

# 长期增温和氮素添加对荒漠草原不同植物功能群特征的影响

王冰莹, 韩国栋, 武倩, 朱毅, 鞠馨

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院草地资源教育部重点实验室, 农业部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室, 内蒙古自治区草地管理与利用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**为揭示短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原植物功能群对长期增温和氮素添加的响应机制,以内蒙古四子王旗短花针茅荒漠草原为研究对象,于2019年8月对连续13年(2006—2019)增温和氮素添加试验下的植物物种组成,高度、盖度、密度进行观测,并对功能群地上生物量、多样性进行分析。结果表明:增温对多年生杂类草的盖度有显著影响,增幅达66.3%,氮素添加处理下一、二年生植物的盖度和密度分别减少了53%和71%;氮素添加处理对多年生杂类草的地上生物量有显著影响,降幅达46.1%;氮素添加对多年生禾草和多年生杂类草的Margalef指数有显著影响,Margalef指数、Shannon-Wiener指数和Pielou指数在增温处理下变化不大;增温+氮素添加处理下多年生杂类草和多年生禾草重要值极大,灌木和半灌木、一、二年生植物重要值极小。长期增温和氮素添加改变了短花针茅荒漠草原植物群落的组成和结构,进而促进了草地的可持续利用。

**关键词:**荒漠草原;增温;氮素添加;功能群

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0042-08

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.02.006



气候变暖和大气氮沉降增加是全球变化的重要驱动因子。气候变暖与氮沉降增加对生态系统产生的影响以及生态系统对气温上升和氮素沉降的反馈是国际生态学领域的研究热点<sup>[1]</sup>。温度的变化会对植物的物质积累、生长、发育产生直接影响<sup>[2]</sup>。由于人类活动的影响,大气氮沉降的速率也在增加<sup>[3]</sup>。不同植物的生

长随着可利用氮含量的变化而改变,进而使植物群落结构发生变化<sup>[4]</sup>。氮素输入的持续增加会改变植物群落的物种丰富度和群落的动态特征<sup>[5]</sup>。在研究增温和氮素添加对植物多样性的影响时,可以缩小研究尺度,将局部细节从各种角度分析描述。功能群是指对特定环境因素有相似反应的一类物种,植物功能群多样性是维持群落结构复杂性和稳定性的基础,一定程度上反映了草地生态系统的健康状况<sup>[6]</sup>。因此,探究长期增温和氮素添加对草地植物功能群特征的影响对于维持草地生态系统稳定具有重要意义。

荒漠草原是草原向荒漠过渡的旱生性草原生态系统,目前为止,对荒漠草原不同功能群的研究还相对薄弱<sup>[7]</sup>。武倩<sup>[8]</sup>,王晨晨等<sup>[4]</sup>对短花针茅荒漠草原的研究表明,长期增温与氮素添加使得荒漠草原群落结构发生变化,植物功能群的引入对研究荒漠草原物种多样性的生态系统功能和维持机制注入了新的活力<sup>[9]</sup>,虽然目前对功能群的研究还不是很完善,但仍有一些研究认为功能群的多样性比物种多样性更加深刻地影

**收稿日期:**2021-02-18; **修回日期:**2021-03-29

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31560140,31260124);内蒙古科技重大专项项目;国家重点研发计划(2016YFC0500500);教育部创新团队-草地资源可持续利用的研究项目(IRT-17R59);内蒙古重点研发和成果转化项目(zdzz2018,2019CG069)。

**作者简介:**王冰莹(1996-),女,内蒙古自治区赤峰市人,硕士研究生。

E-mail:wwangbingying@163.com

韩国栋为通信作者。

E-mail:nmgghanguodong@163.com

响生态系统的整个过程<sup>[10]</sup>。因此,本试验以内蒙古四子王旗短花针茅荒漠草原为研究对象,利用长期增温和氮素添加试验平台,探讨短花针茅荒漠草原不同植物功能群对模拟增温和氮素添加的响应,旨在揭示全球气候变暖和氮素添加对荒漠草原植物功能群的影响,为干旱区荒漠草原科学合理利用提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古农牧业科学院综合试验示范中心四子王基地(N 41°46′43.6″,E 111°53′41.7″,海拔 1 456 m)。四子王旗地处大青山以北的内蒙古高原中部,属于典型的中温带大陆性季风气候。春季干旱多风,夏季炎热,冬季寒冷。四子王旗(1960—2018 年)多年平均气温 3.7 °C,月平均最高温度集中在 6—8 月,≥10 °C 的年积温为 2 200~2 500 °C,无霜期 90~120 d。年均降水量 221.7 mm,降水主要集中在 6—9 月,年平均日照时数为 3 117.7 h。试验地区的土壤类型大多为淡栗钙土,土壤较瘠薄,钾含量丰富,氮和磷较少,有机质含量较低。植被层低矮,种类组成较贫乏。主要是以短花针茅(*Stipa breviflora*)为建群种的荒漠草原,其他优势物种主要有冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、细叶葱(*Allium tenuissimum*)等。

### 1.2 试验设计

该试验采用 2×2 因素随机裂区设计,共 6 个区组,其中包括增温和不增温 2 种主处理样方,共 12 个主样方。每个主处理样方又被分裂为面积相等的 2 个有氮素添加和无氮素添加副处理样方。试验共 4 种处理:无增温和氮素添加(CK)、增温(W)、氮素添加(N)和增温+氮素添加(WN),每个处理 6 次重复,在每个处理样方中央各设置一个 1 m×1 m 的永久监测样方。共设计了 24 个处理样方,面积共计 144 m<sup>2</sup>。从 2006 年 3 月开始,6 个增温区内各安装一个红外线辐射器进行加热,距地面 2.25 m,功率设置为 2000 W,全年不间断。同时在每年 5 月末 6 月初雨季来临之前选用硝酸铵(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)进行施肥处理,施肥量为纯氮 10 g/m<sup>2</sup>。

### 1.3 测定内容和方法

1.3.1 植物群落物种组成及功能群划分 2019 年 8 月中旬取样,在永久监测样方内记录物种数目及名称,并记录每种植物的高度、盖度、密度。具体方法是把活动样方框(1 m×1 m)各边平均划分成 10 cm 等间距的小孔,然后用线绳相连,活动样方框就被平均划分成 100 个小格。密度是每种植物在 100 个小格中株丛总数;盖度是每种植物垂直投影面积占 1 m×1 m 的百分比。按照物种生活型差异,将群落中出现的物种划分为 4 个功能群:多年生禾草(Perennial grasses, PG),多年生杂类草(Perennial forbs, PF),灌木和半灌木(Shrubs and semi-shrubs, SS),一、二年生植物(Annuals and biennials, AB)。样地内出现的物种、划分出的功能群以及结果中使用的功能群见表 1。

表 1 试验区植物功能群划分

Table 1 The plant functional group at the experimental site

生活型	物种名称	
多年生禾草	短花针茅	<i>Stipa breviflora</i>
	克氏针茅	<i>Stipa krylovii</i>
	无芒隐子草	<i>Cleistogenes songorica</i>
	糙隐子草	<i>Cleistogenes squarrosa</i>
多年生杂类草	银灰旋花	<i>Convolvulus ammannii</i>
	细叶葱	<i>Allium tenuissimum</i>
	蒙古葱	<i>Allium mongolicum</i>
	乳白花黄芪	<i>Astragalus galactites</i>
	大包鸢尾	<i>Iris bungei</i>
	寸草苔	<i>Carex duriuscula</i>
	碱韭	<i>Allium polyrhizum</i>
	达乌里芯巴	<i>Cymbaria dahurica</i>

续表 1

生活型	物种名称	
	阿尔泰狗娃花	<i>Heteropappus altaicus</i>
	冬青叶兔唇花	<i>Lagochilus ilicifolius</i>
灌木和半灌木	冷蒿	<i>Artemisia frigida</i>
	小叶锦鸡儿	<i>Caragana microphylla</i>
	狭叶锦鸡儿	<i>Caragana stenophylla</i>
	木地肤	<i>Kochia prostrata</i>
一、二年生植物	栉叶蒿	<i>Neopallasia pectinata</i>
	猪毛蒿	<i>Artemisia collina</i>
	猪毛菜	<i>Salsola collina</i>
	刺穗藜	<i>Chenopodium aristatum</i>
	狭叶尖头叶藜	<i>Chenopodium acuminatum</i>
	灰绿藜	<i>Chenopodium glaucum</i>
	鹤虱	<i>Lappula myosotis</i>

1.3.2 地上生物量 采用直接法估测地上生物量,在植物生长旺盛期(8月),每个小区选取 50 cm×50 cm 样方,然后分物种齐地面刈割并收集枯落物,把样品置于 65 ℃ 恒温下烘干,48 h 后烘至恒重,称其干重(即物种生物量)。

#### 1.4 测度方法

本研究采用 3 个参数,即 Margalef 丰富度指数(A)、Shannon-Wiener 多样性指数(H),Pielou 均匀度指数(E),对植物群落物种功能群进行评价。3 个参数的计算公式如下:

$$\text{Margalef 指数 } A = (S-1)/\text{Ln}N$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H = -\sum Pi \text{Ln}(Pi)$$

$$\text{Pielou 指数 } E = -\sum Pi \text{Ln}(Pi)/\text{Ln}(S) = H/\text{Ln}(S)$$

式中:S 为群落中物种数目;N 为所有物种个体总数;Pi 为重要值。

$$\text{重要值 } Pi = (RC+RH+RD)/3$$

式中:RC 为相对盖度;RH 为相对高度;RD 为相对密度。RC、RH 和 RD 的计算方法详见文献[11]。

#### 1.5 数据分析

在 SAS 9.2 统计分析软件中采用双因素方差分析,分析增温、氮素添加及它们的交互作用对上述各指标的影响。最后再对各指标进行单因素方差分析,研究对照、氮素添加、增温、增温+氮素添加 4 个处理间的差异,所有图均使用 Sigmaplot 14.0 进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 增温和氮素添加对不同功能群植物高度、盖度、密度的影响

增温对多年生杂类草的盖度有显著影响( $P < 0.0001$ ),对其他 3 个植物功能群的高度、密度、盖度没有显著影响( $P > 0.05$ )(表 2)。氮素添加及其与增温的交互作用对不同植物功能群的高度、盖度、密度没有显著影响(表 2)。与对照相比,增温处理下多年生杂类草的盖度增加了 66.3% ( $P < 0.05$ )(图 1);氮素添加处理对多年生杂类草的盖度影响不显著;增温+氮素添加处理下多年生杂类草的盖度增加了 62.8%。增温处理下灌木和半灌木的高度减少了 70%;氮素添加、增温+氮素添加处理对灌木和半灌木的盖度、密度影响不显著。增温、氮素添加、增温+氮素添加处理对多年生禾草的高度、密度、盖度影响不显著。氮素添加处理下一、二年生植物的盖度和密度分别减少了 53% 和 71%。

### 2.2 增温和氮素添加对不同功能群植物地上生物量的影响

氮素添加处理对多年生杂类草的地上生物量有显著影响( $P < 0.001$ ),对其他 3 个植物功能群的地上生物量没有显著影响( $P > 0.05$ ),增温及其与氮素添加的交互作用对 4 个植物功能群地上生物量没有显著影响(表 3)。与对照相比,增温处理下多年生禾草地上

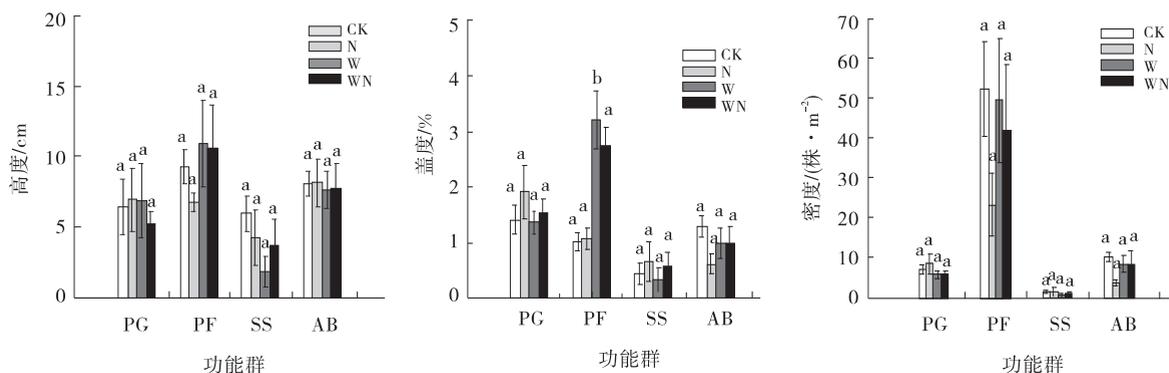


图 1 不同植物功能群的高度、盖度、密度

Fig. 1 Changes of height, coverage and density of different plant functional groups under different treatments

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

表 2 增温、氮素添加及其交互作用对不同功能群植物群落高度、盖度、密度影响的方差分析结果

Table 2 Results of ANOVA ( $P$ -values) on the effects of Warming, N addition and their interactions on the height, coverage and density of different plant functional groups

因素	多年生禾草	多年生杂类草	灌木和半灌木	一、二年生植物
高度				
W	0.075	0.587	0.161	0.712
N	0.606	0.123	0.952	0.916
W×N	0.942	0.932	0.267	0.961
盖度				
W	0.475	<.0001	0.705	0.920
N	0.278	0.511	0.382	0.181
W×N	0.582	0.384	0.950	0.181
密度				
W	0.152	0.530	0.422	0.519
N	0.503	0.165	0.839	0.120
W×N	0.686	0.398	0.839	0.119

表 3 增温、氮素添加及其交互作用对不同功能群植物群落地上生物量影响的方差分析结果

Table 3 Results of ANOVA ( $P$ -values) on the effects of Warming (W), N addition (N) and their interactions on aboveground biomass of different plant functional groups

因素	多年生禾草	多年生杂类草	灌木和半灌木	一、二年生植物
W	0.007	0.209	0.521	0.228
N	0.324	<.001	0.324	0.195
W×N	0.420	0.457	0.689	0.480

生物量减少了 47.7%;氮素添加处理下灌木和半木地上生物量增加了 51.7%,一、二年生植物地上生物量减少了 47.4%,多年生杂类草的地上生物量减少了 46.1% ( $P < 0.001$ );增温+氮素添加处理下多年生禾草地上生物量减少了 43.7% (图 2)。

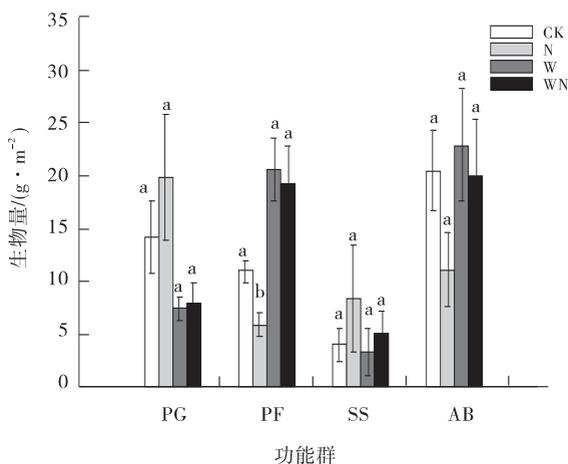


图 2 植物功能群的地上生物量

Fig. 2 Changes of aboveground biomass of different plant functional groups under different treatments

## 2.4 增温和氮素添加对植物功能群多样性的影响

氮素添加对多年生禾草和多年生杂类草的 Margalef 丰富度指数有显著影响 ( $P < 0.01$ ),对 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数没有显著影响。增温对 4 种功能群的多样性指数都没有显著影响 (表 5)。功能群 Margalef 丰富度指数在氮素添加处理和增温+氮素添加处理下显著增加 ( $P < 0.05$ ),在增温+氮素添加处理下 Margalef 丰富度指数最大,为 1.74,显著大于对照处理。而 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数在氮素添加处理和增温+氮素添加处理下有下降的趋势,且均不显著。Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数在增温处理下变化不大 (图 4)。

## 2.5 增温和氮素添加处理下不同功能群植物的重要值

增温处理多年生杂类草重要值最高,达到

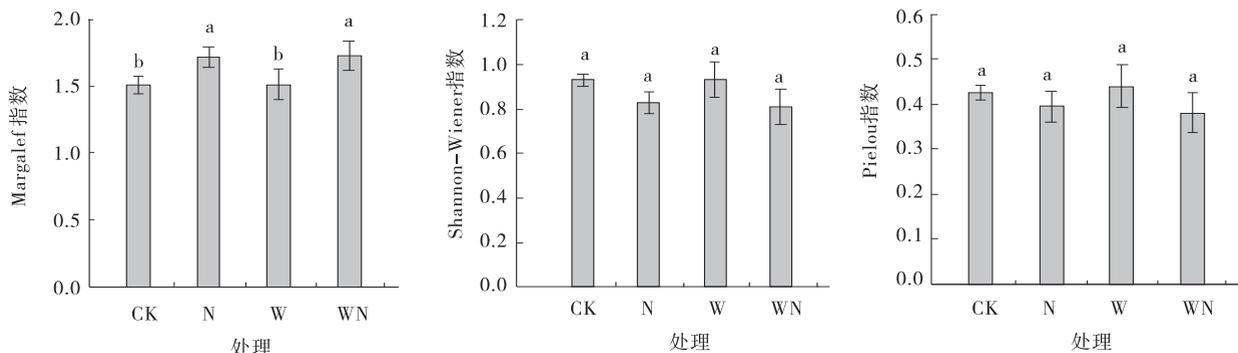


图 3 植物功能群的多样性

Fig. 3 Changes of plant functional groups diversity under different treatments

表 4 增温、氮素添加及其交互作用对不同功能群植物群落 α 多样性的方差分析结果

Table 4 Results of ANOVA (P-values) on the effects of Warming (W), N addition (N) and their interactions on α diversity of different plant functional groups

功能群	因素	Shannon-Wiener	Margalef	Pielou
PG	W	0.226	0.861	0.271
	N	0.353	<.01	0.352
	W×N	0.678	0.290	0.543
PF	W	0.561	0.753	0.441
	N	0.863	<.01	0.713
	W×N	0.334	0.353	0.315
SS	W	0.509	0.969	0.321
	N	0.061	0.419	0.405
	W×N	0.234	0.071	0.329
AB	W	0.981	0.083	0.066
	N	0.329	0.881	0.085
	W×N	0.470	0.697	0.663

53.9%，对照处理，增温+氮素添加处理重要值变化不明显。一、二年生植物重要值在各处理间变化不明显，在增温+氮素添加处理下重要值最高，达到 7.5%。灌木和半灌木以及多年生禾草的重要值均在氮素添加处理下最高，分别达到 15.0%、53.1% (图 5)。

### 3 讨论

在全球气候变暖的大背景下，研究生态系统与气候变暖作用机理的方法层出不穷，例如电阻加热、远红外线照射、互交移植等多种模拟气候变暖的方法<sup>[12]</sup>。在本研究中，采用野外自然条件下红外线增温的试验设计，通过试验发现增温导致灌木和半灌木的高度有所下降，但是其他 3 种功能群植物的高度呈现增加的趋势。这与 Muhamed 等<sup>[13]</sup>的研究一致。Harte 等认为，增温满足了植物对热量的需求，且对植物生长有利，使植物种群高度在整体上有所增加<sup>[14-15]</sup>，但是本研究中不同功能群植物群落高度对增温的响应不同，这可能是由于研究草地的类型及年限不同，导致研究结果出现差异。增温处理导致多年生杂类草的盖度显著增加，而其他 3 种功能群盖度呈现降低趋势，氮素添加对不同功能群植物的盖度没有显著影响，但呈现增加的趋势，增温+氮素添加处理对不同功能群植物的盖度也无显著影响，这与李元恒<sup>[11]</sup>的研究一致。本研究发现，氮素添加导致多年生禾草的密度增加，其他 3 种功能群植物的密度减少。这与 Gough 等<sup>[16]</sup>试验认为随着氮沉降的增加，物种密度逐渐减小的结论相一致。温度的升高和降低能够影响植物的蒸腾作用，改变土壤中水分的含量，使植物对水分的吸收受到影响，其生长和生物量也不同程度的受到影响。而植物自身通过改变土壤中物质的含量引起的植物的改变，都将会

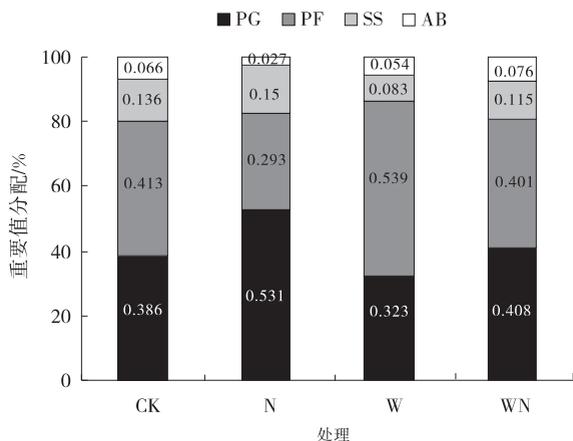


图 4 不同功能群的植物重要值

Fig. 4 Changes of plant important values in different functional groups under different treatments

对生物量产生一定的影响,而生物量是大多数生态系统结构和功能的最直接的综合体现,它是植物生态学特性与其生活环境之间相互作用的产物<sup>[17-19]</sup>。在本研究中,氮素添加导致多年生杂类草的地上生物量显著减少,这与 Su 等<sup>[20]</sup>、Xi 等<sup>[21]</sup>的研究一致,而多年生禾草、灌木和半灌木的地上生物量有增加的趋势,这与潘占磊<sup>[22]</sup>研究不一致。这可能是因为在丰水年份,干旱压力缓解后,氮素成为了限制植物生长的主要因素<sup>[23]</sup>,氮素添加使土壤中可利用氮含量增加,从而促进植物的生长。有研究表明增温提高<sup>[24]</sup>,或抑制<sup>[25]</sup>,或不改变植物地上生物量<sup>[26]</sup>,这可能与生态系统的初始气候条件、优势物种的特性、生物多样性和生物地球化学有关。在本研究中,增温导致多年生禾草、灌木和半灌木的地上生物量减少,多年生杂类草和一、二年生植物的地上生物量增加,这与潘占磊<sup>[22]</sup>研究结果一致。由于一、二年生植物和多年生禾草对养分的利用策略不同,一、二年生植物可以快速利用养分,使其在资源竞争中占据有利地位,而多年生禾草对资源利用比较保守,与一、二年生植物相比,在资源竞争中处于劣势<sup>[27-28]</sup>,因此,增温改变种间关系可能是导致多年生禾草地上净初级生产力降低的原因。

本研究中,增温+氮素添加处理下多年生杂类草和多年生禾草重要值极大,灌木和半灌木和一、二年生植物重要值极小,因此推测以短花针茅为主的多年生杂类草和多年生禾草存在一定的正相互作用,但具体相互作用的机制尚不清楚,仍需进一步的探究。本研究发现,氮素添加对多年生禾草和多年生杂类草的 Margalef 丰富度指数有显著影响,这与 Zong 等<sup>[29]</sup>研究认为,植物的物种丰度指数及多样性指数并未随氮沉降量的变化而产生显著改变的结论不一致,这可能与土壤原来的氮素含量水平及物种间的差异存在密切关系,同时也有大量研究表明,植物物种多样性会随着氮素的增加而减少,而对减少机理的研究却相对甚少。本研究中增温导致 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数有增加的趋势,但是变化趋势不大,这与武倩<sup>[8]</sup>的研究结果一致。功能群 Pielou 均匀度指数在增温、氮素添加、增温+氮素添加处理下均与对照处理相比变化趋势不大,可能是因为本研究增温与氮素添加试验已在短花针茅荒漠草原开展 13 年,处于长时间增温和氮素添加处理,不同小区都已经存在较为稳定的群落,各个小区内不同功能群植物种类基本

相似,因此功能群 Pielou 均匀度指数差异不显著。刘思雅<sup>[30]</sup>研究表明,在植物生长的不同时期增温和施氮所起的作用有所不同。温度较低、雨水相对不足的月份,增温对优势种的生长起抑制作用,有利于群落的物种数目和多样性指数的增加,而人工施氮的效应则恰好相反,使群落的物种多样性指数降低。并不是所有植物群落特征都会随着温度的升高而有明显的变化。说明荒漠植物群落在短时间增温的条件下并不会产生明显影响。

## 4 结论

长期增温和氮素添加对植物群落的增温及其交互作用对不同功能群植物的高度、盖度、密度有不同程度的影响,增温显著增加多年生杂类草的盖度。氮素添加处理显著降低多年生杂类草的地上生物量,显著增加多年生禾草和多年生杂类草的 Margalef 丰富度指数。长期增温和氮素添加改变了短花针茅荒漠草原植物群落的组成和结构,促进了草地的可持续利用。

### 参考文献:

- [1] 张卫建,许泉,王绪奎,等.气温上升对草地土壤微生物群落结构的影响[J].生态学报,2004,24(8):1746-1751.
- [2] 刘振亚,张晓宁,李丽萍,等.大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物的光 and CO<sub>2</sub> 利用能力的影响[J].生态学报,2017,37(23):7821-7832.
- [3] 康静,任海燕,王悦骅,等.短花针茅荒漠草原土壤呼吸对长期增温和氮素添加的响应[J].干旱区资源与环境,2019,33(5):151-157.
- [4] 王晨晨.模拟增温和氮素添加对内蒙古荒漠草原土壤呼吸和植物群落的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014:29.
- [5] Wcdin D A, Jilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon blance of grass-lands [J]. Science, 1996, 271(5293):1720-1723.
- [6] 张守昊,田青,李宗杰,等.摩天岭北坡中段不同海拔梯度草本植物多样性生态系统功能分析[J].草原与草坪,2018,38(3):1-8.
- [7] 董晓宇,姚华荣,戴君虎,等.2000-2017 年内蒙古荒漠草原植物物候变化及对净初级生产力的影响[J].地理科学进展,2020,39(1):24-35.
- [8] 武倩.长期增温和氮素添加对荒漠草原植物群落稳定性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019:44.
- [9] 白永飞,张丽霞,张焱,等.内蒙古锡林河流域草原群落植

- 物功能群组成沿水热梯度变化的样带研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 308—316.
- [10] Tilman D, Knops J, Wedin D, *et al.* The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J]. *Science*, 1997, 277(5330): 1300—1302.
- [11] 李元恒. 内蒙古荒漠草原植物群落结构和功能对增温和氮素添加的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014: 45.
- [12] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 262—271.
- [13] Muhamed H, Touzard B, Le Bagousse-Pinguet Y, *et al.* The role of biotic interactions for the early establishment of oak seedlings in coastal dune forest communities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 297(3): 67—74.
- [14] Harte J, Shaw R. Shifting dominance within a montane vegetation community: Results of a climate-warming experiment[J]. *Science*, 1995, 267(5199): 876—880.
- [15] 周华坤, 周兴民, 赵新全. 模拟增温效益对矮嵩草草甸影响的初步研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 547—553.
- [16] Gough L, Osenberg C W, Gross K L, *et al.* Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities[J]. *Oikos*, 2000, 89(3): 428—439.
- [17] Yang Y H, Harrison A F, Ineson P. Biomass responses to a simulated global warming by changing of elevation and fertilizer addition in upland grassland[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(3): 234—24.
- [18] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, *et al.* Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO<sub>2</sub>[J]. *Science*, 2002, 298(5600): 1987—1990.
- [19] Amakrishna R N, Charles D K, Hirofumi H, *et al.* Climate driven increases global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560—1563.
- [20] Su J, Li X, Li X, *et al.* Effects additional N on herbaceous species of desertified steppe in arid regions of China: four-year field study[J]. *Ecological Research*, 2012, 28(1): 21—28.
- [21] Xi N, Carrere P, Bloor J M. plant community responses to precipitation and spatial pattern of nitrogen supply in an experimental grassland ecosystem[J]. *Ecology*, 2015, 178(2): 329—338.
- [22] 潘占磊. 短花针茅荒漠草原生产力与物种多样性对增温和氮素添加的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 44.
- [23] Ladwing L M, Collins S L, Swann A L, *et al.* Above-and-belowground responses to nitrogen addition in a Chihuahuan Desert grassland[J]. *Oecologia*, 2011, 169(1): 177—185.
- [24] Corlett R T. Impacts of warming on tropical lowland rainforests[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(11): 60—61.
- [25] Saleska S R, Shaw M R, Fischer M L, *et al.* Plant community composition mediates both large transient decline and predicted long-term recovery of soil carbon under climate warming[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1055—1056.
- [26] Yang Z L, Zhang Q, Su F L, *et al.* Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 154—163.
- [27] Rao L E, Allen E B. Combined effects of precipitation and nitrogen deposition on native and invasive winter annual production in California deserts[J]. *Oecologia*, 2010, 162(4): 1035—1046.
- [28] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning evidence from inner Mongolia Grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 358—372.
- [29] Zong N, Shi P L, Song M H, *et al.* Nitrogen critical loads for an alpine meadow ecosystem on the Tibetan plateau [J]. *Environmental Management*, 2016, 57(3): 531—542.
- [30] 刘思雅. 模拟增温与施氮对羊草草原植物群落结构及生物量的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2009: 21.

# Effects of long-term warming and nitrogen addition on characteristics of different plant functional groups in desert steppe

WANG Bing-ying, HAN Guo-dong, WU Qian, ZHU Yi, JU Xin

*(Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, College of Grassland, Resources and Environment, Key Laboratory of Forage Cultivation, processing and High Efficient Utilization of Ministry of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, 010020, China)*

**Abstract:** In order to reveal the response mechanism of plant functional groups to long-term warming and nitrogen addition in a desert steppe, this study took *Stipa breviflora* of desert steppe in the Siziwang Banner of Inner Mongolia as the research object. In August 2019, the plant species composition, height, coverage and density were observed under the control of temperature increase and nitrogen addition for 13 years (2006 ~ 2019) in the experimental site. Above ground biomass as well as species diversity were also analyzed. The results showed that increasing temperature had a significant effect on the coverage of perennial grass, with an increase of 66.3%, and the coverage and density of the first and second year plants decreased by 53% and 71% respectively under nitrogen addition. The results also demonstrated that the Margalef index of perennial grass and perennial hybrid grass was significantly affected by nitrogen addition. Nitrogen addition had a significant effect on the aboveground biomass of perennial grasses, with a decrease of 46.1%; meanwhile, Margalef index, Shannon-Wiener index and Pielou index had little change under the warming treatment; besides, the importance values of perennial grass and perennial grass were extremely high under warming and nitrogen addition treatment, while the importance values of shrubs and semi-shrubs and first and biennial plants were extremely low. In conclusion, long-term warming and nitrogen addition changed the composition and structure of plant community in *Stipa breviflora* desert steppe, and promoted the sustainable utilization of grassland.

**Key words:** desert grassland; warming; nitrogen addition; functional groups