

文章编号: 1008 - 2786 - (2018) 3 - 354 - 10

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000331

# 氮添加条件下白羊草种群及近地表生物结皮 对土壤入渗性能的影响

李兆松<sup>1</sup> 王兵<sup>1,2\*</sup> 李盼盼<sup>1</sup> 王忠禹<sup>1</sup> 汪建芳<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100;

2. 中科院水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 以黄土高原典型草地白羊草群落为研究对象, 设置不同施氮水平(0、2.5、5、10 g/(m<sup>2</sup>·a)) 模拟氮沉降, 通过人工模拟降雨, 系统研究氮添加条件下白羊草群落及其近地表特征对土壤入渗过程的影响。结果表明: (1) 白羊草种群覆盖可显著延缓产流, 且随着近地表生物结皮的参与, 延缓产流效果更加明显。白羊草和生物结皮共同作用下(T<sub>2</sub>) 平均初始产流时间分别是单一白羊草种群(T<sub>1</sub>) 和裸地对照(T<sub>0</sub>) 的 1.64 倍和 4.87 倍; (2) 稳定入渗速率和入渗总量均在较低施氮水平(N<sub>0</sub> 和 N<sub>2.5</sub>) 下总体较高; 生物结皮可抑制土壤入渗过程, 白羊草和生物结皮共同作用下(T<sub>2</sub>) 稳定入渗速率和入渗总量较单一白羊草种群(T<sub>1</sub>) 分别减少了 6.35% 和 7.49%; (3) 植被及生物结皮特征可显著影响坡面入渗过程, 初始产流时间随白羊草盖度、地上生物量和苔藓结皮盖度、高度的增加均呈幂函数增加, 随藻结皮盖度的增加呈幂函数下降(P < 0.01); 稳定入渗速率和入渗总量随生物结皮总盖度的增加而呈幂函数下降, 与藻结皮盖度存在显著的 DoseResp 曲线关系(P < 0.01)。本研究以为黄土高原草地生态水文过程及植被建设提供数据来源和理论依据。

**关键词:** 黄土高原; 白羊草种群; 氮沉降; 生物结皮; 降雨入渗

中图分类号: S157

文献标志码: A

氮素是植物生长的必需元素<sup>[1]</sup>, 也是大多数陆地生态系统植物生长的限制因子<sup>[2-4]</sup>。近年来, 在全球氮沉降日益增加的背景下, 土壤有效氮升高对草地生态系统植被群落特征及土壤入渗过程的潜在影响越来越备受关注。据 2000 年的监测数据显示, 全球氮沉降最低地区氮沉降强度小于 0.2 ~ 0.3 g/(m<sup>2</sup>·a), 而较高地区氮沉降强度则达到 1 ~ 2 g/(m<sup>2</sup>·a), 部分严重污染地区甚至超过 6 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[5]</sup>。随着全球范围内氮沉降强度的持续增加, 一定程度上会增

加土壤中氮素含量, 进而影响植物的生长发育<sup>[6]</sup>, 改变植物群落的组成、结构和功能<sup>[7]</sup>, 调节植物群落地上地下生物量的分配模式<sup>[8]</sup>。氮沉降速率的增加也会显著影响生物结皮生长发育。生物结皮是由隐花植物和土壤中微生物及其他生物体通过菌丝体、假根和分泌物等土壤表层颗粒胶结形成的复合体<sup>[9]</sup>, 作为特殊的生态系统, 适当的氮添加能够促进生物结皮的生长发育, 其中, 苔藓结皮对氮素的敏感性高于藻类结皮和地衣<sup>[10-12]</sup>。

收稿日期(Received date): 2017 - 11 - 05; 改回日期(Accepted date): 2018 - 1 - 16

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2016YFC0501703); 陕西省创新人才推进计划 - 青年科技新星项目(2017KJXX - 88); 国家自然科学基金(41471438)。[Key National R & D Program (2016YFC0501703); Shanxi Province Innovative Talents Promotion Program-Youth Science and Technology Rising Star Project (2017KJXX - 88); National Natural Science Foundation of China (41471438)]

作者简介(Biography): 李兆松(1992 -), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤侵蚀。[LI Zhaosong (1992 -), male, born in Ganzhou, Jiangxi province, M. Sc. candidate, research on soil erosion] E-mail: lzs151139@163.com.

\* 通讯作者(Corresponding author): 王兵(1982 -), 男, 陕西武功人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 植被恢复与土壤侵蚀。[WANG Bing (1982 -), male, born in Yangling, Shanxi province, Ph. D., associate professor, specialized in vegetation restoration and soil erosion] E-mail: bwang@ms. iswc. ac. cn

植被通过冠层截留和根系改善土壤结构进而影响降雨—入渗过程<sup>[13]</sup>。一般而言,植被覆盖度越大,其降雨截留量越大,对雨滴动能的消减能力越强,从而起到保护地表免受雨滴打击,抑制物理结皮发育,增加降雨入渗的作用<sup>[14]</sup>。植物根系在土壤中的生长延伸、生死更迭,形成了大量的根系和孔隙,从而提高土壤的渗透性<sup>[15]</sup>。同时通过增加土壤有机质含量和促进团聚体形成提高土壤入渗速率<sup>[16]</sup>。有关生物结皮对土壤入渗性能影响的研究结果并不一致,总体表现为抑制土壤入渗和促进土壤入渗两个观点<sup>[17]</sup>。一方面,生物结皮通过生物体及生物体分泌的胞外多糖等化学物质在吸水后迅速膨胀,堵塞结皮中的孔隙结构,从而阻碍土壤水分入渗<sup>[18,19]</sup>,增加地表径流<sup>[20-23]</sup>;有研究表明在野外自然降雨条件下单纯生物结皮相对裸地入渗量减少约为8.3%<sup>[24]</sup>,而在圆盘入渗仪法下单纯有生物结皮的土壤稳定入渗速率约是没有结皮的2倍<sup>[19]</sup>。另一方面,也有学者认为生物结皮发育过程中改变下层土壤颗粒组成、孔隙结构和土壤容重等土壤理化性质<sup>[9,25,26]</sup>,进而促进土壤入渗过程<sup>[27,28]</sup>。

黄土高原土壤侵蚀严重,为有效控制水土流失,我国自1999年以来在该区大规模实施“退耕还林(草)”工程,植被得以恢复,近地表生物结皮大面积发育,平均盖度达到了60%~70%<sup>[29]</sup>,对水分平衡产生了显著影响。同时,随着氮沉降强度的持续增加,势必会改变植被及生物结皮群落特征,从而进一步影响坡面入渗过程,对水文循环产生显著影响。然而,氮沉降条件下的植被组成变化对降雨入渗过程的影响机制尚不清楚,仍需进一步研究。基于此,本文选取黄土高原典型地带性植被白羊草作为研究对象,设置不同梯度的施氮水平模拟氮沉降,系统研究氮添加条件下白羊草种群及生物结皮生长特征变化对土壤入渗过程的影响,量化植被特征参数与土壤入渗特性的相互关系,为黄土高原的草地生态水文过程及植被建设提供数据来源和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验布设

#### 1.1.1 试验土槽

试验共布设15个土槽,每个土槽的长度、宽度和深度分别为2 m、1 m和0.5 m,坡度为15°。土槽填装土壤取自安塞农耕地表层黄绵土(0~20 cm),黏粒、粉粒和砂粒含量依次为12.92%、63.99%和

23.09%。填土前将供试土壤过2 mm孔筛,去除草根和砾石。填土时在土槽底部铺5 cm厚的细砂,并盖上一层纱布隔开土和砂,以保证土壤水分均匀下渗。填土过程将土壤容重控制在1.2 g/cm<sup>3</sup>左右,分4次装土,铺平、压实,每次填装下层土壤之前将表土打毛,消除土壤之间的分层现象,填土层总厚度为40 cm。

#### 1.1.2 白羊草种植及施氮水平

2013年7月,填土结束后对于其中12个土槽(另外3个土槽为裸地对照)按照间距20×20 cm、种穴深度0.3 cm种植白羊草,并在表面覆盖草席,定期洒水,待植株长势稳定后,采用间苗方法,控制白羊草密度,保证每个土槽约50株。试验共设4个施氮水平,依次为0 g/(m<sup>2</sup>·a)(N<sub>0</sub>)、2.5 g/(m<sup>2</sup>·a)(N<sub>2.5</sub>)、5 g/(m<sup>2</sup>·a)(N<sub>5</sub>)和10 g/(m<sup>2</sup>·a)(N<sub>10</sub>),氮源为硝酸铵(含氮量35%),每个施氮水平设置3个重复。每年雨季6~9月进行施氮处理,施氮时将硝酸铵按照预设施氮量溶解于水中,均匀喷洒于白羊草坡面,N<sub>0</sub>处理喷洒等量的清水,施氮频率为2周1次。经过3年自然生长,白羊草盖度为74%~93%,生物结皮主要为苔藓结皮和藻类结皮,总盖度为76%~98%(表1)。

表1 不同氮素水平下白羊草群落近地表基本特征

Tab.1 Near surface characteristics of *Bothriochloa ischaemum* community at different nitrogen levels

白羊草及生物结皮特征	N <sub>0</sub>	N <sub>2.5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>10</sub>
白羊草盖度(%)	74.2a	92.6b	92.3b	93.1c
白羊草地上生物量(g/m <sup>2</sup> )	150.3a	313.4b	351.1b	502.3c
白羊草根重密度(kg/m <sup>3</sup> )	2.2a	3.6b	3.1b	2.2a
结皮总盖度(%)	91a	76b	98c	90a
苔藓结皮盖度(%)	87c	40b	51b	27a
藻类结皮盖度(%)	4a	36b	47c	63d
苔藓结皮高度(mm)	7.9a	5.1b	6.8c	6.4c

注:相同字母表示不同氮素水平之间的没有显著差异( $P > 0.05$ )。

### 1.2 试验处理

试验共设3个处理:裸地(T<sub>0</sub>)、白羊草(T<sub>1</sub>)、白羊草+生物结皮(T<sub>2</sub>)。T<sub>0</sub>处理为裸地对照,不种植白羊草且无施氮;相对于T<sub>0</sub>处理,T<sub>1</sub>处理增加了白羊草种群,表征不同施氮水平下白羊草种群地上和地下特征对土壤入渗过程的影响;T<sub>2</sub>处理则是在T<sub>1</sub>处理的基础上增加了地表生物结皮,表征不同施氮水平下白羊草种群和地表生物结皮共同作用对土壤入渗过程的影响(表2)。此外,为最大程度消除去

除生物结皮对降雨试验过程的影响,去除结皮前将土槽静置 2 周,此时土壤表层含水量较低,结皮容易去除,且对地表扰动较小,之后用刮刀小心铲去地表生物结皮,并用软毛刷刷掉地表浮土。

表 2 试验处理及影响入渗过程的因素

Tab. 2 Experiment treatment and factors influencing the infiltration

处理	近地表影响因素	作用描述
T <sub>0</sub>	裸地	为对照组
T <sub>1</sub>	白羊草种群	铲除生物结皮,刷去浮土,白羊草种群单独作用
T <sub>2</sub>	白羊草种群 + 生物结皮	不采取措施,白羊草种群和生物结皮共同作用

### 1.3 试验过程

2016 年 9—10 月,模拟降雨试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,在白羊草生长末期进行模拟降雨实验,降雨器为侧喷式,降雨高度为 16 m。设置 3 个降雨强度,分别为 1、1.5 和 2 mm/min,降雨时间为 90 min。降雨过程中记录初始产流时间,并对径流泥沙进行全部收集,降雨前 30 min 每 2 min 收集一次,后 60 min 每 4 min 收集一次,分别测得径流、泥沙量。

### 1.4 近地表特征测定

降雨结束后,采用照相法测定白羊草盖度,并对土槽中白羊草地上部分全部收割,烘干(48 h、65℃)、称重后得到白羊草地上生物量;挖取整株白羊草根系(重复 3 次),采用水洗法清洗,烘干、称重后得到白羊草根系重量密度。采用样方法(样方大小为 25 × 25 cm,重复 5 次)测定不同种类生物结皮的盖度和高度(表 1)。

### 1.5 入渗性能指标计算

土壤入渗率为单位时间的土壤入渗量,计算公式为:

$$I = p - \frac{10Mr}{St\cos\theta} \quad (1)$$

式中:  $I$  为土壤入渗率(mm/min);  $p$  为降雨强度(mm/min);  $\theta$  为土槽坡度;  $Mr$  降雨时间内产生的径流量(ml);  $S$  为土槽面积( $\text{cm}^2$ );  $t$  为降雨时间(min) [30]。

累积入渗量为降雨历时所对应的入渗量,其公式为入渗率对时间的积分得:

$$A = \int_0^t Idt \quad (2)$$

式中:  $A$  为累积入渗量(mm) [14]。

稳渗率为入渗速率趋于稳定时间段的平均值 [31]。

### 1.6 数据处理

数据分析和图表处理分别采用 Excel 2007、SPSS 21 和 Origin 9.0 软件。

## 2 结果分析

### 2.1 坡面初始产流时间分析

降雨强度是影响坡面产流和入渗的主要因素。各处理下初始产流时间均随降雨强度的增大而减小(表 3 和图 1)。2 mm/min 降雨强度下初始产流时间最小,分别较 1 和 1.5 mm/min 降雨强度减少了 55.58% 和 39.93%。不同处理间初始产流时间也表现出很大的差异性。白羊草和生物结皮共同作用下(T<sub>2</sub>) 平均初始产流时间为 141.5 s,分别是单一白羊草种群(T<sub>1</sub>) 和裸地对照(T<sub>0</sub>) 的 1.64 倍和 4.87 倍,表明白羊草种群覆盖可显著延缓产流时间,且随着近地表生物结皮的参与,延缓径流效果更加明显。施氮水平也会显著影响初始产流时间。对于 T<sub>1</sub> 处理,坡面初始产流时间随施氮量的增加而增大,其中 N<sub>0</sub> 在各雨强下平均初始产流时间为 71 s,分别较 N<sub>2.5</sub>、N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 水平减少了 86.59%、80.68% 和 68.93%;而对于 T<sub>2</sub> 处理,坡面初始产流时间则随施氮水平的增加而减小,其中 N<sub>0</sub> 水平初始产流时间为 160 s,分别是 N<sub>2.5</sub>、N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 水平的 1.16、1.15 和 1.23 倍。这主要是由于不同施氮水平对白羊草种群和生物结皮的影响存在差异。一方面,随着施氮量的增加,白羊草种群盖度和地上生物量均不同程度的增加,从而延缓产流;另一方面,过高的施氮量在一定程度上抑制了生物结皮的生长发育,尤其是苔藓结皮,其盖度在 N<sub>10</sub> 下最低,仅占其他施氮水平的 31.03% ~ 67.50%,从而导致其减缓产流能力下降。

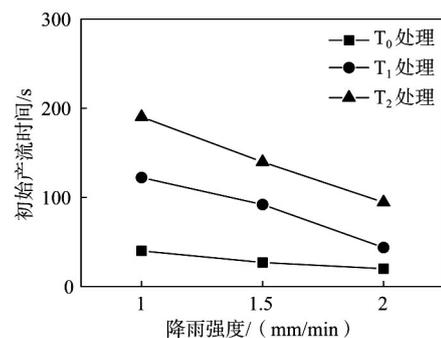


图 1 不同处理初始产流时间随降雨强度的变化

Fig. 1 Initial runoff time of different treatments varies with the rainfall intensity

表 3 不同处理坡面初始产流时间 (单位: s)  
Tab.3 The initial runoff time of different treatments

雨强 (mm/min)	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> 处理				T <sub>2</sub> 处理			
	处理	N <sub>0</sub>	N <sub>2.5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>10</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>2.5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>10</sub>
1.0	40	103	123	128	135	205	195	193	168
1.5	27	80	83	85	120	155	123	153	128
2.0	20	30	40	50	55	118	95	70	95

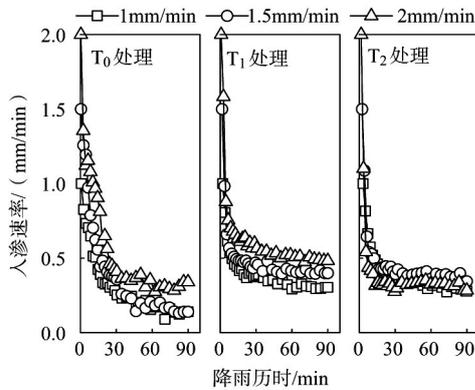


图 2 不同处理及降雨强度下入渗速率随降雨历时变化过程

Fig.2 Variations of infiltration rate with the process of rainfall under different treatments and rainfall intensity

2.2 坡面入渗过程分析

入渗速率随降雨历时的延长总体表现为先减小后趋于稳定的变化趋势(图 2); T<sub>0</sub> 处理入渗率在 30 min 开始趋于稳定,而对于 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理,入渗速率在 15 min 趋于稳定,表明植被的存在使得土壤结构更加稳定,入渗速率能较快达到稳定入渗(图 3)。随着降雨强度的增大,各处理下入渗过程有所不同。对于 T<sub>0</sub> 和 T<sub>1</sub> 处理,入渗速率整体随雨强的增加而增加,而对于 T<sub>2</sub> 处理,1.5 mm/min 雨强下土壤入渗

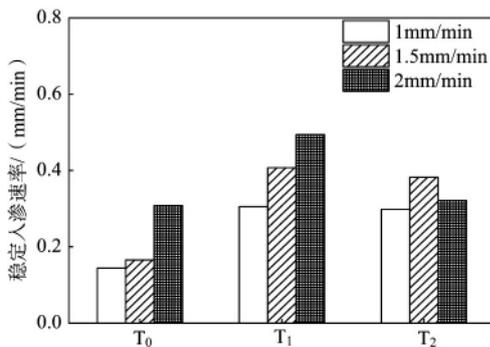


图 3 不同处理及降雨强度下土壤稳定入渗速率  
Fig.3 Soil infiltration rate under different treatments and rainfall intensity

速率最大,其稳定入渗速率为 0.38 mm/min,分别是 1 和 2 mm/min 雨强的 1.28 倍和 1.16 倍。这可能是由于生物结皮对入渗的影响存在阈值,当降雨强度未突破阈值时,随着降雨强度的增大,更多的降雨入渗于土壤,而当降雨强度超过该阈值时,过大雨强的打击可能致使生物结皮形成一层不透水层,从而减小入渗,增加产流。

施氮水平不同导致白羊草种群和生物结皮群落的差异,也在很大程度上影响着入渗过程及土壤稳定入渗性能(图 4 和图 5)。相对于 T<sub>0</sub> 处理,T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理往往较先达到稳定入渗(图 4)。对于 T<sub>1</sub> 处理,N<sub>2.5</sub> 水平入渗速率高于其他氮素水平,且 N<sub>2.5</sub> 水平下稳定入渗速率为 0.44 mm/min,分别是 N<sub>0</sub>、N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 水平的 1.16、1.22 和 1.29 倍。这主要是由于 N<sub>2.5</sub> 水平下白羊草根重密度最大,土壤空隙相对较高,从而增加入渗。对于 T<sub>2</sub> 处理,N<sub>0</sub> 和 N<sub>2.5</sub> 水平的入渗速率高于 N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 水平(图 4),且 N<sub>0</sub> 和 N<sub>2.5</sub> 水平下稳定入渗速率为 0.38 和 0.43 mm/min,分别是 N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 水平的 1.36、1.24 倍和 1.56、1.42 倍。这主要和生物结皮种类的差异有关。苔藓结皮相对于藻类结皮糙度大<sup>[32]</sup>,可显著延缓产流,增加入渗。本研究中 N<sub>0</sub> 和 N<sub>2.5</sub> 水平下藻类结皮盖度均不同程度低于 N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 水平,从而导致入渗速率相对较高。总体而言,由于生物结皮对土壤入渗过程的抑制作用,导致 T<sub>2</sub> 处理稳定入渗速率较 T<sub>1</sub> 处理减少 6.35%。

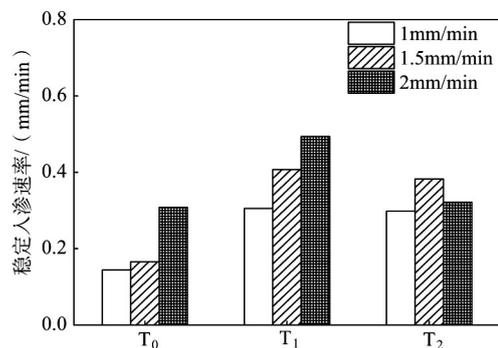


图 4 不同处理及施氮水平下入渗速率随降雨历时变化过程

Fig.4 Variations of infiltration rate with the process of rainfall at different treatments and nitrogen levels

2.3 土壤累积入渗量分析

与入渗速率相同,各处理下累积入渗量随着降雨历时的延长而增大,且在降雨初期累积入渗量增幅显著,而后随着降雨历时的延长,累积入渗量增幅减缓(图 6 和图 7)。随着降雨强度的增大,T<sub>0</sub> 和 T<sub>1</sub>

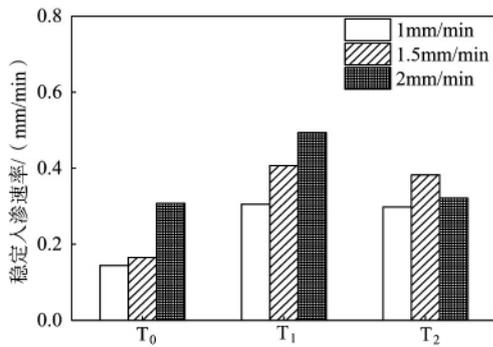


图5 不同施氮水平下各处理土壤稳定入渗速率

Fig. 5 Stable infiltration rate of soil under different nitrogen levels

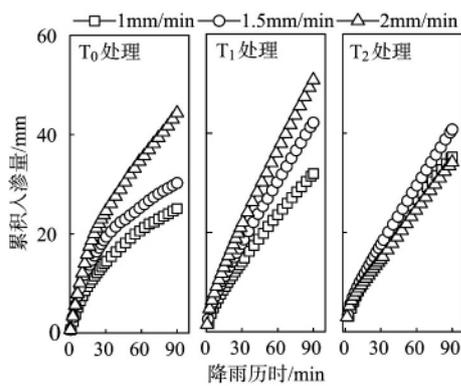


图6 不同降雨强度下各处理的累积入渗过程

Fig. 6 Cumulative infiltration process for each treatment under different rainfall intensities

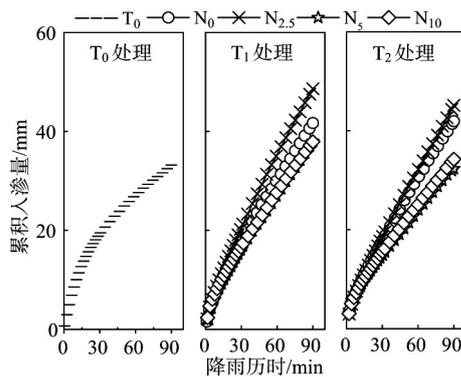


图7 不同施氮水平下各处理累积入渗过程

Fig. 7 Process of cumulative infiltration at different nitrogen levels

处理累积入渗量整体增加,  $T_0$  和  $T_1$  处理 2 mm/min 雨强下入渗总量为 44.34 和 50.72 mm, 分别是 1 mm/min、1.5 mm/min 雨强的 1.77、1.47 倍和 1.59、1.20 倍。对于  $T_2$  处理, 累积入渗量与入渗速率表现出相同的变化趋势, 即 1.5 mm/min 雨强下土壤入渗总量最大, 为 40.77 mm, 分别是 1 mm/min 和 2 mm/min 雨强的 1.16 倍和 1.19 倍。受施氮水

平差异的影响, 各处理入渗总量也有所不同(图 8)。与入渗速率类似,  $T_1$  处理  $N_{2.5}$  水平下入渗总量最大, 为 48.63 mm, 分别是  $N_0$ 、 $N_5$  和  $N_{10}$  水平的 1.17、1.28 和 1.28 倍。根系的存在可以增加土壤空隙, 进而增加土壤入渗性能,  $N_{2.5}$  水平下根重密度最大, 从而导致入渗总量较高。对于  $T_2$  处理,  $N_0$  和  $N_{2.5}$  水平下入渗总量为 41.94 和 45.15 mm, 分别是  $N_5$  和  $N_{10}$  水平的 1.30、1.22 倍和 1.40、1.32 倍。这主要是由于  $N_0$  和  $N_{2.5}$  水平下藻类结皮盖度均不同程度低于  $N_5$  和  $N_{10}$  水平, 从而导致入渗速率相对较高, 入渗总量较大。总体而言, 由于生物结皮对土壤入渗过程的抑制作用, 导致  $T_2$  处理入渗总量较  $T_1$  处理减少 7.49%。

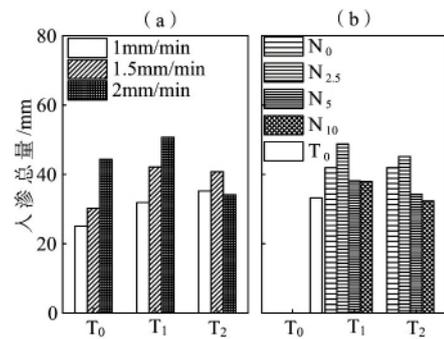


图8 不同降雨强度 (a) 及施氮水平 (b) 下入渗总量

Fig. 8 Amount of infiltration under different rainfall intensities (a) and nitrogen levels (b)

## 2.4 植被近地表特征对土壤入渗过程的影响

不同施氮水平可以显著影响植被覆盖和近地表特征, 进而影响土壤入渗过程。进一步分析表明, 白羊草盖度、白羊草地上生物量、苔藓结皮盖度、苔藓结皮高度和藻结皮盖度均可显著影响初始产流时间。初始产流时间随白羊草盖度和地上生物量的增加均呈现增加趋势, 且可分别表示为白羊草盖度和地上生物量幂函数; 初始产流时间随藻结皮盖度的增加而呈幂函数下降, 随苔藓结皮盖度和高度的增加而呈幂函数增加 ( $P < 0.01$ ) (图 9 和表 4)。入渗过程则主要与生物结皮特征密切相关, 藻结皮盖度和土壤稳定入渗速率、入渗总量存在显著的 DoseResp 曲线关系 ( $P < 0.01$ ) (图 10 和表 5), 当藻结皮盖度小于 45% 时, 土壤稳定入渗速率、入渗总量随藻结皮盖度的增加无明显变化趋势; 而当藻结皮盖度大于 45% 时, 土壤稳定入渗速率和入渗总量显著下降, 但随着藻结皮盖度的进一步增加, 土壤稳定入渗速率和入渗总量并无显著差异。结皮总盖度

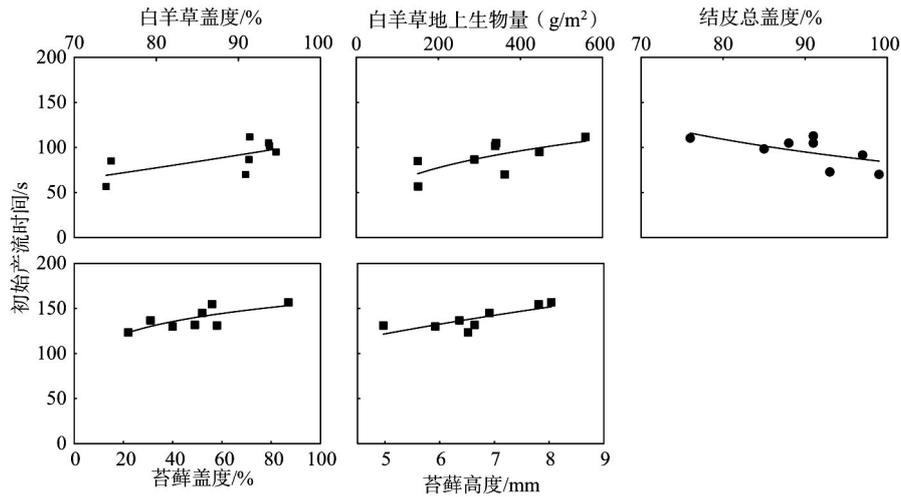


图 9 白羊草种群及生物结皮特征与初始产流时间的关系

Fig. 9 Relationship between characteristics of *Bothriochloa ischaemum* population ,biological soil crusts and initial runoff time

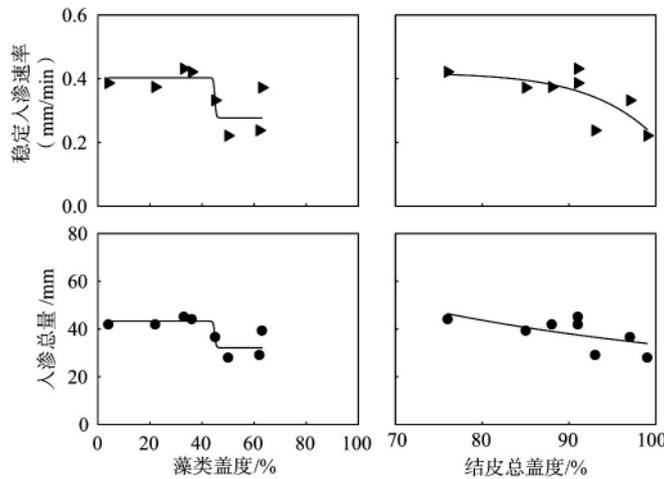


图 10 生物结皮盖度与稳定入渗速率、入渗总量的关系

Fig. 10 Relationship between biological crust coverage and stability infiltration rate and total infiltration

则与土壤稳定入渗速率、入渗总量存在显著的幂函数下降关系( $P < 0.01$ )，随着结皮总盖度的增加，土壤稳定入渗速率、入渗总量减小。

表 4 白羊草种群及生物结皮特征与初始产流时间的函数关系

Tab. 4 Initial runoff time as a function of characteristics of *Bothriochloa ischaemum* and biological soil crusts

群落特征	初始产流时间(IRT)	$R^2$	$P$
白羊草地上生物量(BBI)	$IRT = 14.79BBI^{0.31}$	0.38	$< 0.01$
白羊草盖度(CBI)	$IRT = 0.13CBI^{1.45}$	0.33	$< 0.01$
藻类结皮盖度(CA)	$IRT = 175.16CA^{-0.07}$	0.47	$< 0.01$
苔藓结皮盖度(CM)	$IRT = 75.46CM^{0.16}$	0.48	$< 0.01$
苔藓结皮高度(HM)	$IRT = 57.60HM^{0.46}$	0.54	$< 0.01$

### 3 讨论

植被覆盖可有效拦蓄降雨、延缓产流时间、削减雨滴动能、抑制物理结皮的形成，从而影响坡面入渗过程。植物根系则可改良土壤结构，增强土壤入渗能力。本研究中，由于白羊草种群的存在，其初始产流时间、入渗速率和入渗总量均较裸地显著增加。此外，氮添加可改变白羊草地上和地下生物量的分配模式，施氮水平差异可显著影响白羊草种群特征<sup>[33, 34]</sup>。随着施氮量的增加，白羊草种群盖度和地上生物量显著增加，导致初始产流时间延长，且初始产流时间与盖度和生物量之间存在显著幂函数关系( $P < 0.01$ )。初始产流时间与白羊草根系重量密度

表5 生物结皮特征与稳定入渗速率、入渗总量的函数关系

Tab.5 Stability infiltration rate and total infiltration as a function of biological soil crusts characteristics

	稳定入渗速率( SIA)	入渗总量( TI)
生物结皮总盖度( CTB)	$SIA = 0.42 - 2.83E - 28CTB^{13.43}$ $R^2 = 0.364 P < 0.01$	$TI = 7702.41CTB^{-1.18}$ $R^2 = 0.270 P < 0.01$
藻类结皮盖度( CA)	$SIA = 0.28 + 0.12 / (1 + 10^{-1.61 * (44.93 - CA)})$ $R^2 = 0.360 P < 0.01$	$TI = 32.17 + 11.11 / (1 + 10^{-1.5 * (44.89 - CA)})$ $R^2 = 0.500 P < 0.01$

无显著关系,这也在一定程度表明植被地上特征是影响产流过程的主要因素。稳定入渗速率、入渗总量与白羊草种群盖度、地上生物量和根重密度无显著关系,但稳定入渗速率、入渗总量在  $N_{2.5}$  施氮水平下最大,而在该施氮水平下,白羊草根重密度也最大。李盼盼等<sup>[34]</sup>研究结果也表明,  $N_{2.5}$  施氮水平下白羊草根重密度最大,随着施氮量的增加,植物根系的养分吸收能力逐渐过剩,根系只需要较小的吸收面积,就可以满足自身生长需求,根系生物量降低,入渗能力减小。

生物结皮是一种较致密的生物膜,其遇水后能够在地表形成一层疏水性膜,填充土壤孔隙结构,阻碍土壤水分入渗<sup>[35]</sup>。受结皮种类的差异,其对土壤产流和入渗过程影响也不尽相同。苔藓结皮表面糙度较大,显著延缓产流时间,随着苔藓结皮盖度和高度的增加,初始产流时间显著增大。而藻结皮表面糙度较低,可促进产流过程,随着藻结皮盖度的增加,初始产流时间显著减小。生物结皮群落是一种比较脆弱和敏感的生态系统组分<sup>[36]</sup>,其组成及特征对氮沉降有着积极的响应。随着施氮量的增加,藻结皮盖度显著提高,而苔藓结皮盖度和高度则显著下降(表1),导致初始产流时间随施氮水平增加显著降低。此外,相对于单一白羊草种群,生物结皮和白羊草共同作用下土壤稳定入渗速率和入渗总量有所降低,表明生物结皮的存在可抑制土壤入渗过程。如上所述,较大糙度的苔藓结皮可以增大地表糙度、延迟产流,但由于其同藻结皮均具有遇水膨胀的特性,会形成不透水层,从而抑制土壤入渗<sup>[21]</sup>,总体表现为随生物结皮总盖度的增加,土壤稳定入渗速率和入渗总量显著减小(图10)。藻结皮盖度对土壤稳定入渗速率及入渗总量的影响存在阈值(45%),而苔藓结皮盖度和高度与土壤稳定入渗速率及入渗总量无显著关系,这也一定程度上表明生物结皮对土壤入渗的影响很大程度上取决藻结皮盖度。

总体而言,植被的存在表现为增加降雨入渗,生物结皮则相反。本研究中白羊草种群作用处理入渗

总量较裸地增加 25.56%,而白羊草和生物结皮共同作用处理入渗总量则较单一白羊草种群作用处理减少 7.49%。随着降雨强度的增加,生物结皮的抑制作用增强(图3)。在降雨强度为 1 和 1.5 mm/min 时,白羊草种群和生物结皮群落共同作用处理的稳定入渗速率均略低于白羊草种群单独处理,而在降雨强度为 2 mm/min 时,则低于 32.65%。施氮量的不同影响植被下生物结皮的盖度和组成,进而影响降雨入渗过程。在低施氮水平( $N_0$  和  $N_{2.5}$ ) 时生物结皮抑制作用较高,施氮水平( $N_5$  和  $N_{10}$ ) 作用较小,并在  $N_5$  水平下抑制作用最大(图5)。施氮不仅促进需氮植物地上部分生长,也会改变地下根系特征,诸如根长密度、根重密度和根表面积等。其中根长密度具有较好改良土壤的功能,与土壤入渗性能密切相关,而根表比面积、根重密度与根长密度显著相关,也是影响土壤入渗性能的主要参数<sup>[37]</sup>。本研究中单一白羊草种群作用下,入渗总量、稳定入渗速率与根重密度无显著相关,这可能是由于量化根系特征不足,因此,根长、根表面积和根体积等根系形态特征对入渗影响的研究仍需进一步完善。此外,本研究中稳定入渗速率和入渗总量与生物结皮总盖度显著相关( $P < 0.01$ ),但野外生物结皮种类繁多,未对生物结皮种类及其组成比例对降雨入渗影响研究。

## 4 结论

氮沉降可显著影响植被群落结构和近地表特征,诸如盖度、生物量等,进而对降雨入渗过程产生影响。本文系统研究氮沉降背景下白羊草群落及生物结皮特征改变对土壤入渗过程的影响,取得了以下主要结论:

(1) 随着雨强的增加,初始产流时间呈减小趋势;白羊草种群覆盖可显著延缓产流时间,且随着施氮量的增加,初始产流时间增大。生物结皮也可显著延缓产流时间,但随着施氮量的增加,初始产流时

间减小。

(2) 白羊草种群可显著增大稳定入渗速率和入渗总量,而生物结皮则在一定程度上促进了产流,降低了土壤入渗能力。对不同施氮水平,白羊草种群和生物结皮群落均在低施氮水平下( $N_0$ 和 $N_{2.5}$ )表现出较高的稳定入渗速率和入渗总量。

(3) 初始产流时间随白羊草盖度、地上生物量、苔藓结皮盖度、高度的增加均呈幂函数增加,随藻结皮盖度的增加而呈幂函数下降;稳定入渗速率和入渗总量随结皮总盖度增加而呈幂函数降低,与藻结皮盖度存在显著的 DoseResp 曲线关系,且藻结皮盖度在 >45% 和 <45% 差异显著。

### 参考文献(References)

- [1] BOBBINK R, HICKS K, GALLOWAY J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis[J]. *Ecological Applications* 2010, **20**(1): 30–59
- [2] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(5): 126–133 [CHEN Fusheng, ZENG Dehui, HE Xingyuan. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(5): 126–133]
- [3] LEBAUER DS, TRESEDER KK. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed [J]. *Ecology*, 2008, **89**(2): 371–379
- [4] GALLOWAY JN, TOWNSEND AR, ERISMAN JW, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889–892
- [5] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 等. 1961—2010年中国区域氮沉降时空格局模拟研究[J]. *生态学报*, 2016, **36**(12): 3591–3600 [GU Fengxue, HUANG Mei, ZHANG Yuandong, et al. Modeling the temporal-spatial patterns of atmospheric nitrogen deposition in china during 1961–2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(12): 3591–3600]
- [6] 白雪, 程军回, 郑淑霞, 等. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(2): 103–115 [BAI Xue, CHEN Junhui, ZHENG Shuxia, et al. Eco-physiological responses of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions in a typical steppe [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(2): 103–115]
- [7] 高嵩. 模拟增温和氮素沉降对羊草群落特征及物候期的影响[D]. 吉林: 东北师范大学, 2008: 34 [GAO Song, GUO Jixun. Effects of simulated warming and nitrogen deposition on the characteristics of *Leymus chinensis* community and reproductive phenophase [D]. Northeast Normal University 2008: 34]
- [8] 宗宁, 石培礼, 宋明华, 等. 模拟放牧改变了氮添加作用下高寒草甸生物量的分配模式[J]. *自然资源学报*, 2010, **27**(10): 1696–1707 [ZONG Ning, SHI Peili, SONG Minghua, et al. Clipping alters the response of biomass allocation pattern under nitrogen addition in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources* 2012, **27**(10): 1696–1707]
- [9] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(8): 1429–1434 [ZHAO Yunge, XU Mingxiang, WANG Quanjiu, et al. Physical and chemical properties of soil biological-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2006, **17**(8): 1429–1434]
- [10] 刘军, 张宇清, 冯薇, 等. 几种外源添加剂对生物土壤结皮培育的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, **38**(5): 100–107 [LIU Jun, ZHANG Yuqing, FENG Wei, et al. Influences of exogenous additives on culture of biological soil crusts [J]. *Journal of Beijing Forestry University* 2016, **38**(5): 100–107]
- [11] 周晓兵, 尹本丰, 张元明. 模拟氮沉降对不同生物土壤结皮生长和光合生理的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(11): 3197–3205 [ZHOU Xiaobing, YIN Benfeng, ZHANG Yuanming. The effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthetic physiology of three types of bio-crusts [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2016, **36**(11): 3197–3205]
- [12] 闫佳毅, 张宇清, 秦树高, 等. 不同水分条件下苔藓结皮光合能力对氮素添加量的响应[J]. *水土保持通报*, 2015, **35**(6): 75–80 [YAN Jiayi, ZHANG Yuqing, QIN Shugao, et al. Responses of bryophytes, photosynthesis to nitrogen addition under different water content [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2015, **35**(6): 75–80]
- [13] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J]. *中国水土保持*, 2017(3): 27–30 [LI Kun, YAO Wenyi, XIAO Peiqing, et al. Influence of vegetation on soil infiltration and surface runoff [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2017, (3): 27–30]
- [14] 李毅, 邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(3): 18–23 [LI Yi, SHAO Mingan. Experimental study on influence factors of rainfall and infiltration under artificial grassland coverage [J]. *Transactions of the CASE* 2007, **23**(03): 18–23]
- [15] 戴全厚, 喻理飞, 薛箴, 等. 植被控制水土流失机理及功能研究[J]. *水土保持研究*, 2008, **15**(02): 32–35 [DAI Quanhou, YU Lifei, XUE Sha, et al. Study on the mechanism and function of soil and water loss controlled by vegetation [J]. *Research of Soil And Water Conservation* 2008, **15**(2): 32–35]
- [16] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(5): 529–535 [WANG Guoliang, LIU Guobin, ZHOU Shenglou. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of loess gully region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(5): 529–535]
- [17] 郭建芳, 徐杰, 闫彩霞. 生物结皮影响下土壤水分效应的研究进展[J]. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2012, **42**(1): 99–104 [GUO Jianfang, XU Jie, YAN Caixia. A review on effects of biological soil crusts on soil water cycle [J]. *Journal of Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, **42**(1): 99–104]
- [18] COPPOLAA, BASILE A, WANG X, et al. Hydrological behavior of microbiotic crusts on sand dunes: Example from NW China

- comparing infiltration in crusted and crust-removed soil[J]. Soil & Tillage Research, 2011, **117**( 34 - 43 ): 34 - 43
- [19] 张侃侃,卜崇峰,高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. 干旱区研究, 2011, **28**( 5 ): 808 - 812 [ZHANG Kankan, BU Chongfeng, GAO Guoxiong. Effects of microbiotic crust on soil water infiltration in the loess plateau [J]. Arid Zone Research, 2011, **28**( 05 ): 808 - 812]
- [20] 李林,赵允格,王一贺,等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响[J]. 自然资源学报, 2015, **30**( 6 ): 1013 - 1023 [LI Lin, ZHAO Yunge, WANG Yihe, et al. Impact of different types of biological soil crusts on slope runoff generation [J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**( 6 ): 1013 - 1023]
- [21] 李小军,汪君,高永平. 荒漠化草原植被斑块分布对地表径流、侵蚀及养分流失的影响[J]. 中国沙漠, 2011, **31**( 5 ): 1113 - 1118 [LI Xiaojun, WANG Jun, GAO Yongping. Effects of vegetation patchy distribution on runoff, erosion and nutrients loss in desertified steppe area [J]. Journal of Desert Research, 2011, **31**( 5 ): 1113 - 1118]
- [22] ZHAO Yunge, XU Mingxiang. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the Hilly Loess Plateau Region, China: Influence of bio-crust patches and plant canopies [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, **18**( 4 ): 387 - 393
- [23] 王浩,张光辉,刘法,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**( 5 ): 117 - 123 [WANG Hao, ZHANG Guanghui, LIU Fa, et al. Impact of biological crust on soil infiltration in Hilly areas of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**( 5 ): 117 - 123]
- [24] 李莉,孟杰,杨建振,等. 不同植被下生物结皮的水分入参与水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2010, **24**( 5 ): 105 - 109 [LI Li, MENG Jie, YANG Jianzhen, et al. Effects of biological soil crust on infiltration and soil and water conservation under different vegetation types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**( 5 ): 105 - 109]
- [25] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**( 1 ): 105 - 112 [GAO Liqian, ZHAO Yunge, QIN Ningqiang, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**( 1 ): 105 - 112]
- [26] 姚春竹,赵允格,王媛,等. 黄土丘陵区生物结皮条件下土壤有机质及氮素的累积特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**( 6 ): 197 - 212 [YAO Chunzhu, ZHAO Yunge, WANG Yuan, et al. Accumulation of soil organic matter and nitrogen with biological soil crust in the Hilly Loess Plateau Region [J]. Journal of Northwest A&F University ( Nature Science Edition ), 2014, **42**( 6 ): 197 - 212]
- [27] 李守中,肖洪浪,宋耀选,等. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用[J]. 中国沙漠, 2002, **22**( 6 ): 612 - 616 [LI Shouzhong, XIAO Honglang, SONG Yaoyuan, et al. Impact of micro-biotic soil crusts on rainfall interception in artificial vegetation area of Tengger Desert [J]. Journal of Desert Research, 2002, **22**( 6 ): 612 - 616]
- [28] LI Xinrong, ZHANG Jingguang, WANG Xinping, et al. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand-fixing vegetation in arid desert region [J]. Acta Botanica Sinica, 2000, **42**( 9 ): 1 - 6
- [29] FISCHERT, VESTEM, WIEHE W, et al. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany [J]. Catena, 2010, **80**( 1 ): 47 - 52
- [30] 栾莉莉,张光辉,刘如心,等. 人工模拟降雨水质对土壤入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**( 2 ): 122 - 127 [LUAN Lili, ZHANG Guanghui, LIU Ruxin, et al. Effects of water quality on soil infiltration in rainfall simulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**( 2 ): 122 - 127]
- [31] 吴佳,王林华,李占斌,等. 黄土高原主要秋作物坡地降雨入渗特征参数研究[J]. 水土保持学报, 2014, **28**( 6 ): 115 - 119 [WU Jia, WANG Linhua, LI Zhanbin, et al. Characteristics of soil infiltration parameters in autumn crop slope farmland of loess plateau [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2014, **28**( 6 ): 115 - 119]
- [32] 王媛,赵允格,姚春竹,等. 黄土丘陵区生物土壤结皮表面糙度特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, **25**( 3 ): 647 - 656 [WANG Yuan, ZHAO Yunge, YAO Chunzhu, et al. Surface roughness characteristics of biological soil crusts and its influencing factors in the hilly Loess Plateau region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**( 3 ): 647 - 656]
- [33] 李文达,王国梁,刘国彬,等. N添加对白羊草生长及种群特征的影响[J]. 水土保持通报, 2016, **36**( 1 ): 174 - 178 [LI Wenda, WANG Guoliang, LIU Guobin, et al. Effects of nitrogen addition on growth and propagation of *Bothriochloa ischaemum* population [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, **36**( 1 ): 174 - 178.]
- [34] 李盼盼,王兵,刘国彬,等. 氮添加对白羊草种群及土壤特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15**( 2 ): 35 - 42 [LI Panpan, WANG Bing, LIU Guobin, et al. Effects of nitrogen addition on the population characteristics of *Bothriochloa ischaemum* and soil properties [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, **15**( 42 ): 35 - 44 ]
- [35] 石亚芳,赵允格,李晨辉,等. 踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28**( 10 ): 1 - 12 [SHI Yafang, ZHAO Yunge, LI Chenhui, et al. Effects of trampling disturbance on infiltration of biological soil crustal soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**( 10 ): 1 - 12]
- [36] 焦文珺,朱清科,张宇清,等. 陕北黄土区退耕还林地生物结皮分布及其影响因子研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, **29**( 1 ): 102 - 107 [JIAO Wenjun, ZHU Qingke, ZHANG Yuqing, et al. Distribution of biotic-crusts and its influencing factors in the grain-for-green land of the loess region, northern Shanxi Province [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, **29**( 1 ): 102 - 107]
- [37] 李建兴,何丙辉,谌芸,等. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**( 5 ): 1535 - 1544 [LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**( 5 ): 1535 - 1544]

## Effects of *Bothriochloa ischaemum* Community and Near Soil Surface Biological Crust on the Soil Infiltration Capacity Based on Nitrogen Addition

LI Zhaosong<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>1,2\*</sup>, LI Panpan<sup>1</sup>, WANG Zhongyu<sup>1</sup>, WANG Jianfang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi, 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shanxi, 712100, China)

**Abstract:** This study was performed to discuss the effects of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng. population and its near surface characteristics on the process of slope infiltration under nitrogen deposition based on the simulated rainfall experiment in the hilly region of Loess Plateau. Four nitrogen addition treatments, representative of 0, 2.5, 5, 10 g/(m<sup>2</sup>·a), were designed to simulate the effects of different nitrogen deposition levels on the growth of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng. community. The results showed that: (1) Runoff delayed significantly under the coverage of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng. This delay effects were enhanced due to the co-participation of biological soil crusts (T<sub>2</sub>) and the mean initial runoff time was 1.64 and 4.87 times great than that of single *Bothriochloa ischaemum* population (T<sub>1</sub>) and bare control (T<sub>0</sub>). (2) The stability infiltration rate and infiltration amount were generally higher at the low nitrogen level (N<sub>0</sub> and N<sub>2.5</sub>). *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng. population would promote the process of infiltration while the biological soil crusts inhibited the infiltration process, which the stability of infiltration rate and infiltration amount of T<sub>2</sub> were decreased by 6.35% and 7.49% compared to the T<sub>1</sub> treatment. (3) The initial runoff time increased as power functions (P < 0.01) with the increase of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng. coverage, *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng. aboveground biomass, moss coverage and moss height, while decreased as a power function (P < 0.01) with the increase of the algal crust coverage. The stability of infiltration and amount of infiltration were decreased as a power function with the increase of total biological soil crusts coverage, and there was a significant DoseResp curve relationship between stability of infiltration rate, infiltration amount and algal crust coverage. This study provided the basic data and theoretical foundation for the grassland eco-hydrological processes and vegetation construction in the Loess Plateau.

**Key words:** Loess Plateau; *Bothriochloa ischaemum*(Linn.) Keng. population; nitrogen deposition; biological soil crust; rainfall infiltration