

# N 添加对白羊草生长及种群特征的影响

李文达<sup>1</sup>, 王国梁<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1,2</sup>, 由政<sup>1</sup>, 邱甜甜<sup>1</sup>, 吕凤莲<sup>1</sup>, 李盼盼<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 分析 N 添加对白羊草(*Bothriochloa ischaemum*) 种群特征及繁殖策略的影响, 为评估氮沉降的生态影响提供科学依据。[方法] 以黄土高原地带性优势种群白羊草为对象, 设置对照 CK[0 g/(m<sup>2</sup>·a)], 低氮[2.5 g/(m<sup>2</sup>·a)], 中氮[5.0 g/(m<sup>2</sup>·a)] 和高氮[10.0 g/(m<sup>2</sup>·a)] 4 个 N 添加水平, 研究了为期两年的 N 添加对白羊草种群特征及繁殖策略的影响。[结果] (1) N 添加显著增加了白羊草种群的密度、株高和生物量, 其中中氮处理下种群生物量达到最大; (2) N 添加改变了白羊草生物量的分配策略, 根冠比随 N 添加量增大而减小, 支持功能平衡假说; (3) N 添加促进了白羊草种群的营养繁殖和有性繁殖, 提高了其繁殖竞争能力。[结论] 适度 N 沉降或 N 添加[<5 g/(m<sup>2</sup>·a)] 促进了白羊草种群的生长和发育, 有利于白羊草种群水土保持等生态功能的发挥。

**关键词:** N 添加; 种群特征; 生物量; 分配策略; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0174-05

中图分类号: S543.9

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.030

## Effects of Nitrogen Additions on Growth and Propagation of *Bothriochloa Ischaemum* Population

LI Wenda<sup>1</sup>, WANG Guoliang<sup>1,2</sup>, LIU Guobin<sup>1,2</sup>,

YOU Zheng<sup>1</sup>, QIU Tiantian<sup>1</sup>, LYU Fenglian<sup>1</sup>, LI Panpan<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to analyze the influences of N addition on population characteristics and reproduction strategies of *Bothriochloa ischaemum* population in order to assess the impact of N deposition on the ecological environment. [Methods] This study was conducted to investigate the responses of population characteristics and reproduction strategies of *B. ischaemum* population to N addition based on four N addition treatments, including control CK[0 g/(m<sup>2</sup>·a)], low nitrogen [2.5 g/(m<sup>2</sup>·a)], middle nitrogen [5.0 g/(m<sup>2</sup>·a)] and high nitrogen [10.0 g/(m<sup>2</sup>·a)] for two years. [Results] (1) The N addition significantly increased the height and biomass of *B. ischaemum* population, population biomass reached the maximum with middle nitrogen treatment. (2) N addition had changed the nutrient allocation strategies of *B. ischaemum*. Root-shoot ratio decreased with the increments of N addition. (3) N addition promoted sexual reproduction and vegetative propagation of *B. ischaemum* population, enabled its high ability of breeding and competition. [Conclusion] Moderate N sedimentation or N addition [<5 g/(m<sup>2</sup>·a)] can promote the growth and development of *B. ischaemum* population, and improve its ecological function in soil and water conservation.

**Keywords:** N addition; population characteristics; biomass; allocation strategy; Loess Plateau

收稿日期: 2015-01-17

修回日期: 2015-03-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“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”(D011004); 国家“十二五”科技支撑课题(2015BAC01B03)

第一作者: 李文达(1989—), 男(汉族), 河南省新乡市人, 硕士研究生, 研究方向为植物生理生态及流域生态学。E-mail: liwenda103@126.com。

通讯作者: 刘国彬(1956—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域治理和恢复生态学研究。E-mail: gblu@ms.iswc.ac.cn。

近些年来,人类活动尤其是大量使用化石燃料、农业氮肥等因素,加大了生态系统氮素的输入水平<sup>[1-2]</sup>。N 添加对陆地生态系统的物种构成、群落结构、系统稳定性等方面都有着显著影响,而作为全球生态系统中受到氮限制较为明显的草地生态系统,对于氮输入不断增加的响应日益受到人们的重视<sup>[3]</sup>。氮素不仅会促进植物个体的生长发育,还会对植物群落的组成、结构、功能以及生物多样性产生影响<sup>[4]</sup>。N 添加影响植物群落的影响途径体现在促使氮敏感的植物占据优势地位,从而改变群落组成,降低群落的生物多样性,不同物种尤其是优势种群对 N 添加的响应决定了群落的演化方向和趋势。然而,以往研究主要集中在群落尺度,关于不同种群尤其是优势种群如何响应 N 添加的机制研究较少。

白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)是黄土高原地区的典型地带性植被,也是北方草原的主要建群种和优势种之一,同时还具有优良的水土保持功能<sup>[5]</sup>。有研究表明,该地区的氮沉降水平为 4.7~19.2 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[6]</sup>,而根据预测,未来 40 a 中国草地生态系统仍面临较高的 N 沉降量<sup>[7]</sup>。白羊草种群作为该地区白羊草植被群落的优势种和建群种,其生产力、养分分配、繁殖策略的变化直接影响着该地区草地生态系统。因此,本次研究选取黄土高原的典型草原种群白羊草种群作为研究对象,通过连续 2 a(2013—2014 年)的 N 添加试验,研究白羊草的种群特征以及繁殖策略对 N 添加的响应程度以及变化机制,期望解释 2 个问题:① 白羊草种群对 N 添加的响应策略和机制;② 预测 N 沉降对白羊草种群的影响趋势及是否可能通过 N 添加提高白羊草草地管理。

## 1 材料与方法

### 1.1 人工白羊草种群小区构建

试验布设在陕西省杨凌(108°4′27.95″E, N34°16′56.24″)中国科学院水利部水土保持研究所试验田。该区属温带大陆性季风气候,年平均气温 13.2℃,降水 674.3 mm,日照 1 993.7 h,无霜期 225 d。以白羊草为试验材料,试验用种子和土壤均取自位于黄土丘陵区的延安市安塞县(109°14′E,36°92′N)。自制移动变坡式土槽共 12 个,尺寸规格为:长×宽×高(2.0 m×1.0 m×0.5 m),试验坡度为 15°。供试土壤为陕西安塞县表层土壤(0—20 cm),试验用土为黄绵土,土壤有机质含量为 4.125 g/kg,全氮含量为 0.212 g/kg,速效氮含量为 11.55 mg/kg。控制土壤干容重在 1.2 g/m<sup>3</sup> 左右,分层装土,每层厚度为 10 cm,填土总高度 40 cm。装土全部结束后于 2013 年

7 月,按照密度 10 cm×10 cm,深度 0.5 cm 种植白羊草。试验期间,除拔掉杂草外,不做任何人工处理。

### 1.2 N 添加处理

试验设置 4 个 N 添加水平,N 添加量分别为 0(CK),2.5(N<sub>2.5</sub>),5.0(N<sub>5</sub>)和 10(N<sub>10</sub>) g/(m<sup>2</sup>·a),每个处理设 3 个重复,共 12 个土槽。N 添加使用的氮肥为尿素,纯氮含量 46%,N 添加时将尿素充分溶解在 1 L 水中,雨前均匀灌入试验小区,对照组只喷洒相同体积的水。试验设计 2 a,2013 年份 N 添加在 2013 年 8 月 1 次性施入,2014 年份 N 添加在白羊草生长季(5—8 月)进行,每月添加 1 次,每次添加量为上述设置施 N 水平的 1/4。

### 1.3 种群特征测定

于 2014 年 8 月份测定白羊草种群的株高、株数、叶面积、分蘖情况。由于小区白羊草为人工种植,分布相对均匀,测定中随机选取 10 cm×10 cm 的 6 个样方,统计样方内植物株高、株数、叶面积及分蘖情况,并随机选取 6 个株丛测定株丛丛径、分蘖数、营养枝、繁殖枝数量。此后,贴地面剪下,70℃下烘干测定生物量;挖取对应样方下的土壤,采用冲根法获取地下根系,70℃下烘干测定生物量。各项指标计算方法采用潘庆民等<sup>[8]</sup>的计算方法。

### 1.4 数据处理

不同 N 添加水平下种群特征指标株高、密度、生物量、叶面积、根冠比、单株白羊草丛径、营养分蘖数、生殖分蘖数的差异显著性分别采用单因素方差分析(one-way ANOVA)。整个数学分析采用 SPSS 19.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 N 添加对白羊草种群株高、密度、生物量及叶面积的影响

从图 1a 可以看出,N 添加处理的白羊草种群株高显著高于对照( $p < 0.05$ ),N<sub>2.5</sub> 处理下白羊草种群高度最大,而 N<sub>10</sub> 和 N<sub>5</sub> 差异不显著( $p > 0.05$ )。与 CK 相比,各 N 添加梯度下白羊草种群高度增幅为 N<sub>2.5</sub>(64.8%),N<sub>5</sub>(53.6%),N<sub>10</sub>(30.8%),说明 N 添加有效地促进了白羊草种群的生长,增加了白羊草种群的高度,且随着 N 添加量的增加,其促进效应会随之减弱。

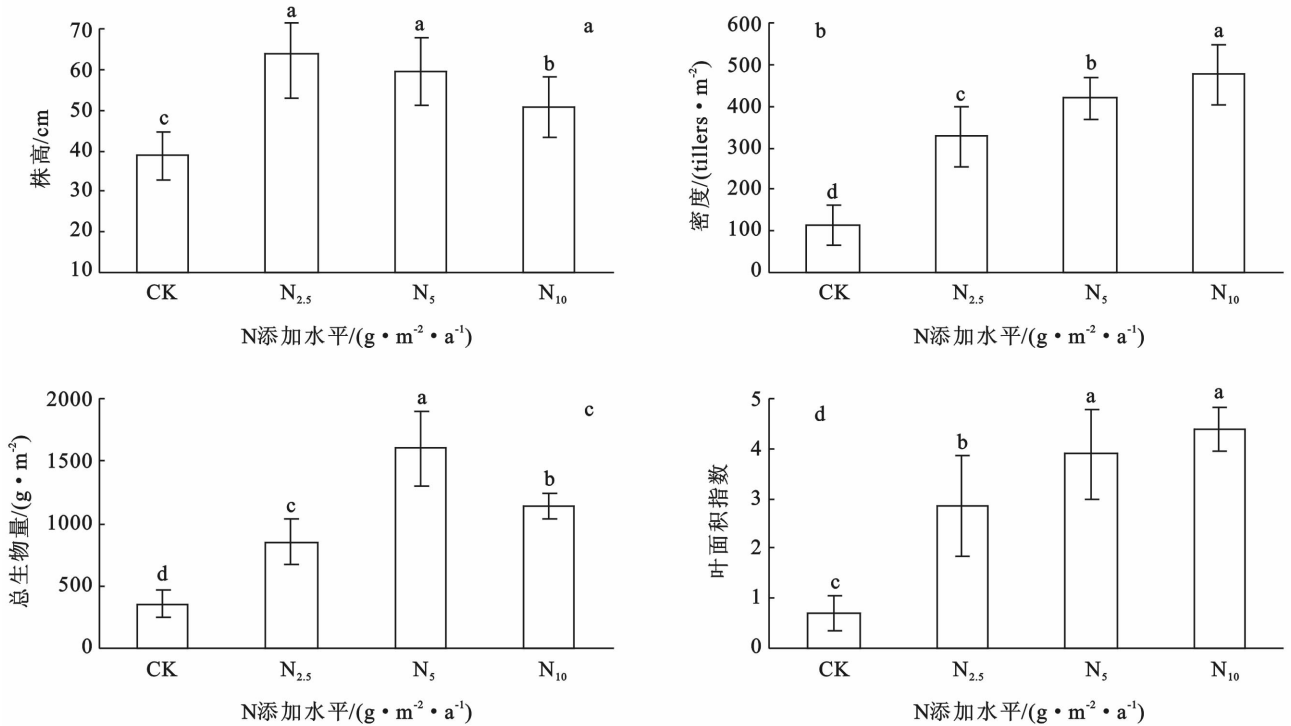
从图 1b 可以看出,氮素显著地提高了白羊草的种群密度( $p < 0.05$ )。与 CK 相比,随着 N 添加量的增加,密度也随着增加,密度振幅依次为 N<sub>10</sub>(314.5%)>N<sub>5</sub>(265.7%)>N<sub>2.5</sub>(184.2%)。说明氮素显著提高了白羊草的种群密度,促使种内竞争加剧。

从图 1c 可以看出, N 添加明显的增加了白羊草种群生物量( $p < 0.05$ ), 与 CK 相比, 各 N 添加下的白羊草生物量增幅依次为  $N_5$  (342.2%)  $> N_{10}$  (220.9%)  $> N_{2.5}$  (139.7%), 说明 N 添加会明显的促进白羊草种群生产力的提高。

叶片是植物进行光合作用的主要器官, 叶面积指数的大小在一定程度上标志着某一种群光合生产力的大小。从图 1d 可以看出, N 添加显著增加了白羊草种群的叶面积指数( $p > 0.05$ ), 叶面积指数随 N 添

加量的增加而增加,  $N_5$  和  $N_{10}$  处理下白羊草叶面积指数差异不显著( $p > 0.05$ )。

综上, N 添加显著的提高了白羊草的株高、密度、生物量和叶面积指数, 在不同氮梯度下,  $N_5$  处理下的白羊草种群密度较为合理, 种群生物量和叶面积指数最大, 种群生产力最高。而  $N_{10}$  处理下的种群密度较大, 生物量和叶面积指数较  $N_5$  处理有所下降。而  $N_{2.5}$  下种群高度最高, 且密度低于  $N_5$  和  $N_{10}$  处理, 说明其具有很大的发育潜力。



注: 不同字母表示不同处理间差异达显著水平( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 N 添加对白羊草种群株高、密度、生物量及叶面积指数的影响

## 2.2 氮素对白羊草种群生物量分配的影响

如图 2 所示, 各 N 添加处理下, 白羊草种群的总生物量, 地上生物量和地上生物量均显著增加( $p < 0.05$ )。在不同水平的 N 添加处理中, 随着 N 添加量的增加, 白羊草种群的地上和地下生物量均呈现先增加后减小的趋势, 在  $N_5$  水平下白羊草种群的生物量达到最大。其中,  $N_{10}$  的地上生物量高于  $N_{2.5}$  ( $p < 0.05$ ), 但地下生物量与  $N_{2.5}$  差异不显著( $p > 0.05$ )。与 CK 相比, 白羊草种群地下/地上生物量显著减小( $p < 0.05$ ),  $N_{2.5}$  处理下地下/地上生物量(0.47)大于  $N_5$ (0.27)和  $N_{10}$  处理(0.26), 但差异不显著( $p > 0.05$ ), 说明随着 N 添加量的增加, 白羊草种群在调控地下部分的生长, 将更多的营养物质分配到地上部分。以地下/地上生物量较大的  $N_{2.5}$  为例, 与对照组比较,  $N_{2.5}$  处理的地下生物量增加了 122.5 g/m<sup>2</sup>, 增

幅 89.1%, 地上生物量增加了 373.2 g/m<sup>2</sup>, 增幅 170.7%, 地上生物量的增幅远大于地下生物量的增幅, 表明氮素对调控植物地上部分生物量的增长作用更为显著。

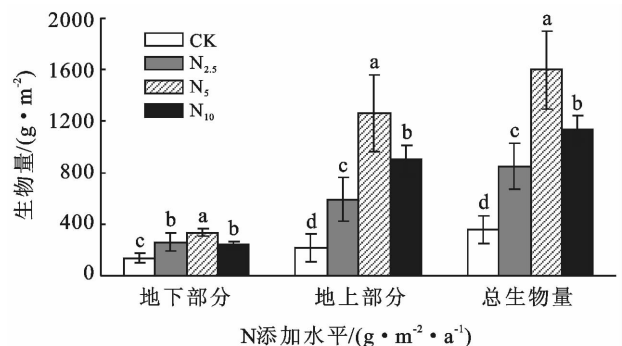


图 2 N 添加对白羊草种群地上和地下生物量的影响

### 2.3 氮素对白羊草种群繁殖的影响

丛径不仅是分蘖植物自身营养繁殖的重要生理指标,而且是体现种群个体间的竞争关系的重要指标。由图 3 可得,白羊草单株丛径和分蘖数随 N 添加量的增加而减小( $p < 0.05$ ),其中单株丛径  $N_{2.5}$  和  $N_5$  差异不显著( $p > 0.05$ ),而分蘖数  $N_5$  和  $N_{10}$  差异显著( $p < 0.05$ ), $N_{2.5}$  处理与两者差异不显著( $p > 0.05$ ),各 N 添加处理均显著高于 CK( $p < 0.05$ )。这表明,白羊草种群对 N 添加具有显著的响应,且在较高的 N 添加水平上,氮素的促进作用会减小。

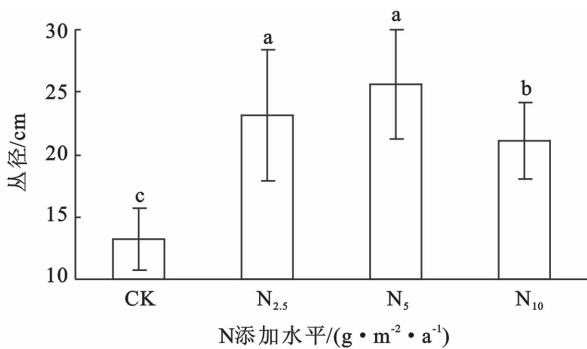


图 3 氮添加对白羊草种群丛径的影响

有性繁殖是白羊草种群繁殖的另一个重要途径,有性繁殖需要消耗大量的营养物质,因此,有性繁殖也是白羊草种群生理特征变化的重要指标。由图 4 可以看出,在本次试验中,白羊草种群的生育期和营养枝/繁殖枝均受到 N 添加的显著影响( $p < 0.05$ )。营养枝/繁殖枝表现了白羊草种群对繁殖策略的选择,与 CK 相比,N 添加处理下的白羊草养繁比明显较低( $p < 0.05$ ),其中  $N_{2.5}$  处理(2.11)低于  $N_5$ (3.53)和  $N_{10}$ (3.52),但差异不显著( $p > 0.05$ )。结果表明,N 添加会增加有性繁殖枝,影响白羊草种群的繁殖策略。

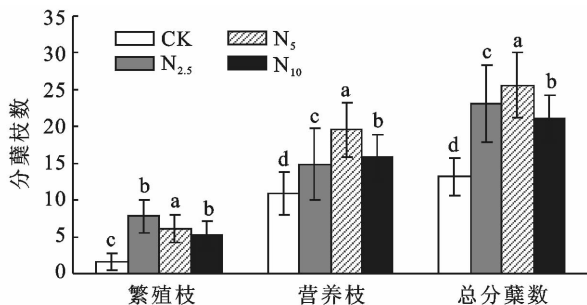


图 4 氮添加对白羊草种群分蘖分化的影响

## 3 讨论

### 3.1 N 添加对白羊草种群特征的影响

关于 N 添加对植物生物量的影响一直存在争

议,一部分研究表明,N 添加对生物量没有显著影响<sup>[9]</sup>,而另外一些试验结果则说明 N 添加明显增加了植物的生物量<sup>[10]</sup>,但 N 添加对株高、密度等指标的影响则结论较为一致,即 N 添加会显著增加植株株高和密度<sup>[9-10]</sup>。存在不同试验结果的原因可能一方面是不同的物种对于 N 添加的敏感性不同所致,另一方面很可能与其他生态因子如水分、温度等有关。本次研究支持 N 添加增加白羊草生物量、株高、密度以及叶面积的观点,说明白羊草种群对 N 添加较为敏感,这也说明,本研究区土壤中 N 含量较低(0.212 g/kg),植物生长仍然受到 N 限制,这与 LeBauer<sup>[11]</sup>,王力等<sup>[12]</sup>认为该区属于 N 限制地区的观点一致。

研究表明,随着 N 添加量的增加,白羊草种群生物量、株高都呈现先增加后减小的趋势,而密度呈现逐渐增大的趋势。这与曲秋玲等的研究较为一致<sup>[13]</sup>,但是白宏兵<sup>[14]</sup>的研究发现,白羊草种群的高度在不断增加。而关于其他草本植物的 N 添加试验表明,植物高度均随 N 添加量增加而增加,与其他研究结果的差异可能是由于不同环境因子差异、物种间对氮素的阈值不同导致的。高氮素可能会对植物正常生长发育产生抑制作用,而从种群角度来说,N 添加会增加种群密度,加剧了种内竞争,反而会抑制种群的生长发育。本次研究表明,在氮沉降初期,氮素输入量较少时会对植物种群有促进作用,可以尝试在白羊草种群发育初期施用少量氮肥,加快其演替速度。但应该关注白羊草种群的氮素输入量,以及高氮量持续施入对白羊草种群的影响。

### 3.2 氮素对白羊草种群地下部分和地上部分生物量分配的影响及分配策略的选择

本研究表明,与 CK 相比,N 添加会显著增加植物地上和地下部分的生物量,而地上部分生物量的增幅高于地下部分的增幅,说明 N 添加改变了白羊草对营养物质的分配策略,使更多的营养物质分配到地上部分。而关于 N 添加对地下部分的影响,主要存在 3 种观点,即:无影响<sup>[15]</sup>,生物量增加但根冠比减小<sup>[8]</sup>,生物量减小<sup>[13]</sup>。本次研究支持随 N 添加量增加,地下根系生物量增加,根冠比减小的观点。根据功能平衡假说,当植物生长受到某种资源限制时,植物将会优先向吸收该资源的器官分配光合产物<sup>[16]</sup>。由于地下部分是获取养分和水分的器官,当 N 添加逐渐增加时,植物更多的受到地上光照的限制,而受到 N 限制的情况得到缓解,因此,根系得到的光合产物会不断下降,地上部分得到更多的光合产物以获取更多的光照。这与王国梁等<sup>[17]</sup>对油松光合产物的分配模式研究一致。

### 3.3 N 添加对白羊草生殖策略的影响

白羊草丛径和分蘖是白羊草重要的营养繁殖特征。本次研究中,白羊草丛径和分蘖数随 N 添加量的增加而减小。而以往研究发现,随着 N 添加量的增加,丛径和分蘖数逐渐增加<sup>[18]</sup>,这可能是由于中氮和高氮下,白羊草种群密度大于低氮梯度,种内竞争加剧,白羊草种群通过调节自身营养繁殖来适应种群密度。有性繁殖和无性繁殖是白羊草繁殖的两大途径,有性繁殖是营养繁殖的基础,对于种群的发展具有决定性作用<sup>[5]</sup>,因此有性繁殖也是植物种群竞争力和发展潜力的重要体现。本次研究中,比较对照组和 N 添加处理组的营养枝/繁殖枝数值,表明了 N 添加处理下白羊草种群的有性繁殖远大于对照组,生殖枝的增加标志着种群生活力和物种竞争力的提升,这与之前的研究较为一致<sup>[8]</sup>。对于白羊草来说,有性繁殖由于并不是主要的繁殖方式,可能对种内竞争的影响不大,但是对于种间竞争,尤其是对于种群范围外空间的争夺具有促进作用,提高了物种的竞争优势。

由于白羊草是多年生植物,本次研究未能表明 N 添加对白羊草种群的长期影响,N 添加水平的进一步定量、对土壤理化性质的研究亦尚未涉及,因此还需要进一步的试验研究。

## 4 结论

N 添加显著地促进了白羊草株高、密度、生物量以及叶面积指数的增长,在不同氮梯度下,N<sub>5</sub> 处理下的白羊草种群密度较为合理,与 CK 比较,种群生物量增长 342.2%,高度增幅 53.6%,密度增幅 265.7%,叶面积指数达到 3.87;随着 N 添加的增加,白羊草地上生物量不断增加,而地下生物量则呈现先增加后减小的趋势,根冠比不断减小,N 添加显著地影响了白羊草对光合产物的分配策略;N 添加明显地促进了白羊草的营养繁殖,白羊草丛径及分蘖数都显著提高,同时 N 添加也有效地提高了有性繁殖的数量,影响了白羊草的生殖策略。

总体来看,N 添加有效地提高了白羊草种群的生产力,促使白羊草种群增加地上部分的养分分配,增强了白羊草营养繁殖和有性繁殖能力,有助于其保持和扩大优势地位。说明氮沉降量在中氮水平时可以促进白羊草种群的生长发育,但是应该注意 N 添加超过这一梯度时的种群变化。此外,中氮也可以作为白羊草草地的参考施肥水平。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, et al. Con-

temporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets[J]. *Biogeochemistry*, 1999,46(1):7-43.

- [2] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human Domination of Earth's Ecosystems[J]. *Science*, 1997,277(5335):494-499.
- [3] 吕超群,田汉勤,黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J]. *植物生态学报*,2007,31(2):205-218.
- [4] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, et al. Nitrogen Saturation in Northern Forest Ecosystems[J]. *Bioscience*, 1989,39(6):378-386
- [5] 许庆方,董宽虎. 温性灌草丛类建群种:白羊草[J]. *草原与草坪*,2004(3):20-24.
- [6] 梁婷,同延安,林文,等. 陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异[J]. *生态学报*,2014,34(3):738-745.
- [7] Yang Haijun, Li Yang, Wu Mingyu, et al. Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: The importance of water availability and species traits [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(9): 2936-2944.
- [8] 潘庆民,白永飞,韩兴国,等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. *植物生态学报*,2005,29(2):311-317.
- [9] 陈静,李玉霖,崔夺,等. 氮素及水分添加对科尔沁沙地 4 种优势植物地上生物量分配的影响[J]. *中国沙漠*, 2014,34(3):696-703.
- [10] 何丹,李向林,万里强,等. 施用氮肥对白羊草个体和种群特征的影响[J]. *草地学报*,2009,17(4):515-519.
- [11] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. *Ecology*, 2008,89(2):371-379.
- [12] 王力,李裕元,李秧秧. 黄土高原生态环境的恶化及其对策[J]. *自然资源学报*,2004,19(2):263-271.
- [13] 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.
- [14] 白宏兵. 施氮对黄土高原丘陵沟壑区不同退耕年限植被群落以及土壤养分的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [15] 杨晓霞,任飞,周华坤,等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. *植物生态学报*,2014,38(2):159-166.
- [16] Grechi I, Vivin P, Hilbert G, et al. Effect of light and nitrogen supply on internal C:N balance and control of root-to-shoot biomass allocation in grapevine[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007,59(2):139-149.
- [17] Wang Guoliang, Liu Fang. Carbon allocation of Chinese pine seedlings along a nitrogen addition gradient[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014(334):114-121.
- [18] 牛建伟,雷占兰,周华坤,等. 种植密度和施氮水平对垂穗披碱草生物量分配的影响[J]. *草业科学*,2014,31(7):1343-1351.