

# 氮添加对白羊草种群及土壤特征的影响

李盼盼<sup>1</sup>, 王兵<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1,2†</sup>, 李彬彬<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学林学院, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院水利部, 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, 712100 陕西杨凌)

**摘要:** 为探究氮沉降对白羊草种群及土壤属性的影响, 以黄土高原典型地带性植被白羊草种群为研究对象, 通过人工添加氮素, 设置不同施氮处理(0、2.5、5、10 g/(m<sup>2</sup>·a)), 系统研究土壤有效氮升高对白羊草种群特征及土壤养分的影响。结果表明: 1) 氮添加量在一定范围内, 可显著改善白羊草种群特征, 超过该范围, 则会影响白羊草种群正常生长。在2.5 g/(m<sup>2</sup>·a) 施氮量下, 白羊草花序数量和株高最大, 当施氮量大于该值时, 白羊草花序数量和株高呈减小趋势, 地上生物量随施氮量的增加显著增加( $P < 0.05$ ); 在5 g/(m<sup>2</sup>·a) 施氮量下, 白羊草根系生物量密度最大, 超过该值后根系生物量密度减小。2) 随施氮量的增加, 土壤中有机质和硝态氮质量分数增加, 速效磷质量分数减小, 全氮和铵态氮无显著变化, 表明土壤中有效氮质量分数增加, 可影响自身及其他营养元素的吸收转化过程, 从而对白羊草种群的生长产生一定影响。研究结果可为黄土丘陵区草地植被建设与管理, 提供基础数据和科学依据。

**关键词:** 氮添加; 白羊草; 种群特征; 土壤养分; 黄土高原

中图分类号: S543 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2017)02-0035-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2017.02.005

## Effects of nitrogen addition on the population characteristics of *Bothriochloa ischaemum* and soil properties

LI Panpan<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>1,2</sup>, LIU Guobin<sup>1,2</sup>, LI Binbin<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract [Background]** Grassland ecosystem plays a great role in improving regional environment condition and maintaining soil and water. With the nitrogen deposition increasing, vegetation characteristics and soil properties of grassland ecosystem would be changed, which in turn influence their effects on reducing soil erosion. *Bothriochloa ischaemum* community is considered as typical vegetation on the Loess Plateau. Besides, the nitrogen content of soil in this region is relatively low. Hence, researching nitrogen addition effect on the characteristics of *B. ischaemum* community has a great significance in vegetation construction and soil and water conservation. **[Methods]** *B. ischaemum* was seeded in the soil bin (2 m in length and 1 m in width; soil bulk density was 1.2 g/cm<sup>3</sup>) with 20 cm row

收稿日期: 2015-05-29 修回日期: 2016-12-16

项目名称: 国家自然科学基金“土壤有效N升高对白羊草群落特征及土壤侵蚀过程的影响机制”(41471438); 西北农林科技大学基本科研业务费“植被恢复影响坡面流土分离过程机理研究”(Z109021539); 中国科学院“西部之光”人才培养计划西部博士资助项目“黄土高原植物根系抑制土壤侵蚀效应研究”(K318021403)

第一作者简介: 李盼盼(1992—)女, 硕士研究生。主要研究方向: 流域生态。E-mail: lipanpan2014050769@163.com

†通信作者简介: 刘国彬(1958—)男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 流域治理与恢复。E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

spacing for each plant. Totally, 50 plants of *B. ischaemum* were seeded for each soil bin. Watered regularly during the first year and added nitrogen in the next year. Ammonium nitrate was used as nitrogen source with four nitrogen levels (0, 2.5, 5 and 10 g N/(m<sup>2</sup>·a)), which was added to the soil once every two weeks from June to August (six times in total). Moreover, the bare loess soil was selected as control. For each treatment, there were three repetitions and 15 soil bins totally. Inflorescence number and plant height of *B. ischaemum* were measured before each nitrogen addition, also the soil was sampled (0–5, 5–10, 10–20, and 20–30 cm) at the same time to determine the soil organic matter, total nitrogen and phosphorus, available nitrogen and phosphorus, pH and particle size distribution. At the end of growth stage, vegetation coverage, biomass of aboveground and roots (65 °C, 48 h) were measured. In addition to this, root characteristics such as total surface area were measured with WinRHIZO software. The differences of vegetation characteristics and soil properties between all treatments were analyzed by multiple comparison method. [Results] 1) The height and inflorescence number of *B. ischaemum* reached the maximum at the nitrogen addition level of 2.5 g N/(m<sup>2</sup>·a), then decreased with the enhancement of nitrogen addition. 2) The aboveground biomass increased significantly with the growing nitrogen addition level ( $P < 0.05$ ) and the root biomass density of *B. ischaemum* got its maximum at 5 g N/(m<sup>2</sup>·a) nitrogen addition level. However, with nitrogen addition increased, root biomass density showed a decreasing trend. 3) With the nitrogen addition up, the soil organic matter and nitrate nitrogen content increased, while available phosphorus content decreased, whereas, there was no significant relationship between nitrogen levels and total nitrogen or ammonium nitrogen. [Conclusions] This study indicated that nitrogen deposition had a significant effect on grassland ecosystem. The *B. ischaemum* grew well with the certain nitrogen addition level, while lower or higher nitrogen addition level may limit its growth. This study may make a better understanding of potential impact of nitrogen deposition on the characteristics of vegetation and soil properties, and would provide fundamental scientific basis for regional vegetation construction under the background of global atmospheric nitrogen deposition.

**Keywords:** nitrogen addition; *Bothriochloa ischaemum*; population characteristics; soil nutrient; the Loess Plateau

全球草地面积近 2 400 万 km<sup>2</sup>, 约占陆地总面积的 1/6。草地不仅是重要的畜牧业基地, 而且在改善区域生态环境和保持水土等方面, 具有重要作用<sup>[1]</sup>。近年来, 由于人类活动导致的氮沉降量不断增加, 影响草地生态系统的土壤养分和植被群落特征, 进而影响草地保持水土功能; 因此, 有必要系统研究氮沉降对草地的影响。相关研究表明, 草地生态系统是受氮沉降影响最显著的生态系统类型之一<sup>[2]</sup>。一方面, 氮沉降增加产生的施肥效应能改善表层土壤肥力, 显著影响草地植物群落结构, 增加群落地上生物量, 有助于草地生产力的恢复<sup>[3-4]</sup>; 另一方面, 过量的氮沉降会干扰土壤养分循环, 导致土壤酸化, 改变植物群落组成, 降低植物多样性, 从而对草地生态系统的结构和功能产生影响。此外, 氮沉降对草地生态系统的影响, 与其本身土壤氮储量限制状态有关, 如 V. Blanke 等<sup>[5]</sup>认为 5 g/(m<sup>2</sup>·a) 的

施氮量, 并未对阿尔卑斯山脉亚高山草原区的草地生态系统结构和功能产生显著影响。

黄土高原地区草地面积达 2 320 万 hm<sup>2</sup>, 占其总面积的 33%<sup>[6]</sup>。白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*) 群落是黄土高原森林草原区的地带性植被群落, 且该区土壤有效氮质量分数较低, 是研究土壤有效氮升高影响草地群落和土壤性质的代表性区域。黄土高原自大规模实施退耕还林(草)工程以来, 植被状况发生显著变化, 然而该区有关氮沉降对植被恢复影响的相关研究相对滞后。笔者以黄土高原地区的典型地带性植被白羊草种群为研究对象, 通过设置不同梯度的氮添加, 模拟氮沉降, 研究土壤有效氮升高对白羊草群落特征及土壤养分的影响, 在理论上阐明土壤有效氮升高对草地生态系统的影响, 进而在实践中预测大气氮沉降背景下, 白羊草群落保持水土能力的变化, 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 试验设计

1.1.1 试验布设 试验地位于陕西省杨凌(E 108° 04' 27.95", N 34° 16' 56.24") 中国科学院水土保持研究所。试验共布设 15 个土槽,每个土槽长×宽×深分别为 2.0 m×1.0 m×0.5 m,坡度为 15°。供试土壤取自安塞坡地表层(0~20 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%)。填土前先将土壤过 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。分 4 次装土,每次填土土壤密度控制在 1.2 g/cm<sup>3</sup> 左右,铺平、压实。每次填装之前,将表土打碎,消除土壤之间的分层现象,填土总厚度为 40 cm。

填土结束后,开始种植白羊草,种子采自陕西省安塞县。种植时,在土槽每 20 cm×20 cm 面积的中心位置挖取 0.2~0.3 cm 深度的种穴,埋下白羊草种子;种植后表面覆盖草席,并定期洒水。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。

1.1.2 试验处理 试验模拟氮沉降所用氮源为 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>,共设 N<sub>0</sub>、N<sub>2.5</sub>、N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 4 个白羊草施氮处理,施氮量分别为 0、2.5、5 和 10 g N/(m<sup>2</sup>·a),同时设置裸地对照 CK,共计 5 个处理,每个施氮处理设置 3 个重复。施氮频率为每 2 周 1 次。施氮时按照预设施氮量,将 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 溶于水,用喷壶均匀洒在地表,不施氮的处理喷洒等量清水。

1.1.3 白羊草种群特征及土壤样品采集 2015 年 6—8 月,每 2 周测量白羊草株高及花序数量,共计测量 6 次。每次施氮前,用直径为 2.5 cm 的小根钻,在每个土槽的上、中、下部位分别采集土样,采样深度分为 0~5、5~10、10~20 和 20~30 cm;采集土样后,将测土壤养分剩余的土样与最初填充土槽的黄绵土按一定密度混合后,填充到对应土槽的孔穴中,并用塑料标签在相应位置做好标记,以避免下次在同一处重复采样。将同一处理同层土样混合,测定土壤有机质、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮、速效磷和 pH。

白羊草生长后期,测定其盖度、地上生物量和根系生物量;盖度采用拍照法测定;地上生物量采用刈割收集、烘干(48 h 65 °C)及称量;根系生物量采用水洗法收集、烘干(48 h 65 °C)及称量。

### 1.2 数据处理

各施氮处理下,植被特征及土壤养分差异采用多重比较方法,数据分析及图表处理采用 SPSS 19.0 和 Origin 9.0 软件。

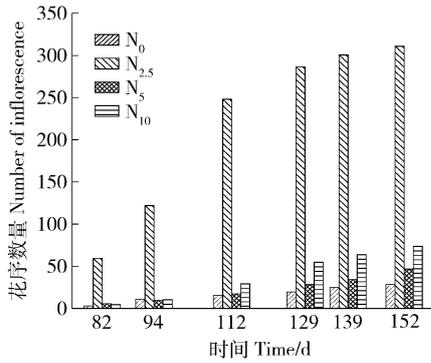
## 2 结果与分析

### 2.1 氮添加对白羊草种群形态特征的影响

2.1.1 花序数量 花序数量对于提高植物生活力和产量有着决定性的作用,是植物营养繁殖的基础<sup>[7]</sup>。在整个生长过程中的不同处理下,白羊草花序数量随生长时间显著增加,且施氮处理下白羊草花序数量均不同程度高于不施氮处理,分别是不施氮处理的 0.88~19.78 倍(图 1)。氮添加会加快白羊草枝条生长速率,促进叶片生长,加速枝条由营养枝到繁殖枝的发育,增加白羊草花序数量,从而影响其繁殖过程<sup>[8]</sup>。受物候期的影响,在整个花序数量记录期(70 d),白羊草前 45 d 花序数量增长速率总体高于后 25 d,分别是其 1.04~5.23 倍。对于不同施氮处理,N<sub>2.5</sub> 处理下白羊草花序数量始终显著高于其他施氮处理;截止到生长后期(152 d),N<sub>2.5</sub> 处理下白羊草花序数量达到 311 个,分别是 N<sub>10</sub>、N<sub>5</sub> 和 N<sub>0</sub> 处理下花序数量的 4.2、6.7 和 11 倍。这一研究结果表明,氮添加虽然能不同程度的增加白羊草花序数量,但施氮量过高时,这种促进作用会有所减缓。李文达等<sup>[9]</sup> 系统研究了不同施氮梯度对白羊草种群特征的影响,结果表明,施氮处理可显著降低白羊草营养枝与生殖枝的比值,且在施氮量为 2.5 g/(m<sup>2</sup>·a) 时,该比值最小,白羊草花序数量最多。表明适当的氮添加,能有效地促进白羊草有性繁殖,显著增加白羊草的花序数量。

2.1.2 株高 株高是植物获取空间和光照资源能力的重要表征,也是植物生长发育的重要指标<sup>[9]</sup>。氮添加可以显著增加白羊草株高,在白羊草生长的不同时期,施氮处理下白羊草株高整体高于不施氮处理,N<sub>2.5</sub>、N<sub>5</sub> 和 N<sub>10</sub> 处理下,白羊草株高分别是不施氮处理 N<sub>0</sub> 的 1.63~1.72、1.29~1.69 和 1.00~1.64 倍(图 2),且在整个生长过程中,白羊草株高总体表现为 N<sub>2.5</sub> > N<sub>5</sub> > N<sub>10</sub> > N<sub>0</sub>。

曲秋玲等<sup>[10]</sup> 研究结果也表明,随着施氮量的增加,白羊草株高呈现降低趋势,且一定量的施氮量可将白羊草种群密度控制在较合理的水平,促进白羊草的纵向生长。此外,N<sub>2.5</sub> 处理下白羊草株高虽整体高于其他施氮处理,但在其生长后期,各施氮处理间白羊草株高差异较小。截止到生长后期,N<sub>2.5</sub> 处



$N_0$ : 施氮量为 0;  $N_{2.5}$ : 施氮量为  $2.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;  $N_5$ : 施氮量为  $5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;  $N_{10}$ : 施氮量为  $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。  $N_0$ : refers to the treatment without adding nitrogen,  $N_{2.5}$ : refers to the treatment with adding nitrogen of  $2.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;  $N_5$ : refers to the treatment with adding nitrogen of  $5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,  $N_{10}$ : refers to the treatment with  $10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . The same below

图 1 各施氮处理下白羊草花序数量随生长时间变化情况

Fig. 1 Variations of inflorescence number with growth of *Bothriochloa ischaemum*

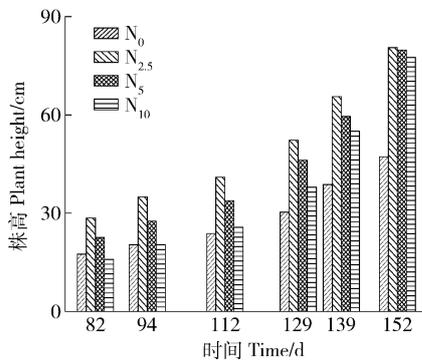


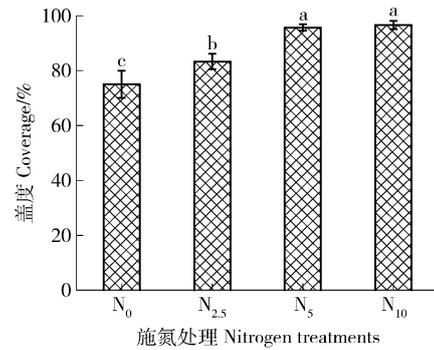
图 2 各施氮处理下白羊草株高随生长时间变化情况

Fig. 2 Variations of plant height with the growth of *Bothriochloa ischaemum*

理下白羊草株高为  $80.5 \text{ cm}$ , 分别是  $N_5$  和  $N_{10}$  处理的 1.01 和 1.04 倍。一方面, 施氮虽然可以促进白羊草生长, 增加株高, 但受到白羊草物种自身特征的限制, 株高不能无限增加, 从而在生长末期, 各施氮处理间白羊草株高趋于一致; 另一方面, 施氮能够促进白羊草地上分蘖<sup>[10]</sup>, 当施氮量达到一定程度时, 白羊草的分蘖数量过多、植株密度增加和植被盖度增加。截止到生长末期, 各施氮处理下白羊草盖度均大于 83% (图 3), 从而导致白羊草生长过程获取光照受限, 影响白羊草植株的纵向生长, 表现为白羊草株高随着施氮量增加趋于稳定。

## 2.2 地上生物量及根系特征

2.2.1 地上生物量 地上生物量可有效反映植物地上部分光合物质的积累量。氮添加可显著影响白



不同小写字母表示不同处理显著差异  $P < 0.05$ 。Values with different letters refer to significant difference at 0.05 levels among the treatments. The same below.

图 3 各施氮处理下白羊草盖度变化情况

Fig. 3 Variations of coverage of *Bothriochloa ischaemum* under different nitrogen treatments

羊草地上生物量, 截止到生长末期, 各施氮处理地上生物量均高于不施氮 ( $N_0$ ) 处理, 且地上生物量随施氮量的增加而增加 (图 4)。其中  $N_{10}$  和  $N_5$  施氮处理下, 白羊草地上生物量与不施氮处理 ( $N_0$ ) 存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。最大施氮水平下 ( $N_{10}$ ), 白羊草地上生物量最大, 为  $323.02 \text{ g}/\text{m}^2$ , 分别较  $N_5$ 、 $N_{2.5}$  和  $N_0$  处理下, 增加 8.14%、23.87% 和 34.99%, 表明施氮可以有效增加白羊草种群地上生物量。

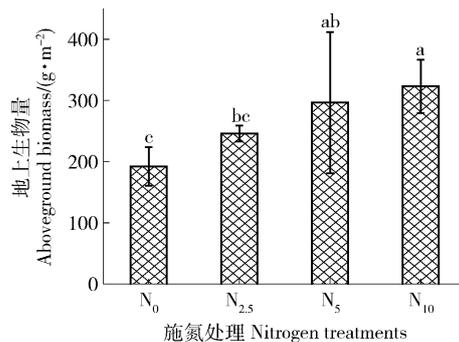


图 4 各施氮处理下白羊草地上生物量变化情况

Fig. 4 Variations of aboveground biomass of *Bothriochloa ischaemum* under different nitrogen treatments

韩金锋等<sup>[11]</sup>研究也表明, 氮素是植物叶片生长发育的必要元素, 植物个体生长主要受氮素的限制, 土壤中氮质量分数的增加, 可显著提高植物种群地上生物量<sup>[12]</sup>。一方面, 植物缺氮时, 蛋白质、核酸和磷脂等物质的合成受阻, 叶绿素质量分数减少, 阻碍植物的光合作用, 导致叶片小而薄, 分蘖较少, 植株生长矮小, 最终限制植物地上生物量的增加<sup>[13]</sup>; 另一方面, 随着土壤中氮质量分数的增加, 植物根系的养分吸收能力逐渐过剩, 将更多的资源分配给地上部分, 植株变得高大, 地上生物量相应的增加, 以利

于获得更多的光照。此外,詹书侠等<sup>[12]</sup>和白雪等<sup>[14]</sup>研究表明,氮添加能显著促进白羊草植株向叶片营养元素的分配,有利于增大白羊草叶片的有效光合面积,进而提高整体光合能力,增加白羊草地上生物量。

2.2.2 根系特征 植物根系特性可决定植物获取土壤养分的能力,对植物营养的吸收有着显著的影响<sup>[10]</sup>。不同施氮量对白羊草的根系生物量密度的影响不尽相同(图 5A)。对于不同施氮处理, $N_{10}$ 施氮水平下白羊草根系生物量密度最小,与不施氮处理( $N_0$ )根系生物量密度之间没有显著差异。 $N_5$ 与 $N_{2.5}$ 施氮条件下白羊草根系生物量密度显著高于 $N_{10}$ 和 $N_0$ 处理,但其两者之间并没有显著差异。 $N_5$ 的根系生物量密度最大,为 $3.18 \text{ kg/m}^3$ ,是 $N_{10}$ 的 1.8 倍。大多数研究认为,磷元素是影响根系生长的主要因素<sup>[15]</sup>;但也有研究表明,氮、磷均会对植物根系生长产生影响,这主要取决于土壤处于氮素限

制,还是磷素限制状态<sup>[15]</sup>。笔者在研究中发现, $N_0$ 、 $N_{2.5}$ 和 $N_5$ 处理的土壤可能处于氮素限制状态;因此,施氮可以增加白羊草根系生物量,而对于 $N_{10}$ 处理,可能是由于较高的施氮水平,在很大程度上消除了土壤氮元素对白羊草根系生长的限制,从而导致白羊草根系生长主要取决于土壤中磷元素的质量分数。根系比表面积是代表根系活力的指标之一,被认为是比生物量更能反映根系生理生态功能的指标,高的比表面积意味着单位质量上,根系可以吸收到更多的土壤养分<sup>[16]</sup>。笔者研究结果表明,不同施氮处理下,白羊草根系的总表面积与比表面积无显著差异,但二者均随着施氮量的增加而减小(图 5B 和图 5C)。当土壤中的氮素缺乏时,植株需要较大的根系表面积来吸收土壤养分,而当土壤养分条件充足时,根系只需要较小的吸收面积,就可以满足自身生长需求。

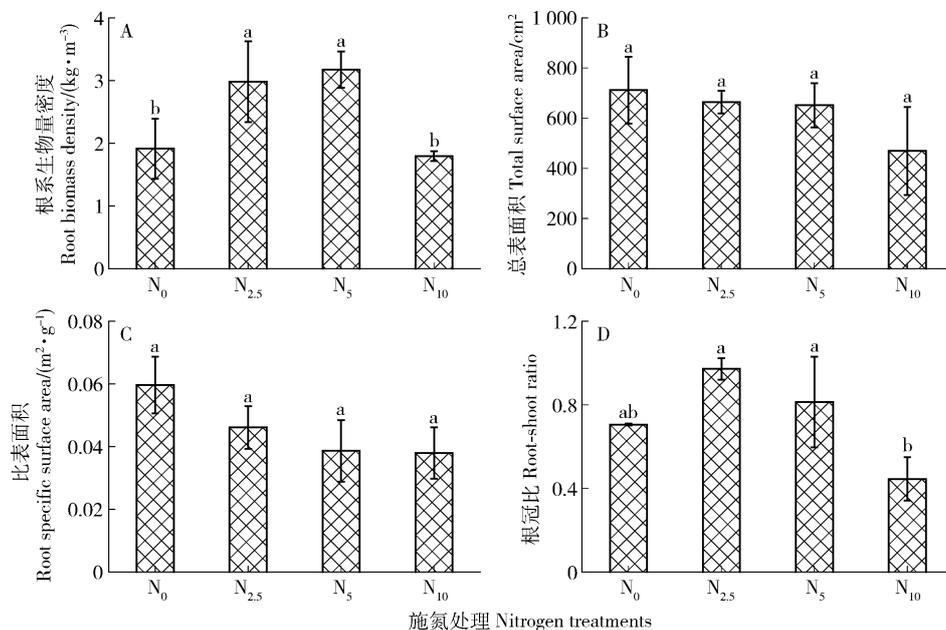


图 5 各施氮处理下白羊草根系生物量密度、总表面积、比表面积和根冠比变化情况

Fig. 5 Variations of root biomass density, total surface area, root specific surface area, and root-shoot ratio of *Bothriochloa ischaemum* under different nitrogen treatments

根冠比可表征植物地上和地下生物量分配比例之间的关系,也可反映植物对自身资源的空间配置状况<sup>[17]</sup>。大多数研究认为,在一定范围内,植物根冠比通常随着施氮量的增加而减小<sup>[18]</sup>。在笔者的研究中,不同施氮处理下,白羊草根冠比随着施氮量的增加而减小(图 5D)。 $N_{2.5}$ 施氮处理下白羊草根冠比最大,为 0.97,是 $N_{10}$ 处理下白羊草根冠比(最小)的 2.2 倍。生物量分配比例的改变,反映白羊

草种群对不同的土壤养分状况应答策略不同<sup>[17]</sup>。缺氮对根系生长的抑制小于对地上部分生长的抑制,使得植株的根冠比增大,从而导致随着施氮量的增加,根冠比呈现下降趋势。当土壤中养分充足时,植物生长由养分限制转变为光限制,为了使自身获得充足的光照,减小植物受遮阴的影响,相较于根系,植株需分配更多的生物量到地上碳同化器官,使植物地上部分得到最快生长;因此,在土壤养分过于

充足时,根冠比反而较低<sup>[19,20]</sup>。戴诚等<sup>[21]</sup>也认为在养分条件较好时,植物倾向于将生物量较多地分配于地上部分,在养分条件较差时,则倾向于分配至地下部分。此外, $N_0$ 处理下根冠比低于 $N_{2.5}$ 和 $N_5$ 处理,这可能是由于土壤在严重缺氮条件下,会抑制整个植株的生长。

### 2.3 土壤养分特征

土壤养分质量分数随施氮量的变化,呈现不同的变化趋势。总体而言,土壤中有有机质、全氮和全磷的变化范围分别为2.11~5.82、0.17~0.30和0.49~0.61 g/kg,均值分别为3.55、0.21和0.54 g/kg;铵态氮、硝态氮和速效磷的变化范围分别为0.01~2.22、0.10~1.56和8.67~32.92 mg/kg,均值分别为0.20、0.54和18.13 mg/kg;pH值变化范围为7.94~8.29(均值为8.12),变异系数为0.99%,整体变化较小,土壤颗粒组成虽有变化,但并未改变土壤类型(黄绵土)。因此,笔者将重点讨论施氮量变化对土壤养分的影响。施氮可显著影响土壤养分质量分数。总体而言,不同施氮处理间土壤中,全氮、全磷及硝态氮均无显著差异( $P>0.05$ )(表1)。这可能是由于上述养分被白羊草植物根系转化吸收,导致上述指标在土壤中差异不显著,而白羊草植物

特征差异显著。施氮能够显著增加凋落物产量<sup>[22]</sup>,从而提高有机质质量分数。土壤有机质随着施氮量的增加,整体表现为增加的趋势,当施氮量达到5 g/(m<sup>2</sup>·a)时,土壤有机质质量分数最高,是 $N_0$ 和 $N_{2.5}$ 处理的1.1倍;但随着施氮量的继续增加,土壤有机质有所降低, $N_{10}$ 处理下土壤有机质质量分数较 $N_5$ 处理减少9.6%,这主要是由于施氮量过大时,微生物活性较高,其分解作用可以加速有机质的分解速率,从而使有机质质量分数下降<sup>[23-24]</sup>。裸地对照处理(CK)土壤中,铵态氮质量分数显著高于不同施氮处理白羊草样地,是其白羊草样地的13.6~15.8倍。一方面是由于白羊草有效地吸收铵态氮,从而导致土壤中铵态氮质量分数降低;另一方面,氮添加会促进土壤中的铵态氮向硝态氮的转化,从而使铵态氮的质量分数降低。不施氮处理下,白羊草样地土壤速效磷质量分数最大,是施氮处理的1.3~1.4倍;但不同施氮处理间,土壤速效磷质量分数差异不显著( $p>0.05$ )。施氮导致土壤氮素增加,促进植物对磷素的吸收,产生“促动效应”<sup>[25]</sup>;但当施氮量达到一定水平时,该种促进作用减缓或被抑制,表现为后期不同施氮处理速效磷差异不显著。

表1 不同施氮处理间土壤养分差异

Tab. 1 Variations of soil nutrient under different nitrogen treatments

施氮处理 Nitrogen treatment	有机质 Soil organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/ (g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	3.31 ± 0.28c	0.21 ± 0.02a	0.54 ± 0.01a	0.95 ± 0.38a	0.55 ± 0.26a	21.48 ± 4.41a
$N_0$	3.53 ± 0.58bc	0.21 ± 0.02a	0.53 ± 0.02a	0.06 ± 0.02b	0.58 ± 0.23a	22.67 ± 2.51a
$N_{2.5}$	3.72 ± 0.45ab	0.21 ± 0.01a	0.53 ± 0.01a	0.06 ± 0.04b	0.55 ± 0.33a	16.85 ± 2.83b
$N_5$	3.94 ± 0.41a	0.22 ± 0.02a	0.54 ± 0.01a	0.06 ± 0.03b	0.62 ± 0.32a	16.71 ± 3.53b
$N_{10}$	3.56 ± 0.30abc	0.22 ± 0.02a	0.54 ± 0.01a	0.07 ± 0.04b	0.61 ± 0.36a	17.06 ± 3.29b

### 3 结论

以黄土高原典型地带性植被白羊草种群为研究对象,通过不同梯度的氮添加模拟氮沉降,系统研究土壤有效氮升高,对白羊草种群特征及土壤特征的影响,主要结论如下:

1)  $N_{2.5}$ 处理下,白羊草花序数量及株高均显著高于其他施氮处理。白羊草生长末期, $N_{2.5}$ 处理的花序数量达到311个,株高为80.5 cm,分别是其他施氮处理下相应指标的4.2~11倍和1.01~1.72倍。结果表明:虽然适量的施氮能不同程度地增加

白羊草花序数量和株高,但当施氮量超过某一阈值时,白羊草的氮素限制状态得到缓解,由有性繁殖向营养繁殖过渡,花序数量有所减少;但由于白羊草自身特征及施氮量过高时,白羊草盖度较大,从而影响光照,造成植株的纵向生长也有所限制。

2) 当施氮量为10 g/(m<sup>2</sup>·a)时,白羊草地上生物量最大,为323.02 g/m<sup>2</sup>,比其他处理增加8.14%~34.99%;当施氮量为5 g/(m<sup>2</sup>·a)时,白羊草根系生物量密度最大,为3.18 kg/m<sup>3</sup>,是其他施氮处理的1.1~1.8倍。不同施氮处理间,白羊草根系的总表面积与比表面积无显著差异,但二者均随着施氮量

的减小而增大。氮素是植物的必需元素,且土壤中的氮素过剩,能促进白羊草地上部分营养生长,表现为地上生物量增大。对于较低施氮量的处理( $N_0$ 、 $N_{2.5}$ 和 $N_5$ )其土壤处于氮素限制状态,需要更多的根系生物量及面积吸收氮素以维持植株生长;当氮素足够时,较小的根系吸收面积便可满足生长需求。因此,当施氮量较大时,根系生物量及表面积反而较小。

3) 当施氮量为 $5\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 时,土壤有机质质量分数最高,是其他处理的1.1倍。适量施氮能够显著增加枯落物,提高土壤有机质质量分数;但施氮量过大,导致微生物加速分解有机质,使其质量分数降低。由于白羊草的吸收及氮添加,使得铵态氮向硝态氮转化,裸地土壤中铵态氮质量分数是施氮处理的13.6~15.8倍,硝态氮质量分数随施氮量表现为增加趋势。由于施氮导致的土壤氮素增加,促进植物对磷素的吸收,因此, $N_0$ 处理下,白羊草样地土壤速效磷质量分数是施氮处理的1.3~1.4倍;但当施氮量达到一定水平时,该促进作用减缓,表现为施氮量较高的处理间,速效磷质量分数无显著差异。综上所述,施氮量的增加在一定程度上会影响白羊草对养分元素的吸收利用,进而对土壤中的养分元素的周转动态产生一定影响。

#### 4 参考文献

- [1] 韩永伟,高吉喜. 中国草地主要生态环境问题分析与防治对策[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 60.  
HAN Yongwei, GAO Jixi. Analysis of main ecological problems of grasslands and relevant countermeasures in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 60.
- [2] 马全会. 氮沉降背景下放牧对草甸草原植物群落特征的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2015: 1.  
MA Quanhui. Effects of grazing on meadow grassland community under nitrogen deposition[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015: 1.
- [3] 宗宁,石培礼,蒋婧,等. 施肥和围栏封育对退化高寒草甸植被恢复的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(6): 906.  
ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al. Effects of fertilization and grazing enclosure on vegetation recovery in a degraded alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2013, 19(6): 906.
- [4] 何丹. 改良措施对天然草原植被及土壤的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009: 1.  
HE Dan. Study on effects of improved measures on vegetation and soil of grassland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009: 1.
- [5] BLANKE V, BASSIN S, VOLK M, et al. Nitrogen deposition effects on subalpine grassland: the role of nutrient limitations and changes in mycorrhizal abundance[J]. Acta Oecologica, 2012, 45(6): 57.
- [6] 宋娟丽. 黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 1.  
SONG Juanli. The characteristics and evaluation on soil quality of grassland in Loess Plateau[D]. Yangling: Northeast Normal University, 2010: 1.
- [7] 董宽虎,米佳. 白羊草种群繁殖的数量特征[J]. 草地学报, 2006, 14(3): 212.  
DONG Kuanhu, Mi Jia. Quantitative characters of vegetative multiplication of *Bothriochloa ischaemum* populations[J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(3): 212.
- [8] 李存福. 无芒雀麦、紫花苜蓿繁殖特性及种子生产技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 56.  
LI Cunfu. Study on the reproductive characteristics and seed production technology of smooth brome grass (*Bromus inermis* Less.) & Alfalfa (*Medicago sativa* L.) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005: 56.
- [9] 李文达. N添加对白羊草种群特征及水土保持功能的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 10.  
LI Wenda. Effects of nitrogen additions on the propagation and soil and water loss of *Bothriochloa ischaemum* population[D]. Yangling: Northeast Normal University, 2015: 10.
- [10] 曲秋玲. 施氮对白羊草地上和根系形态及生理特征的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 19.  
QU Qiuling. Effect of N input on above- and below-ground morphological and physiological characteristics of *Bothriochloa ischaemum* [D]. Yangling: Northeast Normal University, 2012: 19.
- [11] 韩金锋. 模拟降水变化和氮沉降增加对高寒草甸主要优势植物物候及群落地上生物量的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2012: 25.  
HAN Jinfeng. Effects of simulated precipitation changes and increased N deposition on the phenology and biomass of plants in an alpine meadow[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012: 25.
- [12] 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): 39.  
ZHAN Shuxia, ZHENG Shuxia, WANG Yang, et al. Response and correlation of above- and below-ground func-

- tional traits of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 39.
- [13] 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: 40.  
NI Meijuan. Effects of nitrogen on the growth and N uptake of rice under different water conditions [D]. Yangzhou: Yangzhou University 2007: 40.
- [14] 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): 108.  
BAI Xue, CHENG Junhui, ZHENG Shuxia, et al. Ecophysiological responses of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions in a typical steppe [J]. Chinese Journal of Plant Ecology 2014, 38(2): 108.
- [15] 辛小娟. 氮、磷添加对亚高山草甸地上/地下生物量分配及植物功能群组成的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2011: 32.  
XIN Xiaojuan. Effects of N, P addition on above/below-ground biomass allocation and plant functional types' composition in a sub-alpine meadow [D]. Lanzhou: Lanzhou University 2011: 32.
- [16] 吴健. 草地早熟禾根系生长过程及吸水动态研究[D]. 北京: 北京林业大学 2011: 8.  
WU Jian. Root growth and water absorption dynamics of Kentucky Bluegrass [D]. Beijing: Beijing Forestry University 2011: 8.
- [17] 潘庆民, 白永飞 韩兴国, 等. 内蒙古典型草原羊草群落氮素去向的示踪研究[J]. 植物生态学报 2004, 28(5): 670.  
PAN Qingmin, BAI Yongfei, HAN Xingguo, et al. Studies on the fate labeled nitrogen applied to a *Leymus chinensis* community of typical steppe in Inner Mongolia grassland [J]. Acta Phytocologica Sinica 2004, 28(5): 670.
- [18] WANG Zhongqiang, WU Lianghuan, LIU Tingting, et al. Effect of different nitrogen rates on *Parthenocissus tricuspidata* plant seedling growth and nutrient distribution [J]. Acta Ecologica Sinica 2007, 27(8): 3435
- [19] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J]. 生态学报 2011, 31(18): 5125.  
QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al. Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels [J]. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(18): 5125.
- [20] 唐华, 郭彦军, 李智燕. 沼液灌溉对黑麦草生长及土壤性质的影响[J]. 草地学报 2011, 19(6): 942.  
TANG Hua, GUO Yanjun, LI Zhiyan, et al. Effects of slurry application on Ryegrass growth and soil properties [J]. Acta Agrestia Sinica 2011, 19(6): 942.
- [21] 戴诚, 康慕谊, 纪文瑶, 等. 内蒙古中部草原地下生物量与生物量分配对环境因子的响应关系[J]. 草地学报 2012, 20(2): 272.  
DAI Cheng, KANG MUYI, JI Wenyao, et al. Responses of belowground biomass and biomass allocation to environmental factors in central grassland of Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica 2012, 20(2): 272.
- [22] 卢蒙. 氮输入对生态系统碳、氮循环的影响: 整合分析[D]. 上海: 复旦大学 2009: 5.  
LU Meng. The effects of nitrogen additions on ecosystem carbon and nitrogen cycles: a Meta-analysis [D]. Shanghai: Fudan University 2009: 5.
- [23] 张宇. 荒漠草原土壤特性对增温和施氮的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学 2014: 17.  
ZHANG Yu. The response of soil properties to experimental warming and nitrogen addition in desert steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014: 17.
- [24] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应[J]. 生态学报 2004, 24(7): 1417.  
MO Jiangming, XUE Jinghua, FANG Yunting, et al. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica 2004, 24(7): 1417.
- [25] 马琳娜. 松嫩草原土壤有机碳、氮素、磷素对模拟增温及施氮的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2009: 23.  
MA Linna. Responses of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus to simulated warming and nitrogen application in Songnen grassland [D]. Changchun: Northeast Normal University 2009: 23.