

DOI:10.11686/cyxb2019516

http://cyxb.magtech.com.cn

李静, 红梅, 闫瑾, 等. 短花针茅荒漠草原植被群落结构及生物量对水氮变化的响应. 草业学报, 2020, 29(9): 38—48.

Li J, Hong M, Yan J, et al. The response of vegetation community structure and biomass in *Stipa breviflora* desert steppe to water and nitrogen. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 38—48.

短花针茅荒漠草原植被群落结构及生物量对水氮变化的响应

李静, 红梅*, 闫瑾, 张宇晨, 梁志伟, 叶贺, 高海燕, 赵巴音那木拉

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 为了解降水变化和氮沉降对荒漠草原植被群落结构和生物量的影响, 在内蒙古四子王旗短花针茅荒漠草原进行水氮交互试验, 采用裂区试验设计, 主区为 CK(自然降水)、W(增水 30%)、R(减水 30%), 副区为 0 (N_0)、30 (N_{30})、50 (N_{50})、100 (N_{100}) $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 共 12 个处理。结果表明: 1) 水氮的介入导致植物群落组成、重要值发生了明显变化, R 中群落物种数最低, 提高了优势种在群落中的重要值, 氮素添加导致群落物种数呈“抛物线”型, 群落物种数先增多后减少。2) CK、W、R 条件下随施氮量增加, 物种丰富度、Shannon—wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均先增大后减小, 2016 和 2018 年在 CK- N_{30} 、W- N_{30} 、R- N_{50} 达到最大值, 干旱年份(2017)分别在 CK- N_{30} 、W- N_{50} 、R- N_{100} 达到最大值。水分主效应、氮素和水氮交互作用均对以上 3 个植物多样性指数有显著影响 ($P < 0.05$)。3) 水分和氮素刺激了地上生物量的增加, 短期氮素添加使多年生禾草生物量在地上总生物量中占比增加, 多年生杂草生物量在地上总生物量中占比减小。水分、氮素、水氮交互均对地上生物量有显著影响 ($P < 0.05$)。

关键词: 氮沉降; 降水变化; 荒漠草原; 群落结构; 生物量

The response of vegetation community structure and biomass in *Stipa breviflora* desert steppe to water and nitrogen

LI Jing, HONG Mei*, YAN Jin, ZHANG Yu-chen, LIANG Zhi-wei, YE He, GAO Hai-yan, ZHAO Bayinamula

Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract: An experiment comprising a factorial combination of three water and four nitrogen levels (12 treatments), laid out in a split plot design, was conducted to understand the effects of precipitation change and nitrogen deposition on vegetation community structure and biomass in *Stipa breviflora* desert steppe in Siziwang Banner, Inner Mongolia. The main plot treatments were: CK (natural rainfall), W (30% rainfall addition), R (30% rainfall reduction), while the subplot treatments were 0 (N_0), 30 (N_{30}), 50 (N_{50}), and 100 (N_{100}) $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. The results show: 1) The application of water and nitrogen resulted in significant changes in community composition and species importance values. The R treatment had the lowest number of community species, and the importance value of dominant species in community was increased. The addition of nitrogen

收稿日期: 2019-11-26; 改回日期: 2020-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(31860136), 国家自然科学基金(31560156)和内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0350)资助。

作者简介: 李静(1995-), 女, 内蒙古清水河人, 在读硕士。E-mail: 1437325264@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: nmczhm1970@126.com

resulted in a curve of ‘parabola’ shape for number of species present (i. e. the number of community species was higher at medium nitrogen application rates than at N_0 or N_{100}). 2) With increased rate of nitrogen addition, species richness, Shannon—wiener diversity and Pielou evenness index were initially increased, but decreased at higher nitrogen application rates. The maximum values were observed in treatments CK- N_{30} , W- N_{30} and R- N_{50} in 2016 and 2018, and the lowest value of CK- N_{30} , W- N_{30} , R- N_{50} in the drought year (2017), respectively. The main effects of water, nitrogen and water-nitrogen interaction all have significant effects on the above three plant diversity indexes ($P < 0.05$). 3) Water and nitrogen both stimulated aboveground biomass increase. Water, nitrogen as well as water and nitrogen interaction have significant effects on aboveground biomass ($P < 0.05$). The proportion of perennial grasses in the total aboveground biomass was increased by short-term nitrogen addition, while the percentage of perennial weeds was decreased.

Key words: nitrogen deposition; precipitation variation; desert steppe; community structure; biomass

降水和氮沉降作为全球变化的两个重要现象,正不断地影响着陆地生态系统^[1]。随着全球变化的加剧,大气氮沉降迅猛增加,预计在 2050 年达到 $195 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,远远超出全球氮素临界负荷($100 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$)^[2-4]。高氮沉降会改变碳、氮、磷等元素的有效性,进而影响植被生产力,通过改变植物生态系统的组成来降低生物多样性^[5-7]。同时,降水量在全球尺度上也发生了明显变化^[8],根据联合国政府间气候变化专门委员会第五次气候变化评估报告显示,1901 年以来北半球中纬度陆地范围平均降水呈增加趋势^[9]。降水是干旱、半干旱生态系统重要的水分来源,降水格局变化从不同尺度影响植物生理及生态学过程^[10-12],尤其是受水分限制的荒漠草原生态系统,由于物种数量相对较少,外界细微的变化都很可能对生态系统造成很大的影响^[13]。

在荒漠草原生态系统中,氮沉降和降水变化带来的影响直接表现在植被群落结构中。目前,国内外学者就单一氮沉降及水氮耦合对物种多样性的影响做了大量研究,但得到的结论并不一致^[14]。Zeng 等^[15]和 Bai 等^[16]的研究都认为氮素添加后植物物种多样性降低,Huberty 等^[17]认为氮素添加对植物物种多样性无显著影响,还有少数研究认为氮素添加使植物物种多样性增加^[18]。多数研究都集中一次性施氮、设置单一施氮梯度或降水与集中一次性施入的氮素交互,并且由于生态系统的多样性和地区之间的降水量差异,试验结果往往不能直接应用到另一个生态系统中^[19]。

为了更好地解释氮沉降和降水对荒漠草原植被结构及多样性影响的变化,本研究以内蒙古乌兰察布市四子王旗短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原为研究对象,探究水分、氮素及水氮交互对荒漠草原群落结构、物种多样性和生物量的影响。现提出以下科学问题:1)短花针茅荒漠草原降水量低,养分贫瘠,水分、氮素、水氮交互将如何影响荒漠草原群落结构及多样性;2)水分、氮素、水氮交互对荒漠草原植被生物量有何影响,是否会限制植物的生长。研究大气氮沉降和降水格局变化对荒漠草原生态系统的影响,以期对荒漠草原生态系统提供科学的管理对策,实现其可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古乌兰察布市四子王旗短花针茅荒漠草原生态系统野外科学试验基地,地理坐标为 $111^{\circ}53' \text{ E}$, $41^{\circ}47' \text{ N}$,海拔 1450 m,属于温带干旱、半干旱大陆性季风气候区,年平均降水量为 280 mm,主要集中在 6—9 月,年平均气温为 3.4° C 。2017 年全年降水同往年相比较少,降水量为 258.8 mm,降水主要集中在 6、7、10 月,气温同往年相比有所上升,平均气温为 5.65° C (图 1)。该试验区地带性植被是短花针茅荒漠草原,植物种类较少,主要优势种有短花针茅和无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)。

1.2 试验设计

试验于 2015 年 12 月在样地围栏内进行,采用裂区设计,主区为 3 个水分处理,分别是自然降水(CK)、增水 30%(W)和减水 30%(R),副区为 4 个氮素处理,分别是 0 (N_0)、30 (N_{30})、50 (N_{50})、100 (N_{100}) $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (不包括大气沉降的氮量)共 12 个处理,即:对照(CK- N_0)、自然降水施氮 30 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (CK- N_{30})、自

然降水施氮 $50\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (CK- N_{50})、自然降水施氮 $100\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (CK- N_{100})、增水不施氮 (W- N_0)、增水施氮 $30\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (W- N_{30})、增水施氮 $50\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (W- N_{50})、增水施氮 $100\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (W- N_{100})、减水不施氮 (R- N_0)、减水施氮 $30\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (R- N_{30})、减水施氮 $50\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (R- N_{50})、减水施氮 $100\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (R- N_{100})。增水试验分别在每年 5—8 月的 1—3 日进行,通过对荒漠草原多年的降水量监测并做模型预测未来降水量增减极限,增加量为近 5 年 5 月 (18.4%)、6 月 (17.0%)、7 月 (28.3%)、8 月 (36.3%) 平均降水量的 30%,减水试验通过减水架减少当地年平均降水量的 30%,减水架由条状凹槽式亚克力板构成,亚克力板遮挡面积占小区面积的 30% 达到减水 30%。根据本地区氮沉降情况,氮处理强度和频度参考国际上同类研究的处理方法,施氮处理按照施氮量换算成小区硝酸铵 (NH_4NO_3) 施用量,为了尽可能均匀施氮,在每年生长季 (5—9 月) 每月一次,将每个小区每次施用硝酸铵的量溶于 30 L 水中 (在增水处理之后),均匀喷洒在每个小区内,非生长季 (10 月—翌年 4 月),将每月每个小区施氮量与风干土 (直径 $<2\text{ mm}$) 按肥土比 1:10 充分混匀,在无风时以模拟氮沉降的方式直接撒施。试验共 12 个处理 3 次重复,共计 36 个样方,每个小区面积为 $7\text{ m}\times7\text{ m}=49\text{ m}^2$,各小区间设置 2 m 隔离带。

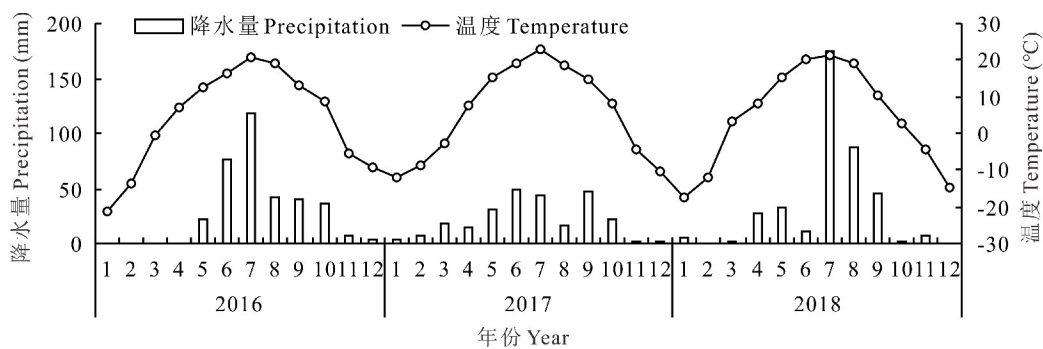


图 1 3 年气温和降水动态
Fig. 1 The temperature and precipitation patterns in three years

1.3 取样方法

野外调查工作于每年植物生长旺季 8 月中旬进行,在各小区内随机选择 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 样方,再将样方分成 100 个 $10\text{ cm}\times10\text{ cm}$ 的小方格,测量并记录样方内各植物种的高度、密度、盖度、频度。生物量的测定为在各小区内随机设置 $0.5\text{ m}\times0.5\text{ m}$ 的小样方,之后采用收割法齐地剪取植物地上部分装入信封中,每个小区重复 3 次,带回实验室在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温箱烘干 24 h 称重。将样方内物种根据生活型分成 4 个类群:一、二年生植物、多年生杂草、多年生禾草和半灌木、小半灌木。

1.4 数据统计与分析

物种的相对重要值 = (相对密度 + 相对高度 + 相对干重) / 3^[20]

地上生物量用植物干重表示。物种丰富度 (P) 用单位面积出现的物种数 (S) 表示: $P=S$ 。

$$\text{Shannon-wiener 指数}^{[21]}: H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}^{[22]}: E = H' / \ln S$$

式中: P_i 为第 i 个物种的个体数占总个体数的比率; S 为物种数。

采用 SAS 9.1 软件对地上生物量、植物多样性指数进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 并对植物多样性指数做双因素方差分析 (Two-way ANOVA),用邓肯多重比较检验 (Duncan's multiple range test) 在方差分析中有差异的变量间的差异显著。采用 Microsoft Excel 2003 进行制图。

2 结果与分析

2.1 水氮控制对荒漠草原植物重要值的影响

2016 年植被群落有刺藜 (*Chenopodium aristatum*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、灰绿藜 (*Chenopodium glau-*

cum)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、苔草(*Carex tristachya*)、短花针茅、无芒隐子草、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、细叶韭(*Allium tenuissimum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、木地肤(*Kochia prostrata*)，与 CK-N₀ 相比，增水施氮(W-N)、CK 中 N₃₀、N₅₀、N₁₀₀ 和减水施氮(R-N)R 中 N₅₀、N₁₀₀ 的物种数目有增加趋势，而 R-N₀ 和 R-N₃₀ 的物种数目减少。2017 年荒漠草原的群落组成依旧是由一、二年生植物、多年生杂草、多年生禾草和半灌木、小半灌木组成，但物种数减少。2018 年同 2016 年相比，一、二年生植物在群落中的比例增加，多年生杂草减少，其中阿尔泰狗娃花和苔草消失，刺藜、灰绿藜、猪毛蒿和银灰旋花在群落中占比增加。

水、氮作用下，物种的重要值不同，其中多年生禾草短花针茅的重要值最高，其次是无芒隐子草。2016 年，在 W 中随着氮素的添加，猪毛蒿的重要值逐渐减小，短花针茅先减小后增大，木地肤逐渐增大。在 CK 中随氮素的添加，猪毛蒿的变化规律不明显，栉叶蒿在 N₀ 的重要值最大，短花针茅重要值先减小后增大。R 提高了短花针茅、克氏针茅和细叶韭的重要值。2017 年小半灌木木地肤发育良好，重要值随氮素添加逐渐增大。随着时间的延长，2018 年群落中刺藜、灰绿藜、猪毛蒿和银灰旋花所占比例增加，在 W 中随氮素添加，刺藜重要值先减小后增大，灰绿藜和猪毛蒿分别在 N₁₀₀、N₀ 达到最大值，W 处理提高了栉叶蒿的重要值。在 CK 中，刺藜重要值随氮素添加先减小后增大，在 N₀、N₁₀₀ 达到最大值。在 R 中，刺藜重要值随氮素添加先增大后减小，在 N₅₀ 达到最大值(表 1)。

2.2 水氮控制对荒漠草原植物多样性指数的影响

2016 年在 3 种不同水分条件下随着氮素的添加，物种丰富度、Shannon—wiener 指数、Pielou 均匀度指数的变化趋势相同，均呈先增大后减小，分别在 W-N₃₀、CK-N₃₀、R-N₅₀ 达到最大值，但均无显著差异。各指数在 W-N₃₀ 处理下分别增加了 16%、8%、6%，CK-N₃₀ 处理下分别增加了 10%、5%、6%，R-N₅₀ 处理下物种丰富度、Shannon—wiener 指数分别增加了 7%、6%，均匀度指数无变化。在相同氮素添加条件下，各水分处理中物种丰富度、Shannon—wiener 指数均为 W>CK>R，均匀度指数变化幅度较小。2017 年在 3 种不同水分条件下，随着氮素的添加，物种丰富度、Shannon—wiener 指数、Pielou 均匀度指数呈先增大后减小的趋势，分别在 W-N₅₀、CK-N₃₀ 达到最大值，在 R 处理中随着氮素的添加，各指数呈逐渐增大的趋势，均在 N₁₀₀ 达到最大值，且对各指数均无显著影响。在相同氮素添加下，物种丰富度、Shannon—wiener 指数、Pielou 均匀度指数均呈 W>CK>R 且 W 对群落多样性有显著影响($P<0.05$)。2018 年各指数变化趋势和 2016 年相同，在 3 种不同水分条件下，随着氮素的添加物种丰富度、Shannon—wiener 指数、Pielou 均匀度指数同样呈先增大后减小的趋势，分别在 W-N₃₀、CK-N₃₀ 和 R-N₅₀ 达到最大值，各指数在 W-N₃₀ 处理下分别增加了 21%、17%、16%，CK-N₃₀ 处理下分别增加了 6%、13%、16%，R-N₅₀ 处理下分别增加了 9%、15%、15%。相同氮素添加不同水分处理中，物种丰富度、Shannon—wiener 指数和均匀度指数为 W>CK>R，增水对物种丰富度和 Shannon—wiener 指数有显著影响($P<0.05$)。2016 年同 2018 年相比，各处理下物种丰富度和 Shannon—wiener 指数变化较小，但均匀度指数有减小的趋势(图 2)。

为了明确水、氮及水氮交互作用对植被群落多样性的影响，进行了双因素方差分析(表 2)。综合分析各处理间的物种丰富度、Shannon—wiener 指数、Pielou 均匀度指数表现为 2017 年最低，而 2016 和 2018 年大致相同。水氮双因素方差分析结果表明，水分、氮素及水氮交互作用均对物种丰富度和植物群落多样性有显著影响，相比氮素，水分的作用更大。

2.3 水氮控制对荒漠草原地上生物量的影响

3 年综合分析，W、CK、R 条件下，随着氮素的添加地上生物量呈逐渐增大的趋势，分别在 W-N₁₀₀、CK-N₁₀₀、R-N₁₀₀ 达到最大值。CK 中 N₃₀、N₅₀、N₁₀₀ 分别增加了 14.35%、20.05%、24.15%，W 中 N₃₀、N₅₀、N₁₀₀ 分别增加了 16.69%、21.49%、31.72%，R 中 N₃₀、N₅₀、N₁₀₀ 分别增加了 8.00%、10.50%、15.90%。相同氮素添加下，地上生物量在 3 种不同的水分处理下表现为 W>CK>R，增水对地上生物量有显著影响($P<0.05$)，和 CK-N₀ 相比较，W-N₀ 增加了 17.26%，R-N₀ 减少了 32.46%(图 3)。

地上生物量按植物功能型表现为多年生禾草>一、二年生植物>多年生杂草>半灌木、小半灌木。一、二年生植物和多年生禾草在各水分处理中随着氮添加，地上生物量显著增加($P<0.05$)，且在总地上生物量中的占比

表 1 不同年份水氮添加对短花针茅荒漠草原植物种群重要值的影响

Table 1 Effects of water and nitrogen addition on important value of different population in *S. breviflora* desert steppe in different years

年份 Year	功能群 Functional groups	种类组成 Species composition	重要值 Important value											
			W				CK				R			
			N ₀	N ₃₀	N ₅₀	N ₁₀₀	N ₀	N ₃₀	N ₅₀	N ₁₀₀	N ₀	N ₃₀	N ₅₀	N ₁₀₀
2016	一、二年生植物 and biennial plants	刺藜 <i>C. aristatum</i>	—	—	—	—	—	—	0.05	0.01	—	—	—	—
		猪毛菜 <i>S. collina</i>	0.11	0.10	0.09	0.07	—	0.07	—	0.12	0.11	—	0.12	0.06
		灰绿藜 <i>C. glaucum</i>	—	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	0.13
		猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.08	0.05	—	0.08	0.07	0.09	0.08	—	—	0.12	0.09	0.08
	多年生杂草 Perennial weeds	栉叶蒿 <i>N. pectinata</i>	—	0.15	0.11	0.11	0.16	0.09	0.10	0.13	0.15	0.11	0.11	0.13
		银灰旋花 <i>C. ammannii</i>	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	—	—	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—
		苔草 <i>C. tristachya</i>	—	—	—	—	0.02	—	0.11	0.09	—	—	0.30	0.11
	多年生禾草 Perennial grass	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	0.21	0.19	0.20	0.24	0.23	0.20	0.24	0.24	0.25	0.27	0.20	0.19
		无芒隐子草 <i>C. songorica</i>	0.13	0.09	0.14	0.11	0.11	0.12	0.08	0.13	0.10	0.11	0.90	0.10
		克氏针茅 <i>S. krylovii</i>	0.13	0.09	—	0.09	0.09	0.10	—	—	0.13	0.11	0.07	—
		蒙古韭 <i>A. mongolicum</i>	—	0.04	0.03	—	—	0.04	—	—	—	—	—	0.04
		细叶韭 <i>A. tenuissimum</i>	0.03	—	—	0.04	0.03	—	0.05	—	0.04	0.06	0.03	0.04
	半灌木、小半灌木 shrub and undershrub	冷蒿 <i>A. frigida</i>	—	—	0.04	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—
		木地肤 <i>K. prostrata</i>	0.06	0.08	0.09	0.11	0.08	0.08	0.09	0.07	0.07	0.07	0.06	—
2017	一、二年生植物 and biennial plants	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.27	0.11	—	0.10	—	0.13	0.16	—	—	—	—	—
	多年生杂草 Perennial weeds	银灰旋花 <i>C. ammannii</i>	—	0.11	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—
	多年生禾草 Perennial grass	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	0.51	0.32	0.27	0.30	0.42	0.48	0.62	0.47	0.60	0.59	0.65	0.58
		无芒隐子草 <i>C. songorica</i>	—	0.10	0.16	0.12	0.06	0.13	0.08	0.07	—	—	—	0.10
		克氏针茅 <i>S. krylovii</i>	0.20	—	0.11	0.13	—	0.24	0.27	—	0.15	0.18	0.18	—
		蒙古韭 <i>A. mongolicum</i>	0.05	0.04	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	半灌木、小半灌木 shrub and undershrub	木地肤 <i>K. prostrata</i>	0.05	0.09	0.10	0.14	0.15	0.12	0.22	0.15	0.19	0.17	—	0.20
2018	一、二年生植物 and biennial plants	刺藜 <i>C. aristatum</i>	0.15	0.10	0.12	0.12	0.10	0.05	0.06	0.10	0.05	0.06	0.10	0.05
		猪毛菜 <i>S. collina</i>	—	—	0.03	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—
		灰绿藜 <i>C. laucum</i>	0.13	0.15	0.11	0.19	0.08	0.11	0.09	0.08	0.06	0.07	0.11	0.10
		猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.29	0.12	0.24	0.21	0.06	0.18	0.12	0.06	0.02	0.01	0.05	0.10
	多年生杂草 Perennial weeds	栉叶蒿 <i>N. pectinata</i>	0.03	0.09	0.06	0.08	0.04	0.03	0.02	0.04	0.05	—	0.07	0.27
		银灰旋花 <i>C. ammannii</i>	0.03	0.03	0.04	0.08	—	0.03	—	0.11	0.05	0.06	0.01	0.03
	多年生禾草 Perennial grass	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	0.17	0.20	0.24	0.23	0.24	0.22	0.20	0.22	0.27	0.23	0.24	0.26
		无芒隐子草 <i>C. songorica</i>	0.13	0.15	0.14	0.10	0.12	0.14	0.15	0.13	0.10	0.13	0.13	0.09
		克氏针茅 <i>S. krylovii</i>	0.12	0.09	—	0.12	—	0.08	—	0.09	—	—	—	—
		蒙古韭 <i>A. mongolicum</i>	0.04	—	0.06	—	0.04	0.06	0.06	0.04	—	0.07	0.07	—
		细叶韭 <i>A. tenuissimum</i>	0.05	0.04	—	—	0.05	0.04	0.05	0.05	0.07	—	0.06	—
	半灌木、小半灌木 shrub and undershrub	冷蒿 <i>A. frigida</i>	—	0.09	—	—	—	—	0.05	—	0.01	0.06	—	—
		木地肤 <i>K. prostrata</i>	0.06	0.06	—	0.11	0.08	0.04	0.07	0.08	—	0.13	0.11	0.09
		狭叶锦鸡儿 <i>Caragana stenophylla</i>	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05	0.05
		小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	—	0.03	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—	—

注: W: 增水 30%; CK: 自然降水; R: 减水 30%, 下同。“—”表示该植物在处理中未出现。

Note: W: 30% rainfall addition; CK: Natural rainfall; R: 30% rainfall reduction, the same below. “—” means that the plant did not appear in the treatment.

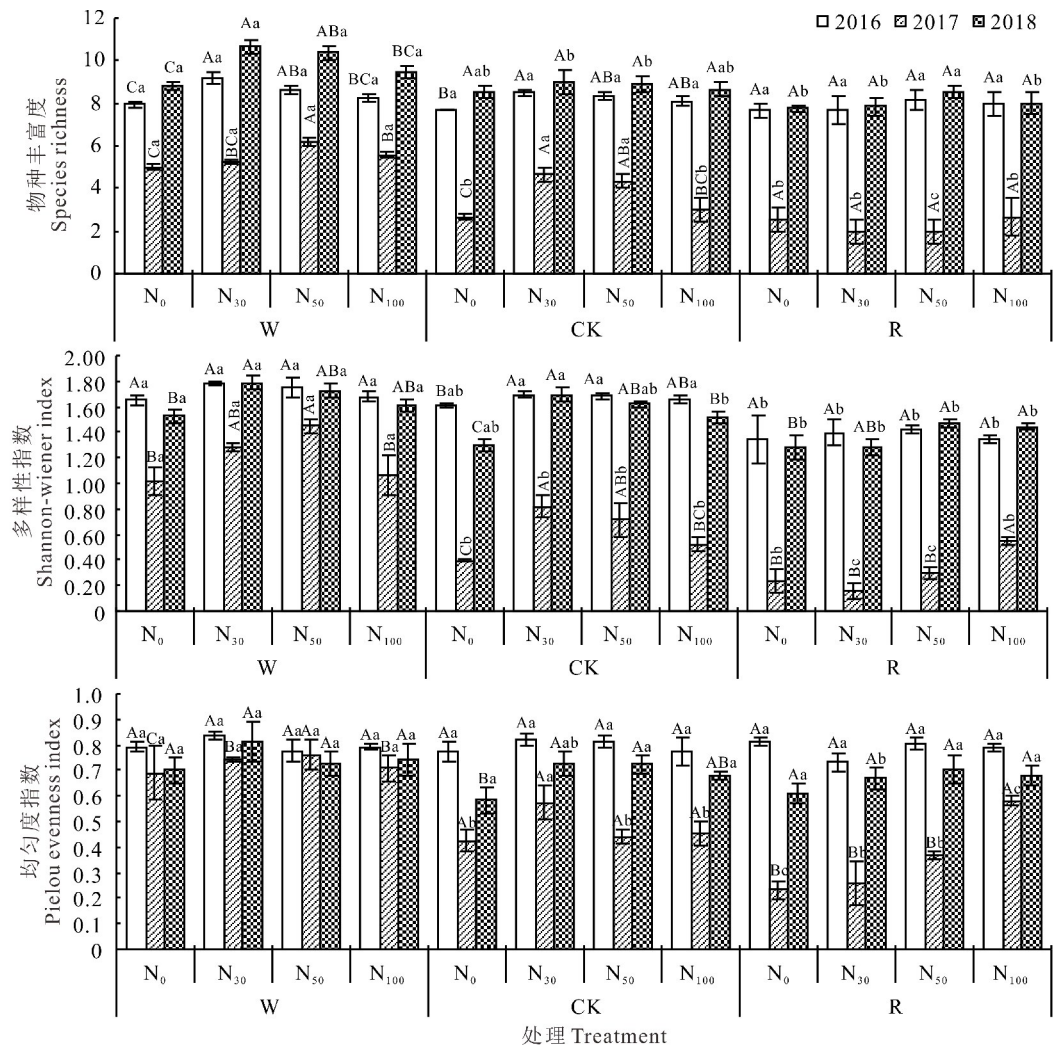


图 2 不同年份水氮添加对物种丰富度、Shannon—wiener 指数和 Pielou 均匀度指数的影响

Fig 2 Effects of water and nitrogen additions on species richness, Shannon—wiener index and Pielou evenness index in different years

W: 增水 30%;CK:自然降水;R:减水 30%。不同大写字母表示同一水分处理下不同氮素水平间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一氮素处理下不同水分处理间差异显著($P<0.05$),下同。W: 30% rainfall addition; CK: Natural rainfall; R: 30% rainfall reduction. Different capital letters showed significant difference among different nitrogen levels under the same water treatment ($P<0.05$), different small letters showed significant difference among different water treatments under the same nitrogen treatment ($P<0.05$), the same below.

均随着氮素添加量的增多而逐渐增大。多年生杂草在 W 中随氮添加生物量有增加的趋势,CK、R 中随着氮素添加生物量有减小的趋势,其在总地上生物量中的占比随着氮素添加量的增多而逐渐减小。相同氮素添加条件下,各功能型植物生物量均呈 $W>CK>R$ 。2017 属于旱年份,各功能群植物生物量均较低。群落地上总生物量在年际间(2016、2018 年)无明显差异,但多年生杂草、多年生禾草生物量在群落地上总生物量中占比有所变化,多年生杂草生物量占群落地上总生物量的比例从 9.78%下降到 3.58%,多年生禾草生物量在群落地上总生物量中的占比从 63.75%增加到

表 2 水氮添加对荒漠草原物种多样性影响的双因素方差分析

Table 2 Two way analysis of variance for the effects of water and nitrogen addition on species diversity in desert steppe communities

指标 Index	水分处理 Water treatment	氮素处理 Nitrogen treatment	水氮交互 Water× nitrogen
物种丰富度 Species richness	71.39 **	7.24 **	2.36 *
多样性指数 Shannon-wiener index	233.55 **	28.48 **	4.87 **
均匀度指数 Pielou evenness index	37.94 **	5.09 **	3.38 **

“*”表示显著差异($P<0.05$),“**”表示极显著差异($P<0.01$),下同。“*” means significant difference ($P<0.05$), “**” means extremely significant difference ($P<0.01$), the same below.

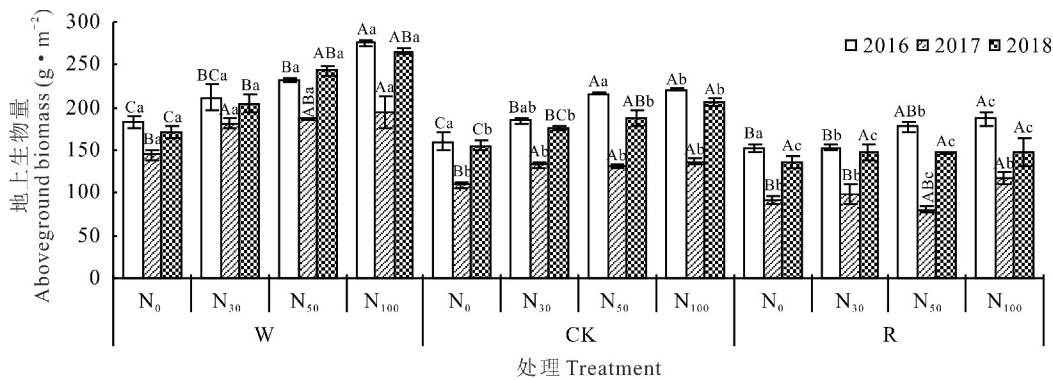


图 3 不同年份水氮添加对群落地上总生物量的影响

Fig. 3 Effects of water and nitrogen additions on total aboveground biomass in different years

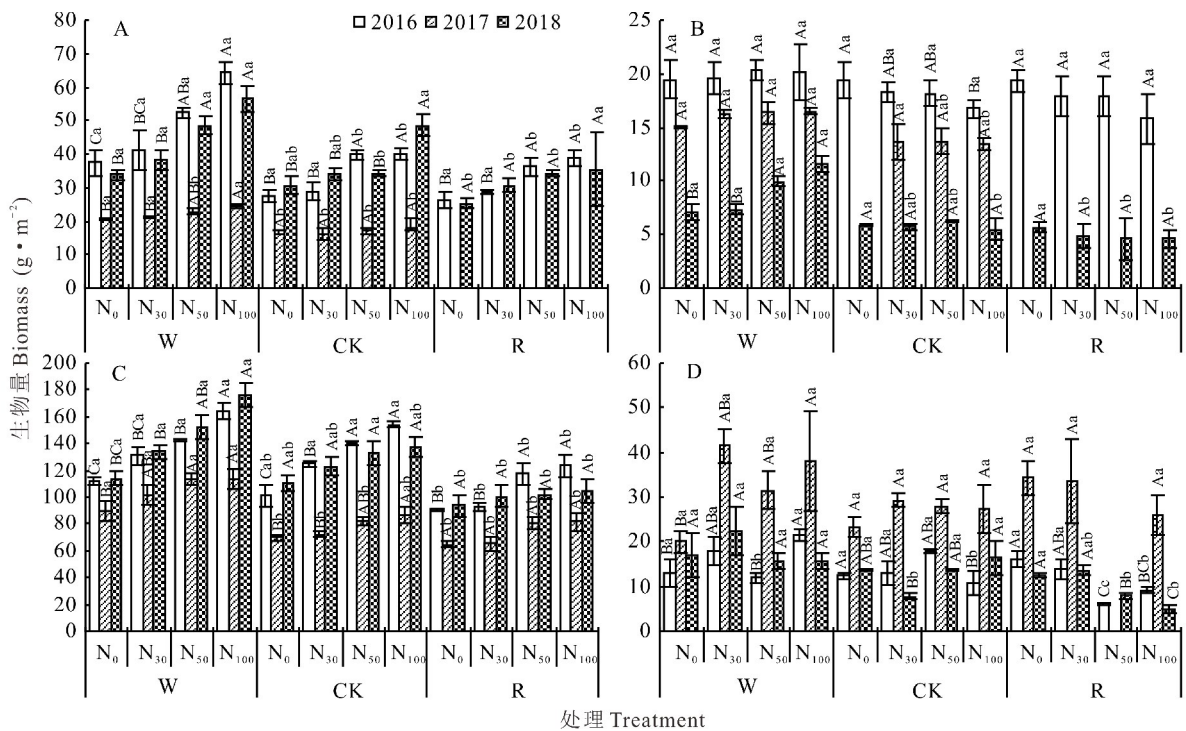


图 4 不同年份水氮添加对各功能型植物生物量的影响

Fig. 4 Effect of water and nitrogen addition on biomass of functional plants in different years

A: 一、二年生植物 Annual and biennial plants; B: 多年生杂草 Perennial weeds; C: 多年生禾草 Perennial grass; D: 半灌木、小半灌木 Semi-shrub and undershrub.

表 3 水氮添加对荒漠草原生物量影响的双因素方差分析

Table 3 Two way analysis of variance for the effects of water and nitrogen addition on biomass in desert grassland communities					
变异来源	生物量	一、二年生植物	多年生杂草	多年生禾草	半灌木、小半灌木
Varintion source	Biomass	Annual and biennial plants	Perennial weeds	Perennial grass	Semi-shrub and undershrub
水分处理 Water treatment	265.87 **	88.51 **	107.39 **	100.47 **	13.33 **
氮素处理 Nitrogen treatment	69.45 **	27.89 **	3.91 **	50.10 **	6.18 **
水氮交互 Water×nitrogen	8.83 **	2.54 *	4.37 **	2.33 *	5.92 **

68.30%,但在2017年,半灌木、小半灌木的生物量相较于2016和2018年最高(图4)。为了明确水氮控制对生物量的影响,进行了水氮双因素方差分析。结果表明,水分、氮素以及水氮互作均对短花针茅荒漠草原生物量有显著影响($P<0.05$),其中水分是主要限制因子(表3)。

3 讨论

3.1 水氮控制对荒漠草原植物群落特征的影响

短花针茅荒漠草原植物群落由一、二年生植物、多年生杂草、多年生禾草和半灌木、小半灌木组成。年际间群落组成变化大, Yang 等^[23]发现降水增加和氮添加显著改变了功能组水平的植物群落结构和组成, 植物群落结构是在不断变化的环境条件下由水介导的。张彦东等^[24]认为在退化严重的草地上施加氮肥, 禾本科草本植物大量增加, 乔木灌木密度增加不明显, 本研究与其具有相似规律。本研究结果表明, 多年生禾草植物在群落中始终占绝对优势, 试验的第 3 年猪毛菜减少, 藜科类植物(刺藜、灰绿藜)在群落组成中所占比例增大, 半灌木、小半灌木对水氮控制变化的影响不明显, 藜科大多数种类是盐生、沙生和喜氮植物^[25], 水分的增加和连续施氮的积累使藜科在群落中迅速生长。相同氮素添加, 增水条件下植物群落组成数量大于其他两个水分处理, 使优势物种的重要值降低, 这与陶冶等^[26]在新疆北部荒漠的研究结果一致, 是由于向环境中输入了水分使群落物种丰富度增加, 促进了各植物种的生长, 尤其是对水分敏感的一、二年生植物。增水条件下, 短花针茅对氮素添加的反应最明显, 随着氮素的增加短花针茅在群落中的重要值呈先减小后增大的趋势, 而在自然降水和减水处理中重要值变化不明显, 适量的氮素添加可以满足植物生长的需求, 荒漠草原干旱少雨, 群落特征对水分条件敏感, 在有水分的前提下植物能更好地吸收氮素^[27], 使得其他植物在群落中增多, 导致短花针茅重要值反而先减小, 因此, 水分和氮素添加对群落组成及重要值产生了明显影响。Tilman^[28]的生态位优先占领假说指在生境较差且物种数相对较少的群落, 第一位优势种首先占领生态位空间的大部, 第二位的占领其余下的大部空间, 依此类推, 到末位的只能占留下的很少空间, 本试验虽更趋向于 Tilman 生态位优先占领假说, 但由于天然草原植物群落的复杂性, 水分变化、氮素添加以及水氮互作对群落结构及组成的影响机理还需进一步探究。

3.2 水氮控制对荒漠草原植物群落多样性的影响

本试验中, 在相同氮素添加条件下, 各指数均呈 $W > CK > R$, 说明水分添加利于群落多样性增加, 与白春利等^[27]的研究结果相似。在 3 种水分条件下, 施入氮肥的第一年, 物种丰富度、Shannon—wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均随着氮素的添加表现为先增加后下降的趋势, 但无显著差异($P > 0.05$)。因生态系统对环境变化有缓冲作用, 所以短期氮素添加并没有引起群落多样性的明显变化, 这与赵新风等^[29]在施肥和增水第一年的结果相似。施入氮肥的第二年, 各指数随氮素添加先上升后下降, 氮素添加对物种丰富度、Shannon—wiener 多样性指数有显著影响($P < 0.05$), 对 Pielou 均匀度指数的影响不显著($P > 0.05$)。各指数在 2018 年也表现为随氮素添加先上升后下降, 分别在 $CK-N_{30}$ 、 $W-N_{30}$ 、 $R-N_{50}$ 达到最大值, 之后显著下降。Stevens 等^[30]也认为氮素的增加会使物种丰富度降低, 是由于嗜氮植物对氮的需求增加导致的。Theodose 等^[31]认为在贫瘠环境下, 物种多样性有增值空间, 短时间内不发生竞争淘汰, 而在肥沃的环境下, 养分添加后物种多样性增值的空间不大, 物种间产生竞争导致一些物种被淘汰。本研究分析出现此结果的原因: 1) 氮素的添加使群落多样性先升高后降低, 在低氮添加时, 土壤养分增多, 植物可利用氮素随之增大, 随着氮素的增加, 各物种表现出种间竞争, 一部分植物对氮素吸收能力强, 造成其他植物竞争能力下降, 最终导致单一植物生长迅速, 群落多样性下降; 2) 氮素添加增加了土壤中的有效养分, 促进了荒漠草原地上部分优势种群的生长^[32], 地上生物量的增加导致竞争排斥^[33], 例如多年生禾草(短花针茅、无芒隐子草)增加, 植株较高的禾草类植物对于光的竞争排斥使植株矮小的植物被淘汰^[34]; 3) 群落多样性指数的变化除与植被本身特性有关外, 还可能受非生物条件影响, 例如土壤酸碱度和其他资源可用性会降低物种丰富度和多样性指数^[25]。

3.3 水氮控制对荒漠草原生物量的影响

本研究中, 各水分条件下随着氮素的添加群落地上总生物量增大, 氮素添加为荒漠草原植物的生长提供了养分需求, 增加了群落地上生物量。在相同氮素添加条件下, 增水处理为土壤提供更多的水分, 为植物生长提供充足的水源, 促进植物营养生长, 使得地上生物量得到提高, 这与郭蕊等^[35]的研究结果一致。郭永盛^[36]认为水氮添加使土壤中速效养分增加, 植物功能群得到有效的可利用资源。半灌木、小半灌木生物量随着水分变化不会大幅波动, 一、二年生植物和多年生草本植物生物量受水分影响较大, 这与孙岩等^[37]的研究结果一致, 深根系的灌木主要利用深层土壤水分, 因此, 生物量不会发生大幅波动, 而浅根系一年生或多年生草本主要利用浅表层土壤水分, 其生物量的积累和浅表层土壤水分密切相关。除此之外, 功能群间的相互制约和功能群自身特性也会受到

影响^[38]。各植物功能群中,多年生禾草占群落地上总生物量比例在第3年增加,而多年生杂草占群落地上总生物量比例减小,多年生禾草对水氮添加的响应较显著,因其大多植株高大,地上部分生长迅速,高度和盖度增加,处于光养分竞争的最上层,有资源竞争优势,且其根系是须根系,对水分和养分添加反应敏感^[39],而多年生杂草主要由菊科类植物组成,随着氮素增加因种群植物竞争加大而使其地上生物量减少,氮素的添加缓解了其对多年生禾草植物的限制,植物竞争格局因养分限制的消除发生变化,进而群落结构发生改变^[38]。

4 结论

1)在水氮控制的影响下,植物群落组成、重要值发生了明显变化,R中群落物种数最低,提高了优势种在群落中的重要值,施氮量增加导致群落物种数呈“抛物线”型,群落物种数先增多后减少,猪毛蒿、银灰旋花、木地肤以及多年生禾草具有较强的竞争力,在群落组成中占优势地位。

2)CK、W、R条件下随施氮量增加,物种丰富度、Shannon—wiener多样性指数和Pielou均匀度指数均先增大后减小,2016和2018年在CK-N₃₀、W-N₃₀、R-N₅₀达到最大值,干旱年份(2017年)分别在CK-N₃₀、W-N₅₀、R-N₁₀₀达到最大值。水分主效应、氮素和水氮交互作用均对以上3个植物多样性指数有显著影响($P < 0.05$)。

3)水分和氮素刺激了地上生物量的增加,短期氮素添加使多年生禾草生物量在地上总生物量中占比增加,多年生杂草生物量在地上总生物量中占比减小,半灌木、小半灌木受水氮控制的影响较小。水分、氮素、水氮交互均对地上生物量有显著影响($P < 0.05$)。

参考文献 References:

- [1] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, *et al.* Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 50(10): 941—952.
- [2] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, *et al.* Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1/3): 7—43.
- [3] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153—226.
- [4] Kaiser J. The other global pollutant: Nitrogen proves tough to curb. *Science*, 2001, 294: 1268—1269.
- [5] Cao Y Z, Wang R Z, Zhang Y G, *et al.* Effects of nitrogen deposition on elemental availability in bulk soils and soil aggregates of grasslands. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8): 2531—2539.
曹彦卓, 王汝振, 张玉革, 等. 氮沉降对草地土壤及团聚体元素有效性的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2531—2539.
- [6] Liu X, Zhang Y, Han W. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494: 459—462.
- [7] Zhang Y, Cui X M, Fan M S. Atmospheric nitrogen deposition and its effect on grassland biodiversity. *Pratacultural Science*, 2007, 24(7): 12—17.
张燕, 崔学民, 樊明寿. 大气氮沉降及其对草地生物多样性的影响. *草业科学*, 2007, 24(7): 12—17.
- [8] Willett K M, Gillett N P, Jones P D, *et al.* Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature*, 2007, 449: 710—712.
- [9] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, 2014.
- [10] Barker D H, Vanier C, Naumburg E, *et al.* Enhanced monsoon precipitation and nitrogen deposition affect leaf traits and photosynthesis differently in spring and summer in the desert shrub *Larrea tridentata*. *New Phytologist*, 2006, 169(4): 799—808.
- [11] Joslin J D, Wolfe M H, Hanson P J. Effects of altered water regimes on forest root systems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 117—129.
- [12] Wang Q, Xu C Y. Affects of nitrogen and phosphorus on plant leaf photosynthesis and carbon partitioning. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2005, (5): 59—62.
王琪, 徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响. *山东林业科技*, 2005, (5): 59—62.
- [13] Zhang X L, Zhai P H, Huang J H. Advances in the influences of precipitation and nitrogen disposition change on the carbon cycle of grassland ecosystem. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 284—288.
张晓琳, 翟鹏辉, 黄建辉. 降水和氮沉降对草地生态系统碳循环影响研究进展. *草地学报*, 2018, 26(2): 284—288.
- [14] He Y H, Liu X P, Xie Z K. Effects of nitrogen addition on species diversity and plant productivity of herbaceous plants in desert grassland of the Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 66—71.

- 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 氮素添加对黄土高原荒漠草原草本植物物种多样性和生产力的影响. 中国沙漠, 2015, 35(1): 66—71.
- [15] Zeng D H, Li L J, Fahey T J, *et al.* Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 185—193.
- [16] 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. Global Change Biology, 2010, 16(1): 358—372.
- [17] Huberty L E, Gross K L, Miller C J. Effects of nitrogen addition on successional dynamics and species diversity in Michigan old-fields. The Journal of Ecology, 1998, 86(5): 794—803.
- [18] Sun B. Three grassland improvement measures on alpine degraded grassland vegetation. Journal of Gansu Agricultural University, 2005, 40(6): 797—801.
- 孙斌. 三种改良措施对高寒退化草地植被的影响. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(6): 797—801.
- [19] Sala O E, Stuart C F, Armesto J J, *et al.* Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 2000, 287: 1770—1774.
- [20] Bu R T Y, Jiang H M. Comparative analysis of three different IV analyzing methods. Environment and Development, 2014, 26(6): 64—67.
- 布仁图雅, 姜慧敏. 三种重要值计算方法的比较分析. 环境与发展, 2014, 26(6): 64—67.
- [21] Sun R Y, Li B, Zhuge Y, *et al.* General ecology. Beijing: Higher Education Press, 1993.
- 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [22] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity. Taxon, 1972, 21(2/3): 213—251.
- [23] Yang H J, Li Y, Wu M Y, *et al.* Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: The importance of water availability and species traits. Global Change Biology, 2011, 17(9): 2936—2944.
- [24] Zhang Y D, Shen Y X, Liu W Y. Fertilization effects of N, P on a grass community at the dry valley of Jinsha River. Bulletin of Botanical Research, 2004, 24(1): 59—64.
- 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. 植物研究, 2004, 24(1): 59—64.
- [25] Khasbagan, Imzab. A study of the wild edible plant resources of Chenopodiaceae from Inner Mongolia. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 1995, (3): 59—63.
- 哈斯巴根, 音扎布. 内蒙古藜科野生可食植物资源的研究. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 1995, (3): 59—63.
- [26] Tao Y, Zhang Y M. Seasonal changes in species composition, richness and the aboveground biomass of types in Gurbantungut Desert, Northwestern China. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(6): 1—11.
- 陶冶, 张元明. 3 种荒漠植物群落物种组成与丰富度的季节变化及地上生物量特征. 草业学报, 2011, 20(6): 1—11.
- [27] Bai C L, Alata, Chen H J, *et al.* Effects of addition of nitrogen and water on plant community characteristic of *Stipa breviflora* desert steppe. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(2): 69—75.
- 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. 中国草地学报, 2013, 35(2): 69—75.
- [28] Tilman D. Resource competition and community structure. Princeton: Princeton University Press, 1982.
- [29] Zhao X F, Xu H L, Zhang P, *et al.* Effects of nutrient and water addition on plant community structure and species diversity in desert grasslands. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(2): 167—177.
- 赵新风, 徐海量, 张鹏, 等. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响. 植物生态学报, 2014, 38(2): 167—177.
- [30] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. Science, 2004, 303: 1876—1879.
- [31] Theodose T A, Bowman W D. Nutrient availability, plant abundance, and species diversity in two alpine tundra communities. Ecology, 1997, 78(6): 1861—1872.
- [32] Gough L, Osenberg C W, Gross K L, *et al.* Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. Oikos, 2000, 89(3): 428—439.
- [33] Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. Science, 2009, 324: 636—638.
- [34] Xin X R, Han X G, Chen L Z. A review on research of plant nutrient use efficiency. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(5): 785—790.
- 邢雪荣, 韩兴国, 陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述. 应用生态学报, 2000, 11(5): 785—790.
- [35] Guo R, Hong M, Han G D, *et al.* Effects of water and nitrogen supplementation on plant community in the *Stipa breviflora* steppe. Journal of Inner Mongolia University (Nature Science Edition), 2016, 47(4): 426—433.
- 郭蕊, 红梅, 韩国栋, 等. 水、氮控制对荒漠草原植物群落特征的影响. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 426—

433.

- [36] Guo Y S. Effects of nitrogen fertilization on desert grassland ecosystem biodiversity in Xinjiang. Shihezi; Shihezi University, 2011.
郭永盛. 施氮肥对新疆荒漠草原生物多样性的影响. 石河子: 石河子大学, 2011.
- [37] Sun Y, He M Z, Wang L. Effects of precipitation control on plant diversity and biomass in a desert region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2425—2433.
孙岩, 何明珠, 王立. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2425—2433.
- [38] Li W J, Wang H, Zhao J N, *et al.* Effects of nitrogen and water addition on aboveground biomass of *Stipa baicalensis* grassland plant functional group. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(2): 7—13.
李文娇, 王慧, 赵建宁, 等. 氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物功能群地上生物量的影响. *中国草地学报*, 2015, 37(2): 7—13.
- [39] Wang C T, Wang G X, Liu W, *et al.* Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3103—3113.
王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响. *生态学报*, 2013, 33(10): 3103—3113.