

DOI: 10.11686/cyxb2024201

http://cyxb.magtech.com.cn

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.

MA Xue-xi, GAO Ying-zhi. Impact of shrub encroachment on soil hydrological processes in grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 212-222.

灌丛化对草地土壤水文过程影响的研究进展

马学喜^{1,2,3}, 高英志^{1,4*}

(1. 新疆农业大学草业学院, 西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 东北师范大学草地科学研究所, 植被生态科学教育部重点实验室, 国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林 长春 130024)

摘要: 草原灌丛化在全球干旱和半干旱地区广泛发生, 逐渐成为生态研究的焦点。本研究从灌丛化全球分布现状、灌丛化对降水、草地土壤水分、入渗、地表径流、蒸散发影响等方面综述了灌丛化对草地土壤水文过程影响的研究进展。灌丛化广泛发生在全球不同类型的生态系统中, 且受到降水的显著影响。在干旱区增加降水抑制灌丛化发生, 湿润区降水增加则促进灌丛化发生。灌丛化可以增加草地土壤水分入渗、减少地表径流量, 改变草地生态系统蒸散发组分, 降低水土流失的风险。未来应结合新技术和新方法, 聚焦降水格局对灌丛化草地生态系统水文过程影响机理等方面的研究。本研究旨在为灌丛化草原科学合理管理提供理论支撑, 以更好提升草原生态系统整体服务功能。

关键词: 灌丛化; 草地生态系统; 全球分布; 降水; 径流; 水文过程

Impact of shrub encroachment on soil hydrological processes in grassland

MA Xue-xi^{1,2,3}, GAO Ying-zhi^{1,4*}

1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Desert Area of the Ministry of Education, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. CAS Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Urumqi 830011, China; 4. Institute of Grassland Science, Northeast Normal University, Key Laboratory of Vegetation Ecology of the Ministry of Education, State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Changchun 130024, China

Abstract: Shrub encroachment in grasslands has become a worldwide phenomenon in arid and semi-arid regions, and is currently a popular topic in ecological research. In this paper, we review the current ecological literature to explore the impact of shrub encroachment on soil hydrological processes in grasslands, specifically examining the global distribution of shrub encroachment and its effects on precipitation, soil moisture, infiltration, surface runoff, and evapotranspiration. Shrub encroachment occurs widely across various ecosystems and is significantly influenced by rainfall. Increased rainfall in arid areas generally inhibits shrub encroachment, whereas increased rainfall in humid areas promotes it. Shrub encroachment can enhance soil water infiltration, reduce surface runoff, alter evapotranspiration components, and decrease soil erosion in grassland ecosystems. Further research integrating new

收稿日期: 2024-06-03; 改回日期: 2024-08-22

基金项目: 新疆第三次科学考察计划(2021xjkk0603), 新疆维吾尔自治区区域协同创新项目(2023E01008)和新疆农业大学研究生校级科研创新计划(XJAUGRI2024001)资助。

作者简介: 马学喜(1987-), 男, 甘肃环县人, 工程师, 在读博士。E-mail: maxx@ms.xjb.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gaoyz108@nene.edu.cn

technologies and methods should explore the mechanisms by which rainfall patterns affect the hydrological processes of shrub encroachment in grassland ecosystems. Such work would provide a scientific basis for the effective management of shrub encroachment in grasslands, facilitating improvements in the overall functionality of grassland ecosystems.

Key words: shrub encroachment; grassland ecosystem; global distribution; rainfall; runoff; hydrological process

草原灌丛化(grassland shrub encroachment)指原生灌木的盖度、密度或生物量在草原上增加,而草本的盖度和密度减少的现象^[1-4],灌丛化过程往往是不可逆的,导致原生态系统转变^[5]。过去的150年,草原灌丛化在草地生态系统中扮演着重要的角色,极大地丰富了草地生态系统的多功能性。但是随着草原灌丛化程度的增加,植被覆盖类型和土地利用模式发生了显著的变化,对草原生态系统的安全和环境,以致草原经济发展构成了严重的威胁。因此,草原灌丛化成了一个亟待解决的全球性生态问题。

灌丛化不仅改变了局部地表的水热条件,还对当地小气候产生重要影响,进而使草地生态系统水文过程产生一系列连锁反应。目前,关于灌丛化的研究主要关注其发生过程、生物多样性以及生态系统服务等方面^[6-7]。有限的研究表明,随着灌丛化程度的提高,草地土壤生态水文连通性改变,并在斑块和景观尺度上产生显著的生态水文影响^[8-9]。灌丛化通过调节降水分布,进一步影响草地土壤水分、入渗、产流和蒸散发等关键水文过程。然而,关于灌丛化对草地土壤水文过程的系统性研究仍然相对匮乏,限制了其对水文循环潜在影响的全面理解,缺乏系统的理论支撑。因此,深入探讨灌丛化对草地生态系统关键的水文循环影响,不仅更好地解释了灌丛化在全球范围内的生态和水文学意义,也为草地生态系统的保护和管理提供科学支撑。

本研究系统地综述了草原灌丛化如何影响草地土壤的生态水文过程,详细综述了灌丛化对降水、土壤水分、入渗、径流、蒸散发的发生、发展的规律及其影响因素,并提出草原灌丛化未来主要研究热点和方向,为灌丛化草原的生态恢复和可持续管理提供理论支撑。

1 草原灌丛化的全球分布现状

草原生态系统是陆地生态系统中重要的类型,覆盖了全球30%~40%的面积^[10]。受气候变化和人类活动的双重影响,特别是极端气候事件频发,使得全球草原生态系统正在发生巨大的改变,许多草原正在逐渐向灌丛过渡,形成了灌丛斑块嵌入草地斑块的新景观。灌丛化通过改变草原生态系统物种间竞争关系、水资源分配和养分循环等关键生态过程,从而对草地生态系统的生产力、养分循环等生态系统功能产生影响(图1)^[11-12]。灌丛化现象使得草原生态系统的生产力和某些生态功能之间出现明显的权衡关系,导致草原生态系统多功能性的改变,进而对整个草原生态系统的健康和稳定产生了深远的影响(图1)^[6,13]。

灌丛化现象在全球不同的草地类型中广泛发生。大量研究发现,灌丛化在纬度梯度上波动很大,灌丛化现象相对较严重的地区集中在19°—46° S和60°—65° N^[14]。早期Stanton等^[15]通过荟萃分析发现,全球至少有6种草原类型中的生物群落发生灌丛化,如北美高草草原、澳大利亚温性草原、南非稀树草原、南美高寒草原、地中海沿岸荒漠草原、北极苔原生态系统的。目前,中亚地区^[16]以及中国内蒙古和青藏高原^[17-18]也成了灌丛化研究的热点区域。根据遥感数据统计,2002—2018年全球灌丛化总面积显著增加,2018年达到 $5.52 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[14]。过去的30年中,非洲撒哈拉沙漠以南草原灌丛化覆盖度增加了8%^[19];南非稀树草原灌丛化面积约为 $0.13 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[20];北美草原灌丛化面积为 $2.20 \times 10^6 \sim 3.30 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[21];近20年,吉尔吉斯斯坦山地生态系统灌丛化面积增加了48%,总覆盖面积占草地面积的2%^[16];中国内蒙古草原灌丛化面积已达 $0.055 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[22];青藏高原高寒草甸已有39%的草原面积发生了灌丛化,约为 $0.19 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[17];在新疆阿尔泰山、天山、伊犁盆地等地区也有关于灌丛化的研究^[23-24]。

在全球草原生态系统中,灌丛化现象正逐渐改变本地的原生植被群落结构,而不同地区的灌丛化草原的入侵灌木种类也各具特色。例如,北美及澳大利亚等草原,发生灌丛化的灌木主要为腺牧豆树(*Prosopis glandulosa*)、

天鹅绒牧豆树 (*Prosopis velutina*)、拉瑞尔 (*Larrea tridentate*)、金合欢属 (*Acacia* spp.)、代儿茶 (*Dichrostachys cinerea*)、桉属 (*Eucalyptus* spp.) 和北美圆柏 (*Juniperus virginiana*) 等具有明显细高主干和大冠幅的木本植物^[25-26]。地中海稀树草地系统灌丛化的主要植物为岩蔷薇 (*Cistus ladanifer*)、大果刺柏 (*Juniperus oxycedrus*) 和球果细枝豆 (*Retama sphaerocarpa*)^[27]。吉尔吉斯斯坦灌丛化的灌木以镰叶锦鸡儿 (*Caragana arborescens*) 为主^[16]。中国内蒙古灌丛化草原最常见的灌木为小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)，也有其他灌木，如狭叶锦鸡儿 (*Caragana stenophylla*)、中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*)、西藏锦鸡儿 (*Caragana tibetica*)、柳叶绣线菊 (*Spiraea salicifolia*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 等植物^[24]。在青藏高原常见的灌丛化植物主要有金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、短叶锦鸡儿 (*Caragana brevifolia*)、高山绣线菊 (*Spiraea alpina*)^[28]，四川若尔盖高寒湿地生态系统灌丛化植物以高山绣线菊、管花忍冬 (*Lonicera tubuliflora*)、高山柳 (*Salix cupularis*) 为主^[29]。新疆草原发生灌丛化的植物主要为绣线菊属 (*Spiraea*) 和锦鸡儿属 (*Caragana*)^[23-24]。不同地区草原灌丛化的灌木种类和特征差异会对草原生态系统植物群落结构和土壤水文功能产生不同影响，明晰灌丛种类和特征差异原因有助于更好地认识和保护草原生态系统。

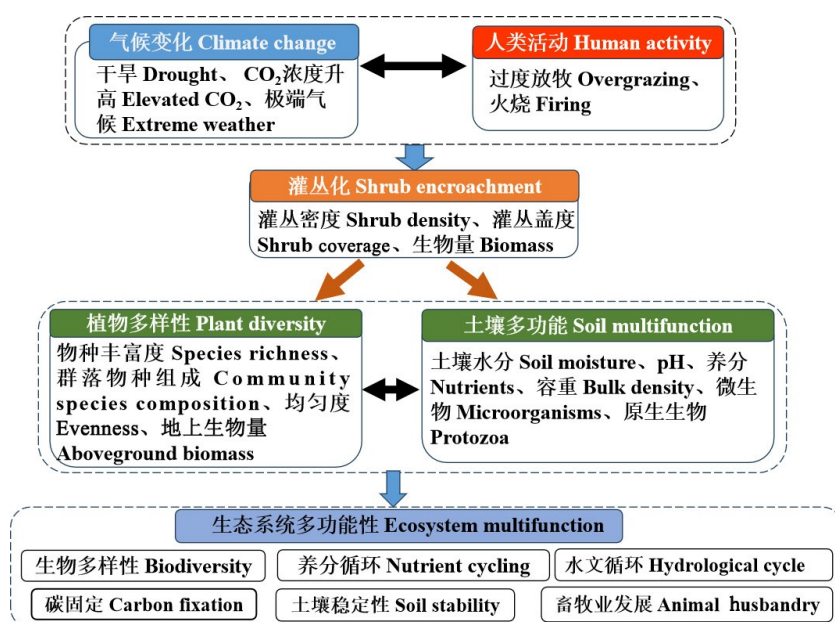


图1 灌丛化发生原因及对草地生态系统的影响

Fig. 1 The reason of shrub encroachment and its effect on grassland ecosystem

2 灌丛化对草地土壤水文的影响

2.1 灌丛化对降水的影响

在干旱和半干旱地区，水分成为植物生长的主要限制因子，即使是少量的降水变化也可能对植物的生长发育和群落结构产生深远的影响^[30]。Criado 等^[31]研究表明，61% 的灌丛化位点的降水量集中在 200~700 mm，在多年平均降水量为 350~400 mm 时灌丛化达到峰值^[14]，印证了先前有关灌丛化存在降水阈值的研究观点。

降水因素在时间、频率和强度方面的变化对土壤水分、蒸散发、渗流和径流之间的分配具有显著影响。在局地尺度上，连续的雨季能显著增加灌丛植被覆盖度^[32-33]。Sankaran 等^[34]的研究表明，灌木植物的百分比与非洲大草原的年平均降水量呈线性相关。Gao 等^[35]的研究表明，美国 Jornada 盆地在 1951—1956 年干旱年中，湿润的冬季和干燥的夏季对于灌木的定植和生长至关重要。降水事件的频率和强度可能加剧木本植物之间的竞争，影响其定居能力、多样性和生长发育，进而引发灌丛化现象^[36]。与单个降水事件的强度相比，降水频率对灌丛化的影响更为显著^[37]。Heisler 等^[38]研究表明，降水量减少使多年生草本植物的生长受到了严重抑制，生物量减少了

81%，而灌丛生物量增加了67%。降水量的增加通过促进内蒙古草原草本植物的生长来减缓灌丛化，从而影响草地生态系统的牧草价值和碳收支^[39]。Kulmatiski等^[40]的研究发现，轻微增加降水强度可以促使土壤水分渗透更深，增加地上灌丛的生长量，同时减少草原系统中草本植物的生长量，而总降水量的变化对此没有显著影响。由于长期的降水年际变异以及干旱影响，内蒙古毛乌素沙地中，灌木相较于草本展现出更强的竞争力^[41]。近30年来的奇瓦瓦荒漠由于冬季降水量明显高于同期平均值，导致优势种的分布减少，灌丛的密度增加了3倍^[42]。在干旱区，增加降水抑制灌丛化，减少降水促进灌丛化，而在湿润区与之相反。降水因素在不同尺度和地区对植被覆盖和草地生态系统产生显著影响，因此，降水的季节性、频率和强度变化也成为引发灌丛化现象的关键驱动力。

随着灌丛化的发生，灌木逐渐占据生态系统的主导地位，对水生物生产过程产生深远影响，包括地下水补给^[43]。由于深根灌丛植物的耗水作用，灌丛化增加了整个系统的耗水量，进而导致地下水位下降^[44]。降水过程中，土壤层所吸收和保留的降水对植被的生长发育起着至关重要的作用。与草地斑块相比，灌丛斑块能更有效地捕获水分，导致灌丛斑块植被冠层下方土壤含水量高于草地斑块^[7]，灌丛化对土壤水分的利用具有一定的优势。然而，王凌菲^[45]研究表明，增加降水有利于草本植物的生长，但在灌丛化初期可能对灌木植物产生负面影响，灌丛化后期，降水增加则有助于促进灌木的生长。灌木和草本植物在生物学特征、根系等方面存在差异，导致灌木与草本植物对降水的分配方式不同。灌木相较于草本植物更耐旱，能够更有效地利用深层水分资源。因此，灌木对降水的需求程度较低，在水分供应减少的情况下，草原灌丛化的扩张可能会加剧^[46]。灌木与草本植物在水分利用方式和耐旱程度上存在差异，可能导致对降水需求和分配的不同适应策略^[47]。因此，需要综合考虑灌丛化的影响因素，从而为实现草原生态系统的可持续发展提供科学依据和指导。

2.2 灌丛化对土壤水分的影响

土壤水分是土壤的重要组成部分，不仅为草地和灌丛提供生长水源，也作为介质影响物质和能量的传输。灌丛化改变了草地植被群落结构和水资源分布，导致草原地区的生物多样性减少和生态系统生产力下降，最终导致草地生态系统退化。灌木侵占可以通过减少土壤水分和增强土壤毛细管水分容量来增加土壤水分和盐分向上运输，从而导致土壤pH值升高。

灌丛和草地斑块以不同的方式拦截和利用水分^[48-49]，导致表层和深层土壤之间的水分分布差异加大^[50]。荒漠草原灌丛化后0~100 cm和100~200 cm土壤含水量分别显著下降了27.80%和57.92%，0~100 cm灌丛化的土壤水分相对亏缺指数显著低于未灌丛化的荒漠草地^[51]。随着灌丛化程度逐渐加剧，不同土层的土壤饱和含水量、毛细管含水量和田间持水量均增加，除0~10 cm土层的土壤含水量降低外，灌丛化可以通过减少土壤含水量和提高土壤毛细管含水量来增加土壤水分和盐分的向上输送，导致土壤pH值增加^[52]。灌丛斑块的田间持水量和植物有效水容量均高于草斑块，而灌丛斑块和草斑块的田间持水量和植物有效水容量均随灌丛化程度加剧而增加^[53]。灌丛化对土壤保水具有积极影响，但在青藏高原高寒草甸向灌木草甸转变过程中，表层土壤的保水和蓄水能力降低，灌木斑块的土壤含水量和储水量也高于草地斑块^[54]。灌丛化提高了草地土壤总孔隙度、非毛细管孔隙度和田间持水量，同时对草本植被盖度、密度、生物量和物种丰富度产生了负面影响^[55]。Li等^[56]对内蒙古灌丛化草原土壤水分动态进行了实地连续观测，发现灌丛斑块与草地斑块土壤水分动态无显著季节差异。草原灌丛化有利于灌丛斑块更有效地截留降水和吸收地下水，通过植物根系和土壤结构的作用，将水分向下输送并储存到更深层土壤中，形成了具有较高水分保持能力的小区域，与周围低水分保持能力的草地斑块形成鲜明对比^[57]。随着灌丛化程度的增加，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^[58]。在草地灌丛化过程中，草本植物对土壤水分的利用主要集中在较浅的0~20 cm土壤，而灌丛植物则倾向于利用较深的土壤水分，其深度在50~200 cm土层^[59]。山地草甸大部分的灌丛倾向于利用深层土壤水分，但也会利用10%~30%的<30 cm浅层土壤水分，草本植物主要依赖降水补给的浅层土壤水分，随着降水量的减少可能会逐渐衰落^[60]。同样，利用氢、氧稳定性同位素在内蒙古高原和黄土高原试验表明，草本植物主要依赖土壤表层的水分，而灌丛植物则主要利用中深层土壤水分。此外，灌木和草本植物之间的水分竞争格局主要受水资源限制^[61-62]。

因此，干旱区灌丛植物水分利用的可塑性强于草本，当受到水分胁迫时，灌丛植物能够根据土壤水分的可利

用性而改变对不同土层水分的利用。在亚湿润干旱地区,灌丛化导致草原土壤水分普遍减少,深层土壤和地下水补给潜力下降^[26]。在干旱区,灌丛化会增加生态系统耗水和植物耗水比例。湿润气候条件下,灌丛化进程可能会发生逆转,会导致越来越多的水分以无效土壤蒸发形式损耗。

2.3 灌丛化对土壤入渗的影响

土壤入渗是草原景观中地下水补给增加的关键驱动力,对地表径流和土壤水分动态都有重要影响,灌丛化在一定程度上改变了土壤孔隙结构和入渗过程^[63-65]。入渗能力是控制径流和土壤水分动态的一个关键特性,并涉及重要的植被—入渗—土壤水分反馈^[66],入渗速率通常受根系特征、土壤含水量和土壤孔隙度的影响^[67]。位于巴塔哥尼亚东北部的灌丛化草地,其灌丛斑块的土壤容重较草地斑块低,但水分入渗速率明显较高,且草地斑块的土壤侵蚀程度较高^[68]。这一现象同样出现在澳大利亚灌丛化草地,其灌丛斑块土壤水分入渗速率明显高于草地斑块^[69],灌丛化草地中水分循环和土壤侵蚀过程受到灌木冠层的影响。与草原相比,北美圆柏灌丛化土壤水分水平异质性增加,是灌丛斑块和草地斑块共存的结果,灌丛斑块的入渗能力显著高于草地斑块^[24]。初始入渗速率随灌丛化程度逐渐增加,在灌丛化前期和后期分别约为2和3倍。在半干旱的喀斯特景观中,灌丛化显著提高了土壤的入渗,主要通过枯枝落叶的积累增强大孔隙流动和增加土壤有机质含量^[65]。灌丛斑块冠层下方土壤层的下渗过程快于草地斑块,轻度、中度和重度灌丛化草地中灌丛斑块水分入渗速率分别为草地斑块的2.00、2.89和5.76倍,灌丛斑块水分最大湿润深度分别为草地斑块的1.09、1.13和1.32倍^[59]。斑块尺度上,灌丛和草地斑块土壤水分平均入渗速率分别为0.37和0.07 mm·s⁻¹,灌丛斑块是草地斑块的5.16倍^[59]。暴雨导致奇瓦瓦灌丛斑块和草地斑块的土壤水分入渗量分别是降水量的140%和68%^[70]。Eldridge等^[71]研究表明,草地斑块的入渗速率大于灌木斑块,灌丛化的影响在很大程度上取决于灌木如何影响斑块的空间分布,从而影响灌丛的土壤入渗能力。降水发生后,草地斑块的地表径流大部分被灌丛斑块截留,不仅利于灌木下方的植物水分吸收,也利于维持较高的生物多样性和生物量。

灌丛化改变了坡面微地形和土壤性质,进一步影响坡面水文过程。Zhang等^[72]发现草地斑块的降水入渗率除坡底最低,其他坡位均高达0.78,灌丛斑块入渗由顶部的0.38增加到下部的0.77。尹霞等^[58]研究表明,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。Leung等^[73]也发现土壤水分入渗随着灌丛化程度的增加而增加。灌丛化增强了基岩风化作用,改变了土壤孔隙结构,从而增加其土壤水分下渗,有可能改变地下侧向流、深层渗透和地下水补给^[74]。土壤大孔隙度随着灌木根系网络密度的增加而增加,植物根系对土壤大孔隙的影响随着灌丛化程度的增加而增加,从而促进了土壤下渗能力^[75]。一方面未灌丛化的草地根系稀疏,而灌丛化的草地和灌木根系密集,明显阻滞水分运移;另一方面灌丛化前的植物根系较浅且连通性较好,灌丛化后,灌木根系的生长导致草本植物根系间连通性降低,孔隙结构变大。因此,中度和重度灌丛化草地的土壤排水性和通气性较好。气候变暖、降水增加等因素可能是灌丛化未来发展的驱动力,未来几十年灌丛可能是在山坡下部和底部的扩展速度将加快,特别是在降水量较高的地区。

2.4 灌丛化对草地地表径流的影响

灌丛化对地表径流产生显著影响,主要通过改变土壤渗透性来实现,土壤渗透性具有双重作用,既可以增加也可以减少地表径流。在年降水量低于500 mm的地区,灌丛化过程并不会导致地表径流的增加^[76]。Qiao等^[77]研究表明,与未灌丛化草地相比,灌丛化草地地表总径流量减少了22 mm,径流系数减少了3%。彭海英^[78]研究表明,小叶锦鸡儿灌丛斑块和草地斑块冠层截留系数分别为20.86%和7.48%,地表径流系数分别为8.71%和20.36%。李小军等^[79]研究表明,地表径流在草地样方出现的时间相对较长,草地样方需要承受更长时间的降水才能开始产生径流,灌丛斑块的径流系数为34.46%,增加了地表径流,加剧了土壤侵蚀的风险^[68]。

灌丛化造成植被草本盖度下降,土壤水分入渗率减小,地表径流增加。一般认为灌丛化会导致土壤入渗率高,地表径流率低。灌丛植物的根系能够增加土壤的结构稳定性和渗透性,减少了径流的产生。灌丛根系的存在可以增加土壤的水分持有能力,使得降水能更多地被土壤吸收,减少了地表径流的形成,并促进水分渗透到地下。

灌丛化能有效减缓径流的流速,使得径流在流动过程中与地表的接触时间增加,有利于地表沉积物和溶解负荷与水体充分接触和吸附,进而提高污染物的去除效率和沉积物的沉淀。灌丛植物的根系能够牢固地固定土壤,增加土壤的抗冲蚀力,减少因水流冲刷而引起的侵蚀和水土流失。总之,灌丛化对草地地表径流具有显著的改善作用,包括减少径流量、降低径流速度和抑制草地侵蚀。

2.5 灌丛化对草地蒸散发的影响

在干旱与半干旱地区,生态系统面临着水资源匮乏的挑战,蒸散发在水量和能量平衡中起关键作用,对于维持生态系统平衡和生物多样性具有重要意义。然而,草地灌丛化后,受土壤、灌木、草本植物的三重影响(图 2),蒸散发难以确定。因此,目前灌丛化对草地蒸散发的研究仍然相对不足,限制了对灌丛化草地生态系统的理解和保护。基于大尺度研究表明,灌丛化不会显著改变生态系统的耗水总量,但是会改变蒸散发组分比例^[80]。Deng 等^[14]研究表明,灌丛化提高了蒸散及蒸腾和蒸散的比值,夏季效果最强。当草原完全转变为杜松(*Juniperus rigida*)林时,年平均蒸散发高出 45%,且蒸散发存在显著的季节性动态变化,在生长高峰期(5—8月),杜松灌丛化草地的蒸散发平均高出 40%^[81]。Wang 等^[82]研究表明,灌丛蒸腾、草地蒸腾和土壤蒸发对总蒸腾速率的平均贡

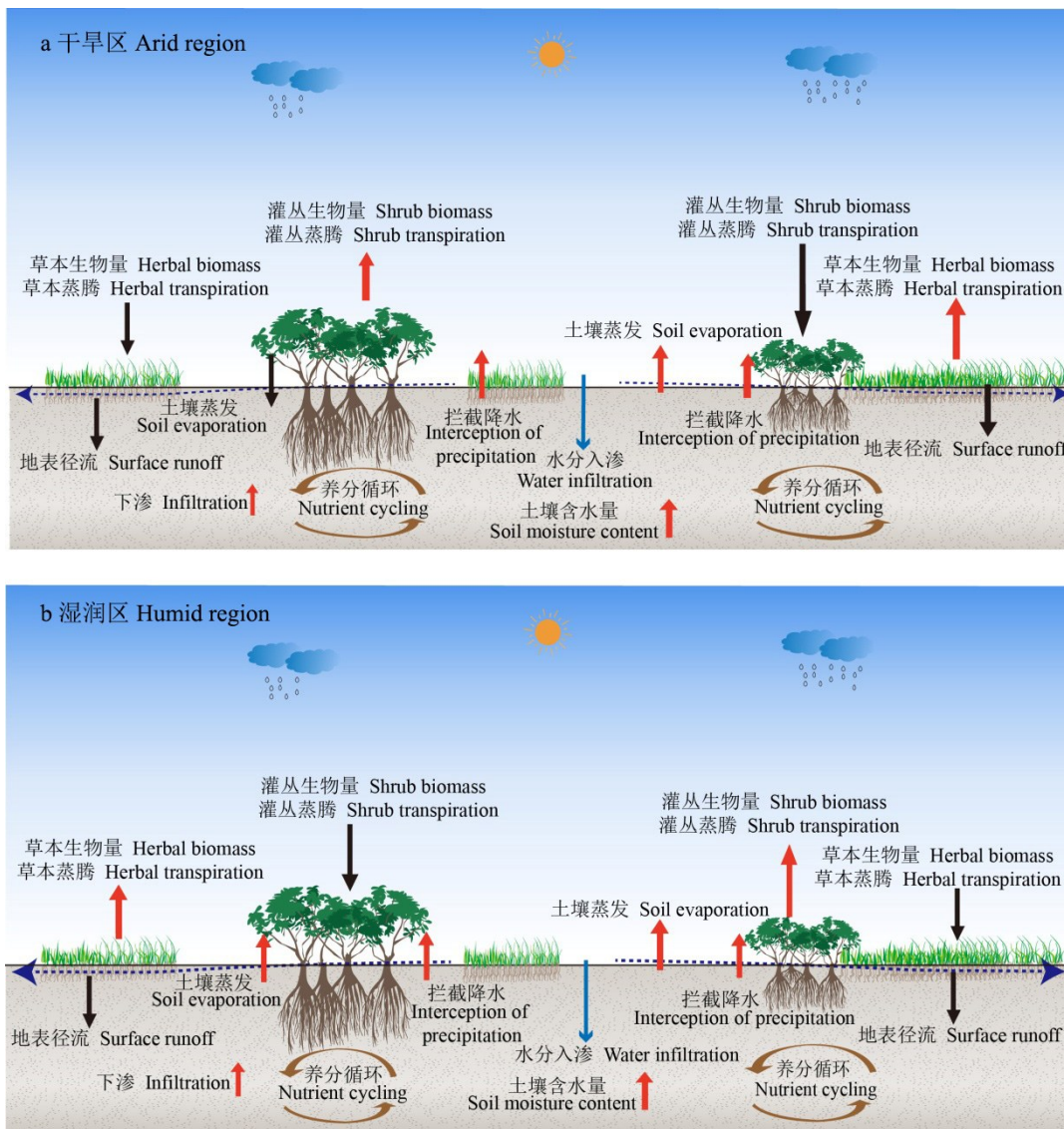


图 2 灌丛化对草地生态系统水循环过程的影响

Fig. 2 The effect of shrub encroachment on water cycle processes in grassland ecosystem

红色箭头表示水循环过程相关指标增加,黑色箭头表示水循环过程相关指标减少 The red arrows indicate that the water cycle process related index increases, and the black arrows indicate that the water cycle process related index decreases.

献分别为 $(24\pm 13)\%$ 、 $(20\pm 4)\%$ 和 $(56\pm 16)\%$ 。干旱区,灌丛具有竞争优势,随着灌丛化程度的增加,土壤蒸发对整体蒸发过程的贡献可能会逐渐提高。而湿润地区,草本具有竞争优势,土壤蒸发变化可能相对较小,甚至可以忽略不计。灌丛化对蒸散发总量的影响相对较小,但对蒸散发组分的影响较显著。上述研究表明灌丛化过程中,土壤水文通量可能受到相对较大的保持和调节作用。

灌丛斑块通过植物的遮阴作用可以有效降低土壤温度,减少土壤水分蒸发,可以保证更多水分用于植物的蒸腾,促进植物的生长和生存^[22]。王芑丹等^[83]研究表明,灌丛化从初期到中期、中期至后期,蒸散发降幅平均值分别为 0.34% 和 0.44% 。人为干预,使荒漠草原灌丛化,导致蒸散发的组分结构发生变化,生态系统蒸腾量平均增加了1.35倍,蒸发量增加了1.06倍,最终导致蒸发比例降低、蒸腾比例增加^[84]。美国新墨西哥州北部干旱区的灌丛化草地斑块的土壤蒸发量高于灌丛斑块,而灌丛斑块的总蒸发量是草地斑块的4~6倍,表明灌丛斑块的蒸腾作用强于草地斑块^[85]。灌丛斑块的土壤温度较低,土壤蒸发减小,可为植物蒸腾提供更多的水分,同时灌丛斑块的生物量较草地斑块更高,植物蒸腾过程中的水分消耗也相对较高。因此,灌丛斑块在维持草地生态平衡和水文过程方面发挥着更重要的作用。

总体来说,在干旱区和湿润区,灌丛化对草地生态系统的土壤水文过程具有积极作用。灌丛化过程中通过增加灌丛盖度、密度或生物量,改变了原有生态系统功能和结构,从而增加土壤入渗,减少地表径流、改善土壤水分分布,并改变草地生态系统蒸散发组分,有助于维持草地生态系统的稳定^[63](图2)。干旱区增加降水有利于抑制灌丛化发生(图2a),而湿润区增加降水则促进灌丛化发生(图2b)。

3 结论与展望

灌丛化对草地生态系统的土壤水文过程具有积极作用,但灌丛化对草地土壤生态水文过程的影响是一个复杂的过程,需要综合考虑气候、土壤、植被和人类活动等多个因素的相互作用。通过灌丛化对草地土壤生态水文过程的影响研究进展的回顾,未来仍需对以下研究方向进一步考虑:1)降水格局变化(如降水强度、降水频率以及年际间降水变异等)会对灌丛化草原生态系统的结构和功能产生重要影响,在未来需进一步深入研究,特别是不同气候条件下,灌丛化对降水分配和土壤水分储存的影响机制。2)当前关于灌丛化程度研究通常采用空间代替时间的方法,虽然可以解析草地灌丛化的长期影响,但受地域性影响,其结果难以在其他区域推广验证,主要受到研究方法限制。目前,各因素在草地灌丛化过程中的具体影响程度仍然尚不清楚,未来需要利用植被格局、连通性指数等指标,构建相关模型来模拟不同程度灌丛化对草地水循环过程的影响。3)大部分研究只针对灌丛化对草地水循环的某一过程,缺乏系统性和整体性。未来需将灌丛化对草地整个水循环过程作为一个整体来研究,如降水分配、径流、土壤水分、入渗、地下水、蒸散发、植物吸水等,量化各个环节,并揭示灌丛化对草地生态系统水循环驱动机制。4)当前研究在研究方法的改进和现代化试验设备的应用上仍有不足,应当引入可持续性、可模拟化和跨学科的研究方法。需引入新技术、新方法在草地灌丛化过程的水循环等生态水文机理研究,如稳定同位素技术、CT扫描技术等应用于灌丛化对土壤水分利用格局影响的生态水文机理研究的领域。

参考文献 References:

- [1] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, *et al.* Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: Towards a global synthesis. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 709–722.
- [2] Peng H Y, Li X Y, Tong S Y. Advance in shrub encroachment in arid and semiarid region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 313–322.
彭海英, 李小雁, 童绍玉. 干旱半干旱区草原灌丛化研究进展. *草业学报*, 2014, 23(2): 313–322.
- [3] Gaitán J J, Oliva G E, Bran D E, *et al.* Vegetation structure is as important as climate for explaining ecosystem function across Patagonian rangelands. *Journal of Ecology*, 2014, 102: 1419–1428.
- [4] Ding J Y, Eldridge D J. Woody encroachment: social-ecological impacts and sustainable management. *Biological Reviews*, 2024. DOI: 10.1111/brv.13104.
- [5] Wang L, Du L T, Ma L L, *et al.* Effects of planted shrub encroachment on carbon storage of desert steppe ecosystem. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 246–254.
- 王乐, 杜灵通, 马龙龙, 等. 人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 246–254.
- [6] Yan B L, Lv S J, Wang Z W, *et al.* The advance of shrub encroachment in grassland and its impact on ecosystem. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(2): 95–101.
- 闫宝龙, 吕世杰, 王忠武, 等. 草地灌丛化成因及其对生态系统的影响研究进展. 中国草地学报, 2019, 41(2): 95–101.
- [7] Peng H Y, Li X Y, Tong S Y. Effects of shrub (*Caragana microphalla* Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2256–2265.
- 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 内蒙古典型草原灌丛化对水分再分配和利用的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2256–2265.
- [8] Wang Y X, Chen X J, Lou S N, *et al.* Woody-plant encroachment in grasslands: a review of mechanisms and after effects. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(5): 219–227.
- 王迎新, 陈先江, 娄珊宁, 等. 草原灌丛化入侵: 过程、机制和效应. 草业学报, 2018, 27(5): 219–227.
- [9] Wilcox B P, Basant S, Olariu H, *et al.* Ecohydrological connectivity: A unifying framework for understanding how woody plant encroachment alters the water cycle in drylands. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 934535.
- [10] Smith M D, Wilkins K D, Holdrege M C, *et al.* Extreme drought impacts have been underestimated in grasslands and shrublands globally. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(4): e2309881120.
- [11] Hu J, Cao Q H, Liu X L, *et al.* Research progress on the effect of the transition between shrub and grass vegetation on grassland ecosystem and its water-carbon processes. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4324–4333.
- 胡健, 曹全恒, 刘小龙, 等. 草灌植被转变对草地生态系统及其水碳过程的影响研究进展. 生态学报, 2022, 42(11): 4324–4333.
- [12] Ding J Y, Yin C C, Han Y, *et al.* Research progress and perspectives on the impact of shrub encroachment on ecosystem multifunctionality. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8257–8267.
- 丁婧祎, 尹彩春, 韩逸, 等. 草原灌丛化对生态系统多功能性的影响. 生态学报, 2023, 43(20): 8257–8267.
- [13] Ding J Y, Eldridge D J. Ecosystem service trade-offs resulting from woody plant removal vary with biome, encroachment stage and removal method. Journal of Applied Ecology, 2023, 61(2): 236–248.
- [14] Deng Y H, Li X Y, Shi F Z, *et al.* Woody plant encroachment enhanced global vegetation greening and ecosystem water-use efficiency. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(12): 2337–2353.
- [15] Stanton R A, Boone W W, Soto-Shoender J, *et al.* Shrub encroachment and vertebrate diversity: A global meta-analysis. Global Ecology and Biogeography, 2018, 27: 368–379.
- [16] Khazieva E, Verburg P H, Pazur R. Grassland degradation by shrub encroachment: Mapping patterns and drivers of encroachment in Kyrgyzstan. Journal of Arid Environments, 2022, 207: 104849.
- [17] Peng H Y, Li X Y, Li G Y, *et al.* Shrub encroachment with increasing anthropogenic disturbance in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China. Catena, 2013, 109: 39–48.
- [18] Brandt J S, Haynes M A, Kuemmerle T, *et al.* Regime shift on the roof of the world: Alpine meadows converting to shrublands in the southern Himalayas. Biological Conservation, 2013, 158(2): 116–127.
- [19] Venter Z S, Cramer M D, Hawkins H J. Drivers of woody plant encroachment over Africa. Nature Communications, 2018, 9: 2272.
- [20] O'Connor T G, Puttick J R, Hoffman M T. Bush encroachment in southern Africa: changes and causes. African Journal of Range and Forage Science, 2014, 31(2): 67–88.
- [21] Knapp A K, Briggs J M, Collins S L, *et al.* Shrub encroachment in North American grasslands: shifts in growth form dominance rapidly alters control of ecosystem carbon inputs. Global Change Biology, 2008, 14(3): 615–623.
- [22] Chen D J, Mi P, Chu J, *et al.* Patterns and drivers of soil microbial communities along a precipitation gradient on the Mongolian Plateau. Landscape Ecology, 2014, 30: 1669–1682.
- [23] Zhang Y, Liu Y H, Teng L C, *et al.* Effects of woody proliferation on chemical structure and thermal stability of soil organic carbon in arid grasslands. Soils, 2022, 54(6): 1138–1148.
- 张宇, 刘耘华, 滕浏闯, 等. 灌丛化对干旱区草地土壤有机碳化学结构和热稳定性的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1138–1148.
- [24] Zhou L H. Effects of shrub encroachment on community structure and soil carbon composition in northern grasslands in China. Beijing: University of Chinese Academy Sciences, 2018.
- 周鲁宏. 灌丛化对中国北方草原群落结构和土壤碳组分的影响. 北京: 中国科学院大学, 2018.

- [25] Li H, Shen H, Chen L, *et al.* Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28974.
- [26] Acharya B S, Hao Y H, Ochsne T E, *et al.* Woody plant encroachment alters soil hydrological properties and reduces downward flux of water in tallgrass prairie. *Plant and Soil*, 2017, 414: 379–391.
- [27] Rivest D, Rolo V, López-Díaz L, *et al.* Shrub encroachment in Mediterranean silvopastoral systems: *Retama sphaerocarpa* and *Cistus ladanifer* induce contrasting effects on pasture and *Quercus ilex* production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(3/4): 447–454.
- [28] Chen J, Li C, Jia B, *et al.* Regulation of soil nitrogen cycling by shrubs in grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 191: 109327.
- [29] Liu X L, Hu J, Zhou Q P, *et al.* Effects of typical shrub-encroached grassland on vegetation characteristics and soil nutrients in the Zoige Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(4): 901–908.
刘小龙, 胡健, 周青平, 等. 若尔盖高原典型草地灌丛化对植被特征和土壤养分的影响. *草地学报*, 2022, 30(4): 901–908.
- [30] Knapp A, Smith L. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, 291: 481–484.
- [31] Criado M G, Myers-Smith I H, Bjorkman A D, *et al.* Woody plant encroachment intensifies under climate change across tundra and savanna biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29: 925–943.
- [32] Angassa A, Oba G. Relating long-term rainfall variability to cattle population dynamics in communal rangelands and a government ranch in southern Ethiopia. *Agricultural Systems*, 2007, 94(3): 715–725.
- [33] Briske D D, Fuhlendorf S D, Smeins F E. Vegetation dynamics on rangelands: a critique of the current paradigms. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(4): 601–614.
- [34] Sankaran M, Hanan N P, Scholes R J, *et al.* Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, 2005, 438(7069): 846–849.
- [35] Gao Q, Reynolds J F. Historical shrub-grass transitions in the northern Chihuahuan Desert: Modeling the effects of shifting rainfall seasonality and event size over a landscape gradient. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1475–1493.
- [36] Brunsell N A, Van Vleck E S, Nossli M, *et al.* Assessing the roles of fire frequency and precipitation in determining woody plant expansion in Central U. S. grasslands. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(10): 2683–2698.
- [37] Good S P, Caylor K K. Climatological determinants of woody cover in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(12): 4902–4907.
- [38] Heisler J L, Briggs J M, Knapp A K, *et al.* Direct and indirect effects of fire on shrub density and aboveground productivity in a mesic grassland. *Ecology*, 2004, 85(8): 2245–2257.
- [39] Zhu Y K, Shen H H, Akinyemi D S, *et al.* Increased precipitation attenuates shrub encroachment by facilitating herbaceous growth in a Mongolian grassland. *Functional Ecology*, 2022, 36: 2356–2366.
- [40] Kulmatiski A, Beard K. Woody plant encroachment facilitated by increased precipitation intensity. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 833–837.
- [41] Liu J S, Xu X, Zhang Y, *et al.* Effect of rainfall interannual variability on the biomass and soil water distribution in a semiarid shrub community. *Science China, Life Sciences*, 2010, 40(2): 166–174.
刘峻杉, 徐霞, 张勇, 等. 长期降雨波动对半干旱灌木群落生物量和土壤水分动态的效应. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(2): 166–174.
- [42] Brown J H, Valone T J, Curtin C G. Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(18): 9729–9733.
- [43] Honda E A, Duriganand G. Woody encroachment and its consequences on hydrological processes in the savannah. *Philosophical Transactions of Royal Society B*, 2016, 371: 20150313.
- [44] Schreiner-McGraw A P, Vivoni E R, Ajami H, *et al.* Woody plant encroachment has a larger impact than climate change on dryland water budgets. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8112.
- [45] Wang L F. Simulation of the effects of precipitation and grazing on shrub encroachment in temperate grassland. Beijing: Beijing Normal University, 2021.
王凌菲. 降水变化与放牧活动对典型草原灌木入侵进程影响的模拟研究. 北京: 北京师范大学, 2021.
- [46] Zhu Y K. Effects of altered precipitation on plant growth and community structure in a shrub-encroached grassland. Beijing:

- University of Chinese Academy Sciences, 2020.
- 朱言坤. 改变降水对灌丛化草原植物生长及群落结构的影响. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [47] Keen R M, Helliker B R, McCulloh K A, *et al.* Save or spend? Diverging water-use strategies of grasses and encroaching clonal shrubs. *Journal of Ecology*, 2024, 112(4): 870–885.
- [48] Caterina G L, Will R E, Turton D J, *et al.* Water use of *Juniperus virginiana* trees encroached into Mesic prairies in Oklahoma, USA. *Ecohydrology*, 2014, 7: 1124–1134.
- [49] Zou C B, Caterina G L, Will R E, *et al.* Canopy interception for a tallgrass prairie under Juniper encroachment. *PLoS One*, 2015, 10: e0141422.
- [50] Breshears D D, Whicker J J, Zou C B, *et al.* A conceptual framework for dryland aeolian sediment transport along the grassland-forest continuum: Effects of 30 woody plant canopy cover and disturbance. *Geomorphology*, 2009, 105: 28–38.
- [51] Zhao Y N, Wang H M, Li Z L, *et al.* Responses of spatial pattern and driving factors for soil water deficit of desert grassland-shrubland transition sites. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 22–34.
- 赵亚楠, 王红梅, 李志丽, 等. 荒漠草原灌丛转变过程土壤水分亏缺空间特征及影响因素. *草业学报*, 2024, 33(4): 22–34.
- [52] Liu Y F, Cui Z, Huang Z, *et al.* Shrub encroachment in alpine meadows increases the potential risk of surface soil salinization by redistributing soil water. *Catena*, 2022, 219: 106593.
- [53] Gao Z, Hu X, Li X Y. Changes in soil water retention and content during shrub encroachment process in Inner Mongolia, Northern China. *Catena*, 2021, 206: 105528.
- [54] Ma Y L, Liu Y F, López-Vicente M, *et al.* Divergent shift of normal alpine meadow towards shrub and degraded meadows reduces soil water retention and storage capacity. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 130109.
- [55] Liu Y F, Fang H, Shi J J, *et al.* Climate change-induced shrub encroachment changes soil hydraulic properties and inhibits herbaceous growth in alpine meadows. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 340: 109629.
- [56] Li X, Zhang S Y, Peng H Y, *et al.* Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: Results from Inner Mongolia steppe ecosystem of north China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171/172: 20–30.
- [57] Peng H Y, Tong S Y, Li X Y. Effects of thicketization of rangeland on soil and soil hydrological processes in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 642–653.
- 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. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 642–653.
- [58] Yin X, Li D M, Li Y, *et al.* Effects of shrub encroachment on soil hydraulic properties in alpine meadow. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 121–129.
- 尹霞, 李冬梅, 李易, 等. 灌丛化对高寒草甸土壤水力性质的影响. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 121–129.
- [59] Li Q Y, Lai L M, Zhou J H, *et al.* Water use characteristics of main species in different shrub encroachment stages on Ordos Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 89–96.
- 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. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 89–96.
- [60] 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(1/2): 31–43.
- [61] Wang J, Fu B J, Lu N, *et al.* 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.
- [62] Liu X, Zhuang Q L, Lai L M, *et al.* Soil water use sources and patterns in shrub encroachment in semiarid grasslands of Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308/309: 108579.
- [63] Ding J Y, Eldridge D J. The success of woody plant removal depends on encroachment stage and plant traits. *Nature Plants*, 2023, 9: 58–67.
- [64] Zou C B, Turton D J, Will R E, *et al.* Alteration of hydrological processes and streamflow with juniper (*Juniperus virginiana*) encroachment in a mesic grassland catchment. *Hydrological Process*, 2014, 28: 6173–6182.
- [65] Leite P A M, Wilcox B P, Kevin J M. Woody plant encroachment enhances soil infiltrability of a semiarid karst savanna. *Environment Research Communication*, 2020, 2(11): 115005.
- [66] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247: 1043–1048.

- [67] Cui Z, Huang Z, Liu Y, *et al.* Natural compensation mechanism of soil water infiltration through decayed roots in semi-arid vegetation species. *Science of the Total Environment*, 2021, 819: 151985.
- [68] Parizek B, Rostagno C M, Sottini R. Soil erosion as affected by shrub encroachment in northeastern Patagonia. *Journal of Range Management*, 2002, 55(1): 43–48.
- [69] Howard K S C, Eldridge D J, Soliveres S. Positive effects of shrubs on plant species diversity do not change along a gradient in grazing pressure in an arid shrubland. *Basic and Applied Ecology*, 2012, 13: 159–168.
- [70] Bhark E W, Small E E. Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan Desert, New Mexico. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 185–196.
- [71] Eldridge D J, Wang L, Ruiz-Colmenero M. Shrub encroachment alters the spatial patterns of infiltration. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 83–93.
- [72] Zhang S Y, Zhang Z H, He B, *et al.* Interactions between shrub encroachment and water infiltration on the hillslope of a typical steppe. *Ecohydrology*, 2023, 16: e2489.
- [73] Leung A, Boldrin D, Liang T, *et al.* Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment. *Geotechnique*, 2018, 68: 646–652.
- [74] Leite P A M, Schmidt L M, Rempe D M, *et al.* Woody plant encroachment modifies carbonate bedrock: field evidence for enhanced weathering and permeability. *Scientific Reports*, 2023, 13: 15431.
- [75] Hu X, Li Z C, Li X Y, *et al.* Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 1–9.
- [76] Wilcox B P. Shrub control and streamflow on rangelands: a process-based viewpoint. *Journal of Range Management*, 2002, 55: 318–326.
- [77] Qiao L, Zou C B, Stebler E, *et al.* Woody plant encroachment reduces annual runoff and shifts runoff mechanisms in the tallgrass prairie, USA. *Water Resources Research*, 2017, 53: 4838–4849.
- [78] Peng H Y. Spatial pattern of shrub patches and its ecohydrological mechanism at the typical steppe in Inner Mongolia. Beijing: Beijing Normal University, 2012.
彭海英. 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛空间分布格局及其生态水文机理. 北京: 北京师范大学, 2012.
- [79] Li X J, Gao Y P. Effects of shrub encroachment in desert grassland on runoff and the induced nitrogen loss in southeast fringe of Tengger Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7828–7835.
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. *生态学报*, 2012, 32(24): 7828–7835.
- [80] Shen X J, Liu Y W, Liu B H, *et al.* Effect of shrub encroachment on land surface temperature in semi-arid areas of temperate regions of the Northern Hemisphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108943.
- [81] Wang J, Xiao X, Zhang Y, *et al.* Enhanced gross primary production and evapotranspiration in juniper-encroached grasslands. *Global Change Biology*, 2018, 24: 5655–5667.
- [82] Wang P, Li X Y, Wang L, *et al.* Divergent evapotranspiration partition dynamics between shrubs and grasses in a shrub-encroached steppe ecosystem. *New Phytologist*, 2018, 219: 1325–1337.
- [83] Wang Q D, Yang W X, Huang J Y, *et al.* Shrub encroachment effect on the evapotranspiration and its component—A numerical simulation study of a shrub encroachment grassland in Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(3): 348–358.
王芑丹, 杨温馨, 黄洁钰, 等. 灌丛化的蒸散耗水效应数值模拟研究—以内蒙古灌丛化草原为例. *植物生态学报*, 2017, 41(3): 348–358.
- [84] Dan Y, Du L T, Wang L, *et al.* Effects of planted shrub encroachment on evapotranspiration and its components in desert steppe: a case study in Yanchi county, Ningxia Hui Autonomous Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5638–5648.
丹杨, 杜灵通, 王乐, 等. 荒漠草原人工灌丛化对蒸散发及其组分的影响—以盐池县为例. *生态学报*, 2020, 40(16): 5638–5648.
- [85] Newman B D, Breshears D D, Gard M O. Evapotranspiration partitioning in a semiarid woodland: ecohydrologic heterogeneity and connectivity of vegetation patches. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(3): 561–572.