

梭梭林下土壤结皮发育对降水入渗动态的影响

李昌龙^{1,2,3}, 姜生秀^{1,3}, 吴昊^{2,3}, 赵鹏^{1,2,3}

(1. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室,甘肃 武威 733000;

2. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃 民勤 733300;3. 甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070)

摘要:研究梭梭林下土壤结皮发育对降水入渗、土壤水分动态的影响,旨在掌握梭梭林地管理和促进林下植被发育的关键技术。结果表明:1)土壤结皮发育对各层土壤含水率的变化具有显著影响($P<0.05$),0~0.5 cm 土层土壤含水率的变化随土壤结皮发育逐渐增大,而其余土层逐渐减小。随土壤深度增加,无结皮沙地(NSC)和物理结皮沙地(PSC)土壤含水率先增加后减小,生物结皮沙地(BSC)逐渐减小。2)土壤结皮发育对林下土壤水分动态产生显著影响($P<0.05$),随着土壤结皮的发育,0~0.5 cm 土层土壤水分波动幅度逐渐增强,而其余土层则逐渐减弱,表现为 NSC>PSC>BSC。NSC 和 PSC 样地水分波动频度较大,BSC 样地没有明显的波动。3)高强度降水下(区间降水 39 mm),三者降水的入渗强度和入渗深度较大,而中(区间降水 19 mm)、轻(区间降水 8 mm)强度降水下,NSC 和 PSC 样地产生轻微的浅层入渗,BSC 样地保持在稳定的水平,表现为 NSC>PSC>BSC,可知梭梭林下土壤结皮发育对降水的截留作用逐渐增强,限制了降水的入渗,但在稳定深层土壤水分和限制深层土壤蒸发方面具有积极的作用。

关键词:土壤水分;降水入渗;土壤结皮;梭梭林

中图分类号:S714 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)05-0035-06

Effects of Soil Crust Development on Precipitation Infiltration Dynamics under *Haloxylon ammodendron* Plantations

LI Chang-long^{1,2,3}, JIANG Sheng-xiu^{1,3}, WU Hao^{2,3}, ZHAO Peng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei 733000, Gansu, China;

2. Gansu Minqin National Field Observation and Research Station on Ecosystem of Desertification Rangeland, Minqin 733300, Gansu, China;

3. Gansu Desert Control and Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract:Soil crust was widely developed under *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert areas, and its development had an important effect on soil hydrological cycle. This paper studied the effect of soil crust development on precipitation infiltration and soil moisture dynamics under the plantations. The objectives of this study were to master the key technologies on management of *H. ammodendron* plantations and to promote the development of land vegetation. The results showed that 1) soil crust development presented a significant effect on the soil moisture change ($P<0.05$). Soil moisture change in the crust development layer (0—0.5 cm) gradually increase with soil crust development, while it gradually decreased in the other layers. With the increase of soil depth, the change of soil moisture increased firstly and then decreased in the non-soil-crust (NSC) and physical soil crust (PSC) plots, but in the biological soil crust (BSC) plots, it showed a gradually decreasing trend. 2) Soil crust development had a significant effect on soil moisture fluctuation($P<0.05$)under the plantations. With the soil crust development, the fluctuation amplitude increased in the crust development layer (0—0.5 cm), while it gradually decreased in the other

soil layers. The fluctuation amplitude in the soils with different crusts was in the order of NSC>PSC>BSC. The fluctuation amplitude and frequency of soil moisture were relatively higher in the NSC and PSC plots, while soil moisture had no obvious change in the BSC plots. 3) Under highly intensive rainfall conditions(interval precipitation 39 mm), high infiltration intensity and depth were found in three crust, under moderately (interval precipitation 19 mm) and lightly (interval precipitation 8 mm) intensive rainfall conditions, light infiltration in the shallow layer was found in NSC and PSC, while in BSC, it was stable, and the filtration was in the order of NSC>PSC>BSC. It was concluded that the interception of precipitation of soil crust gradually increased with the development of the crust under *H. ammodendron* plantations. The crust inhabited the rain water filtration, on the other hand, curst played a positive role in stabilized soil moisture and limited moisture evaporation of deep soil layers.

Key words: soil moisture; precipitation infiltration; soil crust; *Haloxylon ammodendron* plantation

土壤结皮是荒漠生态系统重要的组成部分和常见的一种地表覆被类型,包括物理结皮和生物结皮两类,土壤物理结皮是由降雨打击夯实表层土壤导致土壤团聚体发生物理变化而形成的结构性结皮,生物结皮是由苔类、藻类、真菌和细菌以及许多非维管束植物成分与其下土层复合形成的复杂聚合体^[1-2]。土壤结皮的发育从根本上改变了表层土壤的结构,从而影响着以表层土壤为介质的水文循环过程^[3-7]。在干旱荒漠地区,降水入渗是降水有效转化为土壤水的唯一途径,对降水的有效储存与转化利用至关重要^[8-10]。近年来对土壤结皮与土壤水分的关系进行了大量的研究^[11-13],但对于土壤结皮在土壤水文循环过程中的影响一直存在争议,有的认为土壤结皮促进水分入渗^[14-15],有的则认为阻碍水分入渗^[16-17]。甘肃省民勤治沙综合试验站早在20世纪60~70年代,采用黏土沙障进行流沙治理,并于黏土沙障间种植梭梭(*Haloxylon ammodendron*)形成防风固沙林。人工梭梭林经过60 a的演变,林分密度逐渐下降达到合理程度,林下土壤结皮逐渐发育,其梭梭固沙林的结构和功能趋于合理。稀疏的梭梭林($60\sim80 \text{ 株} \cdot \text{km}^{-2}$)不足以影响降水的土壤入渗,而土壤结皮的发育深刻地影响着林地的土壤水文循环过程。本研究通过对梭梭林地土壤结皮发育过程中的土壤水分动态进行研究,掌握稀疏梭梭林土壤结皮发育对土壤水文过程的影响,对干旱荒漠区人工梭梭林生态系统中土壤结皮的生态功能和林分管理具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处巴丹吉林沙漠东南缘(甘肃省民勤治沙综合试验站内($38^{\circ}36'N, 102^{\circ}58'E$)),海拔1 375 m),民勤西沙窝沙井子地区。属于典型温带大陆型气候,平均气温7.76℃,最高气温41.0℃,最低气温

-30.8℃,无霜期175 d。年平均降水量115.9 mm,集中分布于7—9月(约占全年降水量的75%)。年均蒸发量2 604.3 mm,干燥度约5.3,相对湿度46%;年均日照时数2 799.4 h。常年盛行西北风,平均风速为 $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年平均大风日数25.1 d,年平均沙尘暴日数25.6 d。土壤类型主要为风沙土,植被类型主要有梭梭、唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)等。

1.2 研究方法

在甘肃省民勤治沙综合试验站(甘肃省民勤荒漠草场国家野外定位观测研究站样地)内,梭梭林下土壤表层从无土壤结皮→土壤物理结皮→土壤生物结皮是一个漫长的发育过程,但是由于人为破坏,土壤结皮发育过程发生逆向转变,所以林下土壤表层有3种存在状态。选择空间尺度内不同地域3种典型(表1)、无结皮沙地(NSC)、物理结皮沙地(PSC)、生物结皮沙地(BSC)土壤结皮发育样地,分别代表时间尺度内土壤结皮发育初期、中期、后期样地。每个样地内分别设置3个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 样方,每个样方设置3个样点,用烘干法测定土壤含水量。2017—2018年的2个生长季(4—10月)内,每隔20 d采集0~0.5、0.5~10、10~20、20~40、40~60 cm土层的土壤。

土壤含水率的变化反映了各个土层水分补给受降水入渗的影响,以及土壤结皮对降水入渗的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤结皮对各层土壤含水率变化的影响

在梭梭林中3种样地NSC、PSC、BSC各层土壤含水率的变化见图1~图3。分析表明,NSC和PSC样地土壤含水率最大值呈先增加后减小的趋势,在10~20 cm土层土壤含水率变化最大,除表层结皮层(0~0.5 cm)外,NSC样地各层土壤含水率略>PSC样地,而BSC样地呈逐渐下降趋势,0.0~

0.5 cm 结皮层土壤含水率的变化最大。各层土壤水分的变化主要受降水量的影响较大,特别是对深层土壤水分具有显著的影响,不同土壤结皮发育层对降水的拦截和蓄积作用是导致三者差异的主要原因。结皮发育层(0~0.5 cm)土壤含水率变化在土壤结皮发育过程中逐渐增大,NSC 样地<4%,而

PSC 样地略>4%,MSC 样地几乎接近 8%,结皮层的蓄积作用逐渐增强,进一步阻止了降水的深层入渗,导致其余各层土壤含水率的变化随着土壤结皮的发育逐渐变小,各层土壤含水率最大值均表现为 NSC>PSC>BSC。

表 1 梭梭林下结皮发育样地的生境特征

Table 1 Habitat characteristics of soil crust development plots under *H. ammodendron* plantations

种群生境	无结皮沙地 NSC	物理结皮沙地 PSC	生物结皮沙地 BSC
经纬度	38°33'22"N, 102°58'51"E	38°33'54"N, 103°00'31"E	38°33'23"N, 102°58'15"E
海拔/m	1 362	1 349	1 353
地貌特征	流动沙地	固定沙地	固定沙地
沙地高度/m	4~5	5~6	3~4
土壤特征	风沙土	风沙土	风沙土
风积蚀特征	风蚀	风蚀与沉积相间	沉积
结皮厚度/cm	0.0	0.2	0.5
梭梭密度/(株·km ⁻²)	80	75	60
梭梭地径/cm	23.25	14.18	15.25
梭梭高度/m	3.83	3.05	2.89
梭梭冠幅/m	4.50×4.60	2.79×3.13	2.74×2.96

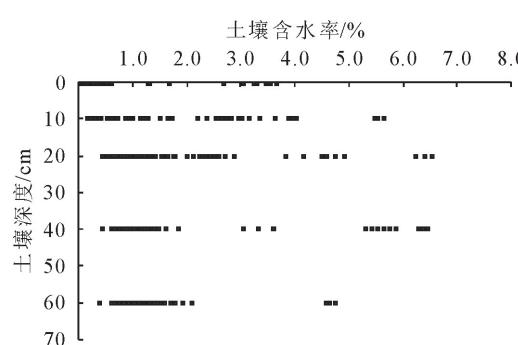


图 1 梭梭林下无结皮样地各土层土壤水分变化

Fig. 1 The change rang of soil moisture content on NSC plot under *H. ammodendron* populations

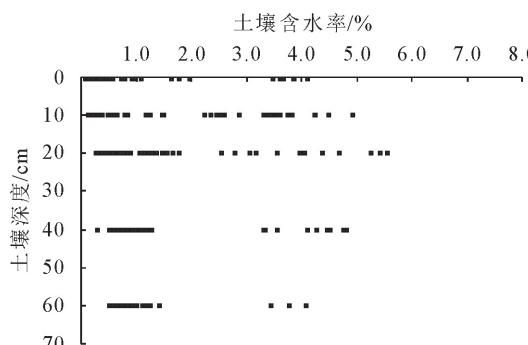


图 2 梭梭林下物理结皮样地各层土壤水分变化

Fig. 2 The change rang of soil moisture content on PSC plot under *H. ammodendron* populations

2.2 土壤结皮对土壤水分动态变化的影响

梭梭林 3 种样地的土壤水分动态变化见图 4~图 6,分析表明,NSC 和 PSC 样地土壤水分的动

态变化相对于 BSC 样地的土壤水分动态变化具有较强的波动性,表现为 NSC>PSC>BSC。在 NSC 和 PSC 样地,0~0.5 cm 结皮发育层土壤水分波动的强度较大,但频度较小,大部分时间段都保持在一个较稳定的低水平,而在雨期具有短暂的活跃期,而在其下土层中,土壤水分的波动强度有所减弱,而波动频度明显加大,随着土层深度的增加,波动性总体表现为逐渐减弱的趋势。在 BSC 样地,只有 0~0.5 cm 土层土壤水分波动的强度更大,频度较小,而其下土层基本保持在同一个水平,变化曲线没有明显的波峰和波谷,波动性表现不明显。而在强降水条件下的饱和入渗,三者土壤水分变化表现出很强的波动性,土壤结皮发育层(0~0.5 cm)表现最为剧烈,随着土壤结皮的发育逐渐增强,而其下各层土壤的水分变化也较为剧烈。

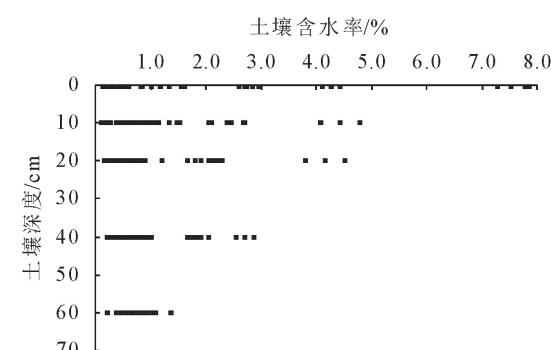


图 3 梭梭林下生物结皮样地各土层土壤水分变化

Fig. 3 The change rang of soil moisture content on MSC plot under *H. ammodendron* populations

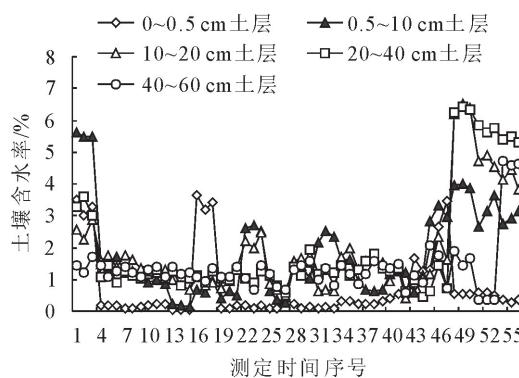


图 4 梭梭林下无结皮样地土壤水分动态变化

Fig. 4 Soil moisture dynamic variety of the plaies on NSC plot under *H. ammodendron* plantation

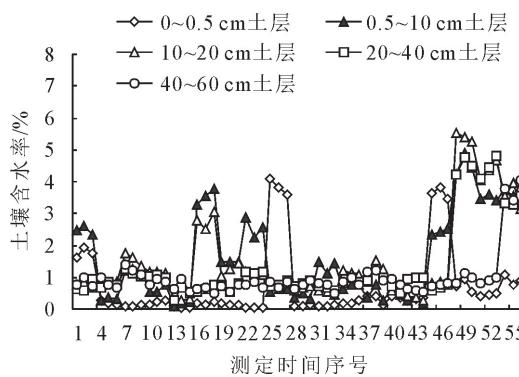


图 5 梭梭林下物理结皮样地土壤水分动态变化

Fig. 5 Soil moisture dynamic variety of the plaies on PSC plot under *H. ammodendron* plantation

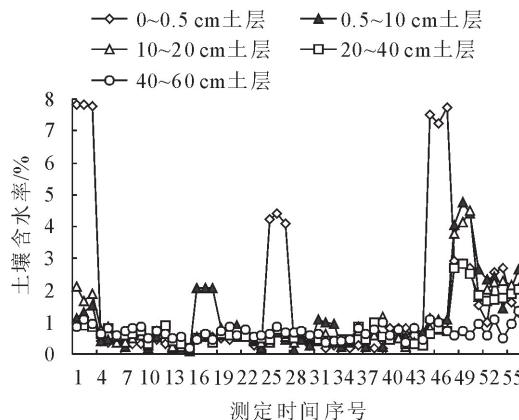


图 6 梭梭林下生物结皮样地土壤水分动态变化

Fig. 6 Soil moisture dynamic variety of the plaies on BSC plot under *H. ammodendron* plantation

2.3 不同降水强度下土壤结皮对降水土壤入渗的影响

图 7 为高强度降水条件下降水入渗的动态变化(2018 年 8 月 15 日—10 月 12 日,期间总降水量为 39.1 mm),表明在入渗深度和强度方面具有较大的影响。初期, BSC 样地结皮层土壤含水率强烈提升,而以下土层没有受到降水影响,PSC 样地结皮层土壤含水率略>NSC 样地,但入渗的深度和入渗

量不及 NSC 样地。到了中期,由于受到地表蒸发和降水入渗的双重作用,结皮层土壤含水率急剧下降,下降速度 BSC 样地相对比较缓慢,PSC 和 NSC 样地快速达到最低点,而其他土层(除 40~60 cm 外)土壤含水率都有大幅度的增加,入渗强度具体表现为 NSC>PSC>BSC。到了后期,降水入渗作用和土壤蒸发作用加剧,0~20 cm 范围内土壤含水率出现下降,而 20~60 cm 范围内入渗强度有所下降,但入渗深度逐渐加大,同样表现为 NSC>PSC>BSC。

中强度降水条件下土壤水分的动态变化(2017 年 8 月 11 日—10 月 19 日,期间总降水量为 18.9 mm)见图 8,由于降水的不饱和入渗,在入渗量和深度方面均受到极大的限制。在整个入渗过程中,土壤结皮层含水率始终保持在一个较低水平,BSC 样地略大于 NSC 和 PSC 样地,主要是由于降水事件后强烈的土壤水分蒸发所致。而其他土层,降水的入渗量和深度随着时间的推移,入渗量逐渐减弱,而入渗深度逐渐加深,入渗强度表现为 NSC>PSC>BSC,入渗初期结皮发育层由于强烈的土壤水分蒸发作用,土壤含水率下降到降水前的水平,而 0.5~10 cm 土层受降水补给的影响较大,其余土层土壤含水率保持在原有水平,入渗中期时 0.5~10、10~20 cm 土层受到降水入渗的影响进一步加大,后期影响范围扩大到 20~40 cm 土层。

相对于高强度降水和中强度降水,低强度降水对土壤水分的补给受到极大的限制(图 9,2018 年 5 月 3 日—7 月 3 日,期间总降水量为 7.9 mm),土壤含水率受降水入渗影响的变化规律基本上与中度相似,但入渗强度与入渗深度进一步受到影响,逐渐减弱。

3 结论与讨论

土壤结皮发育对各层土壤含水率的变化具有显著影响($P < 0.05$),0~0.5 cm 土层土壤含水率的变化随土壤结皮发育逐渐增大,而其余土层逐渐减小。随土壤深度增加,无结皮沙地(NSC)和物理结皮沙地(PSC)土壤含水率的变化呈先增加后减小,生物结皮沙地(BSC)逐渐减小。

土壤结皮发育对林下土壤水分动态产生显著影响($P < 0.05$),随着土壤结皮的发育,0~0.5 cm 土层土壤水分波动幅度逐渐增强,而其余土层则逐渐减弱,表现为 NSC>PSC>BSC。

高强度降水条件下,三者降水的入渗强度和入渗深度较大,而中、轻强度降水下,NSC 和 PSC 样地产生轻微的浅层入渗,BSC 样地保持在稳定的水平,但均表现为 NSC>PSC>BSC。

土壤结皮在干旱荒漠区的梭梭人工林下广泛分

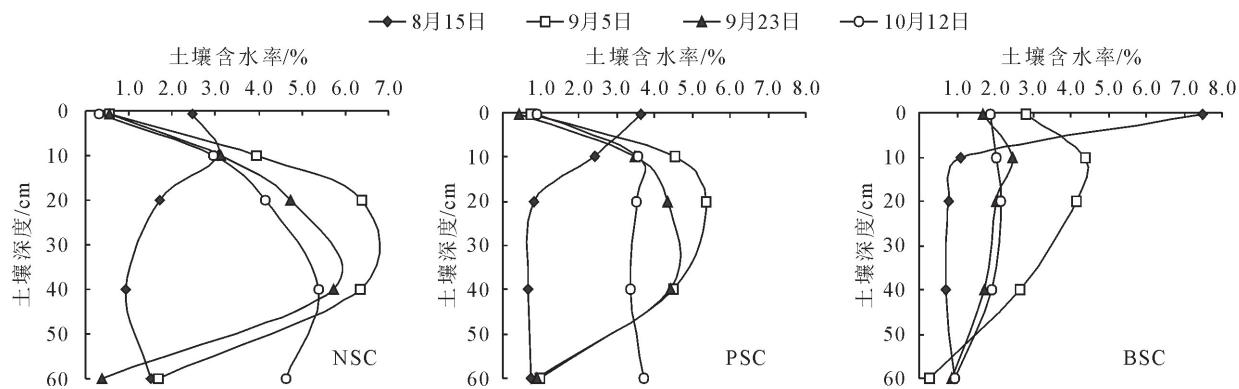


图 7 高强度降水条件下土壤结皮对降水入渗的影响

Fig. 7 Effect of soil crust development on precipitation infiltration under the condition of high intensity precipitation

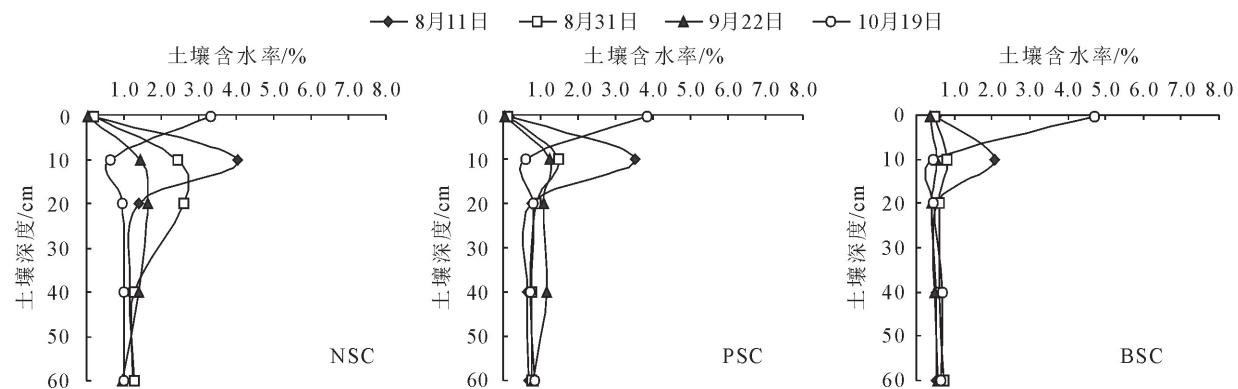


图 8 中强度降水条件下土壤结皮对降水入渗的影响

Fig. 8 Effect of soil crust development on precipitation infiltration under the condition of moderate intensity precipitation

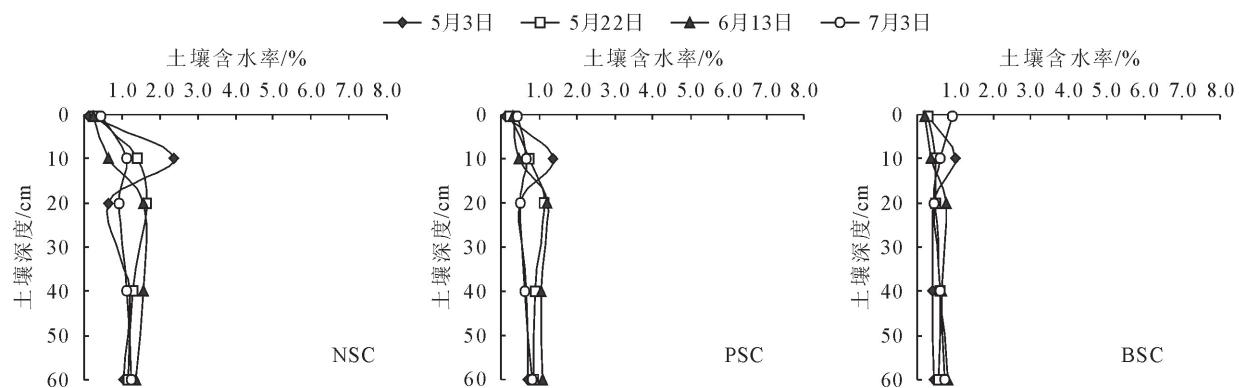


图 9 低强度降水条件下土壤结皮对降水入渗的影响

Fig. 9 Effect of soil crust development on precipitation infiltration under the condition of low intensity precipitation

布,对土壤水文循环和土壤水分格局产生重要的影响^[19]。研究表明梭梭林下土壤结皮发育过程对各层土壤含水率的变化存在显著影响($P < 0.05$),土壤结皮发育层(0~0.5 cm)含水率变化呈现为BSC>PSC>NSC,BSC样地结皮发育层土壤水分含量最大值可达8%左右,显著大于PSC和NSC样地,而其他土层土壤水分变化强度逐渐减弱,表现为NSC>PSC>BSC。由于降水入渗和土壤蒸发的双重作用,NSC和PSC样地呈现先增加后减少的趋势,在10~20 cm土层达到最大值,而BSC样地呈

逐渐减小的趋势,最大值则出现在0~0.5 cm的结皮发育层。梭梭林下土壤结皮的发育,使结皮发育层细粒含量和有机物含量逐渐增大,对降水截留作用逐渐增强^[20~21],更有利于结皮发育层土壤水分的蒸发,从而限制了降水入渗^[22~24]。

在土壤结皮发育过程中,结皮发育层对降水的滞留作用逐渐增加,同时它的存在抑制了深层土壤水分的蒸发^[25]。土壤结皮的发育对梭梭林下沙地土壤水分的动态变化存在显著影响($P < 0.05$)。NSC和PSC样地结皮发育层(0~0.5 cm)土壤水

分波动强度较大,但波动频度很小,大部分时间维持在相对较低而稳定的水平,而其下各层土壤水分的波动强度有所减弱,但波动频度增大,是由于降水入渗过程和土壤水分蒸发过程相继交替发生。而BSC样地除结皮发育层具有较高的波动强度和较小的波动频度外,其余土层土壤水分变化没有明显的波峰和波谷,土壤水分含量均<1%,说明降水入渗和土壤蒸发作用很小。而在强降水事件的影响下,发生饱和入渗,各层土壤水分变化才具有明显的波动性,但波动强度和频度远小于NSC和PSC样地。因此,土壤结皮的发育在影响降水入渗的同时,也限制了结皮层下土壤水分的蒸发,对稳定土壤结皮层下土壤水分具有积极的作用。

降水入渗是干旱荒漠区土壤水分的唯一来源,而土壤结皮的发育是影响降水入渗的主要因素。许多研究表明结皮发育层和层下表层土壤具有良好的持水力,能截留10%~40%的降水量,限制了截留水分向深层土壤的渗透^[26-28]。本研究表明不同降水强度对土壤结皮发育过程中3种类型样地降水的入渗量和深度均产生较大的影响。在高强度降水条件下的饱和入渗,3种样地在入渗强度和入渗深度方面均有较强的反应,除结皮发育层外,表现为NSC>PSC>BSC。而在中强度和低强度降水的不饱和入渗,NSC和PSC样地产生轻微的浅层入渗,而BSC样地结皮发育层和层下表层发生轻微入渗,而其余土层土壤水分保持高度的稳定性。

参考文献:

- [1] 张冠华,胡甲均.生物结皮土壤-水文-侵蚀效应研究进展[J].水土保持学报,2019,33(1):1-8.
ZHANG G H, HU J J. A review of soil-hydrology-erosion effects of biological crusts[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] 刘江,张立欣,徐先英.不同退化程度的人工梭梭林地土壤理化特征[J].西北林学院学报,2019,34(4):36-42.
LIU J, ZHANG L X, XU X Y. Soil physicochemical properties of artificial *Haloxylon ammodendron* forest with different degradation degrees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 36-42. (in Chinese)
- [3] 石薇,王新平,张亚峰.腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J].中国沙漠,2018,38(3):600-609.
SHI W, WANG X P, ZHANG Y F. Response of shallow soil moisture to precipitation and biological crust in artificial sand-fixing vegetation area of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 600-609. (in Chinese)
- [4] 张克海,胡广录,张钰佳,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron*)根区土壤含水量分布特征及影响因素[J].西北林学院学报,2019,34(4):16-25.
ZHANG K H, HU G L, ZHANG Y J, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil water content in root zone of *Haloxylon ammodendron* in desert oasis transitional zone in middle reaches of Heihe river[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 16-25. (in Chinese)
- [5] 程一本.干旱半干旱地区典型沙地深层土壤水分渗漏过程研究[D].北京:北京林业科学研究院,2018.
- [6] 杨利云.甘肃民勤半荒漠地区人工藻结皮的固沙效果研究[D].兰州:兰州理工大学,2017.
- [7] 张立恒,李昌龙,姜生秀,等.梭梭林下土壤结皮对土壤水分空间分布格局的影响[J].西北林学院学报,2019,34(5):17-22.
ZHANG L H, LI C L, JIANG S X, et al. Effects of soil crusts on the spatial distribution pattern of soil moisture under *Haloxylon ammodendron* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 17-22. (in Chinese)
- [8] 张志山,李新荣,赵洋,等.沙坡头生态水文学研究进展及水量平衡自动模拟监测系统[J].中国沙漠,2018,38(6):1119-1135.
- [9] 韩炳宏,牛得草,贺磊,等.生物土壤结皮发育及其影响因素研究进展[J].草业科学,2017,34(9):1793-1801.
HAN B H, NIU D C, HE L, et al. A review on the development and effects of biological soil crusts[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(9): 1793-1801. (in Chinese)
- [10] KIDRON G J, MONGER C, VONSHAK AHUVA, et al. Contrasting effects of microbiotic crusts on runoff in desert surfaces [J]. Geomorphology, 2012, 139: 484-494.
- [11] FISCHER T, YAIR A, VESTE M. Infiltration, water holding capacity and growth patterns of biological soil crusts on sand dunes under arid and temperate climates [A]. Vienna: EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012.
- [12] 李新荣,谭会娟,回嵘,等.中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J].科学通报,2018,69(23):2320-2334.
LI X R, TAN H J, HUI R, et al. Study on biological soil crusts in desert and sandy land in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 69(23): 2320-2334. (in Chinese)
- [13] 王莉,秦树高,张宇清,等.生物土壤结皮对毛乌素沙地油蒿群落土壤水分的影响[J].北京林业大学学报,2017,16(3):48-56.
WANG L, QIN S G, ZHANG Y Q, et al. Effects of biological soil crusts on soil moisture of *Artemisia ordosica* community in Mu Us Sandy [J]. Journal Beijing Forestry University, 2017, 16(3): 48-56. (in Chinese)
- [14] WANG C, LI S C, DERRICK LAI Y F, et al. The effect of floating vegetation on CH₄ and N₂O emissions from subtropical paddy fields in China[J]. Paddy Water Environ, 2015, 13: 425-431.
- [15] 余海龙,赖荣生,黄菊莹,等.生物土壤结皮在灌丛沙堆发生发育过程中的作用述评[J].江苏农业科学,2015,42(9):350-353.
- [16] 张军红,吴波.油蒿群落生物结皮对降水入渗过程的影响[J].中国科学院大学学报,2014,31(2):214-220.
ZHANG J H, WU B. Influences of biological soil crusts in *Artemisia ordosica* community on the precipitation infiltration process[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Science, 2014, 31(2): 214-220. (in Chinese)

(下转第 103 页)

Chinese)

- [14] 陈昌雄,陈平留,肖才生,等.人工马尾松复层混交林林分结构规律的研究[J].林业科学,2001,37(supp. 1):205-207.
- CHEN C X, CHEN P L, XIAO C S, et al. Study on the stand structure law of multi-stories mixed unevenaged *Pinus massoniana* LAMB. Plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(supp. 1):205-207. (in Chinese)
- [15] HASHIMOTO R. Analysis of the morphology and structure of crowns in a young sugi (*Cryptomeria japonica*) stand [J]. *Tree Physiology*, 1989, 6:119-134.
- [16] NANOS N, MONTERO G. Spatial prediction of diameter distribution models[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 161(1-3) :147-158.
- [17] 欧建德,吴志庄.林下套种及坡位和弱光环境对南方红豆杉人工林早期生长及林分分化的影响[J].东北林业大学学报,2016,44(10):12-16.
- OU J D, WU Z Z. Effects of intercropping pattern, different
- slope and weak light on early growth and structure differentiation of *Taxus wallichina* var. *mairei* plantation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44 (10) : 12-16. (in Chinese)
- [18] 温晶,张秋良,韩胜利,等.不同抚育间伐强度对兴安落叶松林分平均直径和树高生长的影响[J].西北林学院学报,2018,33 (5):163-166.
- WEN J, ZHANG Q L, HAN S L, et al. Effects of different tending thinning intensities on the average diameter and height growth of *Larix gmelinii* forest[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(5):163-166. (in Chinese)
- [19] 欧建德,吴志庄.林下套种对南方红豆杉树冠形态结构及干形变化的影响[J].西南林业大学学报,2016,36(5):106-110.
- OU J D, WU Z Z. The effect of interplant under the canopy on *Taxus chinensis* var. *mairei* crown structure and stem form changes[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36(5):106-110. (in Chinese)

(上接第 40 页)

- [17] XIAO B, WANG Q H, ZHAO Y G, et al. Artificial culture of biological soil crusts and its effects on overland flow and infiltration under simulated rainfall[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(1):11-17.
- [18] 格日乐,刘艳琦,左志严,等.土壤水分对植物根-土界面相互作用特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):135-140.
- [19] LI X R, ZHANG Z S, HUANG L, et al. Review of the eco-hydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(5):397-410.
- [20] 乔宇.民勤绿洲边缘粘土沙障生态水文效应研究[D].北京:中国林业科学院,2015.
- [21] YANG H T, LI X R, LIU L C. Soil water repellency and influence factors of NitrariatangutorumNebkhas at different stages [J]. *Journal Arid Land*, 2014, 6(3):300-310.
- [22] 乔宇,徐先英.干旱荒漠区物理结皮的土壤水文效应[J].中国农学通报,2015,31(7):206-211.
- [23] 白秀文,哈申吐力古尔,徐杰.不同类型结皮影响下土壤水分的变化规律[J].内蒙古师范大学学报:自然科学,2017,46 (3):401-407.
- [24] 刘翔,周宏飞,刘昊,等.不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟[J].生态学报,2016,46(18):5820-5826.
- LIU X, ZHOU H F, LIU H. Characteristic and numerical simulation of sand soil infiltration under the different types of biological soil crusts[J]. *Acta Ecologia Sinica*, 2016, 46 (18): 5820-5826. (in Chinese)
- [25] 李守中,肖洪浪,李新荣,等.干旱半干旱地区微生物结皮土壤水文学的研究进展[J].中国沙漠,2004,24(4):500-506.
- [26] 李柏.不同荒漠生态系统生物结皮分布及水文特征研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [27] DUAN Z H, XIAO H L, LI X R, et al. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/4):237-246.
- [28] 乔宇,徐先英,付贵全,等.民勤绿洲边缘不同年代土壤结皮特性及对水文过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):1-6.