

模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面 流水动力特性的影响

李盼盼¹, 李彬彬², 王 兵^{1,2}, 刘国彬^{1,2*}

(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, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘 要: 大气氮沉降的增加可能会通过草地群落进而影响坡面流水动力特性。选取黄土高原典型地带性草本白羊草为研究对象, 通过设置不同施氮处理 (0, 2.5, 5, 10 g/(m²·a), 以 N 计, 下同) 模拟氮沉降, 采用人工模拟降雨, 探究土壤有效氮升高对白羊草群落季节变化及坡面流水动力特征的影响。结果表明, 一定程度的施氮可有效增加白羊草盖度, 促进藻结皮的生长, 但会抑制苔藓结皮的发育。施氮使 Darcy-Weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数分别降低了 68.6%~71.5% 和 44.7%~47.4%; 平均流速加快了 32.0%~44.0%, 径流深减小了 25.1%~28.7%, 同时, 使径流剪切力和水流功率显著增加, 过水断面单位能减少。随着季节变化, 9 月白羊草群落坡面 Darcy-Weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数分别较 6—8 月显著增加了 220.2%~496.9% 和 79.5%~139.4%, 平均流速减缓了 23.5%~29.7%, 径流深增加了 36.4%~66.9%, 径流剪切力和水流功率均显著降低, 过水断面单位能增加。降雨强度对坡面流特征也存在显著影响。随着降雨强度的增大, 坡面流阻力减小, 进而导致流速、径流深及水流功率增加。草地具有良好的调控坡面流的作用, 然而大气氮沉降的增加可能会加剧草地群落坡面土壤侵蚀。

关键词: 水动力学; 植被; 氮沉降; 坡面流; 阻力系数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.007

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0052-10

李盼盼, 李彬彬, 王兵, 等. 模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 52-61. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.007 <http://www.tcsae.org>

Li Panpan, Li Binbin, Wang Bing, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the *Bothriochloa ischaemum* community and its hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 52-61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.007 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

人类活动显著加剧了陆地生态系统的大气氮沉降速率。据报道, 1984—2016 年, 全球无机氮沉降量从 86.6 Tg/a (以 N 计, 下同) 增加到 93.6 Tg/a, 目前, 大气氮沉降已成为全球变化研究最为关注的问题之一^[1]。全球草地面积接近 2.4×10^7 km², 约占陆地总面积的 1/6^[2]。氮素是植物生长过程中的必需和限制元素, 草地植被群落的结构组成和植物生理特征必然会对大气氮沉降产生显著响应。研究发现, 长期缓慢施氮能够筛选出适应高氮水平的草本物种, 且草地上部分对氮素的输入比土壤更为敏感^[3-4]。生物土壤结皮是草地群落重要的组成部分, 可直接从大气中捕获可利用的氮素, 因此生物结皮比高等植物对氮素的响应更敏感^[5-6]。与此同时, 草地生态系统也具有较好的防治水土流失功能, 能显著控制坡面产流产沙^[7]。因此, 氮沉降

势必会通过改变草地生态系统, 进而影响土壤侵蚀过程。

然而, 目前大量研究主要集中在氮沉降对草地群落特征的影响以及草地对土壤侵蚀的调控方面, 有关氮沉降如何通过影响植物群落特征进而影响水土流失过程的研究较少。而且, 由于植被对产流产沙过程调控的复杂性, 关于草地植被影响土壤侵蚀的研究多集中在减沙方面, 而对于草地群落坡面流水动力学特性的关注相对较少, 试验手段多为坡面流冲刷, 而忽视了雨滴对径流的扰动影响^[7-9]。坡面流是一种易受土壤类型、下垫面条件、降雨等因素影响的流动边界复杂的浅层水流, 它显著影响着坡面侵蚀过程的变化^[10-11]。近年来, 相关学者多选取坡面流流速、径流深、阻力系数、径流剪切力等水力要素, 反映植被类型、覆盖度等对水动力学特征的影响。多数研究认为, 草地增加了坡面流阻力和入渗率, 降低了流速和径流剪切力, 起到了显著的减蚀作用^[12-14]。然而, 随着季节的变化, 草地植被群落的组成结构及植物生理特征会发生显著改变, 这必然对坡面流特征产生显著影响。而这种季节变化会对不断增加的大气氮沉降产生怎样的复杂响应, 尚需进一步探究。

黄土高原地区是中国乃至全世界土壤侵蚀最严重的地区之一, 2018 年黄土高原地区水土流失面积为 21.37 万 km², 占区域总面积的 37.19%。草地作为该地区重要

收稿日期: 2020-04-13 修订日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于 RUSLE 模型的黄土高原草地植被覆盖因子研究 (41771555)”；国家自然科学基金重点项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制 (41530858)”

作者简介: 李盼盼, 博士生, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀方面的研究。

Email: lpp@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 刘国彬, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与生态恢复方面的研究。Email: gblu@ms.iswc.ac.cn

的生态系统类型, 面积达 $2.32 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占总面积的 33%^[15], 其中, 白羊草群落是黄土高原森林草原区的地带性植被群落。此外, 该区土壤有效氮含量较低, 氮素是该地区植物生长的重要限制元素。据估算, 2019 年该地区氮沉降量有望达到 $2.3 \sim 3.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[16]。因此, 在大气氮沉降加剧背景下, 探究草地植被群落季节变化及其对坡面流特性的影响, 对深入了解坡面侵蚀过程具有重要意义。鉴于此, 本文以黄土高原地区的典型地带性植被白羊草群落为研究对象, 通过不同梯度的氮添加模拟氮沉降, 研究土壤有效氮升高对白羊草群落及坡面流特征的影响, 在理论上阐明氮沉降对草地生态系统坡面流特性的间接影响, 为黄土丘陵区草地植被建设和水土流失治理提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验土柱及白羊草种植

本试验位于陕西省杨凌 ($108^\circ 04' 27.95'' \text{E}$, $34^\circ 16' 56.24'' \text{N}$) 中国科学院水土保持研究所。试验所用土槽长 \times 宽 \times 高分别为 $2.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 坡度为 15° 。供试土壤取自安塞坡地表层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 的黄绵土 (黏粒、粉粒和砂粒质量分数分别为 12.92%, 63.99% 和 23.09%)。对每个试验土槽进行填土前, 先将供试土壤过 2 mm 孔筛, 去除草根和砾石。在土槽底部铺 5 cm 厚的细砂, 以保证土壤水分均匀下渗, 同时盖一层纱布隔开土和砂。土壤填装分 4 次完成, 每次填土时的容重控制在 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 左右, 铺平、压实。每次填装之前, 将表土轻轻打碎, 消除土壤之间的分层现象, 填土总厚度为 40 cm 。

供试土槽填土结束后, 于 2012 年 4 月中旬种植白羊草, 草种采自陕西省安塞县。种植前, 先按照土槽尺寸将地表划分为 50 个正方形格子 ($20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$); 种植时, 在每个格子的中心位置, 挖取 $0.2 \sim 0.3 \text{ cm}$ 深度的种穴, 埋下白羊草种子; 种植后, 将土槽地表覆盖草席并定期洒水, 为白羊草种子提供适宜发芽的温湿环境。待植株长势稳定后, 采用间苗方法, 控制其密度, 保证每个土槽约 50 株白羊草。

1.2 模拟氮沉降

根据全球及中国大气氮沉降速率研究现状, 本研究模拟氮沉降所用氮源为 NH_4NO_3 , 共设置 N_0 、 $\text{N}_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10} 4 个施氮处理, 对应施氮量分别为 0、2.5、5 和 $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 每个施氮处理设置 2 个重复, 共计 8 个试验土槽^[1,16-17]。施氮年限为 2012—2016 年 (共 5 a), 具体施氮日期为每年 6—9 月 (4 个月) 中每月的 15 日和 30 日; 如遇阴雨天气, 则对施氮时间进行适当调整。具体施氮时, 选择晴朗天气的傍晚, 将 NH_4NO_3 粉末按照预设处理称质量, 将其溶于一定量的清水中, 然后用喷壶均匀洒在白羊草地表 (尽量避开白羊草枝叶), 不施氮处理喷洒等量清水。

1.3 降雨过程及指标测定

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, 采用 QYJY-503 固定式人工模拟降雨系统, 该降雨设备采用组合式喷头, 安置高

度为 18 m , 可调节降雨强度范围为 $30 \sim 300 \text{ mm/h}$, 雨滴大小控制在 $0.4 \sim 6.0 \text{ mm}$, 降雨均匀度大于 80%, 雨滴终点速度近似天然降雨。降雨前, 对所有土槽进行预降雨试验, 以消除土壤含水率差异对试验的影响。试验共设置 3 个降雨强度 (60 、 90 和 120 mm/h), 其中 60 mm/h 降雨强度为黄土高原地区较为常见的侵蚀性降雨强度, 90 和 120 mm/h 可模拟极端降雨情况^[18]。通过预试验得出, 降雨进行 60 min 后, 各处理的产流速率均达到稳定, 故本试验的降雨历时为 90 min , 具体研究时段为最后 30 min 。在该降雨时段内, 每 4 min 收集 1 次径流泥沙全样并测定 1 次表面流速和水温, 故每场降雨每个土槽共收集 7 次径流泥沙全样并测定 7 次表面流速和水温。测定流速时, 在车槽距顶部和底部各 0.5 m 处的 1 m 区域内, 沿坡面中轴线, 采用高锰酸钾法测定表面流速, 同时测定相应水温。径流泥沙全样经过称质量、沉淀、烘干泥沙后计算得到径流质量。降雨试验在 2016 年 6—9 月 (共计 4 个月) 进行, 为避免每个月降雨过程中不同处理植被的生长状况变化较大, 结合实际降雨状况, 每个月尽量保证在连续 2 周内完成 8 个土槽在 3 个雨强下的降雨试验, 共计 96 场降雨。

1.4 白羊草和生物结皮盖度测定

2016 年 5—9 月, 每月第 1 次降雨试验前测定白羊草和生物结皮盖度。测定白羊草盖度时, 垂直于土槽坡面方向进行拍照, 利用 PCOVER 软件对获取的图像进行处理, 采用自动判别模型计算得到白羊草植被盖度。每次拍照时, 每个土槽重复 3 次, 取均值作为当月该土槽的白羊草盖度。生物结皮盖度通过网格法测量。选取边长为 30 cm 的正方形塑胶框, 用 1 mm 直径的尼龙绳在框内编织 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的网格, 框内共计 196 个交叉点。用蒸馏水喷湿地表, 采用抛投法在土槽内随机选择 5 个样方, 将直径 1 mm 的钎针沿每个交叉点垂直于坡面轻触地表, 若该点为苔藓结皮, 记 1 次“0”, 藻结皮则记 1 次“1”。分别统计“0”和“1”的次数, 并用各自占总数 (196) 的百分比作为此样方框内该生物结皮类型的盖度。最后, 取 5 个样方的均值作为当月土槽内生物结皮的盖度。

1.5 水动力参数计算

为准确描述不同施氮处理下坡面流水动力学特征及其对土壤侵蚀影响, 本研究选取径流量 (q , L/s)、平均流速 (V , m/s)、径流深 (h , m)、雷诺数 (Re)、弗劳德数 (Fr)、Darcy-Weisbach 阻力系数 (f)、曼宁糙率系数 (n)、径流剪切力 (τ , Pa)、水流功率 (ω , $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$) 及过水断面单位能 (E , cm) 10 个常用参数进行坡面水动力学特征研究, 计算公式如下:

$$q = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

$$V = k \cdot V_s \quad (2)$$

$$h = \frac{Q}{V \cdot B \cdot t} \quad (3)$$

$$Re = \frac{V \cdot R}{u} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (5)$$

$$f = \frac{8g \cdot R \cdot J}{V^2} \quad (6)$$

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (7)$$

$$\tau = \gamma \cdot g \cdot R \cdot J \quad (8)$$

$$\omega = \tau \cdot V \quad (9)$$

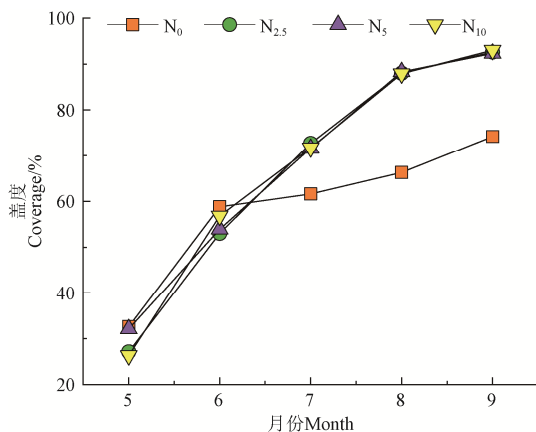
$$E = \frac{\alpha \cdot V^2}{2g} + h \cdot \cos \theta \quad (10)$$

式中 Q 为 t 时间内的径流量, L; t 为径流取样间隔时间, s; k 为修正系数 (层流, $k=0.67$; 过渡流, $k=0.70$; 紊流, $k=0.80$); V_s 为表面流速, m/s; B 为过水断面宽度, m; R 为水力半径, 用水深 h 代替, m; u 为水流的运动黏滞系数, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; J 为水力能坡, 用试验坡度的正弦值; Pa; γ 为含沙水流密度, kg/m^3 ; α 为能动校正系数, $\alpha=1$; θ 为坡度, ($^\circ$)。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理白羊草群落特征

盖度是植物生长发育过程中获取空间和光照资源能力的重要表征参数, 容易测定, 是最常用的植被特征之一。5—6 月, 不同施氮处理间的草被盖度无显著差异 ($P>0.05$) (图 1)。而在 7—9 月, 施氮显著增加了草被盖度, N_0 处理在这 3 个月的草被盖度分别为 61.6%、66.3%和 74.2%, 均低于同期其他处理的草被盖度 ($P<0.05$); 但施氮处理间 ($N_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10}) 白羊草盖度不存在显著差异。



注: N_0 、 $N_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10} 分别表示施氮量为 0、2.5、5 和 10 $g/(m^2 \cdot a)$ (以 N 计), 下同。

Note: N_0 , $N_{2.5}$, N_5 and N_{10} are nitrogen additions of 0, 2.5, 5 and 10 $g/(m^2 \cdot a)$ (based on pure N), respectively. The same below.

图 1 不同施氮处理白羊草盖度月份变化

Fig.1 Monthly changes of coverages of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng with different nitrogen treatments

由于施氮影响, $N_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10} 处理草被盖度的增幅随月份变化逐渐减小 (图 1)。相较于上个月份, 同一施氮处理白羊草盖度的增幅变化范围分别为 5.2%~95.6%

($N_{2.5}$)、4.6%~68.2% (N_5) 和 5.8%~116.4% (N_{10})。而 N_0 处理草被盖度的增幅呈先降后增的趋势, 分别为 80.4%、4.7%、7.6%和 11.9%。总体表现为生长前中期 $N_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10} 处理白羊草盖度增幅较大, 而在生长末期 (9 月), N_0 处理的增幅较大。

整个生长期, 不同处理间苔藓结皮盖度均表现为 $N_0 > N_5 > N_{2.5} > N_{10}$, 与藻结皮相反 (图 2a 和图 2b)。5—9 月, N_0 处理苔藓结皮盖度的变化范围为 14.7%~86.5% (平均为 59.0%), 不同程度地高于同期其他处理的盖度。与 N_0 处理苔藓结皮盖度的变化趋势相反, 其藻结皮盖度的变化范围为 7.0%~59.3% (平均为 28.1%), 分别较其他处理的盖度有所降低。

在植被生长过程中, 除 N_5 处理外, 生物结皮总盖度整体表现为增加趋势 (图 2c), 其中苔藓和藻结皮盖度分别表现为增加和降低趋势 (图 2a 和图 2b)。5—9 月, N_0 处理苔藓结皮盖度的平均变化速率为 3.0%~146.3%, 分别是 $N_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10} 的 1.4、1.6 和 2.4 倍。 N_0 处理的藻结皮盖度变化速率为 -81.1%~14.3%, 分别是其他处理的 1.7、4.5 和 6.6 倍。总体而言, 施氮促进了白羊草和藻结皮的盖度, 抑制了苔藓结皮的发育。

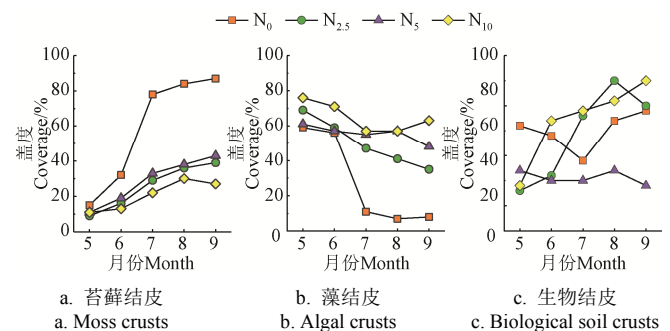


图 2 生物结皮盖度对施氮梯度的响应

Fig.2 Responses of biological soil crusts coverage to nitrogen addition gradients

2.2 白羊草群落坡面流流态特征

水流流态是表征坡面薄层水流动力学特性的基本参数, 与坡面流平均流速和输沙关系密切, 因此研究坡面薄层水流流态具有重要意义, 可用雷诺数 (Re) 和佛汝德数 (Fr) 进行判别^[19]。根据明渠均匀流的基本理论, 雷诺数小于 500 则属于层流, 大于 2 000 属于紊流, 介于二者之间属于过渡流。此外, 坡面流流态也可通过佛汝德数的大小进行表征, 当 Fr 大于 1 时, 表明坡面流流态是急流, Fr 小于 1 则属于缓流。在本研究设定的降雨强度下, 不同施氮处理间雷诺数和佛汝德数的波动范围分别为 87~381 和 0.038~0.264 (图 3)。该结果表明各处理坡面流的流型流态均为层流和缓流, 说明草地群落能显著抑制坡面流。

2.3 不同施氮处理坡面流水动力特征

2.3.1 施氮对坡面流水动力特征的影响

将某施氮处理 4 个月不同降雨强度下获得的值取平均, 得到其对应水动力学参数值 (图 4)。结果表明, 坡面径流量随施氮量呈增加趋势, 变化范围为 0.136~0.154 L/s, 然而, 由于试验前水分条件控制一致, 且本研

究中采用的降雨强度较大, 因此不同施氮处理的坡面径流量没有明显差异。此外, 随着施氮量的增加, 坡面平均流速逐渐加快, 水深变浅, 径流阻力减小。其中, 施氮处理 ($N_{2.5}$ 、 N_5 和 N_{10}) 的平均流速较不施氮处理 (N_0) 增加了 32.0%~44.0%, 径流深减小了 25.1%~28.7%, Darcy-Weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数分别减少了 68.6%~71.5%和 44.7%~47.4%。坡面侵蚀过程实质上是一个不断耗能和做功的过程, 受下垫面状况及土壤特性的影响。随着施氮量的增加, 坡面水流沿程的能耗也随之增强, 表现为径流剪切力、水流功率增大, 分别比不施氮处理 (N_0) 增大了 228.7%~327.4%和 313.5%~543.2%。过水断面单位能是指以过水断面最低点基准面的单位水质量的动能及势能之和, 是反映坡面侵蚀程度及侵蚀方式变化的重要参数^[20]。随着施氮量的增加, 过水断面单位能量整体呈降低趋势, 相较于不施氮处理 (N_0) 减少了 24.4%~27.9%。整体上, 除径流量外, 白羊草坡面流水动力学参数值均表现为 N_0 处理与其他处理

之间存在明显差异。

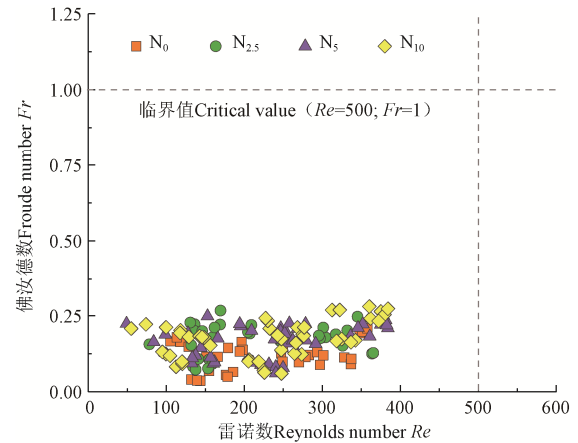


图 3 不同施氮处理坡面水流流态特征

Fig.3 Characteristics of overland flow patterns under different nitrogen addition treatments

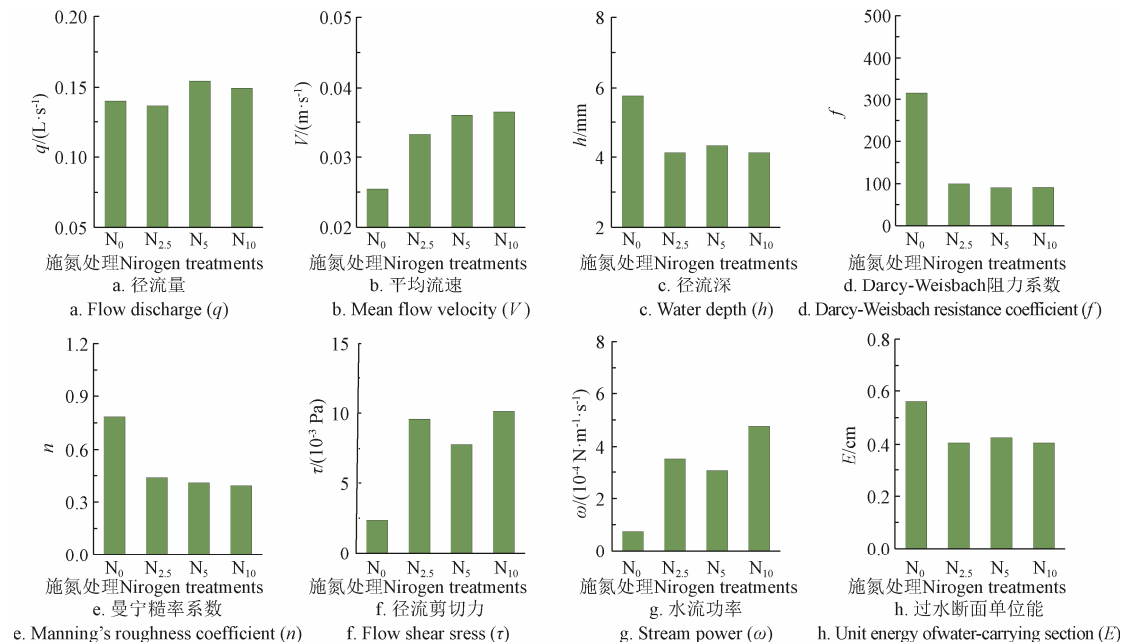


图 4 不同施氮处理下白羊草群落坡面流水动力学特征

Fig.4 Hydrodynamic characteristics of overland flow of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng community under different nitrogen addition treatments

2.3.2 白羊草生长期坡面流水动力特征动态变化

将每个月 4 个施氮处理各降雨强度下获得的参数值取平均, 得到其对应的水动力学参数值 (图 5)。结果表明, 随着白羊草的生长, 不同生长期白羊草群落坡面径流量没有显著差异。除此之外, 其他水动力参数在植被不同生长阶段均存在明显变化规律。植被生长过程中, 白羊草群落坡面的平均流速逐渐减缓, 径流深增加, 坡面流阻力增大。其中, 坡面流平均流速和径流深分别表现为减缓和增大趋势, 9 月 (0.026 m/s 和 5.99 mm) 较生长前中期分别减少了 23.5%~29.7%, 增大了 36.4%~66.9%, Darcy-Weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数 (339.87 和 0.79) 分别比前中期时增加了

220.2%~496.9%和 79.5%~139.4%。坡面径流沿坡面方向流动过程中, 需要克服草被及生物结皮的阻碍、土壤黏结力等一系列沿程阻力, 从而分散剥离土壤颗粒, 同时消耗大量水体动能及势能。随着季节变化, 径流剪切力明显降低, 较生长初期 (28.79×10^{-3} Pa) 降低了 97.7%~99.4%。此外, 单位质量水体沿程所消耗的功率逐渐减小, 表现为水流功率降低, 较生长初期 (11.74×10^{-4} N/(m·s)) 减少了 98.1%~99.7%。此外, 植被生长后期, 坡面流流速较缓, 动能较低, 但由于水深较大, 势能高, 总体导致过水断面单位能随植被发育而逐渐升高, 较白羊草生长初期 (0.355 cm) 增加了 20.8%~64.2%。

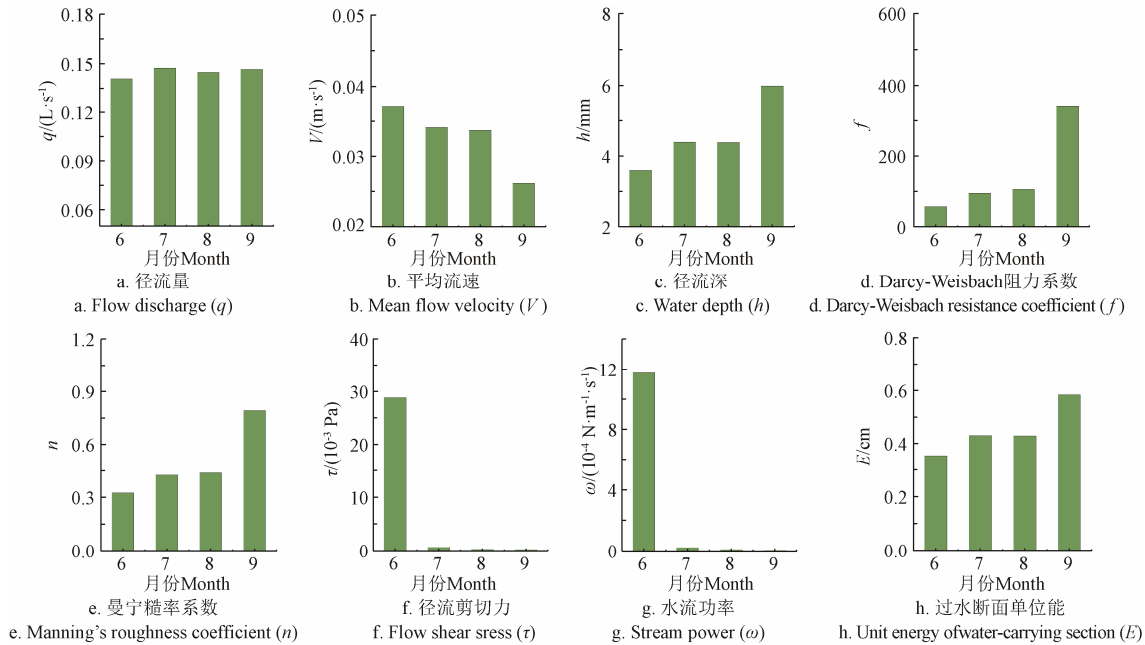


图5 白羊草群落坡面流水动力学特征动态变化

Fig.5 Dynamics fo hydrodynamic characteristics of overland flow in the *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng community

2. 3. 3 降雨强度对坡面流水动力特征的影响

降雨作为重要的驱动力来源，其对坡面流特征和土壤侵蚀过程也存在显著影响。将某降雨强度下 4 个施氮处理在 4 个月中某特征参数值取平均，得到该雨强下该参数最终值，见表 1。由表 1 可知随着降雨强度的增大，径流量、平均流速和径流深均显著增加，90 和 120 mm/h 降雨强度下的径流量分别比 60 mm/h 增加了 62.1%和 146.8%，平均流速增加了 19.3%和 60.8%，径流深增加了

32.1%和 43.7%。流速的加快降低了坡面流阻力，增大了水流功率和过水断面单位能等参数。其中，90 和 120 mm/h 降雨强度下的 Darcy-Weisbach 阻力系数比 60 mm/h 降低了 23.5%、62.6%，曼宁糙率系数降低了 2.9%、27.9%，过水断面单位能增加了 262.3%和 329.6%，120 mm/h 降雨强度下的水流功率增加了 146.4%。此外，由于受径流深和径流含沙量的共同影响，径流剪切力在不同降雨强度间没有显著差异（表 1），但该参数整体呈增大趋势。

表 1 不同降雨强度下白羊草群落坡面流水动力学特征

Table 1 Hydraulic characteristics of overland flow of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng community under different rainfall intensities

降雨强度 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)	$q/(L\cdot s^{-1})$	$V/(m\cdot s^{-1})$	h/mm	f	n	$\tau/10^{-3}Pa$	$\omega/(10^{-4}N\cdot m^{-1}\cdot s^{-1})$	E/cm
60	0.085c	0.026c	3.66b	209.60a	0.55a	3.64a	1.02b	0.36b
90	0.138b	0.031b	4.84a	160.24a	0.54a	9.81a	3.68ab	0.47a
120	0.211a	0.042a	5.26a	78.44b	0.40b	8.96a	4.37a	0.52a

注：同一列不同字母表示在 0.05 水平上处理间差异显著。
Note: Different letters in a column after values indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

3 讨 论

3.1 施氮对白羊草群落特征的影响

氮素限制着陆地生态系统的净初级生产力，氮的不断输入显著改变了植物群落生产力及群落结构与组成。白羊草生长初期，植株较小，对氮素的需求低，因此施氮对白羊草盖度的促进作用不明显。但随着植株增大，施氮显著增加了白羊草盖度，但不同施氮处理间（N_{2.5}、N₅和 N₁₀）无显著差异（图 1）。此外，就生长期变化而言，生长前中期 N_{2.5}、N₅和 N₁₀处理白羊草盖度增幅较大，而在生长末期（9 月），N₀处理的增幅较大。当土壤有效氮含量不足时，植物体内蛋白质及酶的合成受阻，叶绿素含量减少，光合效率降低限制植物地上部分的增加；此时，向土壤中施氮可增加白羊草叶片中营养元素的分配，增加盖度^[21-22]。然而随着生长期变化，施氮导致土

壤中的氮素不断累积，当土壤有效氮达到植物可吸收的阈值时，更多的氮添加不能显著提高植物的生长速率^[23]。此外，过于充足的土壤氮环境还可能导致根系清除活性氧代谢的干扰，根系细胞的渗透势较低，抑制根系的吸收，阻碍植株正常生长发育^[24]。

生物土壤结皮是干旱半干旱区广泛发育的重要地表覆被物，平均盖度可以达到 70%以上，具有重要的生态功能^[25]。地衣、藻类等低等植物可以直接从大气中捕获可利用的氮素，因此生物结皮比高等植物对大气氮沉降的响应更为敏感^[5]。氮素通过影响生物结皮的光合过程，进而影响其生物量和盖度。本研究表明施氮促进了白羊草和藻结皮的盖度，抑制了苔藓结皮的发育。这可能是由于苔藓个体突出于土壤表面，且叶片没有角质层等保护性结构，因此对氮素增加的响应更为敏感^[25]。同时，白羊草的庇荫也可能促进了苔藓结皮的演替发育（表 2）。

此外,相关研究表明,0.2 g/(m²·a)是苔藓结皮生长的最适施氮量,含水率充足时,低于 0.6 g/(m²·a)的氮会提高其净光合速率;然而,过量的施氮会使苔藓结皮年光合固碳值明显减少,增加苔藓种类损失的风险^[26-27]。

3.2 施氮对坡面流水动力参数的影响

施氮减小了坡面流阻力和水深,加快了流速(图 4)。一方面,白羊草叶片属于狭长型,植株上部柔性部分匍匐于地表时,叶片对降雨分配可能起到了一定的导流作用。因此,尽管白羊草盖度与径流流速、阻力系数等无显著相关性(表 3),但施氮在增加白羊草盖度的同时,更多倒伏的枝叶降低了地表径流阻力,使流速加快,水深增加。另一方面,N₀ 处理白羊草盖度较低,当植被处于非完全淹没状态时,雨滴打击坡面薄层水流,会促使坡面流产生混掺消能作用,导致径流紊动性增强,阻力增大,流速减缓,水深较大^[19,28-29]。此外,许多研究证实了苔藓结皮的发育更易增大地表糙度,进而降低坡面流流速^[30]。本研究的相关分析也表明了苔藓结皮与流速之间存在显著负相关,而与阻力系数存在显著正相关

(表 3)。而且,N₀ 处理的苔藓结皮厚度最大,变化范围为 6.6~9.4 mm(9 月),而该处理水深最大为 5.8 mm(图 4),这也可能导致 N₀ 处理的坡面流阻力较大,流速相对较缓,水深较大。

表 2 施氮量与白羊草和生物结皮盖度的相关分析
Table 2 Correlation analysis between nitrogen addition and coverage of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng and biological soil crusts

指标 Indexes	白羊草盖度 Coverage of <i>Bothriochloa</i> <i>ischaemum</i> (Linn.) Keng	苔藓结皮盖度 Coverage of moss	藻结皮盖度 Coverage of algae
施氮量 Nitrogen addition amount	0.264**	-0.646**	0.613**
白羊草盖度 Coverage of <i>Bothriochloa</i> <i>ischaemum</i> (Linn.) Keng	—	0.280**	-0.215**

注:**表示在置信度在 0.01 水平上显著相关;*表示在置信度在 0.05 水平上显著相关。下同。样本量为 32。
Note: ** indicate level of significance at 0.01 level; * indicates level of significance at 0.05 level. Same below. The sample size is 32.

表 3 坡面流水动力学参数与降雨强度和植被盖度的相关分析
Table 3 Correlation analysis between hydrodynamic parameters and vegetation coverage and rainfall intensity

指标 Indexes	<i>q</i>	<i>V</i>	<i>h</i>	<i>f</i>	<i>n</i>	<i>τ</i>	<i>ω</i>	<i>E</i>
降雨强度 Rainfall intensity	0.94**	0.65**	0.42**	-0.24	-0.20	0.14	0.20	0.44**
白羊草盖度 Coverage of <i>Bothriochloa ischaemum</i> (Linn.) Keng	0.07	-0.11	0.21	0.10	0.16	-0.62**	-0.56**	0.21
苔藓结皮盖度 Coverage of moss	-0.04	-0.54**	0.61**	0.55**	0.65**	-0.45**	-0.43**	0.61**
藻结皮盖度 Coverage of algae	0.07	0.54**	-0.57**	-0.52**	-0.62**	0.42**	0.40**	-0.56**
生物结皮盖度 Coverage of biological soil crusts	0.07	-0.20	0.35*	0.29*	0.32*	-0.25	-0.23	0.35*

注:样本量为 96。
Note: The sample size is 96.

坡面侵蚀过程实质上是一个不断耗能和做功的过程,受下垫面状况及土壤特性的影响。随着施氮量的增加,坡面水流沿程的能耗也随之增强,表现为径流剪切力、水流功率增大,过水断面单位能降低。首先,对于径流剪切力和水流功率而言,二者均与径流含沙量密切相关。相关研究认为当草被盖度达到 60%时,其减少土壤侵蚀的作用趋于最大且稳定^[14]。因此,尽管本研究中 N₀ 处理的白羊草盖度较低,但其减蚀作用稳定,生物结皮可能成为其控制泥沙含量的主要因素。此外,由于 N₀ 处理的苔藓结皮盖度显著高于其他处理,其径流含沙量(0.86 g/L)显著低于 N_{2.5}、N₅ 和 N₁₀ 处理(3.82、3.12 和 4.97 g/L),且苔藓结皮降低流速的能力和保护表土的作用均优于藻结皮^[31],因此 N₀ 处理的径流剪切力和水流功率最小。

施氮显著影响了白羊草群落的生长发育,同时也使坡面流水动力特征表现出较大的不确定性。由于白羊草为柔性植被且株高较大,使其受到雨滴打击而呈匍匐状态;另外,不同处理地表生物结皮的分布不均,且夹杂着裸地斑块(如 9 月 N_{2.5} 处理的裸露面积最大,占 16.5%)。因此,径流在对地表土壤的冲刷过程中,可能造成白羊草冠层在坡面的重新堆叠。而且生物结皮也可能被股流“揭开”,造成生物结皮新的分布格局,使结皮覆盖下的土壤颗粒随水流搬运。这些均会增加水动力学特征的不

确定性。
3.3 白羊草生长长期内坡面流水动力参数的变化特征
白羊草不同生长期的坡面径流量没有显著变化(图 5)。这主要是由于每次降雨试验前对坡面进行充分润湿,使土壤含水率达到饱和状态,从而限制了水分下渗。此外,本研究的降雨强度较大,加之白羊草叶片狭长,对雨滴的承载和截留能力十分有限,在一定程度上掩盖了植被冠层对降雨的截留作用。相关分析也表明,坡面径流量与植被盖度无显著关系($P>0.05$),而与降雨强度呈显著相关($r=0.94$, $P<0.01$, 表 3)。

在分析植被对坡面流水动力特性的影响时,一般根据植被的柔韧性将植被分为刚性和柔性 2 种,二者对坡面流阻力的影响不尽相同^[8]。研究结果表明,植被生长过程中,白羊草群落坡面的平均水流速率逐渐减缓,水深增加,坡面流阻力显著增大。植被生长前期,白羊草植株矮小,草被盖度较低,冠层对雨滴的截留作用较弱^[32]。此外,本研究中生物结皮在降雨试验前经历过年际冻融,使得地表藻类结皮连续性破碎,边缘翻起,增大了径流阻力。王媛^[33]研究发现,冻融可增加生物结皮表面糙度,且与苔藓结皮相比,冻融更易显著增加藻结皮糙度。因此,在植被生长初期,坡面流受到的阻力主要来自白羊草植株基部刚性部分和地表糙度。随着生长期变化,坡面流特征变化更加复杂。白羊草属于柔性植被,存在倒

伏现象, 导致白羊草盖度与坡面流流速、水深等参数不存在相关性(表3)。然而, 随着白羊草枝叶的逐渐增长, 植株多呈匍匐状态, 根据最小能耗原理, 薄层水流呈股状流动并穿梭于茎叶之间, 在一定程度上延长了流程, 降低了流速, 增加了水流阻力和水深^[34-35]。研究表明, 当柔性植被没有被水流完全淹没时, 阻力系数随着植被盖度和植株高度的增加而增加^[36]。对于苔藓结皮, 在一定程度上属于刚性植被, 其水流阻力与植株刚度、分布密度和盖度等有关^[8,37-38], 因此, 随着苔藓结皮盖度增大, 地表糙度增加, 水流阻力增大。由于径流剪切力和水流功率受坡面流速和水深和水流挟沙密度的共同影响, 这也二者的变化过程较为复杂。研究表明, 相同降雨条件下, 植被对产沙的抑制作用显著高于径流^[39], 因此, 最终表现为径流剪切力和水流功率随植被生长显著降低。

4 结 论

本试验采用氮添加模拟氮沉降, 研究了土壤有效氮升高对草地群落特征季节变化的影响, 并进一步通过人工降雨试验探究了其对坡面流的水动力学特性的影响。主要结论如下:

1) 施氮可显著促进白羊草盖度的增加, 当施氮量打破了土壤氮素限制状态后, 该促进作用不显著。此外, 生长前中期, 施氮显著增加了白羊草盖度, 而在生长末期, 不施氮处理白羊草盖度的增幅较大。对于生物结皮, 施氮有利于藻类结皮的生长, 而显著抑制苔藓结皮的发育。

2) 白羊草群落的坡面流均为层流和缓流。降雨强度的增大减缓了坡面流阻力, 导致径流量、平均流速、径流深、水流功率和过水断面单位能均显著增加。随着季节变化, 白羊草群落坡面流阻力显著增大, 平均流速减缓, 径流深增加, 径流剪切力和水流功率均降低, 过水断面单位能增加。施氮显著改变了白羊草群落坡面流特征, 随着施氮量的增加, 坡面流阻力显著降低, 平均流速加快, 径流深变浅, 径流剪切力和水流功率均显著增加, 过水断面单位能减小。

3) 白羊草群落具有良好的调控坡面流的作用。然而, 在大气氮沉降不断增加的背景下, 白羊草群落的“阻水”作用有减弱的趋势, 可能会增加草地群落坡面土壤侵蚀的风险。因此, 应采取相应措施减缓大气氮沉降速率, 从而间接地为控制土壤侵蚀作出贡献。

[参 考 文 献]

- [1] Ackerman Daniel, Millet Dylan B, Chen Xin. Global estimates of inorganic nitrogen deposition across four decades[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019(1): 100-107.
- [2] 李盼盼. 施氮对白羊草群落特征及土壤侵蚀过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Li Panpan. Effects of Nitrogen Addition on the Community Characteristics and Soil Erosion Processes in *Bothriochloa*

- ischaemum*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [3] Stevens Carly J, Dise Nancy B, Mountford J Owen, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [4] Zong Ning, Shi Peili, Song Minghua, et al. Nitrogen critical loads for an alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Management*, 2016, 57(3): 531-542.
- [5] Salo Hanna, Bućko Michał S, Vaahtovuori Elina, et al. Biomonitoring of air pollution in SW Finland by magnetic and chemical measurements of moss bags and lichens[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 115: 69-81.
- [6] Zhang Yuanming, Zhou Xiaobing, Yin Benfeng, et al. Sensitivity of the xerophytic moss *Syntrichia caninervis* to prolonged simulated nitrogen deposition[J]. *Annals of Botany*, 2016, 117(7): 1153-1161.
- [7] Wang Bing, Zhang Guanghui, Yang Yanfen, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 266: 68-75.
- [8] Wang Yuting, Zhang Huilan, Yang Pingping, et al. Experimental study of overland flow through rigid emergent vegetation with different densities and location arrangements[J]. *Water*, 2018, 10(11): 1638.
- [9] 张琪琳, 王占礼, 王栋栋, 等. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(10): 1093-1101.
Zhang Qilin, Wang Zhanli, Wang Dongdong, et al. Advances in researches of the effects of grassland vegetation on soil erosion in Loess Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(10): 1093-1101. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王俊杰, 张宽地, 杨苗, 等. 雨强和糙度对坡面薄层流水动力学特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(9): 147-154.
Wang Junjie, Zhang Kuandi, Yang Miao, et al. Influence of rainfall and roughness on hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(9): 147-154. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 182-189.
Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*,

- 2014, 30(15): 182-189. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李毅, 邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 1-5.
- Li Yi, Shao Ming'an. Hydrodynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孟铖铖, 张会兰, 杨坪坪. 模拟植被类型及空间配置对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 50-56.
- Meng Chengcheng, Zhang Huilan, Yang Pingping. Effects of simulated vegetation types and spatial patterns on hydrodynamics of overland flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 50-56, 78. (in Chinese with English abstract)
- [14] 孙佳美, 余新晓, 樊登星, 等. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2574-2580.
- Sun Jiamei, Yu Xinxiao, Fan Dengxing, et al. Impact of vegetation cover on surface runoff hydraulic characteristics with simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2574-2580. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋娟丽. 黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- Song Juanli. The Characteristics and Evaluation on Soil Quality of Grassland in Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [16] 魏样, 同延安, 乔丽, 等. 陕西省不同生态区大气氮沉降量的初步估算[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 795-800.
- Wei Yang, Tong Yan'an, Qiao Li, et al. Preliminary estimate of atmospheric nitrogen deposition in different ecological regions of Shaanxi Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(4): 795-800. (in Chinese with English abstract)
- [17] Yu Guirui, Jia Yanlong, He Nianpeng, et al. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(6): 424-431.
- [18] 李兆松, 王兵, 汪建芳, 等. 铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 151-157.
- Li Zhaosong, Wang Bing, Wang Jianfang, et al. Effects of *Artemisia gmelinii* and *Bothriochloa ischcemum* litter mass coverage on hydrodynamic characteristics of loess overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(17): 151-157. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14-19.
- Wu Shufang, Wu Pute, Yuan Lifeng. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 14-19. (in Chinese with English abstract)
- [20] 肖海, 刘刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 106-111.
- Xiao Hai, Liu Gang, Liu Puling. Response of detachment rate of loess slope to hydrodynamic characteristics under concentrate flow condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 106-111. (in Chinese with English abstract)
- [21] 倪梅娟. 不同氮素形态、水分状况对水稻生长及氮素吸收的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.
- Ni Meijuan. Effects of Nitrogen on the Growth and N Uptake of Rice under Different Water Conditions[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [22] 詹书侠, 郑淑霞, 王扬, 等. 羊草的地上-地下功能性状对氮磷施肥梯度的响应及关联[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 36-47.
- Zhan Shuxia, Zheng Shuxia, Wang Yang, et al. Response and correlation of above- and below-ground functional traits of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 36-47. (in Chinese with English abstract)
- [23] 邱波, 罗燕江. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响[J]. 兰州大学学报, 2004, 40(3): 56-59.
- Qiu Bo, Luo Yanjiang. Effects of fertilizer gradients on productivity and species diversity in a degraded alpine meadow[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2004, 40(3): 56-59. (in Chinese with English abstract)
- [24] He Chun'e, Lu Lilan, Jin Ye, et al. Effects of nitrogen on root development and contents of bioactive compounds in *Salvia miltiorrhiza bunge*[J]. Crop Science, 2013, 53(5): 2028-2039.
- [25] 周晓兵, 尹本丰, 张元明. 模拟氮沉降对不同类型生物土

- 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 biocrusts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3197-3205. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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. (in Chinese with English abstract)
- [27] Carroll J A, Johnson D, Morecroft M, et al. The effect of long-term nitrogen additions on the bryophyte cover of upland acidic grasslands[J]. Journal of Bryology, 2000, 22(2): 83-89.
- [28] 朱慧鑫, 胡晓静, 程金花, 等. 草被覆盖下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(7): 48-57.
- Zhu Huixin, Hu Xiaojing, Cheng Jinhua, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion in overland flow under grass coverage[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(7): 48-57. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wu Shufang, Wu Pute, Feng Hao et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2011, 5(1): 76-83.
- [30] 杨凯, 赵军, 赵允格, 等. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 135-141.
- Yang Kai, Zhao Jun, Zhao Yunge, et al. Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 135-141. (in Chinese with English abstract)
- [31] 秦宁强. 黄土丘陵区生物土壤结皮对降雨侵蚀力的响应及影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- Qin Ningqiang. The Response and Impact of Biological Soil Crust on Rainfall Erosivity in the Loess Hilly Region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [32] Li Xiang, Xiao Qingfu, Niu Jianzhi, et al. Process-based rainfall interception by small trees in Northern China: The effect of rainfall traits and crown structure characteristics[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2016, 218: 65-73.
- [33] 王媛. 黄土丘陵区生物结皮表面糙度特征及其对产流的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- Wang Yuan. Impact of Biological Soil Crusts on Surface Roughness and Its Effect on Runoff Generated Process on Slope in the Hilly Loess Plateau region, China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李朝栋, 李占斌, 马建业, 等. 不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 153-160.
- Li Chaodong, Li Zhanbin, Ma Jianye, et al. Hydraulic characteristic of overland flow on loess farmland slope under mulch with different wheat straw lengths[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 153-160. (in Chinese with English abstract)
- [35] Zhang Guanhua, Hu Jiajun. Effects of patchy distributed *Artemisia capillaris* on overland flow hydrodynamic characteristics[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(1): 81-88.
- [36] 杨坪坪. 坡面薄层流水动力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Yang Pingping. Study on Hydrodynamic Properties of Overland Flow[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [37] Yang Pingping, Zhang Huilan, Ma Chao. Effects of simulated submerged and rigid vegetation and grain roughness on hydraulic resistance to simulated overland flow[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(10): 2042-2052.
- [38] Li Bai, Gao Jiarong, Wang Xiuru, et al. Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(4): 311-323.
- [39] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 170-178.
- Zhao Qinghe, Ji Xiaoyu, Xu Shanshan, et al. Inhibiting effect of riparian vegetation on erosion and sediment yield of slope runoff[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 170-178. (in Chinese with English abstract)

Effects of simulated nitrogen deposition on the *Bothriochloa ischaemum* community and its hydrodynamic characteristics of overland flow

Li Panpan¹, Li Binbin², Wang Bing^{1,2}, Liu Guobin^{1,2*}

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

Abstract: Atmospheric nitrogen deposition is one of the most concerned issues in global changes. Grassland communities respond significantly to nitrogen deposition and then have influences on soil erosion. In this study, the typical zonal grass species (*Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng) on the Loess Plateau was selected as the research object. The nitrogen deposition process was simulated through nitrogen additions, and the influences of seasonal changes of vegetation communities on overland flow hydrodynamics were explored by the artificial simulated rainfall method. This experiment was conducted at the Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR (108°04'27.95" E and 34°16'56.24" N), Yangling City, Shaanxi Province, China in 2016. Five treatments with different nitrogen addition levels of 0, 2.5, 5, 10 g/(m²·a) (based on N) were designed and they were regarded as N₀, N_{2.5}, N₅ and N₁₀, respectively. All the treatments were subjected to simulated rainfall under three rainfall intensities of 60, 90 and 120 mm/h monthly from June to September. In addition, from May to September, the coverage of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng and biological soil crusts before the first rainfall test of each month were monitored. During the rainfall, the mixed samples of runoff and sediment were collected when the flow velocity became stable, and the surface flow velocity and water temperature were measured at the same time. According to the formula of open channel flow, the hydrodynamic parameters such as flow discharge, mean flow velocity, water depth, Reynolds number, Froude number, Darcy-Weisbach resistance coefficient, Manning's roughness coefficient, flow shear stress, stream power and unit energy of water-carrying section were calculated. The results showed that nitrogen additions promoted the coverage of *Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng and algal crusts, but inhibited the moss crusts. Compared with no nitrogen treatment (N₀), the overland flow resistances values of treatments of N_{2.5}, N₅ and N₁₀ were significantly decreased by 68.6% to 71.5% (Darcy-Weisbach resistance coefficient) and by 44.7% to 47.4% (Manning's Roughness coefficient). The mean flow velocity values were accelerated by 32.0% to 44.0% and water depth values were reduced by 25.1% to 28.7%. The flow shear stress and stream power values were increased significantly by 228.7% to 327.4% and 313.5% to 543.2%, respectively. The unit energy of water-carrying section values was reduced by 24.4% to 27.9%. With seasons changing, the resistance values to overland flow in September were increased significantly by 220.2% to 496.9% (Darcy-Weisbach resistance coefficient) and 79.5% to 139.4% (Manning's roughness coefficient), compared with the early-mid period (from June to August). Furthermore, the mean flow velocity values were decreased by 23.5% to 29.7%, the water depth values increased by 36.4% to 66.9%. The flow shear stress and stream power values were decreased by 97.7% to 99.4% and 98.1% to 99.7%, respectively, and the unit energy of water-carrying section values was increased by 20.8% to 64.2%. Moreover, overland flow resistance was decreased with the increase of rainfall intensity, which promoted mean flow velocity, water depth, and stream power. All in all, with the nitrogen addition increasing, the overland flow resistance was significantly reduced, the flow velocity was accelerated, the water depth was decreased, the flow shear stress and stream power were significantly increased, and the unit energy of water-carrying section was reduced. Grassland plays vital roles in regulating overland flow. However, the increase of atmospheric nitrogen deposition may exacerbate soil erosion on the slope. Overall, the results can provide a scientific instruction for grassland vegetation construction and soil erosion control in the Loess Plateau.

Keywords: hydrodynamics; vegetation; nitrogen deposition; overland flow; resistance coefficient