地上木本植物的冠层与降雨强度相互作用,通过降雨截留和土壤表面遮阴效果影响土壤水分模式^[12-13],堆积在木本植物表层的凋落物可能会增加土壤的渗透性^[14],并且降低土壤的温度,从而有可能操控土壤持水量的增减。在地下,木本植物更大的功能性体现在生根深度,可能会减少深层土壤水分的排放^[15],而根系的吸收和水分的再分配可能进一步改变木本植物下土壤含水量的空间变化^[16]。因此,通过以上的研究结果可以预判木本植物与土壤水分之间的相互作用是可变的,但是这些研究缺乏不同灌丛化阶段的定量分析和评估,因为树冠、根系乃至凋落物的差异存在于不同灌丛化阶段,今后这些方面是重点研究内容。

尽管草原灌丛化与土壤水分的关系已有一些研究,但这些研究主要集中在我国北方干旱半干旱草原^[4-5]和澳洲的热带稀树草原^[11],而且这些研究缺乏对不同灌丛化阶段之间土壤物理性质的差异的考察,在青藏高原有零星关于灌木林地土壤水分变化的研究^[14],但鲜有针对高寒草甸灌丛化对土壤水分影响的研究报道。考虑到灌丛化与土壤性质的关系可能在不同气候区域^[15]以及不同灌木物种^[16]之间存在差异,当前非常有必要对面临灌丛化的青藏高原高寒

草甸进行相关研究。本研究以青藏高原东缘川西锦鸡儿(*Caragana Erinacea* Kom)和金露梅(*Potentilla Fruticosa*)灌丛化草甸为研究对象,以未发生灌丛化的高寒草甸为对照,研究了灌丛化高寒草甸在未灌丛化、轻度、中度和重度灌丛化阶段土壤容重、孔隙度、持水及入渗性能的变化规律,揭示灌丛化与高寒草甸土壤物理生态过程的关系,旨在为青藏高原高寒草甸的保护和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原^[17-21]东缘的红原县境内($32^{\circ}50'07''\text{N}$, $102^{\circ}35'34''\text{E}$)(图 1),海拔在 3 500 m 以上,是典型的大陆高原寒温带季风气候,日照时间长,日温差较大,霜冻期长,年均气温 1.4°C ,年均积雪期达 70 天以上,无绝对的无霜期。年平均降水量 792 mm,其中 86% 集中在 5—10 月,年均蒸发量 1 263 mm,年均湿度 60%~70%。研究区土壤类型以亚高山草甸土和高山草甸土为主。高寒草甸常见优势种为莎草科嵩草属(*Kobresia* Wild.)、苔草属(*Carex* Linn.)以及禾本科披碱草属(*Elymus* Linn.)^[22]。

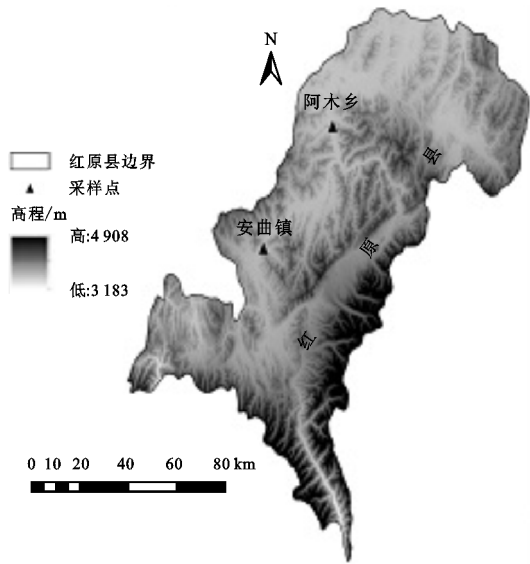


图 1 研究区位置与采样点分布

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集 2021 年 8 月进行实地考察,选择分别位于红原县安曲镇和阿木乡境内的川西锦鸡儿和金露梅灌丛化草甸连续灌丛化梯度的土壤进行采样。Liao 等^[23]认为,灌木、灌木丛和树冠超过 40% 时为较严重灌丛化,以研究处草甸的灌丛化发展程度以及植被盖度为分类标准,将其划分为未灌

丛化(没有灌丛生长的原生草甸)、轻度灌丛化(盖度 20%~40%)、中度灌丛化(盖度 40%~60%)和重度灌丛化(盖度>60%)。以未灌丛化为对照,在每个灌丛化阶段随机选择长势良好的 3 丛作为重复,然后以每丛灌丛斑块垂直投影所在的区域作为灌丛化取样的范围,在范围内的灌丛冠幅下方随机选取采样点。去除表层凋落物,挖取土壤剖面,根据土壤层次分表层(0—10 cm)、次表层(10—20 cm),在每层的中心位置,将环刀垂直插入取样,每层共 3 个土样,1 个样地共计原状土壤样品 24 个,将环刀放平,尽量不要碰撞,带回实验室,立即称取鲜重,然后分别用于测定土壤持水量、孔隙度、渗透性和容重。

1.2.2 测定方法

(1)土壤水分测定。采用环刀(环刀容积为 100 cm³)浸泡法测定土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤田间持水量。分别将装满土壤且揭去上盖的环刀放在水中(水的位置刚好在距环刀顶部 1~2 cm 处)浸泡至少 12 h 后盖上顶盖称重,再揭盖将其放在烘干的散装土上 2 h,立即盖顶盖称重,紧接着去盖放烘干土上 3 天,盖盖立即称重。采用烘干法测定土壤含水量,将渗水以后的环刀放在恒温烘箱中,105 ℃烘至恒重。

(2)土壤容重、孔隙度测定。采用烘干法测定土壤容重,将装有土壤的环刀平稳地放在烘箱内,105 ℃烘干到恒重。

土壤孔隙度的计算公式:

毛管孔隙度=毛管持水量×容重

非毛管孔隙度=(最大持水量—毛管持水量)×容重。

(3)土壤渗透性测定。土壤渗透性采用双环刀(环刀容积为 100 cm³)渗透法测定。将浸水 12 h 后的环刀取出,擦干外壁,在其上套 1 个空环刀(接口处要粘好),将套好的环刀放在漏斗上,底下接 1 个烧杯,向空环刀加水至离环刀口 1 cm 处,加水后自漏斗下面滴出第 1 滴水时开始计时,以后每间隔相等的时间更换漏斗下面的仪器,记录渗水量。每换 1 次烧杯,都要将上面环刀中的水加至原来高度,同时记录水温,直到相等时间段内滴出的水量相等为止。

1.2.3 数据处理 数据整理用 Excel 2016 软件,统计分析基于 SPSS 26.0 软件。单因素方差分析(One-way Anova)分别检验 2 个土层不同灌丛化阶段土壤性质的显著性,运用 LSD 多重比较检验不同灌丛化阶段物理指标的差异程度,用 Pearson 相关性分析法对土壤持水性能、容重、土壤孔隙度、土壤水分入渗指标做相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌丛化阶段土壤容重和孔隙度变化

由图 2 可知,对于川西锦鸡儿灌丛化草甸而言,2 个土层不同灌丛化阶段土壤容重有显著性差异($p<0.05$),与未灌丛化相比,轻度、中度灌丛化土壤容重分别减少 14.46%,29.85%,重度灌丛化增加 4.97%,对于金露梅灌丛化草甸,不同灌丛化也显著影响了土壤容重($p<0.05$),与未灌丛化相比,轻度、中度、重度灌丛化土壤容重分别下降 15.52%,17.54%,8.66%。2 种灌丛化草甸 2 个土层的孔隙度变化一样,随着灌丛化程度的增加,非毛管孔隙度变化趋势均表现为先增加后减少,总孔隙度均在中度灌丛化阶段最高,而毛管孔隙度在不同灌丛化阶段之间变化不明显。

2.2 不同灌丛化阶段土壤持水能力

由图 3 可知,2 种灌丛化草甸不同灌丛化阶段土壤表层含水量变化趋势不一样,而在土壤次表层含水量随着灌丛化程度的增加均表现为不断上升的趋势。本研究显示,川西锦鸡儿灌丛化草甸在表层和次表层不同灌丛化阶段土壤毛管持水量、最大持水量、田间持水量都表现为中度灌丛化>轻度灌丛化>未灌丛化>重度灌丛化,且各因子在不同灌丛化阶段差异显著($p<0.05$)。金露梅灌丛化草甸的毛管持水量和田间持水量的变化与川西锦鸡儿灌丛化草甸的变化规律一致,且不同灌丛化阶段表现出显著差异($p<0.05$),最大持水量的变化在不同灌丛化阶段不够明显。

2.3 不同灌丛化阶段土壤水分入渗特征

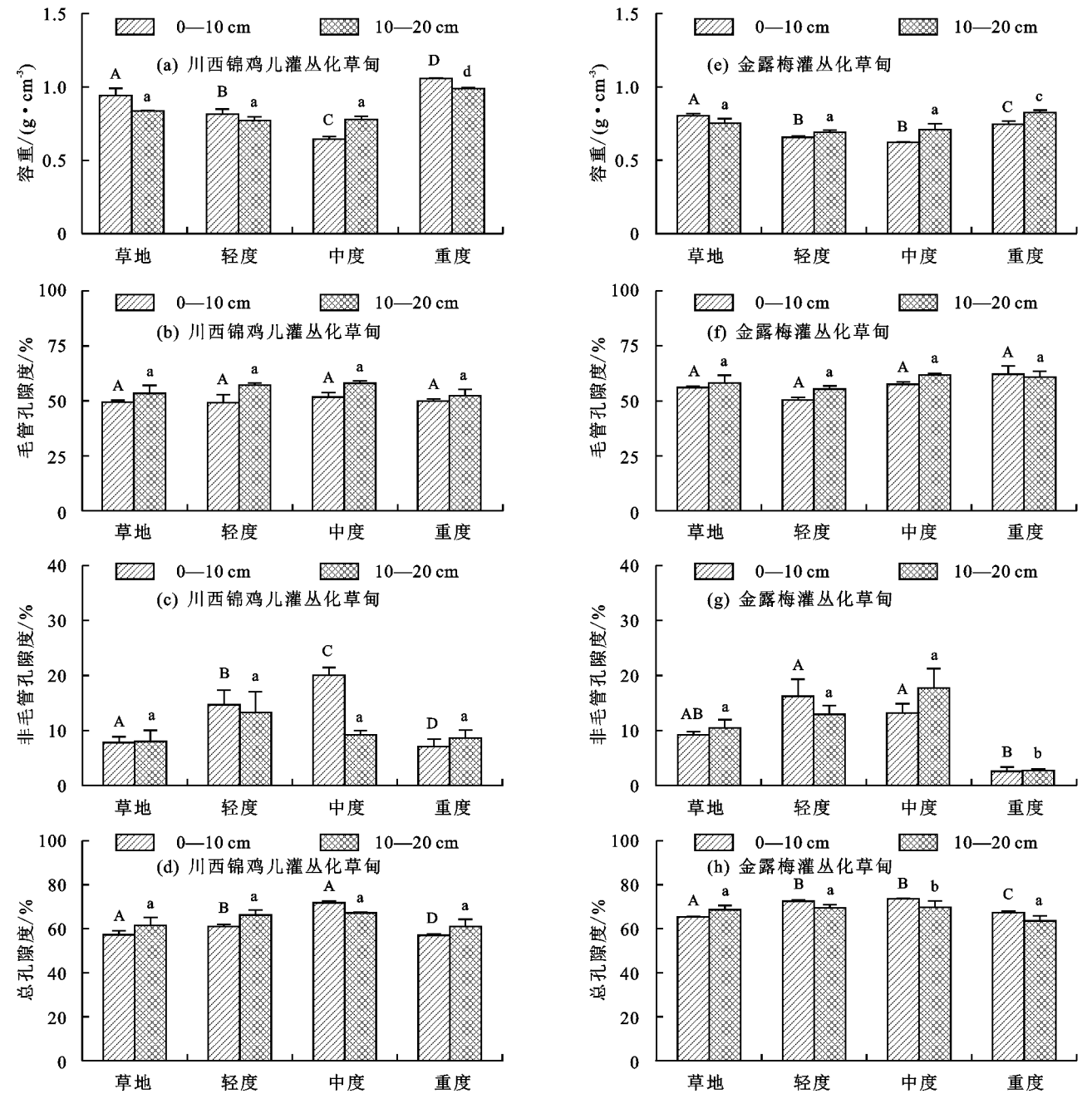
由图 4 可知,2 种高寒灌丛化草甸 2 个土层土壤的初渗率和稳渗率在不同灌丛化阶段之间均有显著性差异($p<0.05$)。对于川西锦鸡儿灌丛化草甸,与未灌丛化作对比,轻度、中度、重度灌丛化在 2 个土层平均初渗率分别增加 29.60%,67.21%,75.78%,稳渗率分别增加 14.85%,51.19%,69.16%;对于金露梅灌丛化草甸,与未灌丛化相比,轻度、中度、重度灌丛化在 2 个土层平均初渗率分别增加 48.67%,72.55%,81.98%,稳渗率分别增加 44.75%,70.44%,76.90%,并且通过图 5 可以更加直观地分析随着时间的变化不同灌丛化阶段土壤入渗速度的快慢,2 种高寒灌丛化草甸在重度灌丛化阶段入渗最快。

2.4 土壤容重、孔隙度、持水量及入渗参数的相关关系

由表 1 可知,川西锦鸡儿灌丛化草甸土壤毛管持水量、最大持水量、田间持水量、容重、总孔隙度之间都有着极显著的相关关系($p<0.01$),土壤含水量与初渗率和稳渗率之间存在着极显著的正相关性($p<$

0.01),非毛管孔隙度与容重呈显著相关关系($p<0.05$),毛管孔隙度与田间持水量有显著正相关关系($p<0.05$)。由表 2 可知,金露梅灌丛化草甸土壤田间持水量与毛管持水量有极显著正相关关系($p<$

0.01),总孔隙度与容重呈极显著负相关($p<0.01$),与非毛管孔隙度呈显著正相关($p<0.05$),初渗率与非毛管孔隙度呈显著负相关($p<0.05$),与稳渗率有着极显著正相关关系($p<0.01$)。



注:图柱上方不同大写字母表示在 0—10 cm 土层不同灌丛化阶段差异性显著($p<0.05$);不同小写字母表示 10—20 cm 土层同一灌丛化阶段差异性显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同灌丛化阶段土壤容重和孔隙度变化

3 讨论

3.1 灌丛化对土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度被认为是土壤中水分优先流动的重要因素,可以用来评价土壤持水能力和渗透能力^[24]。本研究表明,2 种高寒灌丛化草甸的土壤容重与孔隙度均有着相同的变化趋势。随着灌丛化程度的增加,同一土层土壤容重在重度灌丛化阶段最低,

重度灌丛化阶段表现为上升,这与邢媛媛等^[2]在非洲热带稀树草原草地得到的研究结果有相似性,可能的原因是随着灌丛化程度的增加,灌木根系的持续穿插使灌丛化土壤变得更加疏松,容重小于未灌丛化阶段,但是重度和中度灌丛化阶段相比,土壤表面草本物种稀少和覆盖度低,导致土层土壤暴露太多,在极端的降雨天气下,地表土壤流失,增加土壤容重降低

土壤孔隙^[25],因此毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度都表现出在中度灌丛化阶段最高,重度灌丛化阶段稍有下降。另外,本研究显示,同一灌丛化阶段2

个土层的毛管孔隙度表现为次表层>表层,这可能是由于灌丛主根会不断向下延伸生长,而且在生长过程中侧根数量也会增加,从而增加了土壤毛管孔隙度。

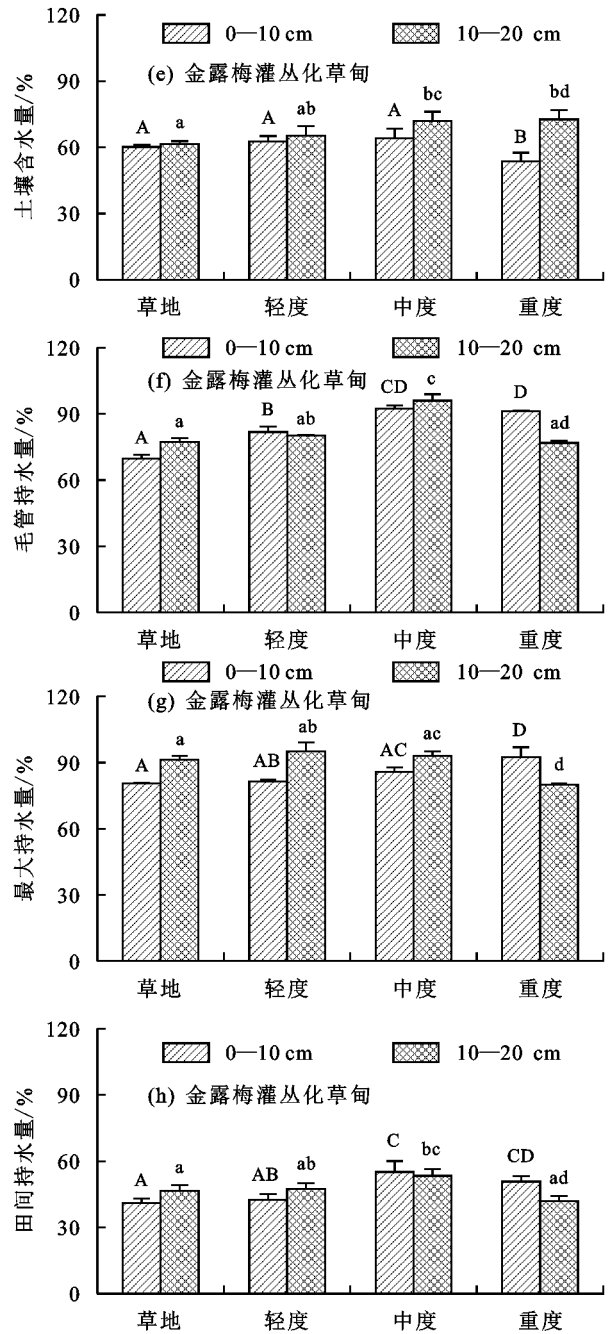
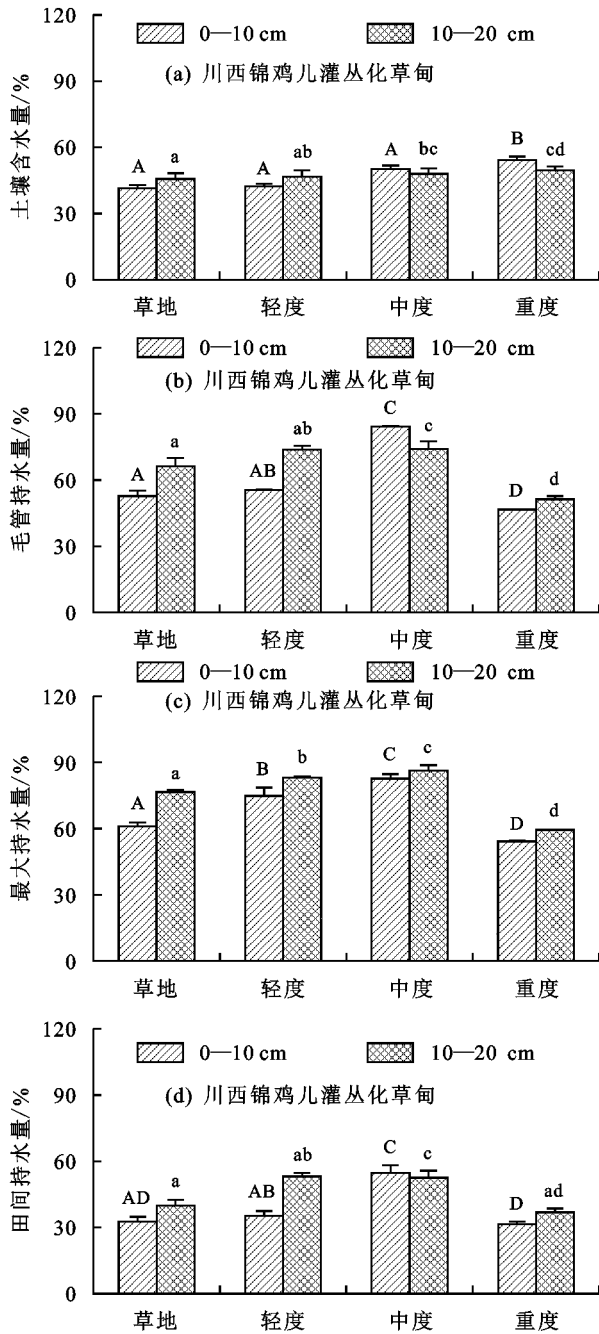


图3 不同灌丛化阶段土壤含水量和持水量变化

3.2 灌丛化对土壤持水性能的影响

灌丛化土壤水分受到灌木的形态结构、植被覆盖物^[13]以及根系^[16]等的影响,而外界因素的改变会推动这些影响因子的发展,从而让土壤水分呈现复杂的动态变化。本研究中,2种高寒灌丛化草甸的土壤含水量和持水量在不同灌丛化阶段和土层之间都有很大的波动。对于川西锦鸡儿灌丛化草甸,土壤含水量随着灌丛化程度的增加而增加,这与赵亚楠等^[26]在宁夏东部的温带荒漠草原得到的研究结果有一致性,

可能是因为降水通过树冠茎流带来的水分^[27]随着灌丛化程度的发展逐渐增多,灌丛土壤温度低且疏松,这样获得的大量水分会很好地保留在灌丛下的土壤中,从而导致灌丛化土壤水分不断增加;另外,因灌丛根系逐渐发达,在土壤内部向不同方向的生长需要吸收更多的水分,这时在草甸和灌丛之间容易形成地表径流,从而使灌丛下土壤得到了地下水的补给^[25],因此含水量增加;而同一灌丛化阶段的2个土层土壤含水量却不同,在未灌丛化和轻度灌丛化阶段表现为次

表层>表层,中度和重度灌丛化阶段为表层>次表层,这种变化可能与树冠层有很大关系,因为中度和重度灌丛化的树冠创造了一个良好的冠下遮阴环境^[28],减缓了表层水分的蒸散速率,而未灌丛化和轻度灌丛化草本植物盖度高,表层水分的蒸发速度较快,且对雨水的截留量比较少,所以该灌丛化草甸有如此变化趋势。对于金露梅灌丛化草甸,随灌丛化程度的增加土壤表层含水量表现为先上升后下降,次表层则一直增加,可能是重度灌丛化阶段表层凋落物和

苔藓现象严重,致使其组成很多疏水性有机物,从而产生土壤斥水性^[29],导致该灌丛化阶段表层含水量下降;同一灌丛化阶段的 2 个土层含水量表现一样,均为次表层>表层,这与赵晶忠等^[30]在祁连山东段自然保护区灌丛分布区的研究结果相反,这可能是由于高寒草甸金露梅灌丛株高和冠幅比较小,表层土壤受风蚀的作用比川西锦鸡儿灌丛强。由此说明,土壤含水量的复杂变化受到不同灌木种类及不同灌丛化阶段扰动的因素是多方面的,还需要进行深入探究。

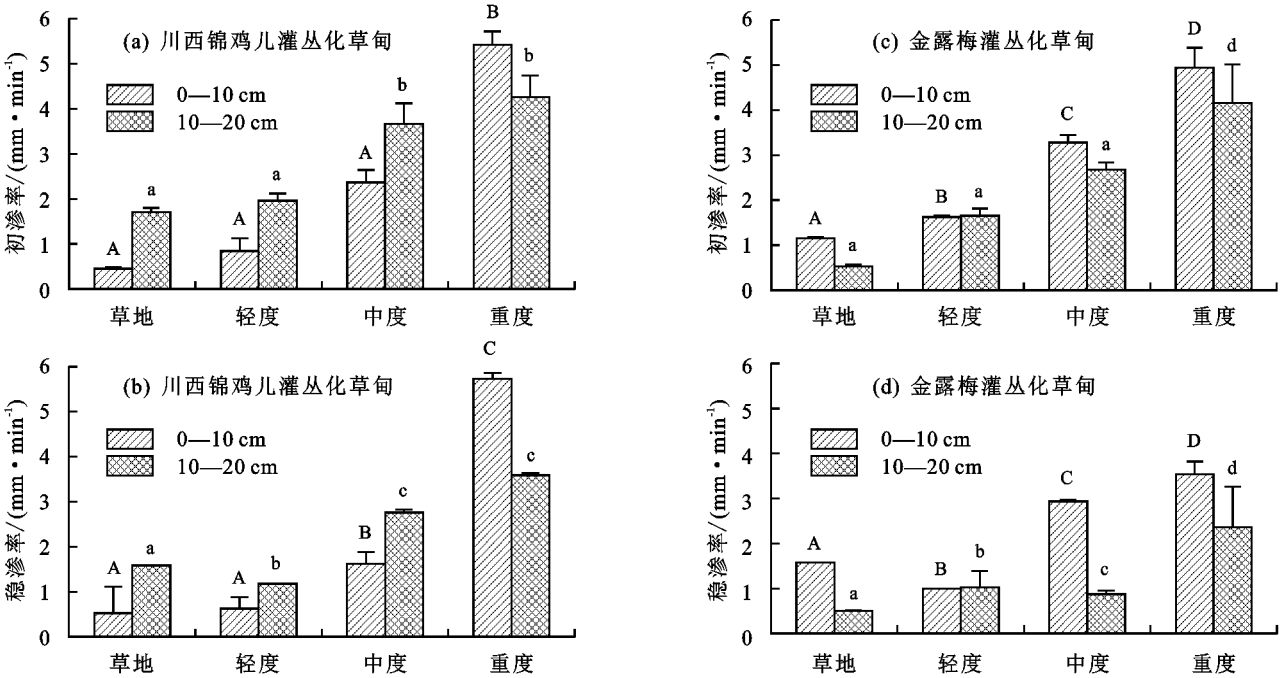


图 4 不同灌丛化阶段土壤初渗率和稳渗率变化

土壤持水量与土壤孔隙大小组成比例的变化联系密切,而孔隙组成比例由大孔隙、小孔隙及微孔隙决定,根系形态对孔隙大小的形成有着重要的影响^[31]。本研究中,2种灌丛化草甸的毛管持水量、最大持水量和田间持水量在不同灌丛化阶段和土层之间均有着显著的变化。就川西锦鸡儿灌丛化草甸来说,土壤毛管持水量、最大持水量和田间持水量随灌丛化程度的增加表现为先增加后减少,中度灌丛化阶段达到最高,重度灌丛化阶段低于未灌丛化阶段,一方面可能是未灌丛化到中度灌丛化阶段的发展粗根系变多,枯枝落叶的分解使土壤营养物质丰富^[8],增加了小动物数量和活动频率,从而大孔隙增多,而地表草本植物的覆盖减少,小孔隙数量相应下降,以此形成一系列的大优势流增加持水性;另一方面是重度灌丛化可能部分粗根坏死和根木质部空化现象^[15]加重,影响到根系的良好生长,则孔隙数量下降,直接引起持水性减弱,还可能受灌木树冠下方形成的灌丛丘的影响,重度灌丛化聚集起的土堆比轻度和中度灌丛化大且坡度陡,这样不利于上坡位的径流入渗到

灌丛内部根系周围^[32],因此土壤持水量相应变少。同一灌丛化阶段的最大持水量、毛管持水量和田间持水量在 2 个土层之间的变化稍有差异,但整体表现为次表层>表层,与何露露等^[33]在川西亚高山米亚罗林区得出的研究结果相似,这可能是由于植物发达的根系有丰富根毛^[16],并不断向下生长增加了小孔隙,因此次表层持水量增加。对于金露梅灌丛化草甸,土壤毛管持水量和田间持水量在不同灌丛化阶段的变化与川西锦鸡儿灌丛化草甸的变化完全一致,而土壤最大持水量表现出不一样的发展趋势,在表层随着灌丛化程度的增加而增加,在次表层先上升后下降,可能与不同灌丛化阶段生根的深度^[15]和细根数量有关;同一灌丛化阶段 2 个土层持水量的变化一样,均是未灌丛化、轻度和中度灌丛化表现为次表层>表层,重度灌丛化表现为表层>次表层,由于重度灌丛化得到树干茎流和穿透雨带来的水量多于其他灌丛化阶段,且该灌丛化阶段表层的毛管孔隙数量表现为最多,又因毛管孔隙可以贮存水分的特征,所以表层持水量更高。

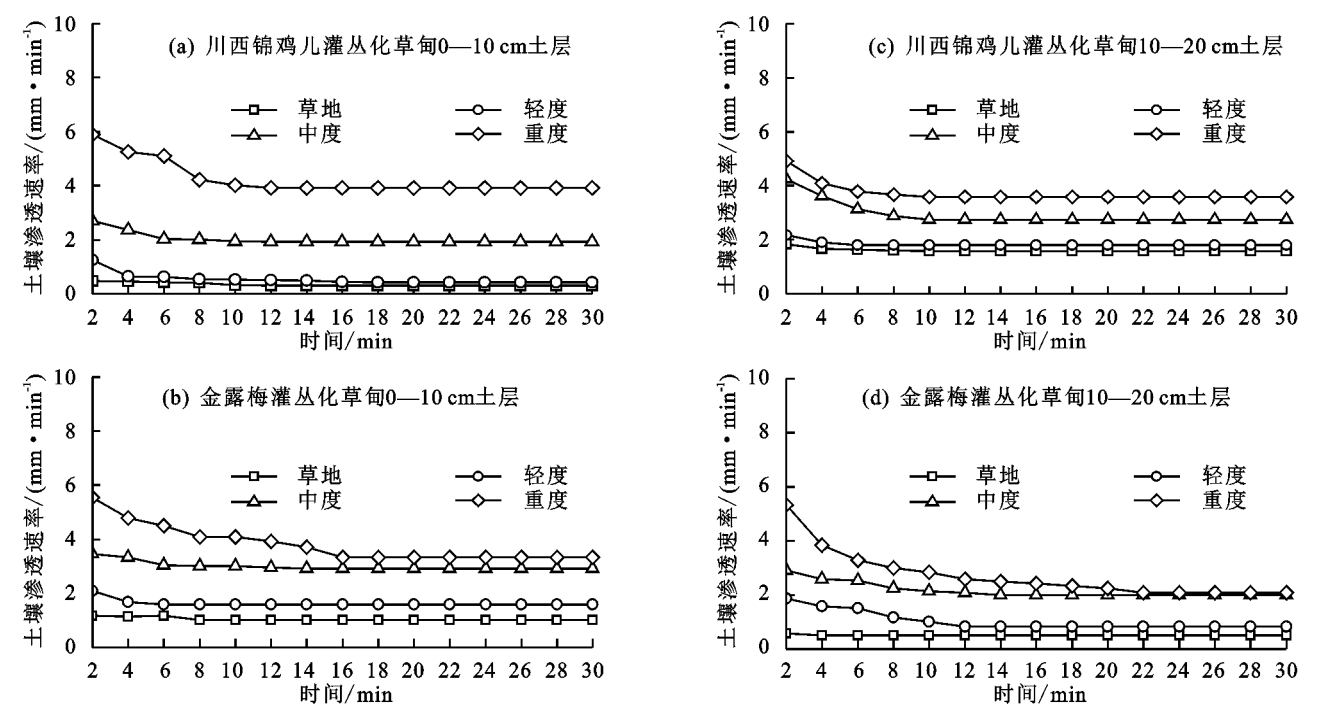


图5 不同灌丛化阶段土壤水分入渗过程随时间变化曲线

表 1 川西锦鸡儿灌丛化物理性状间的相关系数

指标	土壤含水量	毛管持水量	最大持水量	田间持水量	容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	初渗率	稳渗率
土壤含水量	1.000									
毛管持水量	0.077	1.000								
最大持水量	-0.154	0.906 **	1.000							
田间持水量	0.194	0.953 **	0.870 **	1.000						
容重	0.172	-0.935 **	-0.925 **	0.844 **	1.000					
毛管孔隙度	0.186	0.616	0.676	0.759 *	-0.420	1.00				
非毛管孔隙度	0.021	0.668	0.579	0.599	-0.807 *	-0.018	1.000			
总孔隙度	0.204	0.947 **	0.838 **	0.955 **	-0.895 **	0.574	0.756 *	1.000		
初渗率	0.840 **	-0.408	-0.508	-0.254	0.613	-0.006	-0.446	-0.280	1.000	
稳渗率	0.861 **	-0.391	-0.516	-0.246	0.603	-0.018	-0.431	-0.250	0.994 **	1.000

注：* * 表示 $p<0.01$ 时,相关性显著; * 表示 $p<0.05$ 时,相关性显著。下同。

表 2 金露梅灌丛化物理性状间的相关系数

指标	土壤含水量	毛管持水量	最大持水量	田间持水量	容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	初渗率	稳渗率
土壤含水量	1.000									
毛管持水量	0.059	1.000								
最大持水量	-0.136	0.506	1.000							
田间持水量	-0.064	0.892 **	0.645	1.000						
容重	0.090	-0.586	-0.292	-0.598	1.000					
毛管孔隙度	0.140	0.409	0.368	0.444	0.431	1.000				
非毛管孔隙度	0.294	0.296	0.199	0.273	-0.691	-0.491	1.000			
总孔隙度	-0.107	0.543	0.249	0.569	-0.981 **	-0.465	0.748 *	1.000		
初渗率	-0.139	-0.313	-0.078	0.224	0.206	0.572	-0.731 *	-0.330	1.000	
稳渗率	-0.344	0.327	-0.141	0.309	0.036	0.430	-0.642	-0.134	0.940 **	1.000

3.3 灌丛化对土壤渗透性的影响

土壤孔隙度、土壤含水量、持水性、灌丛高低、根冠

结构、凋落物等自然和生物因素都可能会影响高寒草甸的入渗速率。本研究中,2 种灌丛化草甸的初渗率和稳

渗率总体上随着灌丛化程度的增加均保持上升,这与赵维俊等^[34]对祁连山亚高山灌丛土壤入渗性能研究的结果有相似性,一方面可能是由于未灌丛化阶段的草甸根系和灌丛化阶段相比较密集,因此对水分的运移具有强烈的阻滞作用,所以灌丛化的入渗性能更好;另一方面,还可能是由于未灌丛化阶段草甸植物根系浅且连通性较强,而灌丛化阶段灌木根系的穿插阻断了草本植物联通起来的小孔隙,因此显著改变了孔隙组成比例,尤其是中度和重度灌丛化灌木发达的根系在土壤下相互牵连形成很多的大孔隙和水分通道^[34];再者众多凋落物增加了土壤有机质,土壤动物活动频繁,迅速增加中孔和微孔数量,更加有利于水分的入渗。本研究还显示,2种灌丛化草甸同一灌丛化阶段的2个土层变化不一样,对于川西锦鸡儿灌丛化草甸,入渗速率表现为次表层>表层,而金露梅灌丛化草甸表现为表层>次表层,这可能是川西锦鸡儿灌丛的根比金露梅灌丛的根深,导致川西锦鸡儿灌丛在次表层有良好的孔隙结构^[35],从而加快入渗。

4 结论

(1)随着灌丛化程度的增加,2种高寒灌丛化草甸的土壤容重在灌丛化阶段最低,非毛管孔隙度和总孔隙度在灌丛化阶段最大,而毛管孔隙度没有明显的趋势变化,这说明土壤容重和孔隙度对灌丛化过程的响应是非线性的。

(2)2种高寒灌丛化草甸随着灌丛化程度的增加土壤含水量、持水量发生了明显变化,其中,在中度和重度灌丛化阶段含水性、持水性表现较好。由此说明灌丛化高寒草甸土壤的水分分配除受到容重和孔隙度的直接影响外,也受到灌丛种类和大小、凋落物和根系的间接影响。

(3)2种高寒草甸灌丛化进程中,不同程度的灌丛化之间入渗指标有显著差异,且在重度灌丛化入渗速率最快。说明随着灌丛化程度的增加,根系的转变使土壤的中孔和微孔转变为大孔,渗透流量通过大孔的比例显著升高,影响了入渗速率。

(4)高寒草甸土壤水力性质间的相互作用在不同程度灌丛化的转变中发挥着举足轻重的作用,本文的研究揭示出灌丛化与土壤物理生态过程的密切联系,从而为高寒草甸的保护和管理提供全面的科学理论依据。

参考文献:

[1] Carlos E, Guiomar R P, Cristina P, et al. Assessment of remotely sensed near-surface soil moisture for distributed eco-hydrological model implementation [J]. *Water*,

2019,11(12):e2613.

[2] 邢媛媛,王永东,雷加强.草地灌丛化对植被与土壤的影响[J].干旱区研究,2017,34(5):1157-1163.

[3] Peng H Y. Shrub encroachment with increasing anthropogenic disturbance in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China [J]. *Catena*,2013,109(10):39-48.

[4] 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].生态学报,2019,38(1):89-96.

[5] Jodi S B. Regime shift on the roof of the world: Alpine meadows converting to shrublands in the southern Himalayas [J]. *Biological Conservation*,2013,46(2):116-127.

[6] Zhao D S, Wu S H, Yin Y H, et al. Vegetation distribution on Tibetan Plateau under climate change scenario [J]. *Regional Environmental Change*,2011,11(4):905-915.

[7] 彭海英,童绍玉,李小雁.内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应[J].自然资源学报,2017,32(4):642-653.

[8] He Y H. The relationship between an invasive shrub and soil moisture: Seasonal interactions and spatially covarying relations [J]. *Isprs International Journal of Geo-Information*,2014,3(3):1139-1153.

[9] Guo X X, Fu Q, Hang Y H, et al. Spatial variability of soil moisture in relation to land use types and topographic features on hillslopes in the black soil area of northeast China [J]. *Sustainability*,2020,12(9):e3552.

[10] 李小军,高永平.腾格里沙漠东南缘沙质草地灌丛化对地表径流及氮流失的影响[J].生态学报,2012,32(24):7828-7835.

[11] Daniel L P. Woody plants modulate the temporal dynamics of soil moisture in a semi-arid mesquite savanna [J]. *Ecohydrology*,2010,3(1):20-27.

[12] Dirk L, Britta T, Niels B, et al. Prescribed fire as a tool for managing shrub encroachment in semi-arid savanna rangelands [J]. *Journal of Arid Environments*,2014,107(8):49-56.

[13] 蔡育蓉.灌丛化草原土壤功能空间异质性及其对放牧的响应[D].北京:中国农业科学院,2021.

[14] 杨益帆,胡宗达,李亚非,等.川西亚高山川滇高山栎灌丛地被物与土壤持水性能[J].应用与环境生物学报,2020,26(4):951-960.

[15] 聂秀青,熊丰,李长斌,等.青藏高原高寒灌丛生态系统草本层生物量分配格局[J].生态学报,2018,38(18):6664-6669.

[16] Russell L S, William L H. The ecohydrologic significance of hydraulic redistribution in a semiarid savanna [J]. *Water Resources Research*,2008,44(2):564-575.

[17] 张懿铨,李炳元,郑度.《论青藏高原范围与面积》一文数

- 据的发表:青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据 [Z].全球变化科学研究数据出版系统,2014,69:65-68.
- [18] 张懿铨,刘林山,李炳元,等.青藏高原范围数据集 2021 与 2014 年版本比较研究[J].全球变化数据学报,2021,5(3):322-332.
- [19] 张懿铨,李炳元,刘林山,等.再论青藏高原范围 [J].地理研究,2021,40(6):1543-1553.
- [20] 张懿铨,刘林山,李炳元,等.青藏高原范围数据集 2021 年版与 2014 年版比较[Z].全球变化数据学报,2021,5(4):32-42.
- [21] 张懿铨,任慧霞,潘小多.青藏高原边界数据总集[J].国家青藏高原科学数据中心,2019.
- [22] 徐翠,张林波,杜加强,等.三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[J].生态学报,2013,33(8):2388-2399.
- [23] Liao C, Clark P E, Degloria S D. Bush encroachment dynamics and rangeland management implications in southern Ethiopia [J].Ecology and Evolution,2018,8(23):11694-11703.
- [24] 吕宸,宫渊波,龚伟,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤水文效应特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(5):1170-1177.
- [25] 何露露,庞学勇.川西亚高山 4 种典型灌丛岛土壤持水能力及其影响因素[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):632-638.
- [26] 赵亚楠,于露,周玉蓉,等.宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响[J].生态学报,2020,40(4):1305-1315.
- [27] 彭海英,李小雁,童绍玉.内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响[J].生态学报,2014,34(9):2256-2265.
- [28] Li X Y. Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: Results from inner mongolia steppe ecosystem of north China [J].Agricultural and Forest Meteorology,2013,6(11):20-30.
- [29] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J].生态学报,2016,36(11):3127-3136.
- [30] 赵晶忠,金铭,敬文茂,等.祁连山东段典型灌丛分布区的土壤物理性质[J].林业科技通讯,2020(11):17-20.
- [31] Hu X. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the inner mongolia grassland of northern China [J].Soil and Tillage Research,2015,150(4):1-9.
- [32] 李小军.地表径流对荒漠灌丛生境土壤水分空间特征的影响[J].中国沙漠,2012,32(6):1576-1582.
- [33] 何露露,强薇,张燕,等.川西亚高山针叶林次生演替对土壤持水量的影响[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):639-647.
- [34] 赵维俊,刘贤德,张学龙,等.祁连山西水林区亚高山灌丛土壤入渗性能研究[J].水土保持学报,2015,29(2):106-110.
- [35] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):133-138.