

# 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响

李长斌<sup>1,5</sup>, 彭云峰<sup>3</sup>, 赵殿智<sup>4</sup>, 宁祎<sup>1,5</sup>, 周国英<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2. 中国科学院 藏药研究重点实验室, 西宁 810008;  
3. 中国科学院 植物研究所, 北京 100093; 4. 青海省三角城种羊场, 青海 刚察 812300; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 全球变化对草地物种组成和物种多样性有显著影响, 而高寒草原研究较少。以青藏高原紫花针茅高寒草原为对象, 通过三年的野外小区完全随机试验, 模拟分析了降水变化和氮素添加对物种群落结构和物种多样性的影响, 降雨水平设置减少 50% 降雨、对照和增加 50% 降雨 3 个水分处理, 氮添加设置对照和加氮 2 个水平。结果显示: (1) 氮添加后随降雨梯度递增分别导致物种数由 24, 25, 21 减少到 21, 21, 20。(2) 年际变化、水分和氮素处理对群落盖度影响显著, 年际变化和水分处理交互效应显著。群落盖度 2015 年 > 2014 年 > 2013 年; 随着降雨梯度递增, 群落盖度呈增加趋势; 添加氮素处理的群落盖度显著高于对照。(3) 种丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数在年际间有显著差异, 另外, 氮素处理显著影响丰富度指数, Pielou 指数在不同降水处理间差异显著。氮素添加显著影响青藏高原高寒草原物种组成、群落盖度以及丰富度指数, 而降水作用只影响群落盖度; 降水变化除了对 Pielou 指数有影响外, 降水变化和氮素添加均不影响多样性指数。

**关键词:** 青藏高原; 群落结构; 物种多样性; 降水变化; 氮素添加; 高寒草原

中图分类号: Q948.15<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0185-07

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.06.024

## Effects of Precipitation Change and Nitrogen Addition on Community Structure and Plant Diversity in an Alpine Steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau

LI Changbin<sup>1,5</sup>, PENG Yunfeng<sup>3</sup>, ZHAO Dianzhi<sup>4</sup>, NING Yi<sup>1,5</sup>, ZHOU Guoying<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810008, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810008, China; 3. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 4. Sanjiaocheng Sheep Breeding Farm of Qinghai Province, Gangcha, Qinghai 812300, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Responses of species composition and richness to global change remain a major uncertainty in alpine grassland. Here we performed a three-year manipulative experiment to examine the changes of community structure and species richness under three precipitation regimes (doubled, control and halved) and two nitrogen (N) addition rates [0 and 10 g/(m<sup>2</sup> · year)] in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. The main results are as follows. (1) N addition significantly reduced species richness from 24, 25, 21 to 21, 21, 20 along the precipitation gradient. (2) N addition and precipitation treatments significantly influenced community cover, which increased with N addition and increase of precipitation. Meanwhile, precipitation also interacted with year to affect community cover, following the trend 2015 > 2014 > 2013 across the three precipitation gradient. (3) The Simpson index, Shannon-Wiener index and Pielou index varied significantly among years. N treatment substantially altered richness index, while changing precipitation regime had significant effect on Pielou evenness. Overall, N addition had significant influence on species composition, community coverage and richness index in this alpine steppe, while precipitation only influenced on coverage. Except that changing precipitation altered Pielou index, both precipitation changes and N addition had minor

收稿日期: 2015-12-25

修回日期: 2016-01-07

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB026105); 国家科技支撑计划项目(2014BAC05B01); 国家自然科学基金(40801076)

第一作者: 李长斌(1990—), 男, 青海西宁人, 在读研究生, 主要研究方向: 草地生态学。E-mail: lichangbin900912@126.com

通信作者: 周国英(1974—), 男, 青海乐都人, 研究员, 主要研究方向: 生态学。E-mail: zhouguy@nwipb.cas.cn

contributions to diversity index.

**Keywords:** Qinghai-Tibetan Plateau; community structure; species diversity; precipitation change; nitrogen addition; alpine steppe

观测记录显示全球平均气温在 20 世纪升高了  $0.74^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,且在 1990—2100 年间气温还将增加  $1.7\sim 4.9^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>,全球性的气候变暖已是不争的事实。全球变暖引起陆地表面变干并导致大气中水汽压的增大<sup>[3]</sup>,前者增加了干旱的影响范围和程度,后者则增加了强降水事件发生的概率<sup>[4]</sup>。青藏高原是全球对气候变化最为敏感的地区之一,气候变化具有一定的超前性<sup>[5]</sup>。青藏高原的降水总体呈增加的趋势<sup>[6]</sup>,但高原北部(青海地区和西藏西北部阿里地区)和南部(西藏其他地区)呈相反变化,北部降水呈波动增加,南部降水呈波动减小,这种降水变化的空间差异主要是由季风和西风带决定的<sup>[6]</sup>。

降水变化不仅对干旱半干旱地区生态系统过程和功能影响显著,而且也可能显著地影响相对湿润的地区<sup>[7]</sup>。降水通过影响土壤水分间接调节植物群落生长,具有一定滞后效应,降雨对植物群落生长影响是一个累积效应<sup>[8]</sup>。植物群落结构会随降水的改变发生一系列的变化。降水变化对生态系统结构和过程如群落组成和动态、物种多样性、物种竞争<sup>[7]</sup>等有显著影响。国内有关降水变化对群落结构影响的研究主要集中在干旱半干旱的内蒙古草原<sup>[9-10]</sup>、热带亚热带鼎湖山<sup>[11]</sup>、北温带长白山<sup>[12]</sup>等地区。多数研究认为降水增加,植物群落物种多样性有不同程度的提高<sup>[9-10]</sup>。青藏高原降水对群落结构影响的研究主要集中在高寒草甸<sup>[13]</sup>。

人类活动导致全球氮沉降速率显著增加。目前,我国已成为除欧洲和北美以外全球第 3 大高氮沉降区<sup>[14]</sup>。青藏高原氮沉降水平也呈现逐年增加的趋势<sup>[15]</sup>。大气氮沉降的大幅增加,导致陆地生态系统土壤或水体酸化、富营养化以及生产力、生物多样性变化等危害,严重威胁着陆地和水体生态系统的健康发展<sup>[14]</sup>。氮沉降增加不仅影响陆地生态系统的结构和功能指标以及生理生态过程,而且还会产生一系列的生态和环境问题,例如改变物种多样性等<sup>[16]</sup>。氮沉降增加会增加植物地上生物量<sup>[17]</sup>,氮素影响物种的变化速率,氮素添加使得草原上的物种损失和更新的速率增加<sup>[18]</sup>。多数研究认为对草地施氮会显著降低物种丰富度<sup>[19]</sup>;也有研究则认为氮添加并未引起草地群落植物多样性的明显变化<sup>[20-21]</sup>,还有研究认为氮添加会引起植物多样性的增加<sup>[22]</sup>。

全球多数陆地生态系统的初级生产力和群落结

构都受到氮素和水分的共同限制<sup>[23]</sup>。草地群落结构与降水量、温度、土壤 pH 值、有效磷、氨态氮、硝态氮等因子有明显的相关关系<sup>[24-25]</sup>。Ren 等通过添加 N, P, K、水等研究了不同组合的资源添加对高寒草甸植物群落物种丰富度和地上生产力的影响,结果表明随着施入不同资源组合数量的增加物种多样性呈线性降低<sup>[26]</sup>。Liu 等认为土壤水分的有效性比温度对于干旱地区草原上的气候变化更加重要<sup>[27]</sup>。Mo 等认为增加水分结果是正效应,会丰富物种的多样性,而氮的增加是负效应;交互作用显著,抵消一部分氮的负效应<sup>[17]</sup>。人为因素使得环境因子发生变化后,其对群落属性的影响是与本地环境因子对群落组成的原初生长限制性、对群落组成种影响的差异性以及由此带来的种内、种间关系改变而发生的。

青藏高原水氮交互的试验集中在高寒草甸<sup>[25]</sup>,对于高寒草原水氮添加的研究鲜有报道。由于陆地生态系统自身的差异及氮素和水分增加量、持续时间的不同,使得陆地生态系统对于氮素、水分状况改变的响应机制相当复杂。有鉴于此,本研究以青藏高原紫花针茅草原为研究对象,分析降水变化和氮添加处理下高寒草原生态系统的群落结构和物种多样性的变化,以期增加我们对全球气候变化背景下高寒草原响应和适应降水和氮沉降变化格局和机制的理解,为我国草地生态系统的生物多样性保护提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于青藏高原东北部的青海省刚察县,海拔  $3\ 200\sim 3\ 800\text{ m}$ 。该地区气候寒冷期长,太阳辐射强,气温日差较大,干旱少雨,降水比较集中,雨热同季,且无明显四季之分,属高原大陆性气候。据刚察县气象观测资料分析,多年平均气温为  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温  $25^{\circ}\text{C}$ ,极端最低  $-31^{\circ}\text{C}$ , $\geq 0^{\circ}\text{C}$  的年积温为  $1\ 299^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量  $370.3\text{ mm}$ ,年蒸发量  $607.4\text{ mm}$ ,平均风力大于 8 级。最大冻土深度  $2.88\text{ m}$ ,土壤以栗钙土为主。

研究样地位于青海省三角城种羊场( $37^{\circ}17'\text{N}$ ,  $100^{\circ}15'\text{E}$ ),该地区植被类型为青藏高原高寒草原中最具代表性的紫花针茅草原,主要物种包括紫花针茅(*Stipa purpurea*)、伊凡苔草(*Carex ivanovae*)、草地

早熟禾(*Poa pratensis*)等(详见表2注1)。

## 1.2 试验设计

1.2.1 样地设计 样地选择植物生长均匀、微地形差异较小、面积较大的群落。样地面积 1 320 m<sup>2</sup>, 样地大小为 36.2×36.5 m, 30 块 3.3×2.7 m 的试验小区分列 5 排(每排为一重复, 5 个重复), 每排 6 块子样地, 每两块子样地之间有一宽为 2 m 的缓冲带, 样地四周为 5 m 的缓冲带。每个试验小区四周有 15 cm 的防径流带, 用雪花铁皮插入地下 20 cm, 防止地表径流。在每个试验小区的东南部为 0.5 m×0.5 m 的方形铝框和两个深度不同的土壤呼吸环; 西南部设立 1×1 m 的固定样方观测区; 北部为采样区和随机样方观测区。

1.2.2 处理设计 试验于 2013 年 6 月开始, 设计降雨和氮添加两个因素, 其中降雨水平设置减少 50% 降雨、对照和增加 50% 降雨 3 个水分处理, 用  $P_-$ ,  $P_0$  和  $P_+$  表示。降雨处理采用凹面透光遮雨板, 将试验小区南北十等分, 所有小区均倾斜(北高 2.1 m, 南高 1.4 m)间隔布设 5 份, 但将对照与增加 50% 降雨处理底部剪开, 通过 PVC 管收集减少 50% 降雨处理的雨水, 当天将收集到的降雨均匀的喷洒于增加 50% 的小区。氮添加设置对照和加氮 [10 g/(m<sup>2</sup>·年)] 2 个水平(氮肥形态为硝酸铵), 用  $N_0$  和  $N_+$  表示, 氮肥分别于 2013—2015 年 6 月, 7 月每月中旬等量施用。2013 年 6 月对试验小区土壤氮做本底调查, 0—30 cm 土壤中总氮含量为 2.5 g/kg, NO<sub>3</sub>-N (1 mol/L KCl 浸提) 含量为 11.5 mg/kg, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (1 mol/L KCl 浸提) 含量为 0.1 mg/kg, pH 值为 9.5。试验采用完全随机试验, 每个处理 5 个重复。各处理对应顺序见表 1。

表 1 各小区(3 m×2.4 m)降水变化及氮素增加量

处理	降水变化	氮素增加
1, $N_0P_-$	减少 50% 降水	0 g
2, $N_0P_0$	对照	0 g
3, $N_0P_+$	增加 50% 降水	0 g
4, $N_+P_-$	减少 50% 降水	205.7 g
5, $N_+P_0$	对照	205.7 g
6, $N_+P_+$	增加 50% 降水	205.7 g

1.2.3 植被调查 群落调查于 2013—2015 年每年 8 月中旬植物生长旺盛期进行。调查采用样方法, 样方面积 1 m×1 m, 每块样地设 3 次重复, 调查指标包括物种组成、群落总盖度、各物种高度和盖度。物种盖度调查采用目测法, 将 1 m×1 m 的样方框等分成 100 个 10 cm×10 cm 的小方格, 样方随机设置, 每个样方每个物种随机选取 5 株测量高度。

## 1.3 统计分析

采用单因变量二固定因素—随机因素之方差分析。分析降水变化和氮素添加以及年际间差异对群落盖度、丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数的影响及交互效应。采用邓肯多重比较(Duncan's multiple range test)检验不同处理间差异显著性。所有统计分析均在 SPSS 18.0 (SPSS, Chicago, USA) 中进行, 统计图形在 SigmaPlot 10.0 中绘制。具体多样性计算公式<sup>[28]</sup>如下:

(1) 丰富度指数:

$$R_0 = S \quad (1)$$

式中:  $S$  表示出现在某一草地类型中的物种数。

(2) 重要值( $L_v$ )=(相对频度+相对盖度+相对高度)/3 (2)

(3) Shannon-Wiener 指数:

$$SW = -\sum P_i \ln P_i \quad P_i = N_i/N \quad (3)$$

式中:  $P_i$  表示某个草地类型中第  $i$  个物种的相对重要值;  $N_i$  表示该草地类型中的第  $i$  个物种的重要值;  $N$  表示该草地类型中所有物种重要值之和(下同)。

(4) Simpson 指数:

$$Sp = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

(5) Pielou 指数:

$$J_{sw} = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (5)$$

## 2 结果和分析

### 2.1 降水变化和氮素添加对种存在度的影响

通过调查发现在三年的降水变化和氮素添加处理后试验小区中物种数量发生变化。其中添加氮素的处理物种数减少明显, 添加氮素且随着降雨减少 50%、对照、增加 50%, 物种数分别由 24, 25, 21 减少到 21, 21, 20, 分别减少了 12.5%, 16%, 4.8%, 降水对于物种存在度变化不明显(表 2)。2014 年有 6 种物种消失: 包括菊科的火绒草、藜、冷蒿, 禾本科的洽草, 蔷薇科的楔叶委陵菜和瑞香科的狼毒。2015 年同 2014 年的出现物种相同。菊科草变化最大, 由之前的 7 种减少到 4 种(表 2)。

### 2.2 降水变化和氮素添加对群落盖度的影响

通过单因变量多因素方差分析, 发现在  $p=0.05$  显著水平下, 群落盖度的年际变化、水分处理和氮素处理极显著, 年际变化和水分处理交互显著, 其余交互不显著(表 3)。年际之间群落盖度变化显著, 并呈逐年增加趋势, 增加降雨 50% 显著高于对照自然降雨高于减少降雨 50% 的盖度, 添加氮素显著高于未添加氮素的群落盖度(图 1)。

表 2 随降水变化和氮素添加种存在度的变化

物种	N <sub>0</sub> P <sub>-</sub>			N <sub>0</sub> P <sub>0</sub>			N <sub>0</sub> P <sub>+</sub>			N <sub>+</sub> P <sub>-</sub>			N <sub>+</sub> P <sub>0</sub>			N <sub>+</sub> P <sub>+</sub>		
	2013年	2014年	2015年	2013年	2014年	2015年	2013年	2014年	2015年	2013年	2014年	2015年	2013年	2014年	2015年	2013年	2014年	2015年
S <sub>1</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>2</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>3</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>4</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>5</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>6</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>7</sub>	×	√	√	×	×	×	×	×	×	√	×	√	√	×	×	×	×	×
S <sub>8</sub>	√	×	×	√	×	×	√	×	×	√	×	×	√	×	×	√	×	×
S <sub>9</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>10</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>11</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>12</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>13</sub>	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
S <sub>14</sub>	×	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
S <sub>15</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>16</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>17</sub>	×	×	×	×	√	√	×	×	√	×	×	×	√	√	√	√	√	√
S <sub>18</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>19</sub>	√	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×	√	×	×	×
S <sub>20</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>21</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>22</sub>	√	√	√	√	√	√	√	×	×	√	×	×	√	√	√	√	√	√
S <sub>23</sub>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>24</sub>	√	×	×	√	×	×	×	×	×	√	×	×	√	×	×	×	×	×
S <sub>25</sub>	√	×	×	√	×	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×	√	√
S <sub>26</sub>	×	√	√	√	√	√	×	√	√	×	√	√	√	√	√	√	√	√
S <sub>27</sub>	√	√	√	×	×	×	×	×	×	√	√	×	×	×	×	×	×	×
S <sub>28</sub>	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	√	√	×	×	×	×	×	×
S <sub>29</sub>	×	×	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×	×	×	×
S <sub>30</sub>	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×
合计	22	21	22	22	20	21	21	19	20	24	21	21	25	21	21	21	20	20

注: S<sub>1</sub>—S<sub>30</sub> 分别代表以下各物种, (S<sub>1</sub>)紫花针茅(*Stipa purpurea*), (S<sub>2</sub>)草地早熟禾(*Poa pratensis*), (S<sub>3</sub>)冷地早熟禾(*Poa crymophila*), (S<sub>4</sub>)扁穗冰草(*Agropyron cristatum*), (S<sub>5</sub>)赖草(*Leymus secalinus*), (S<sub>6</sub>)西北针茅(*Stipa sareptana Becher*), (S<sub>7</sub>)垂穗披碱草(*Elymus nutans*), (S<sub>8</sub>)洽草(*Koeleria glauca*), (S<sub>9</sub>)阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*), (S<sub>10</sub>)猪毛蒿(*Artemisia scoparia*), (S<sub>11</sub>)蒲公英(*Taraxacum mongolicum*), (S<sub>12</sub>)大蓟(*Cirsium japonicum*), (S<sub>13</sub>)火绒草(*Leontopodium leontopodioides*), (S<sub>14</sub>)冷蒿(*Artemisia frigida*), (S<sub>15</sub>)棘豆(*Oxytropis*), (S<sub>16</sub>)多枝黄芪(*Astragalus polycladus*), (S<sub>17</sub>)披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*), (S<sub>18</sub>)伊凡苔草(*Carex ivanovae*), (S<sub>19</sub>)矮嵩草(*Kobresia humilis*), (S<sub>20</sub>)异叶青兰(*Dracocephalum heterophyllum*), (S<sub>21</sub>)三辐柴胡(*Bupleurum triradiatum*), (S<sub>22</sub>)鸢尾(*Iris tectorum*), (S<sub>23</sub>)多裂委陵菜(*Potentilla multifida*), (S<sub>24</sub>)楔叶委陵菜(*Potentilla cuneata*), (S<sub>25</sub>)阿拉善马先蒿(*Pedicularis alaschanica*), (S<sub>26</sub>)鳞叶龙胆(*Gentiana squarrosa*), (S<sub>27</sub>)达乌里秦艽(*Gentiana dahurica*), (S<sub>28</sub>)天蓝韭(*Allium cyaneum*), (S<sub>29</sub>)狼毒(*Stellera chamaejasme*)以及(S<sub>30</sub>)藜(*Chenopodium album*); (√)表示该物种存在, (×)表示该物种不存在。

表 3 氮素添加与降水变化对盖度的单因变量多因素方差分析结果 (p=0.05)

变异来源	盖度		
	自由度	F 值	显著水平
年	2	55.001	3.17 × 10 <sup>-15</sup>
氮素处理	1	23.648	6.58 × 10 <sup>-6</sup>
水分处理	2	20.109	1.15 × 10 <sup>-7</sup>
年际与氮互作	2	2.889	0.062
年际与水互作	4	8.163	1.74 × 10 <sup>-5</sup>
氮与水互作	2	0.255	0.776
年、氮、降水互作	4	0.300	0.877

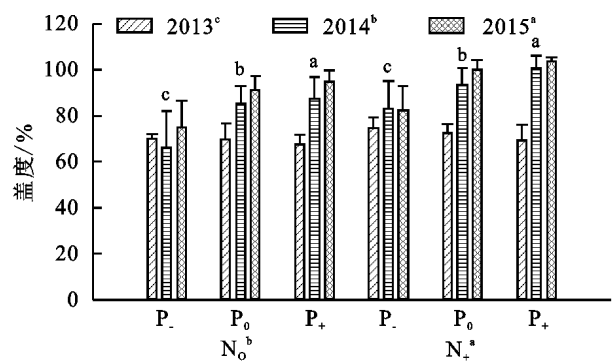


图 1 年际间降雨变化和氮素增加对植被盖度的影响

### 2.3 降水变化和氮素添加对物种多样性指数的影响

2.3.1 丰富度指数对降水变化和氮素添加的响应  
方差分析结果显示丰富度指数在年际和氮素处理方面差异显著,其余处理均不显著(表 4)。因此,进一

步分析丰富度指数年际之间变化(图 2)。年际之间 2015 年丰富度指数显著高于 2013 年和 2014 年,添加氮素的处理显著低于未添加氮素的处理。

表 4 氮素添加与降水变化对物种多样性指数的单因变量多因素方差分析结果

变异来源	物种多样性指数			
	丰富度指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数
年	3.872*	25.647***	21.841***	33.591***
氮素处理	6.400*	1.420	1.339	2.038
水分处理	0.953	2.050	0.197	5.780*
年际与氮互作	0.059	0.639	0.775	0.019
年际与水互作	0.375	0.160	0.463	0.207
氮与水互	1.615	0.235	0.014	0.472
年、氮、降水互作	0.607	0.664	0.329	0.717

注:\*, \*\*, \*\*\*表示  $p < 0.05, 0.01$  和  $0.001$ 。

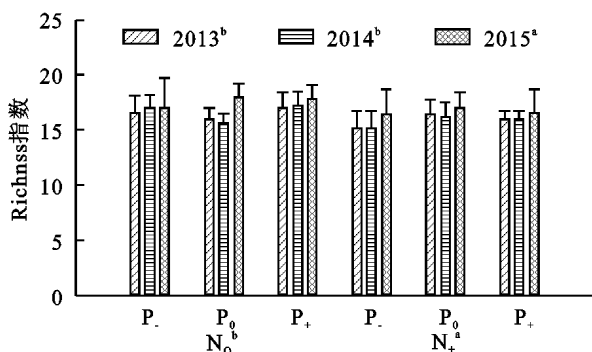


图 2 年际间降雨变化和氮素增加对丰富度指数的影响

2.3.2 群落物种多样性对降水变化和氮素添加的响应  
方差分析结果显示 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数在年际间有显著差异,另外,

Pielou 指数在降水处理中差异显著(表 4),其余处理和交互均不显著。因此,进一步分析 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数年际之间变化和 Pielou 指数在降水处理中差异(图 3)。

2014 年和 2015 年的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数均显著高于 2013 年。Pielou 均匀度指数中对对照 < 增减和减少降水的处理 ( $p < 0.05$ )。

### 2.4 群落盖度与物种多样性关系

通过上述的结果我们发现,在氮素添加后群落盖度与物种多样性之间呈负相关,即群落盖度增加使得物种多样性降低 ( $r = 0.187$ ) (图 1, 3)。降水处理中群落盖度与物种多样性无明显相关关系。

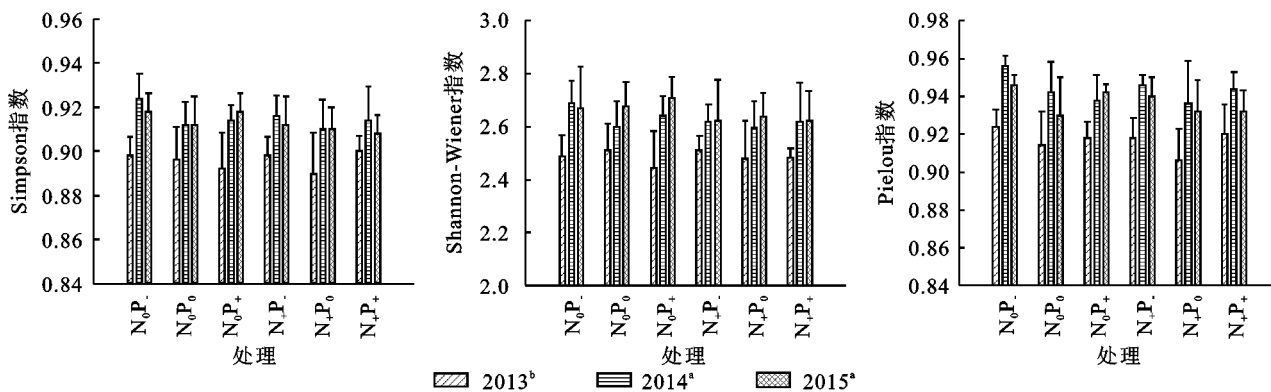


图 3 年际间降雨变化和氮素增加对 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数的影响

## 3 讨论

### 3.1 降水变化和氮素添加对种存在度和盖度的影响

3 年试验期间,氮素添加处理的种存在度明显减少,而降水处理无明显变化(表 2)。这与 Mo 等在内蒙古草原得到的结果一致<sup>[17]</sup>。这可能的原因是,高寒草原本身植被稀少,施氮后促进了禾草类植物的生长,为其他次优势种留有少部分资源,而作为弱势种

群的菊科植物在竞争中被淘汰而消失。持续性的气候变化可能会改变植物的生活史和物种的竞争能力,导致群落组成均衡性的消失。但由于天然群落的复杂性,氮添加与物种数间的关系机理仍然需要进一步研究。氮素的添加同样促进群落盖度显著增加<sup>[29]</sup>。另外,降水变化对群落盖度影响同样显著,群落盖度在年际间有显著差异(表 4),表现为植被盖度 2015 年 > 2014 年 > 2013 年。增加降雨和自然降雨显著高于减

少降雨的盖度,增加氮素显著高于未增加氮素的群落盖度(图 1)。氮素的增加和降水的增加都能增加群落盖度,这与多数研究结果一致,这主要是因为氮素增加和降水增加使得植物生物量增加,尤其是促进禾草类地上生物量的增加,从而引起盖度的增加<sup>[29]</sup>。

### 3.2 降水变化和氮素添加对物种多样性指数的影响

多数研究认为氮素添加会降低物种丰富度。Ren 等研究了添加 N、P、K、水等营养物质的不同组合对高寒草甸植物群落物种丰富度和地上生产力的影响,结果表明随着施入不同资源组合数量的增加,物种丰富度呈线性降低<sup>[26]</sup>。张杰琦等研究也表明氮素添加显著降低了物种丰富度<sup>[25]</sup>。本研究结果显示,同属青藏高原的高寒草原与高寒草甸的物种丰富度对氮素的添加有相同的反应,添加氮素显著降低物种丰富度,这与上述结果一致。氮素增加会降低物种丰富度,究其原因可能有以下几点:(1)氮素添加使得优势种植物生物量显著提高,加剧了种间竞争,形成高植株物种对矮植株的光抑制,从而导致物种丰富度降低。Ren 等认为物种之间对群落下层光的竞争是资源添加导致物种多样性降低的主要原因之一<sup>[26]</sup>。(2)凋落物积累和盖度的增加同样使地物种丰富度降低。凋落物积累和盖度增加使得地表水分蒸发减少,加剧了底层植物的光抑制<sup>[23,26]</sup>。(3)当水分相对充足时,施氮增加了土壤的有效资源,竞争力较强的优势种群覆盖度和高度快速增加,使弱势种群生长受到抑制,甚至被淘汰<sup>[24]</sup>。

目前,关于氮素添加对物种多样性影响的研究报道很多。有研究认为,氮素添加会导致物种多样性下降<sup>[19]</sup>,也有研究认为氮素添加不会导致物种多样性下降<sup>[20-21]</sup>。本研究结果表明,处理间氮素添加后丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数差异均不显著,这与氮素增加并没有引起草地群落植物多样性的明显变化相似<sup>[20-21]</sup>。这可能是因为试验周期较短,需要在接下来的几年中进一步分析。物种多样性与水的反应结果不一致,常学礼等认为物种多样性指数随降水量变化而变化,二者呈正相关<sup>[30]</sup>。多数研究认为降水增加,植物群落物种多样性有不同程度的提高<sup>[9-10]</sup>。降水是通过影响土壤水分间接调节植物群落生长,具有一定滞后效应,降雨对植物群落生长影响是一个累积效应,因此需要确定合适的时间尺度作为参数才能准确预测全球变化下植物群落的变化方向<sup>[11]</sup>。本试验结果表现为:降水变化对 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数差异均不显著,这与很多研究结果一致,降水变化并没有改变物种多样性<sup>[31]</sup>。该结果与白春利等在

短花针茅荒漠草原上得到的结果一致<sup>[31]</sup>。

### 3.3 水氮交互对物种多样性的影响

全球大多数陆地生态系统的初级生产力和群落结构都受到氮素和水分的共同限制<sup>[23]</sup>。国内外一些学者对草地生态系统的研究表明,草地群落结构与降水量、温度、氨 N、硝 N 等因子有明显的相关关系<sup>[24-25]</sup>。本研究的结果表明,水氮交互对处理间丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数差异均不显著(表 4)。但多样性指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数在年际间有显著差异(表 4)。一方面这可能是因为增加水分结果是正效应,而氮的增加是负效应;交互作用中抵消一部分氮的负效应,从而使得交互作用对各指数结果不显著<sup>[17]</sup>。另一方面这种交互作用可能也与时间上的积累有关,白春利等认为氮素和水分有互作效应,各处理对群落特征的影响有赖于时间的积累<sup>[31]</sup>,另外,充足的水分可以促进植物对氮素的吸收,从而中和氮素的效应,从而使得交互作用不明显<sup>[18]</sup>。此外,高寒草原蒸发量较大,高蒸发使得植物对水分的需求量无法得到满足,短期的动态可能会控制一定程度上环境的波动<sup>[18]</sup>。本试验中,2014 年和 2015 年的丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数均显著高于 2013 年。这可能的原因是:(1)试验布设于 2013 年,样地布设引起的土壤扰动影响试验结果。(2)年际间的降水差异,刚察县气象站数据显示,2014 年和 2015 年降水量显著高于 2013 年;分别为 571.9,412.7,375.3 mm。

## 4 结论

本研究布设于青藏高原高寒草原,对全球变化前提下的水氮交互试验进行补充。此外,本研究在氮素添加的基础上考虑了降水的作用,结果显示:氮素添加显著影响青藏高原高寒草原物种组成、群落盖度以及丰富度指数,而降水作用只影响群落盖度;降水变化除了对 Pielou 指数有影响外,降水变化和氮素添加均不影响多样性指数;年际间各指数差异显著,交互作用不显著。针对青藏高原高寒草原具体实践中,减少氮肥施用可降低物种多样性减少的风险。因此,相对于长期的试验,短期的试验无法对于处理提供较多可靠的信息,我们需要对该试验进行进一步的观测,从而能够更好地说明问题。

### 参考文献:

- [1] Gray V. Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers [J]. Energy & Environment, 2007, 18(3): 433-440.

- [2] Wigley T M L, Raper S C B. Interpretation of high projections for global-mean warming[J]. *Science*, 2001, 293(5529):451-454.
- [3] Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change[J]. *Science*, 2003,302(5651):1719-1723.
- [4] Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003,84(9):1205-1217.
- [5] Maocang T, Cunqiang L. On the facts of that the Qinghai-Xizang Plateau was the source region of climatic variation [C]// *The Proceedings of the First Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau*. Beijing: Science Press, 1992.
- [6] 段克勤,姚檀栋,王宁练. 青藏高原南北降水变化差异研究[J]. *冰川冻土*, 2008,30(5):726-732.
- [7] Dunne J A, Harte J, Taylor K J. Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods[J]. *Ecological Monographs*, 2003,73(1):69-86.
- [8] Niu S, Wu M, Han Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe[J]. *New Phytologist*, 2008,177(1):209-219.
- [9] Wan S, Hui D, Wallace L, et al. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005,53(2):159-160.
- [10] Niu S, Wu M, Han Y I, et al. Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2010,16(1):144-155.
- [11] 周国逸,闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. *生态学报*, 2001,21(12):2002-2012.
- [12] 王宁,王美菊,李世兰,等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2015,26(5):1297-1305.
- [13] Geng Y, Wang L, Jin D, et al. Alpine climate alters the relationships between leaf and root morphological traits but not chemical traits[J]. *Oecologia*, 2014,175(2):445-455.
- [14] Lovett G M, Reiners W A, Olson R K. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests: hydrological and chemical inputs[J]. *Science*, 1982,218(4579):1303-1304.
- [15] LüC, Tian H. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007,112(D22):229-238.
- [16] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands [J]. *Nature*, 2008,451(7179):712-715.
- [17] Mo J, Zhang W E I, Zhu W, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. *Global Change Biology*, 2008,14(2):403-412.
- [18] Xu Z, Wan S, Ren H, et al. Effects of water and nitrogen addition on species turnover in temperate grasslands in northern China[J]. *PloS ONE*, 2012,7(6):1634-1634.
- [19] Goldberg D E, Miller T E. Effects of different resource additions of species diversity in an annual plant community [J]. *Ecology*, 1990,71(1):213-225.
- [20] Huberty L E, Gross K L, Miller C J. Effects of nitrogen addition on successional dynamics and species diversity in Michigan old-fields[J]. *Journal of Ecology*, 1998,86(5):794-803.
- [21] 张彦东,沈有信,刘文耀. 金沙江干旱河谷退化草地群落对氮磷施肥的反应[J]. *植物研究*, 2004,24(1):59-64.
- [22] 郑华平,陈子萱,王生荣,等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. *草业学报*, 2007,16(5):34-39.
- [23] Hooper D U, Johnson L. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: responses to geographical and temporal variation in precipitation[J]. *Biogeochemistry*, 1999,46(1/3):247-293.
- [24] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands[J]. *Science*, 1996,274(5293):1720-1723.
- [25] 张杰琦,李奇,任正炜,等. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响[J]. *植物生态学报*, 2010,34(10):1125-1131.
- [26] Ren Z, Li Q, Chu C, et al. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2010,3(1):25-31.
- [27] Liu W, Zhang Z H E, Wan S. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2009,15(1):184-195.
- [28] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法:  $\alpha$ 多样性的测度方法(下)[J]. *生物多样性*, 1994,2(4):231-239.
- [29] 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.
- [30] 常学礼,赵爱芬. 科尔沁沙地固定沙丘植被物种多样性对降水变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2000,24(2):147-151.
- [31] 白春利,阿拉塔,陈海军,等. 氮素和水分添加对短花针茅荒漠草原植物群落特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2013(2):69-75.