

DOI: 10.5846/stxb201508141706

秦洁, 鲍雅静, 李政海, 张靖, 孟根其其格, 李梦娇. 氮素添加和功能群去除对糙隐子草和大针茅根系特征的影响. 生态学报, 2017, 37(3): - .
Qin J, Bao Y J, Li Z H, Zhang J, Menggen Qiqige, Li M J. The response of *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis* root characteristics to nitrogen adding gradient and removal of function groups. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

氮素添加和功能群去除对糙隐子草和大针茅根系特征的影响

秦洁^{1,2}, 鲍雅静^{1,*}, 李政海¹, 张靖¹, 孟根其其格^{1,3}, 李梦娇^{1,4}

1 大连民族大学环境与资源学院, 大连 116600

2 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010018

3 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021

4 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021

摘要: 由于草地不合理利用, 中国北方草原严重退化, 导致生态系统结构性破坏甚至功能性紊乱。随着草原退化, 中能值功能群植物糙隐子草会取代高能值功能群植物大针茅成为群落中优势度最大的植物。为了解大针茅和糙隐子草在氮素添加以及去除功能群的情况下根系特征的变化趋势, 选取锡林郭勒盟典型草原中的退化草原群落, 分别开展两项实验, 实验 1: 氮素添加梯度实验(0、10.5、17.5、28 gN/m²), 实验 2: 同时进行功能群的去除和氮素的添加, 功能群去除实验(将植物分为高能值植物功能群、中能值植物功能群、低能值植物功能群 3 个功能群; 每个处理分别剪除另外两个功能群, 留取单一功能群), 并同时开展氮素添加实验(0、17.5 gN/m²)。在进行两年的实验处理后, 通过 Delta-T SCAN 根系分析仪测量大针茅和糙隐子草根系的长度、直径、面积、体积指标。分析植物根系对氮素添加的响应, 以及功能群去除是否改变这两种植物对氮素添加的响应格局。实验 1 研究表明: 在受到其他功能群的竞争压力下, 大针茅根系长度、面积、体积均在高氮素添加(28 gN/m²) 情况下显著增加, 糙隐子草根系直径和体积在中氮素添加(17.5 gN/m²) 的情况下显著高于其他 3 个处理, 退化样地中土壤氮素的增加, 促使大针茅根系主要通过增加根系长度扩大在土壤中的空间分布, 而促使糙隐子草主要通过增粗生长来扩大土壤分布空间。实验 2 研究结果表明: 功能群的去除, 中氮素添加对根系的影响, 只有糙隐子草的根系直径显著增加。综合来看, 功能群去除实验对大针茅的根系长度和面积有影响, 对糙隐子草的根系长度、直径和面积有影响。功能群去除处理与氮素添加的交互作用对大针茅根系没有影响, 对糙隐子草的根系直径和体积有影响。

关键词: 大针茅; 糙隐子草; 氮素; 根系; 功能群

The response of *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis* root characteristics to nitrogen adding gradient and removal of function groups

QIN Jie^{1,2}, BAO Yajing^{1,*}, LI Zhenghai¹, ZHANG Jing¹, MENGGEN Qiqige^{1,3}, LI Mengjiao^{1,4}

1 College of Environmental & Resource Sciences, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China

2 College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

3 College of Life Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

4 College of Environmental & Resource Sciences, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

Abstract: Overgrazing has severely degraded the grassland of Northern China causing serious loss of soil nitrogen (N). Along with the degraded steppe, *Cleistogenes squarrosa* will replace *Stipa grandis*, which was the original dominant species, to become the dominant plant in the community. In order to understand this transition, a study was made to examine the

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(DC201502070303); 国家自然科学基金(30771528); 国家火炬计划项目(2012GH531899)

收稿日期: 2015-08-14; 网络出版日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: byj@dlnu.edu.cn

effect of N and selected functional plant groups on the rooting characteristics of *S. grandis* and *C. squarrosa*. Two experiments were conducted in degraded grassland communities that were dominated by *C. squarrosa* on the Xilingol steppe. In Experiment 1, N addition along an increasing gradient (0, 10.5, 17.5, 28 g N · m⁻²) was conducted on a degraded community. In Experiment 2, two of three functional groups (high-energy, middle-energy and low-energy functional groups) were removed (1, 0, 0; 0, 2, 0; and 0, 0, 3) and adding N fertilizer (0, 17.5 g N · m⁻²) in a factorial arrangement. After two years, the root length, diameter, area, and volume of *S. grandis* and *C. squarrosa* were measured using a Delta-T SCAN analyzer. Root response to N fertilizer as well as to the removal of functional groups, with two N levels, were analyzed. Under pressure from competition by other functional groups, the root length, area, and volume of *S. grandis* significantly increased under high N fertilizer (28 gN/m²) while root diameter and volume of *C. squarrosa* with 17.5 gN/m² were significantly higher than the other three N application rates. In Experiment 2, we did not detect a response in *S. grandis* to nitrogen addition (17.5 gN/m²) while removing functional groups but the root diameter of *C. squarrosa* increased significantly. In general, removal of plant functional groups affects the root length and area of *S. grandis* and the root length, diameter and area of *C. squarrosa*. While the interaction between nitrogen addition and removal of plant functional groups affects the root diameter and volume of *C. squarrosa*, and it did not affect *S. grandis*.

Key Words: *Stipa grandis*; *Cleistogenes squarrosa*; nitrogen; root; functional group

锡林郭勒草原是我国西北干旱区向东北湿润区和华北旱作农业区的过渡区^[1], 由于气候的波动、人类活动的加剧以及不合理的利用和管理使得锡林郭勒草原植被退化、生产力下降、土地沙化、水土流失加重, 生态系统功能失调, 对北方地区可持续发展造成严重威胁, 成为全球变化响应的敏感区。所以采取必要措施维护草原生态的稳定, 对保护我国生态安全意义重大^[2]。要实现草地的可持续性发展, 必须实现以生态恢复为主的策略方向^[3]。

对于退化草地的生态恢复, 国内外的学者做了大量研究, 有土地管理方式^[4-7]、草原灌溉技术^[2,8]、施肥改良技术^[9-10]以及翻耕^[11-13]、火烧^[14]、补播^[15-16]、化学修复等措施^[17]。长期退化的草原中生态系统的物质和能量每年不断向系统外流失, 造成土壤基质中营养物质的严重亏空, 在这些限制性资源元素中氮素的需求量最大, 植被单凭生物固氮所吸收的氮素远远不够其生长所需, 所以近年来有学者开展施氮肥对退化草原生态系统的修复方面的研究^[1]。只有生态系统维持物质流动的动态平衡和长期稳定的状态, 草地畜牧业才能可持续发展下去, 所以施氮肥对典型草原退化草地恢复情况的研究显得极为重要。

锡林郭勒典型草原常以针茅、羊草和蒿类等为群落的建群种或优势种^[18], 而糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*) 为疏丛型禾草, 典型草原旱生种, 极广泛分布于草原带, 是大针茅草原、羊草草原的下层优势种, 随着草地退化演替成为优势度最大的植物, 即形成糙隐子草占优势的小禾草草原群落^[19]。这种群落建群种和优势种的更替是群落处于不同演替阶段的标志^[20]。糙隐子草作为一种草地退化的指示性植物, 如果草地退化进一步加剧, 糙隐子草将会被适口性较差的杂类草所取代^[19]。而在近年来退化草地恢复的研究中, 有些报道涉及到糙隐子草与大针茅 (*Stipa grandis*) 之间的关系^[21-22], 张建丽等^[5]研究发现在割草场和四季围封两种土地管理方式下群落优势种由糙隐子草过渡为大针茅, 群落恢复。但是研究退化草原中氮素添加梯度下糙隐子草与大针茅各自的变化趋势以及两者的相互关系还未见报道。

近年来, 国内研究者开始关注功能群在解释多样性和生态系统功能关系等方面的重要性^[23-24]。基于植物热值的能量功能群分类, 可以综合地反映植物生理生态过程的变化, 以及不同物种的竞争与共存机制, 进而更为准确地反映不同植物群体在草原生态系统中的功能地位^[25]。在一个植物群落中共存的不同功能群可能从不同的空间和时间生态位上利用土壤养分^[26]。Davise^[27]等研究了不同功能群的去除对土壤无机氮浓度的影响, 结果表明了功能群的去除整体上增加了土壤无机氮的浓度。不同功能群利用土壤养分模式的差异意味着功能多样性对于整个生长季中土壤养分的利用非常重要^[28]。Fornara 等^[29]研究表明功能群多样性的增加

促进了植物对氮素的有效利用,根系的氮素逐渐积累,促进了植被根系生长。由于功能群在利用资源上的时空差异,维持和提高功能多样性将是充分利用土壤养分的合理方法,所以去除实验更多地选用功能群的去除而不是单一物种的去除。大针茅和糙隐子草是高能值植物的代表种,在草地退化和恢复过程中较为活跃和敏感,大针茅根系构型为密丛型^[30],糙隐子草根多集中分布在 0—10cm 土层内,每一株具两条根,只有在风沙土中长度较长分支也较多^[30]。生长在一起的植物个体,其根系生长发育,相互交错穿插,吸收土壤介质中的营养物质和元素,相互邻近植物根系吸收其周围土壤中养分,造成该共有区域土壤养分耗竭、供应不足,引起对养分的争夺。不同功能群之间的生态和生理特征有所差别,根系形态亦不相同,这就决定了功能群之间的养分竞争表现形式和功能群内竞争不同,具有不一致性^[31]。

国内对于氮素改善退化草地研究已经有相关报道,黄军等^[32]研究表明施氮肥能够明显改善退化植物种群结构、增加牧草种类、提高草地生物量、显著改善 0—20cm 土层土壤肥力。秦洁等^[33]研究发现在重度退化草地中土壤氮素的增加促使大针茅根系长度的增加,李禄军等^[34]研究科尔沁沙地表明氮素添加改变了群落优势种。但任祖淦等^[35]研究发现,若施氮肥超量,可能导致植物硝酸盐积累超标。盲目的大量施肥既危险成本又高,而人为大量投入肥料所产生的投入产出比例失衡,会导致草原生态系统失去可持续性的良性发展,所以修复退化草原施肥需要更为系统的量化研究。

本研究重在通过对大针茅和糙隐子草根特征在氮素添加梯度中的关系进行研究,揭示施氮素是否有助于退化草原的恢复以及哪个施肥程度最为有利,使得以糙隐子草为优势种的退化草原恢复成为大针茅为优势种的草原,为氮素施肥低成本高效率的修复方式提供科学依据。去除功能群实验旨在研究在去除功能群之间的竞争以后对于氮肥施加的效果是否有变化,进一步验证土壤中氮素养分的增加导致的变化有无功能群间竞争的影响,探讨在退化草地恢复过程功能群之间的关系以及施加氮肥对草地恢复进程的影响,从而探索群落恢复的共性规律,为内蒙古典型草原退化草地的恢复提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

锡林郭勒盟属于中温带半干旱大陆性气候。其主要气候特点是风大、干旱、寒冷。年平均气温 0—3℃,年较差为 35—42℃。降雨多集中在 7、8、9 三个月内,大部分地区年降水量 200—300mm,自东向西递减。蒸发量在 1500—2700mm 之间,最大值出现在 5—6 月份,由东向西递增,年平均相对湿度在 60% 以下。年日照时数为 2800—3200h,日照率 64%—73%。试验区位于内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场境内(N: 43°38′, E: 116°42′),海拔 1187m。典型草原群落是本地区分布最广的草原类型。群落内的植物种类组成比较丰富,主要有大针茅、糙隐子草、羊草(*Leymus chinensis*)和一些杂类草等。

1.2 研究方法

1.2.1 实验样地的选取

本研究选择的实验样地位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站研究区样地附近,实验样地设置如下:牧民长期自由放牧样地,已发生严重退化,于 2008 年围封作为实验样地。由于样地为放牧样地表层土壤的养分、水分的变化最为明显,且草本植物根系大多集中在 0—10cm 土层中^[36-37],且氮沉降对于土壤 0—10cm 的影响最显著^[36],所以在实验开始前对样地 0—10cm 土壤概况见表 1。在对植物热值进行分析测定的基础上,依据植物的能量属性-单位重量干物质在完全燃烧后所释放出来的热量值,采用人为分段的方法对草原植物进行了能量功能群的划分:高能值植物功能群(热值>18.00kJ/g)、中能值植物功能群(18.00 kJ/g>热值>17.00 kJ/g)和低能值植物功能群(热值<17.00 kJ/g)^[25],高能群植物包括大针茅、羊草、羽茅,中能群植物包括糙隐子草、冰草、苔草、洽草、野韭,低能群植物包括唐松草、星毛委陵菜、刺穗黎、猪毛菜、灰绿黎。在样地中,中能群相对生物量最高,其次是高能群,低能群最低,其中属高能群植物的大针茅相对生物量为 20.4%,占高能群的生物量比例为 52.1%;属中能群的糙隐子草相对生物量为 34.3%,占中能群生物量比例为 69.2%。

(见表 2)

表 1 样地植被特征与 0—10cm 土壤概况

Table 1 Vegetation characteristics and 0—10cm soil condition of sample plot

土壤总有机碳 Soil total organic carbon/%	土壤全氮 Soil total nitrogen/ (g/kg)	土壤含水量 Soil water content/ (g/kg)	地上生物量 Above ground biomass/ (g/m ²)	地下生物量 Underground biomass/ (g/m ²)	物种数/种 Species number	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	主要物种组成 Main species composition
1.92	2.25	6.74	62.38±11.23	496.95±66.67	17	1.41	大针茅(相对生物量为 34.43%, 密度为 10.2 株/m ²), 糙隐子草(相对生物量为 20.37%, 密度为 65.9 株/m ²), 羊草, 米氏冰草 <i>Agropyron michnoi</i> Roshev, 刺德藜 <i>Chenopodium aristatum</i> , 冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>

表 2 样地植被功能群生物量

Table 2 The above-ground biomass of function group

功能群 Function group	功能群相对生物量/% Function of relative biomass	代表种 Typical specie	占功能群生物量/% Plant of function biomass
高能量功能群 High-function group	40.3	大针茅	69.21
中能量功能群 Mid-function group	54.2	糙隐子草	52.11
低能量功能群 Low-function group	5.5	—	—

1.2.3 实验设计与方法

2008 年在研究样地中选取 100×100m 的草场一块,并用围栏进行围封,作为定位实验样地,设置两个实验区,其中一个用于群落水平的实验研究,设计 4 个氮素添加梯度,氮素添加水平参照潘庆民^[38]氮素添加实验的处理和实验结果设置。0、10.5、17.5 和 28 gN/m²,4 个水平,分别代表对照、低氮、中氮和高氮生境。另一个是去除功能群的实验区,分为 3 个小区,对实验区分别进行植物能量功能群的去除,分别保留高、中、低单一功能群,植物能量功能群的分类参照鲍雅静^[25]的植物功能群划分方法。在一块样地内采用随机区组方法施加上述氮素水平的硝酸铵(NH₄NO₃),4 个处理依次为:N0(不添加氮素),N10.5(添加 30gNH₄NO₃m⁻²),N17.5(添加 50gNH₄NO₃m⁻²),N28(添加 80gNH₄NO₃m⁻²)稀释于少量水中均匀喷洒实验区,每个氮素水平设置 5 个重复(共 20 个 2m×2m 的实验小区,每个小区中间设置一个 1m×1m 的固定样方,每个小区之间留 0.5m 的过道)。为了保证氮素是唯一限制因子,对所有处理施用适量 KH₂PO₃以排除 P、K 限制对本实验的干扰。另一块样地用于单一功能群的实验研究,去除功能群并同时进行氮素添加,将植物按能量功能群分类(高能值植物、中能值植物和低能值植物),每个处理剪除另外两个功能群,分别保留高、中、低单一功能群,并同时进行氮素添加(2 个 N 素梯度处理 0、17.5gN/m²),故 3 个留取单一功能群×2 个氮素添加,共 6 个处理,每个处理 5 个重复,采用随机区组方法进行实验小区的设计,共 30 个 2m×3m 的实验小区,每个小区内设置 1×1m 的固定样方,另外留出 1m×2m 的取样区,每个小区之间留 0.5m 的过道。氮素添加于 2009 年 5 月 1 日和 2010 年 5 月 1 日实施(与生长季相对应),留取单一功能群实验区则从生长季开始每隔 10 天剪割一次,每个处理只留取一个功能群,将另外两个功能群的植物齐地面剪割。

2010 年 8 月中旬草本植物生长旺盛期,对每个处理中分别随机选取 3 个重复处理样地,挖取深度为 50cm 的 30cm×30cm 的带有地上植被的土方,放置沙袋中冲洗。带回室内后,在每个处理的 3 个土方沙袋中分别随机选取 10 株完整的大针茅和糙隐子草植株(表 2 表明样地中高能群植物中大针茅占优势,中能群植物中糙隐子草占优势),然后使用 Delta-T SCAN 根系分析系统的扫描仪对草样根系进行扫描,样品图像扫描后输送到计算机中,并利用根系分析系统中图像分析软件分析草样根系的长度、直径、面积、体积等根系构型特征。

1.2.4 数据统计分析

实验数据用 Excel 软件整理,利用 SPSS-statistics 20 对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVAs)分别分析不去除功能群草地中糙隐子草和大针茅在氮素添加梯度间的差异,Duncan 假定方差齐性检验用于不同处理之间根系特征的多重比较,采用独立样本 T 检验分别比较糙隐子草和大针茅在去除功能群情况下氮素添加的差异。多元分析进一步验证氮素添加和功能群处理对植物根系的影响,以及两者交互对植物根系的影响。

2 结果分析

2.1 不去除功能群情况下糙隐子草和大针茅对氮素添加的响应

在不去除功能群的样地中,糙隐子草和大针茅根系直径对氮素添加梯度的响应(图 1,表 5)表明,糙隐子草根直径在不同氮素处理之间有显著差异($P < 0.05$),在 17.5 gN/m^2 处理下显著高于其他 3 个处理(0、10.5、28 gN/m^2),而大针茅根系直径对不同氮素处理之间差异不显著。

对于两种植物的根系长度(图 2,表 5),糙隐子草根长度在不同氮素处理之间没有显著差异,大针茅根系长度在氮素添加为 28 gN/m^2 处理下显著高于其他 3 个处理(0、10.5、17.5 gN/m^2) ($P < 0.05$)。

比较糙隐子草和大针茅根系面积对氮素添加的响应(图 3,表 5),糙隐子草根面积在不同氮素处理之间差异不显著,而大针茅根系面积在氮素添加为 28 gN/m^2 处理下显著高于其他 3 个处理(0、10.5、17.5 gN/m^2) ($P < 0.05$)。

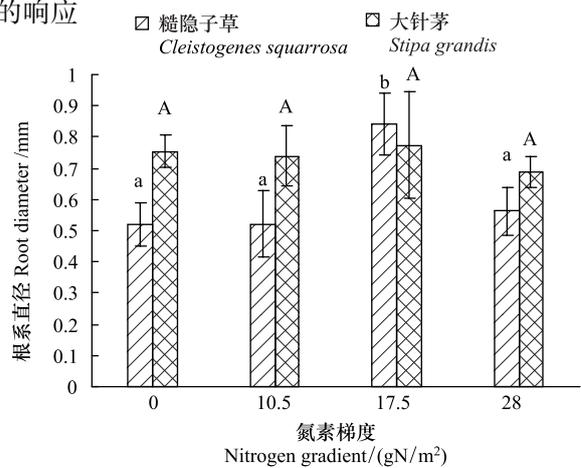


图 1 糙隐子草和大针茅根系直径对氮素添加梯度的响应
Fig.1 The response of *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis* root diameter to nitrogen adding gradient
字母不同者表示数值间差异显著($P < 0.05$)

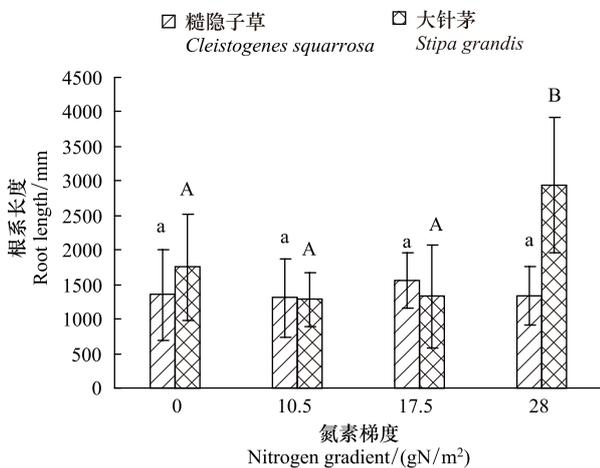


图 2 糙隐子草和大针茅根系长度对氮素添加梯度的响应
Fig.2 The response of *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis* root length to nitrogen adding gradient

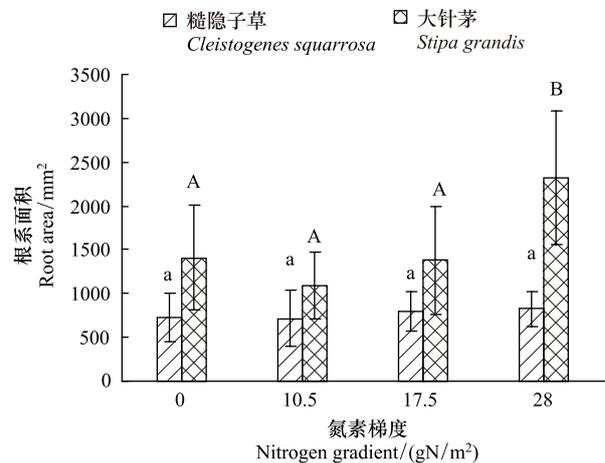


图 3 糙隐子草和大针茅根系面积对氮素添加梯度的响应
Fig.3 The response of *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis* root surface area to nitrogen adding gradient

比较糙隐子草和大针茅根系体积对氮素添加的响应(图 4,表 5),两种植物的根系体积对于氮素添加处理均有显著性响应($P < 0.05$),糙隐子草在 17.5 gN/m^2 处理下显著高于其他 3 个处理(0、10.5、28 gN/m^2),而

大针茅根系体积随氮素梯度的增加而显著增加,在氮素添加为 28 gN/m²处理下显著高于 0 和 10.5 gN/m²。

用根系的直径和长度自动换算的根系体积和面积结果表明,糙隐子草根系体积的变化主要是由根系直径的变化引起的,而大针茅根系面积和体积的变化主要是由根系长度的变化引起的。

2.2 去除功能群情况下氮素添加对糙隐子草和大针茅根系的影响

实验结果表明(表 3),在去除高、低功能群后的样地中,氮素添加为 17.5 gN/m²处理与没有氮素添加的处理相比,糙隐子草根系长度、表面积与体积均没有显著变化,但是根系直径在氮素添加情况下显著高于没有氮素添加的处理。

与不去除功能群情况下糙隐子草对氮素添加的响应(见图 1—4)相比,在中氮素(17.5 gN/m²)添加情况下,糙隐子草的根系直径在中氮素的情况下高于其他氮素处理,这与去除功能群的结果相一致;去除功能群中糙隐子草根系体积有所增加但是没有达到像不去除功能群那样的显著差异。

表 3 去除功能群情况下糙隐子草根系对氮素添加的响应

Table 3 The response of *Cleistogenes squarrosa* root system to nitrogen adding under remove function group

氮素梯度 Nitrogen gradient/(gN/m ²)	0	17.5
根系长度 Root length/mm	2090.4±559.86a	1881.31±310.61a
根系直径 Root diameter/mm	0.519534±0.07a	0.842658±0.10b
根系面积 Root area/mm ²	1231.437±324.84a	1301.05±213.61a
根系体积 Root volume/mm ³	1.18412±0.45a	1.41356±0.35a

字母不同者表示数值间差异显著($P<0.05$)

实验结果表明(表 4),在去除中、低功能群后的样地中,氮素添加为 17.5 gN/m²的处理与不施氮的对照相比,大针茅根系长度、直径、面积与体积均没有显著差异。

表 4 去除功能群情况下大针茅根系对氮素添加的响应

Table 4 The response of *Stipa grandis* root system to nitrogen adding under remove function group

氮素梯度 Nitrogen gradient/(gN/m ²)	0	17.5
根系长度 Root length/mm	2302.58±561.63 a	2284.41±672.64 a
根系直径 Root diameter/mm	0.72165±0.08 a	0.764432±0.08 a
根系面积 Root area/mm ²	1913.94±536.00 a	2092.11±539.84 a
根系体积 Root volume/mm ³	2.63537±1.21 a	2.809933±1.19 a

注:字母不同者表示数值间差异显著($P<0.05$)

多变量分析表明(表 5),功能群去除实验对大针茅的根系长度和面积有影响,对糙隐子草的根系长度、直径和面积有影响。然而功能群去除处理与氮素添加的交互作用对大针茅根系没有影响,对糙隐子草的根系直径和体积有影响。

3 讨论

3.1 氮素添加对大针茅和糙隐子草根系特征的影响

在不进行功能群去除的样地中,存在不同功能群之间的竞争,作为高能群的优势植物—大针茅,和中能群

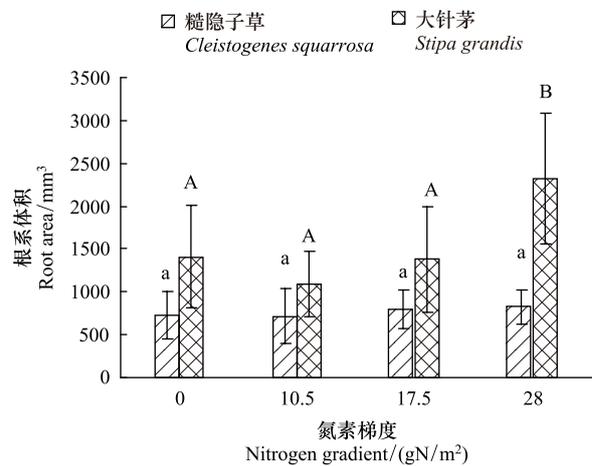


图 4 糙隐子草和大针茅根系体积对氮素添加梯度的响应

Fig. 4 The response of *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis* root volume to nitrogen adding gradient

的优势植物-糙隐子草,二者也必然存在竞争,二者均对氮素添加做出响应,其中大针茅根系表现为伸长生长,且在 28 gN/m²处理达到最大值,糙隐子草根系表现为增粗生长,在 17.5 gN/m²根系直径最大。根系长度反映了根系生长及其在土壤中的拓殖能力^[39],根系直径大小与根导水阻水有直接关系,直径越大,阻力越大^[40]。说明氮素的添加增加了大针茅根系在土壤中的拓殖力,降低了糙隐子草根系对水分的吸收能力。

表 5 功能群去除处理与氮素添加以及交互作用对根系的影响(P 值)

Table 5 The effect of root between remove function group, nitrogen adding and interaction

因素 Factors	根系指标 Root indexes	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>
功能群处理 Remove function group	根系长度	0.002	0.002
	根系直径	0.483	0
	根系面积	0.003	0
	根系体积	0.054	0.78
氮素添加 Nitrogen adding	根系长度	0	0.889
	根系直径	0.186	0
	根系面积	0	0.704
功能群处理×氮素添加 Remove function group×nitrogen adding	根系长度	0.394	0.205
	根系直径	0.706	0
	根系面积	0.585	0.989
	根系体积	0.4	0.001

在受到其他功能群竞争的情况下,氮素添加促使大针茅根系通过伸长生长来扩大在土壤中的空间分布,而糙隐子草则是通过增粗生长的策略来扩大根系在土壤中的空间。中能群优势种糙隐子草在中氮素添加的条件下根系变化都显著高于其他三个梯度,而高能群优势种大针茅在高氮素添加的情况下显著高于其他三个梯度。综合推断,在氮素添加的前三个梯度时,高能群植物受到中能群植物的竞争压迫,大针茅根系对于氮素添加所表现的变化受到来自糙隐子草的压制。但是随氮素添加量到最高时,在这种土壤中氮素的含量已经超过糙隐子草生长的最佳状态下,糙隐子草的竞争力减弱,大针茅对氮素的变化开始凸显。

竞争能力取决于环境,又与植物的特性有关^[41],所以这种竞争关系的变化可能与糙隐子草和大针茅对氮素因子变化的差异性响应有关,糙隐子草是 C4 植物,大针茅是 C3 植物,Gao 等^[42]报道土壤氮素缺乏的情况下加强了 C4 植物糙隐子草对 C3 植物冷蒿的竞争力,但是杨贤燕^[43]等在模拟氮沉降对陆稻与稗草竞争影响的研究结果中却发现模拟氮沉降水平为每年 2 和 4 gN/m²时,增强了 C4 稗草对 C3 陆稻的竞争力,而在氮沉降增加为每年 6 gN/m²时,稗草生物量却出现下降趋势。说明不同的 C3 和 C4 植物间竞争力对氮素添加响应也是不同的,没有表现出一致性。根据本研究的结果可以推测,低氮情况下 C4 植物糙隐子草的竞争力较强,而随着氮素的增加 C3 植物大针茅的竞争力逐渐增强。

3.2 功能群去除影响

功能群的去除消除了另外两个功能群的竞争压力,当群落中只剩下单一功能群的情况下,植物只受到来自同一功能群内植物的竞争,而大针茅和糙隐子草分别作为高能群和中能群的优势植物,且功能群去除以后物种多样性降低,种间竞争减弱,所以功能群内的植物的竞争压力则相对较小,对于中氮素添加处理来说,在去除其它功能群的时候,大针茅根系对氮素的添加没有显著响应,而糙隐子草根系直径依然受到显著影响。不论是否有其他功能群的竞争,氮素的添加都会促使糙隐子草根系通过增粗生长来扩大根系在土壤中的空间。Symstad 和 Tilman 的去除实验发现^[44],不同功能群的去除对植物生物量、土壤氮动态的影响不同,他们将这种影响归因于保留功能群补偿能力的不同,即保留功能群占据已丧失功能群所占空间的能力^[45]。研究结果表明,功能群去除以后高能群植物大针茅并没有对中氮素添加做出很强烈的响应,结果也可能表明高能群的补偿能力相对较弱。保留中能群以后,糙隐子草随着氮素添加根系直径增粗,但是没有去除功能群的糙隐

子草也对氮素添加有相似的响应,所以也不能将这种变化归因为功能群补偿。

“去除”行为本身对生态系统的干扰,包括资源供应的变化或对保留生物体生境的物理干扰等,如植被的机械去除干扰会引起土壤的物理、生物性质等的改变^[46-47]。沙琼等^[48]的研究表明去除植物功能群的数量和土壤硝态氮含量存在显著的线性正相关,说明植物物种多样性降低使土壤硝态氮含量增加。所以在本研究交互作用的结果中,氮素添加和功能群去除实验都对大针茅和糙隐子草的根系有影响,但是交互作用的影响却没有那么强烈,其中的原因可能就是功能群的去除本身就会使得土壤中的氮素含量增加,氮素的添加反而使得土壤中氮素含量过高,高氮素制约了根系的发展,对此大针茅根系在去除功能群情况下对氮素添加没有响应,而糙隐子草的根系表现出增粗生长。在物种去除后的初期,干扰对系统的影响比物种的缺失对系统的影响可能还要大,随着时间的推移,这种干扰作用的影响逐渐减小^[49]。这与系统中优势种或去除物种个体的生命周期有关,也与“去除”行为在去除初期对研究系统的较大扰动有关。本研究只有两年的时间,时间较短这也可能是研究结果与前人研究结果不同的主要原因,要掌握功能群去除对整个生态系统的真实影响需要在更长的时间尺度上进一步监测和研究。

3.3 氮素添加对草地恢复的影响

在退化草地植被自然生长状态下,氮素添加会改变功能群间的竞争关系,引起群落组成的变化,导致群落的演替^[50]。典型草原在没有退化之前是以大针茅为优势种的群落,草原的退化促使糙隐子草取代大针茅成为优势种,在退化草地缺乏养分的情况下中能群的糙隐子草对土壤环境中氮变化的响应显然比高能群大针茅更为敏感。优势种为糙隐子草的退化草地在添加氮素以后,改变了中能群优势种糙隐子草与其他功能群的竞争关系,尤其是与高能群优势种大针茅的竞争关系,中能群的竞争力减弱,促使其优势地位下降,逐渐由中能群为优势过度到高能群为优势种的群落。氮素的添加改变了退化草地的群落组成,从群落组成上促进了退化草地的恢复。

3.4 关于功能群去除的进一步探讨

根据乌恩旗^[51]等的研究结果,灌溉+施肥和未灌溉相比,要达到同样的增产效果,灌溉比未灌溉每公顷能节约化肥 45kg。本研究只研究了氮肥对退化草地的改变,并没有对水分的影响做研究。推测在不同水分梯度下,各功能群之间的竞争关系也会发生变化,氮素与水分综合添加情况下,这种情况可能更为显著。而在去除实验中,多样性降低的情况下灌溉也可能会不同程度地加剧土壤表层氮的淋溶损失,这需要进一步更为系统的研究。

种子的保存和萌发却严格地受到微环境的制约,地表微环境的差异对种子的保存和萌发,以及幼苗的成长都具有强大的筛选作用。草地施氮恢复的实施将不同程度地改变土壤微环境,直接影响到物种的性状,进而影响群落乃至整个生态系统的结构和功能^[6]。本研究氮素的添加为期两年,不同程度的改变土壤表层环境,这一过程不仅影响种群的数量动态,也对种群的空间格局和遗传结构造成深远的影响,所以氮素的添加对整个群落的多样性的影响还需要深入的研究。

4 结论

在受到其他功能群竞争压力下,高能群优势种大针茅根系长度、面积、体积对高氮素添加(28 gN/m²)处理响应显著,主要表现为通过伸长生长扩展根系空间分布;糙隐子草根系直径、体积对于中氮素添加(17.5 gN/m²)处理响应显著,主要表现为通过根系增粗生长扩展根系空间分布。

功能群的去除,中氮素对根系的影响,只有糙隐子草的根系直径显著增加。综合来看,功能群去除实验对大针茅的根系长度和面积有影响,对糙隐子草的根系长度、直径和面积有影响。功能群去除处理与氮素添加的交互作用对大针茅根系没有影响,对糙隐子草的根系直径和体积有影响。

参考文献(References):

[1] 李青丰,胡春元,王明玖. 锡林郭勒草原生态环境劣化原因诊断及治理对策. 内蒙古大学学报:自然科学版, 2003, 34(2): 166-172.

- [2] 郭克贞, 史海滨, 苏佩凤, 赵淑银, 徐冰. 锡林郭勒草原生态需水初步研究. 中国农村水利水电, 2004, (8): 82-85.
- [3] 李笑春, 全川. 草地可持续发展: 生态建设到生态恢复的转向. 自然辩证法研究, 2004, 20(9): 19-21, 49-49.
- [4] 闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响. 西北植物学报, 2007, 27(6): 1225-1232.
- [5] 张建丽, 张丽红, 陈丽萍, 李军鹏, 赵念席, 高玉葆. 不同管理方式对锡林郭勒大针茅典型草原退化群落的恢复作用. 中国草地学报, 2012, 34(6): 81-88.
- [6] 任海彦, 郑淑霞, 白永飞. 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1065-1074.
- [7] Zheng S X, Ren H Y, Lan Z C, Li W H, Wang K B, Bai Y F. Effects of grazing on leaf traits and ecosystem functioning in Inner Mongolia grasslands: scaling from species to community. Biogeosciences, 2010, 7(3): 1117-1132.
- [8] 高天明, 张瑞强, 刘铁军, 郭孟霞. 不同灌溉量对退化草地的生态恢复作用. 中国水利, 2011, (9): 20-23.
- [9] Fonseca C R, Overton J M, Collins B, Westoby M. Shifts in trait-combinations along rainfall and phosphorus gradients. Journal of Ecology, 2000, 88(6): 964-977.
- [10] 李本银, 汪金舫, 赵世杰, 张宏伟, 赵明旭. 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响. 中国草地, 2004, 26(1): 14-17, 33-33.
- [11] Crowley P, Stieha C R, McLetchie D N. Overgrowth competition, fragmentation and sex-ratio dynamics: a spatially explicit, sub-individual-based model. Journal of Theoretical Biology, 2005, 233(1): 25-42.
- [12] 宝音贺希格, 高福光, 姚继明, 张利枝. 内蒙古退化草地的不同改良措施. 畜牧与饲料科学, 2011, 32(3): 38-41.
- [13] 张洪生, 邵新庆, 刘贵河, 韩建国. 围封、浅耕翻改良技术对退化羊草草地植被恢复的影响. 草地学报, 2010, 18(3): 339-344, 351-351.
- [14] 鲍雅静, 李政海, 刘钟龄. 羊草草原火烧效应的模拟实验研究. 中国草地, 2000, (1): 7-11.
- [15] Hofmann M, Isselstein J. Effects of drought and competition by a ryegrass sward on the seedling growth of a range of grassland species. Journal of Agronomy and Crop Science, 2004, 190(4): 277-286.
- [16] 王殿才, 郑金艳, 李凤兰. 松土补播改良退化草场试验研究. 畜牧兽医科技信息, 2010, (7): 132-132.
- [17] 罗成科, 肖国举, 张峰举, 秦萍. 脱硫石膏改良中度苏打盐渍土施用量的研究. 生态与农村环境学报, 2009, 25(3): 44-48.
- [18] 章祖同, 刘起. 中国重点牧区草地资源及其开发利用. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [19] 陈世鑽, 张昊, 占布拉, 孟君. 糙隐子草群落特点和规律的研究. 内蒙古草业, 1995, (3/4): 35-39.
- [20] 王炜, 刘钟龄, 郝敦元, 梁存柱. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究——II. 恢复演替时间进程的分析. 植物生态学报, 1996, 20(5): 460-471.
- [21] 安渊, 李博, 杨持, 徐柱, 阎志坚, 韩国栋. 内蒙古大针茅草原植物生产力及其可持续利用研究 III——植物补偿性生长研究. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2000, 31(6): 608-612.
- [22] 王炜, 梁存柱, 刘钟龄, 郝敦元. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究——IV. 恢复演替过程中植物种群动态的分析. 干旱区资源与环境, 1999, 13(4): 44-55.
- [23] 孙国钧, 张荣, 周立. 植物功能多样性与功能群研究进展. 生态学报, 2003, 23(7): 1430-1435.
- [24] 胡楠, 范玉龙, 丁圣彦, 廖秉华. 陆地生态系统植物功能群研究进展. 生态学报, 2008, 28(7): 3302-3311.
- [25] 鲍雅静, 李政海. 基于能量属性的植物功能群划分方法探索——以内蒙古锡林河流域草原植物群落为例. 生态学报, 2008, 28(9): 4540-4546.
- [26] Mckane R B, Grigal D F, Russelle M P. Spatiotemporal differences in 15n uptake and the organization of an old-field plant community. Ecology, 1990, 71(3): 1126-1132.
- [27] Davies K W, Pokorny M L, Sheley R L, James J J. Influence of plant functional group removal on inorganic soil nitrogen concentrations in native grasslands. Rangeland Ecology & Management, 2007, 60(3): 304-310.
- [28] 李禄军, 曾德慧, 于占源. 物种/功能群去除实验及其在生态学中的应用. 生态学报, 2010, 30(1): 197-204.
- [29] Fornara D A, Tilman D. Ecological mechanisms associated with the positive diversity-productivity relationship in an N-limited grassland. Ecology, 2009, 90(2): 408-418.
- [30] 陈世鑽. 内蒙古草原植物根系类型. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1987.
- [31] 王树起, 沈其荣, 褚贵新, 茆泽圣. 种间竞争对旱作水稻与花生间作系统根系分布和氮素吸收积累的影响. 土壤学报, 2006, 43(5): 860-863.
- [32] 黄军, 王高峰, 安沙舟, 负静, 李海, 张荣华. 施氮对退化草甸植被结构和生物量及土壤肥力的影响. 草业科学, 2009, 26(3): 75-78.
- [33] 秦洁, 鲍雅静, 李政海, 胡志超, 高伟. 退化草地大针茅根系特征对氮素添加的响应. 草业学报, 2014, 23(5): 40-48.
- [34] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 艾桂艳, 杨丹, 毛琰. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844.

- [35] 任祖淦, 邱孝煊, 蔡元呈, 李贞合, 王琳. 氮肥施用与蔬菜硝酸盐积累的相关研究. 生态学报, 1998, 18(5): 523-528.
- [36] 祁瑜, Mulder J, 段雷, 黄永梅. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土壤有机碳的短期影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1104-1113.
- [37] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2256-2265.
- [38] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 杨景成. 内蒙古典型草原羊草群落氮素去向的示踪研究. 植物生态学报, 2004, 28(5): 665-671.
- [39] 周艳松, 王立群, 张鹏, 梁金华, 王旭峰. 大针茅根系构型对草地退化的响应. 草业科学, 2011, 28(11): 1962-1966.
- [40] 严小龙. 根系生物学原理与应用. 北京: 科学出版社, 2007.
- [41] Comas L H, Bouma T J, Eissenstat D M. Linking root traits to potential growth rate in six temperate tree species. *Oecologia*, 2002, 132(1): 34-43.
- [42] Gao Y Z, Wang S P, Han X G, Patton B D, Nyren P E. Competition between *Artemisia frigida* and *Cleistogenes squarrosa* under different clipping intensities in replacement series mixtures at different nitrogen levels. *Grass and Forage Science*, 2005, 60(2): 119-127.
- [43] 杨贤燕, 蒋琦清, 唐建军, 陈欣, Hu S J. 两种温度下模拟氮沉降对陆稻与稗草竞争的影响. 应用生态学报, 2007, 18(4): 848-852.
- [44] Symstad A J, Tilman D. Diversity loss, recruitment limitation, and ecosystem functioning: lessons learned from a removal experiment. *Oikos*, 2001, 92(3): 424-435.
- [45] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6): 902-910.
- [46] Campbell B D, Grime J P, Mackey J M L, Jalili A. The quest for a mechanistic understanding of resource competition in plant communities: the role of experiments. *Functional Ecology*, 1991, 5(2): 241-253.
- [47] Aarssen L W, Epp G A. Neighbour manipulations in natural vegetation: a review. *Journal of Vegetation Science*, 1990, 1(1): 13-30.
- [48] 沙琼, 黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 植物功能群去除对内蒙古典型草原羊草群落土壤碳、氮库的影响. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1305-1309.
- [49] Lepš J. Variability in population and community biomass in a grassland community affected by environmental productivity and diversity. *Oikos*, 2004, 107(1): 64-71.
- [50] 蒋琦清, 唐建军, 陈欣, 陈静, 杨如意, Hu S. 模拟氮沉降对杂草生长和氮吸收的影响. 应用生态学报, 2005, 16(5): 951-955.
- [51] 乌恩旗, 张国昌, 刘春晓. 羊草草原改良措施与效果. 草地学报, 2001, 9(4): 290-295.