

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0167

高海燕, 红梅, 霍利霞, 刘鹏飞, 常菲. 水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响. 草业科学, 2018, 35(1): 36-45.

Gao H Y, Hong M, Huo L X, Liu P F, Chang F. Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 36-45.

水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响

高海燕¹, 红梅^{1,2}, 霍利霞¹, 刘鹏飞¹, 常菲¹

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010011;

2. 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 010011)

摘要: 为了研究大气氮沉降和降水变化对荒漠草原物种多样性及地上、地下生物量的影响, 设置自然降雨(CK)、增雨 30%(W)和减雨 30%(R)3 个水分处理及 0(N₀), 30(N₃₀), 50(N₅₀)和 100 kg·(hm²·a)⁻¹(N₁₀₀)4 个氮素(NH₄NO₃)水平(其中不包括大气氮沉降), 进行水氮交互试验。结果表明, 1) CK×N 和 R×N 处理下荒漠草原物种多样性随着施氮量增加, 整体呈现先上升后下降的趋势, N₃₀ 水平达到最大, W×N 处理下随着施氮量增加物种多样性显著降低($P < 0.05$)。2) 对比 W×N₀ 处理, CK×N₀ 和 R×N₀ 处理地上生物量显著增加($P < 0.05$)。水氮交互作用下, 随着施氮量增加, CK×N 和 W×N 处理有助于地上生物量显著增加($P < 0.05$), R×N 处理地上生物量有增加的趋势。水氮交互作用对一、二年生植物有显著影响($P < 0.05$), 地上生物量整体呈现(W×N) > (CK×N) > (R×N)。3) 不同水氮交互作用下, 地下生物量随土层增加逐渐减少, 主要集中在 0—30 cm 土层, W×N 处理可促进根系向深层土壤生长。在 CK×N 和 R×N 处理下, 随着施氮量增加, 荒漠草原物种地下生物量整体呈现先上升后下降的趋势, W×N 处理随着施氮量增加地下总生物量显著增加($P < 0.05$)。4) CK×N₃₀ 和 R×N₃₀ 处理下, 根冠比显著降低($P < 0.05$)。以上结果说明, 荒漠草原植物物种多样性及生物量与水分及养分有密切关系。

关键词: 氮沉降; 增雨减雨; 物种多样性; 地上生物量; 地下生物量

中图分类号: S812; Q945.79

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2018)01-0036-10*

Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland

Gao Hai-yan¹, Hong Mei^{1,2}, Huo Li-xia¹, Liu Peng-fei¹, Chang Fei¹

(1. College of Grasslands, Resources and Environment, Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Huhhot 010011, Inner Mongolia, China)

Abstract: To demonstrate the effects of atmospheric nitrogen deposition and precipitation on species diversity and biomass in desert grassland, we examined water and nitrogen interactions, using three levels of water treatment [natural precipitation (CK), increased precipitation 30% (W) and reduced precipitation 30% (R)] and four nitrogen (NH₄NO₃) levels: 0 (N₀), 30 (N₃₀), 50 (N₅₀), and 100 (N₁₀₀) kg·(hm²·a)⁻¹ (which does not include atmospheric nitrogen deposition). The following results were obtained: 1) The species diversity of desert grassland under CK×N and R×N treatments increased with an increase in nitrogen application rate, showing an initial increase trend and a subsequent decrease, with maximum diversity being attained with the N₃₀ treatment. Under the W×N treatment, the species diversity was significantly reduced ($P < 0.05$) with an increase of nitrogen application rate. 2) The aboveground biomass obtained with CK×N₀ and R×N₀ treat-

* 收稿日期: 2017-04-06 接受日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(31560156)

第一作者: 高海燕(1993-), 女, 内蒙古清水河人, 在读硕士生, 主要从事草原土壤资源利用与保护。E-mail: 980384137@qq.com

通信作者: 红梅(1970-), 女(蒙古族), 内蒙古兴安盟人, 教授, 博士, 主要从事草原土壤资源利用与保护。E-mail: nmhm1970@sina.com

ments was significantly increased ($P<0.05$) compared with the $W\times N_0$ treatment. Under the water and nitrogen interaction, the aboveground biomass of $CK\times N$ and $W\times N$ treatments was significantly increased ($P<0.05$) with an increase in nitrogen application rate. The water and nitrogen interaction had a significant effect on annual and biennial plants. The overall aboveground biomass trend was as follows: $(W\times N)>(CK\times N)>(R\times N)$. 3) Under the water and nitrogen interactions, the underground biomass decreased gradually with the depth of soil, and was mainly concentrated in the 0–30 cm. The $W\times N$ treatment promoted root extension into deeper soil. The biomass of desert grassland under $CK\times N$ and $R\times N$ treatments showed an initial increase trend and then a subsequent decrease with an increase of nitrogen application rate, and the underground biomass obtained with the $W\times N$ treatment showed a significant increase ($P<0.05$). 4) The treatments of $CK\times N_{30}$ and $R\times N_{30}$ significantly reduced the root/shoot ratio ($P<0.05$). Collectively, the results of this study showed that the plant species diversity and biomass in desert grassland are closely related to water and nutrients.

Key words: nitrogen deposition; increased of reduced precipitation; species diversity; aboveground biomass; underground biomass

Corresponding author: Hong Mei E-mail:nmhm1970@sina.com

近几十年来随着工业的发展,大气氮沉降和降水格局发生了很大变化^[1-2],草原生态系统是全球最大的碳存储库,在生态系统中发挥着极其重要的作用^[3-4],生物多样性及生物量是衡量草原生态系统优劣的重要指标^[5-6]。在荒漠草原地区,气候干燥,降水量少,土壤肥力低下物种稀少,地上、地下生物量匮乏,水分和养分是促进植物生长的主要环境因子^[7-9]。近几年,越来越多的学者致力于氮沉降和降水变化对生物多样性及生物量的研究^[7,10-11],主要集中在典型草原、草甸草原和森林植被等研究^[7,11-13]。结果表明:施氮水平增加有助于植物地上生物量的增加,但植物群落的多样性下降,单一水分添加使得地上生物量和植物群落的多样性均增加,水氮交互作用下水分的添加则有利于氮

素肥效的释放,更有利于地上生物量的积累,从而使生态系统的结构和功能发生变化^[14]。本研究设置不同施氮水平与水分(增雨和减雨)分析二者的互作对内蒙古荒漠草原物种多样性和地上地下生物量的影响,从而提出更加合理有效的荒漠草原生态系统管理方案,为荒漠草原生态系统的恢复和长久生存提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古乌兰察布市四子王旗短花针茅草原生态系统野外科学试验基地,试验区四周有围栏保护,地理坐标为 111°53′ E,41°47′ N,海拔 1 450 m,属于中温带大陆性季风气候,年平均气温 3.4 ℃,年降

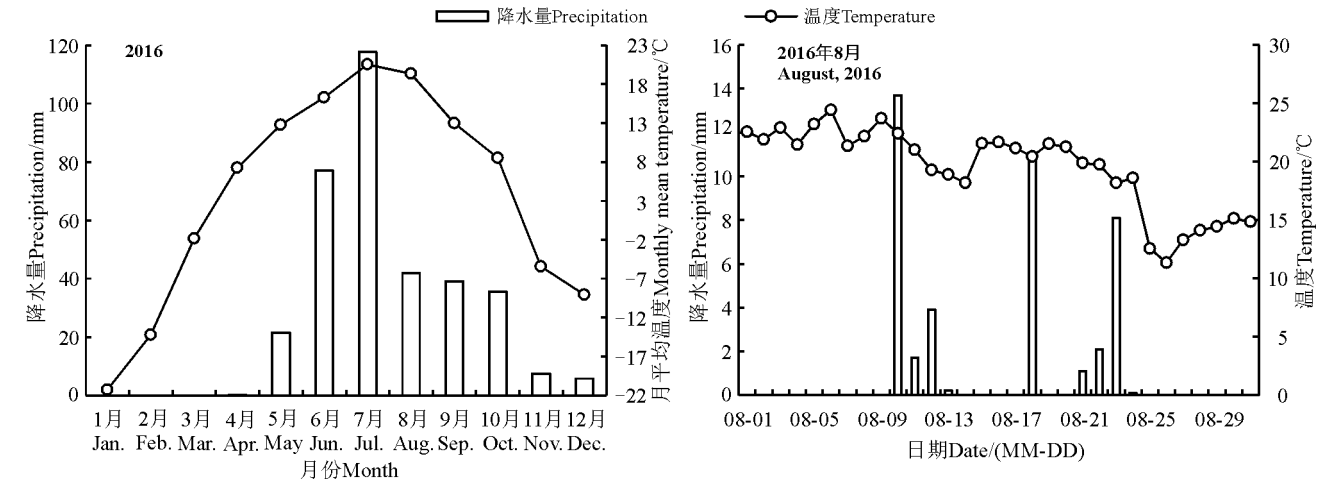


图 1 2016 年及 2016 年 8 月降水量与气温动态
Fig. 1 The precipitation and temperature patterns in 2016 and August 2016

水量 280 mm。主要植被优势种为多年生丛生禾草短花针茅(*Stipa breviflora*)和无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*),小半灌木冷蒿(*Artemisia frigida*)和木地肤(*Kochia prostrata*),一年生草本猪毛菜(*Salsola collina*)5种植物。2016 年全年降水量为 346 mm,主要集中在 6—9 月份,平均气温 4.6 °C,同往年相比降水量增加,气温上升(图 1)。

1.2 试验设计

试验样地于 2015 年布设,采用裂区试验设计,主区为水分处理,分别为自然降雨(CK)、增雨(W)和减雨(R),增雨试验分别在每年 5—8 月的 1—3 日进行,通过多年对荒漠草原降雨量监测并做模型预测未来降雨量增减极限,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%,减雨试验通过减雨装置减少当地年平均降水量的 30%。副区为 4 个氮素(纯氮)水平处理分别为 0 (N_0)、30 (N_{30})、50 (N_{50}) 和 100 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (N_{100}),其中不包括大气氮沉降,施氮处理按照施氮量换算成小区硝酸铵(NH_4NO_3)施用量,为能够尽可能均匀施氮,在生长季(5—9 月)每月施一次,将每个小区每次施用硝酸铵按量溶于 30 L 水中(在增雨处理之后),均匀喷洒在每个小区内,CK 喷洒相同量的水,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 mm)按肥土比 1:10 的比例充分混匀,在无风时以模拟干沉降的方式直接撒施。试验共 12 个处理,6 次重复。每个小区面积为 7 m $\times$ 7 m,各小区间设置 1 m 隔离带。

1.3 取样方法

地上生物量测定于 2016 年植物生长旺季 8 月中旬进行,每个小区进行 3 次重复,将 0.5 m $\times$ 0.5 m 的样方随机放入小区内,采用收割法剪取植物地上部分装入信封中,带回实验室在 65 °C 恒温箱烘干 24 h 称重。根据生活型和物种,将样方内的所有物种分成 4 个类群:一、二年生植物、多年生禾草类、多年生杂草类和半灌木、小半灌木。不同类群生物量占群落生物量的比例按每个类群物种生物量干重占总生物量百分比计算。

地下生物量的测定是在将地上生物量采集完毕后用直径为 7 cm 的根钻在样方内按 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 土层分层取土装入网袋中,带回实验室过筛清洗,用镊子夹出死根和活根进行清洗(不分种),然后放入 65 °C 恒温箱烘干 24 h 称重。

1.4 数据统计

地上生物量=干重 $\times$ 4。

式中:4 为换算 1 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 生物量的系数。

地下生物量=干重/ πr^2 。

式中: $r=3.5$ cm。

根冠比=地下生物量/地上生物量。

物种丰富度(P)用单位面积的物种数(S)来表示

$P=S$ 。

式中:S 为物种数;

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln(P_i)$$

式中: P_i 为第 i 个物种的个体数占总个体数的比率。

Pielou 均匀度指数(E):

$$E = H' / \ln(S)$$

式中:S 为物种数。

1.5 数据分析

采用 SAS 9.1 软件对植物物种多样性、地上生物量、地下生物量及根冠比进行单因素方差分析和双因素交互方差分析;采用 Microsoft Excel 2003 进行制图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对荒漠草原植物群落多样性的影响

同一水分处理下随着施氮水平增加,CK 中物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均呈先上升后下降的趋势,在 N_{30} 水平时达到最大值且多样性指数较 CK- N_0 有显著差异($P<0.05$)(表 1);W 处理物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均呈下降的趋势,且 N_{30} 水平物种丰富度、多样性指数显著下降($P<0.05$),与 CK 相应的氮素添加相比,W- N_0 处理的各指数均高于 CK- N_0 ,而其他氮水平下各指数均低于 CK;R 处理的物种丰富度、多样性指数和均匀度指数呈先上升后下降的趋势,在 N_{50} 水平时出现“峰值”且较 N_0 有显著差异($P<0.05$),与相应 CK 各氮素水平相比,物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均有下降的趋势。双因素交互方差分析结果同样表明,水氮交互作用对物种丰富度和多样性指数有显著影响($P<0.05$),水分变化对物种丰富度有显著影响($P<0.05$)(表 2)。

2.2 地上生物量

2.2.1 水氮耦合对荒漠草原植物群落地上生物量的影响 同一水分处理下,随施氮水平增加荒漠草原

表 1 水氮耦合下荒漠草原群落物种多样性

Table 1 The species diversity of desert grassland communities under water and nitrogen interaction

项目 Item	处理 Treatment	施氮水平 N application level/[g·(hm ² ·a) ⁻¹]			
		0(N ₀)	30(N ₃₀)	50(N ₅₀)	100(N ₁₀₀)
物种丰富度 Species richness	CK	8.17±0.31Ab	9.17±0.31Aa	8.67±0.42Aa	8.50±0.43Aa
	W	9.33±0.33Aa	8.33±0.21Ba	8.17±0.40Ba	8.00±0.37Ba
	R	7.00±0.37Bc	7.17±0.31ABa	8.17±0.31Aa	7.50±0.34ABa
多样性指数 Shannon-Wiener Index	CK	1.73±0.02Bb	1.84±0.02Aa	1.79±0.02ABa	1.77±0.05ABa
	W	1.92±0.03Aa	1.82±0.03Bab	1.76±0.03Ba	1.72±0.04Ba
	R	1.69±0.03Bb	1.74±0.03ABb	1.84±0.04Aa	1.76±0.04ABa
均匀度指数 Pielou index	CK	0.81±0.01Aa	0.85±0.01Aa	0.83±0.02Aa	0.81±0.01Aa
	W	0.86±0.03Aa	0.84±0.01Aa	0.82±0.01Aa	0.81±0.02Aa
	R	0.79±0.02Ba	0.83±0.02ABa	0.85±0.01Aa	0.80±0.01Ba

CK, 自然降雨; W, 增雨 30%; R, 减雨 30%; N₀, N₃₀, N₅₀ 和 N₁₀₀ 分别表示施氮肥水平为 0、30、50 和 100 g·(hm²·a)⁻¹。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水平下不同水分处理间差异显著($P<0.05$)。表 3、表 4、图 2、图 3、图 4 同。

CK, natural precipitation; W, increase precipitation 30%; R, reduce precipitation 30%; N₀, N₃₀, N₅₀ and N₁₀₀ indicate application level of 0, 30, 50 and 100 g·(hm²·a)⁻¹, respectively. Different capital letters for the same water treatment indicate significant difference among different nitrogen levels at the 0.05 level; Different lowercase letters for the same nitrogen treatment indicate significant difference among different water treatments at the 0.05 level; similarly for Table 3, Table 4, Fig. 2, Fig. 3, and Fig. 4.

表 2 水氮耦合对荒漠草原群落物种多样性影响的方差分析(P)结果

Table 2 Variance analysis (P) of the effects of water and nitrogen interaction on species diversity of desert grassland communities

变异来源 Varintion source	物种丰富度 Species richness	多样性指数 Shannon-Wiener Index	均匀度指数 Pielou index
氮素处理 Nutrient treatment	0.695 6	0.307 2	0.058 8
水分处理 Water treatment	<0.000 1	0.170 7	0.681 5
水氮交互 Nutrient × Water	0.010 6	0.000 2	0.104 7

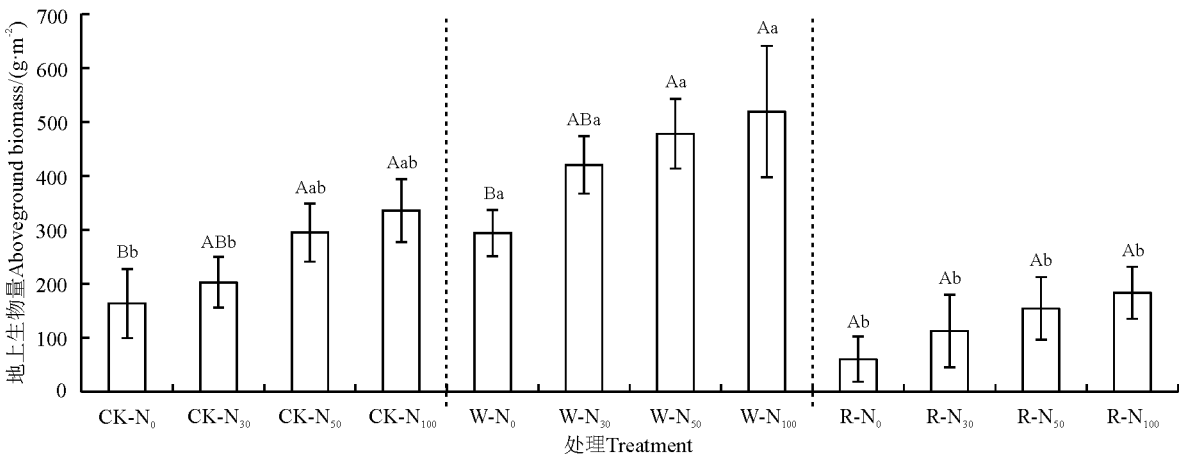


图 2 水氮耦合下荒漠草原群落地上生物量

Fig. 2 The aboveground biomass of desert grassland communities under water and nitrogen interaction

地上生物量有增加的趋势。CK 中, N_{30} 、 N_{50} 和 N_{100} 水平增加量分别为 24%、46% 和 14%, 在 N_{50} 及 N_{100} 显著高于 N_0 水平 ($P<0.05$); W 处理中, N_{30} 、 N_{50} 和 N_{100} 水平增加量分别为 43%、14% 和 9%, N_{50} 及 N_{100} 显著高于 N_0 水平 ($P<0.05$); R 处理中, N_{30} 、 N_{50} 和 N_{100} 水平增加量分别为 86%、37% 和 19%, 但各施氮水平间无显著差异 ($P>0.05$)。同一施氮水平不同水分处理下地上生物量顺序为 $W>CK>R$, N_0 和 N_{30} 水平下, 与 CK、R 相比, W 的生物量显著增加 ($P<0.05$); N_{50} 和 N_{100} 水平下, 与 R 相比, W 的生物量显著增加 ($P<0.05$)。

2.2.2 水氮耦合对荒漠草原植物群落地上生物量分配比的影响 同一水分处理下随着施氮水平增加, CK 和 R 处理多年生禾草(短花针茅等)和一、二年生植物(猪毛菜等)的生物量显著增加 ($P<0.05$), 半灌木、小半灌木(木地肤等)无显著下降 ($P>0.05$); 同时除多年生禾草外各植物群落生物量分配比随着氮水平增加有同样增加和降低的趋势(表 3); W 处理多年生杂草和一、二年生植物的生物量显著增加 ($P<0.05$), 多年生禾草显著下降 ($P<0.05$), 半灌木、小半灌木无显著变化 ($P<0.05$), 同时除一、二年生植物外的各植物群落生物量分配比随着氮水平增加有同样增加和降低的趋势。同一施氮水平不同水分处理下, N_0 水平, W 处理下一、二年生植物、多年生禾草类、多年生杂草类和

半灌木、小半灌木生物量较 CK-N 显著增加 ($P<0.05$), 同时一、二年生植物和半灌木、小半灌木分配比也有所增加; N_{30} 、 N_{50} 及 N_{100} 水平下 W 使一、二年生植物、多年生杂草和半灌木、小半灌木生物量较 CK 显著增加 ($P<0.05$), 同时这 3 种植物群落生物量分配比增加。

2.3 地下生物量

2.3.1 水氮耦合对荒漠草原植物群落地下生物量的影响 同一水分处理下, 随着施氮水平增加, CK 和 R 处理地下生物量呈现先增加后降低的趋势, 在 N_{50} 水平出现“峰值”且 N_{100} 水平显著降低 ($P<0.05$) (图 3); W 处理随着施氮水平的增加, 地下生物量呈增加的趋势但增加量在减小, N_{30} 水平较 N_0 水平有显著差异 ($P<0.05$)。同一施氮水平不同水分处理下, N_0 水平下 CK、W、R 无显著差异 ($P>0.05$); N_{30} 和 N_{50} 水平下, W 处理较 R 处理有显著增加 ($P<0.05$); N_{100} 水平下 W 较 CK 和 R 有显著增加 ($P<0.05$)。

2.3.2 水氮处理对荒漠草原植物群落不同土层的地下生物量的影响 在不同水氮互作下, 荒漠草原地下生物量随着土层深度的增加呈现减少的趋势 ($P>0.05$), 且 80% 的地下生物量主要集中在 0—30 cm, W-N 的地下生物量深层次土层所占比例有上升的趋势且均无显著变化(表 4)。

表 3 水氮耦合下荒漠草原植物群落地上生物量分配比
Table 3 The aboveground biomass of desert grassland communities under water and nitrogen treatment

处理 Treatment	一、二年生植物 Annual and biennial plants			多年生杂草 Perennial weed		多年生禾草 Perennial grass		半灌木、小半灌木 Semi-shrub and undershrub	
	平均值 Mean	分配比 Ratio/%		平均值 Mean	分配比 Ratio/%		平均值 Mean	分配比 Ratio/%	
CK	N ₀	51.17±5.63Cb	10	166.41±6.90Ab	32	216.18±9.02Cb	42	79.92±6.32Ab	16
	N ₃₀	99.00±9.36Bab	16	143.45±7.19ABb	24	297.49±10.72Ba	49	64.83±7.25Ab	11
	N ₅₀	154.40±8.07Ab	22	134.89±10.06Bb	19	346.60±8.99Aa	50	60.77±8.62Ab	9
	N ₁₀₀	179.33±12.15Ab	24	130.83±7.94Bb	18	361.33±12.03Aa	49	58.57±6.50Ab	8
W	N ₀	76.99±8.91Ca	32	221.45±11.42Ca	11	264.44±10.18Aa	38	131.56±10.29Aa	19
	N ₃₀	143.27±9.97Ba	17	319.93±11.88Ba	39	235.58±11.60Ab	29	121.71±14.94Aa	15
	N ₅₀	207.33±9.17Aa	24	352.33±12.88Ba	40	216.98±7.18ABb	25	102.33±8.92Aa	12
	N ₁₀₀	228.87±11.64Aa	25	390.17±11.76Aa	42	206.95±11.08Bc	23	93.69±13.90Aa	10
R	N ₀	46.17±9.13Bb	10	151.87±11.79Ab	33	202.57±9.67Cb	44	60.17±7.85Ab	13
	N ₃₀	78.00±11.43Ab	15	143.53±12.02Ab	28	243.59±12.90Bb	47	47.73±7.93Ab	9
	N ₅₀	100.81±11.20Ac	18	134.17±12.04Ab	24	278.17±12.15Aab	50	43.47±5.37Ab	8
	N ₁₀₀	120.41±7.26Ac	21	127.50±11.11Ab	22	296.67±15.68Ab	51	38.11±7.59Ab	7

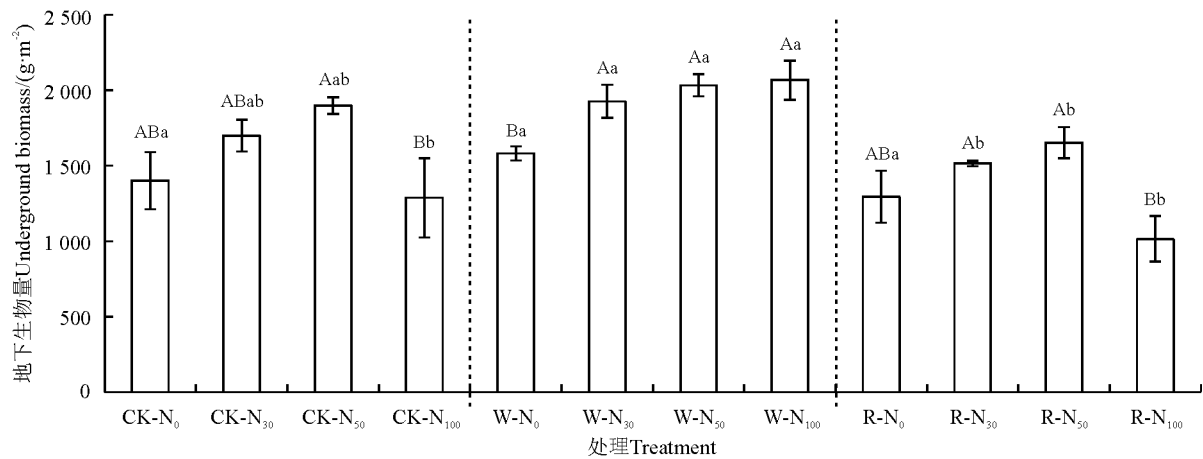


图 3 水氮耦合下荒漠草原植物群落地下生物量

Fig. 3 The underground biomass of desert grassland communities under water and nitrogen treatment

表 4 水氮耦合下荒漠草原植物群落不同土层地下生物量

Table 4 The belowground biomass of different soil layers of desert grassland under water and nitrogen interaction

处理 Treatment		土层 Soil layer/cm				
		0—10	10—20	20—30	30—40	40—50
		g · m ⁻²				
CK	N ₀	667.33±136.61	366.60±98.80	222.73±112.36	115.27±95.91	29.03±24.51
	N ₃₀	745.77±93.62	442.00±90.98	282.53±92.75	154.70±65.68	73.67±48.64
	N ₅₀	761.80±122.05	456.30±102.74	351.87±86.38	188.93±72.00	139.97±102.28
	N ₁₀₀	576.33±108.76	338.00±115.02	229.67±102.52	100.53±35.45	43.77±21.78
W	N ₀	691.17±124.23	460.63±74.09	236.60±74.32	119.17±56.33	74.10±17.75
	N ₃₀	756.60±87.64	464.10±69.43	354.03±79.82	256.53±103.27	95.77±25.13
	N ₅₀	769.17±80.45	486.20±39.86	366.17±79.44	266.93±65.90	145.17±60.28
	N ₁₀₀	780.00±85.27	490.53±54.96	380.47±69.48	305.50±83.25	111.37±54.21
R	N ₀	608.83±73.54	356.20±91.01	204.53±56.14	96.63±60.48	28.60±18.85
	N ₃₀	638.30±39.54	396.93±67.98	274.73±56.13	138.67±74.23	67.17±30.10
	N ₅₀	643.50±71.29	433.77±70.46	332.37±58.90	153.40±66.21	90.13±36.01
	N ₁₀₀	492.27±93.36	275.60±53.92	157.73±31.33	74.53±37.02	15.17±8.44

2.4 水氮耦合对荒漠草原植物根冠比的影响

同一水分处理下,随着施氮水平增加,W 处理荒漠草原的根冠比无显著变化($P>0.05$);CK 和 R 处理下根冠比显著降低($P<0.05$)(图 4)。同一施氮水平不同水分处理下,N₀ 和 N₃₀ 水平下各水分处理均有显著差异($P<0.05$)R 处理最大,以处理最小;N₅₀ 水平下 R 处理最大,与 CK 及 W 处理有显著差异($P<0.05$);N₁₀₀ 水平下各水分处理均无显著差异($P>0.05$)。整体上,W-N 处理根冠比较低。

3 讨论

3.1 水氮耦合对荒漠草原植物群落多样性的影响

通过对群落物种多样性的研究可以了解到生态

系统结构和功能的稳定性^[15-17],群落多样性可由物种丰富度、多样性指数和均匀度指数来表征。物种丰富度可以反映一定空间范围内的物种数量,多样性指数可以反映由生物群落等级特征引起的多样性程度,均匀度指数可以反映群落中个体占有比^[18]。水分和养分是调节生态系统关键因子^[19-20],影响生态系统物种多样性^[21-23]。本研究表明,不同水分处理下 CK 随氮素的添加物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均出现先上升后下降的趋势,在 N₃₀ 时出现“峰值”且多样性指数有显著增大($P<0.05$),而物种丰富度、均匀度指数无显著增大($P<0.05$),与 Hall 等^[24]对植物物种多样性研究相反,其研究显示氮素添加使物种丰富度下降;与郭永盛等^[25]对物种丰

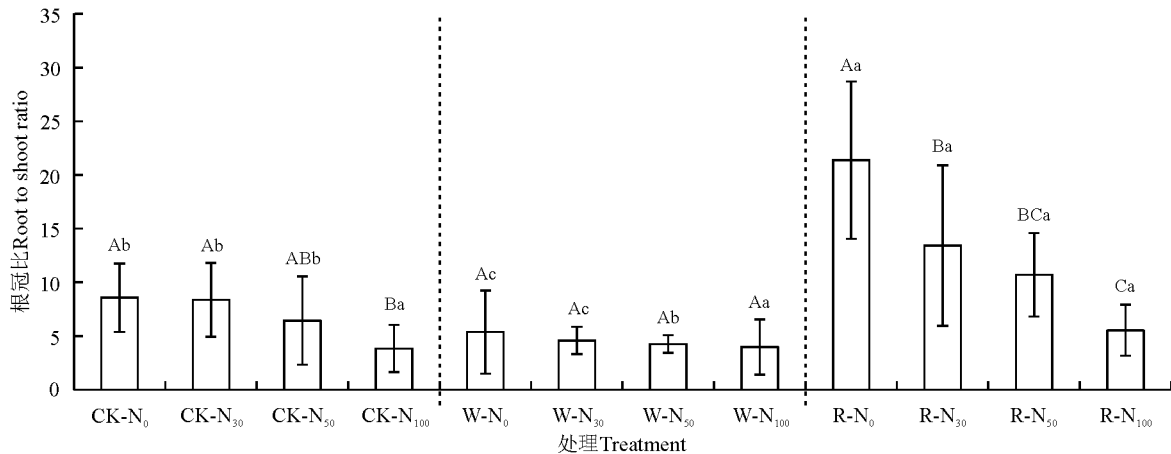


图 4 水氮耦合下荒漠草原植物根冠比

Fig. 4 The root to shoot ratio of plants in desert grassland under water and nitrogen interaction

富度研究相似,表明适量的氮素添加有助于群落多样性的增加。其原因可能是:1)随着氮素的添加物种多样性增加,但是群落具有一定的饱和度,当达到饱和水平时,就会出现自疏现象或他疏现象。2)适量施肥对植物生长有促进作用,过量施肥植物会发生“烧苗”现象。3)局域空间中各植株对阳光的竞争使得植株矮小的植物被淘汰^[26]。随氮素的添加,W处理的物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均呈现下降的趋势,且多样性指数和均匀度指数在N₃₀水平显著降低($P < 0.05$),这与李文娇等^[11]对植物物种多样性研究结果相似,其原因可能是W×N交互作用下,水分更好地激发了氮素的肥力,以致于一定空间内群落优势种生长茂盛,出现优胜劣汰的现象。随氮素的添加,R处理的物种丰富度、多样性指数和均匀度指数先上升后下降的趋势,N₅₀水平时出现“峰值”且物种丰富度和均匀度指数有显著差异($P < 0.05$),对比CK各氮素水平各指数均有下降的趋势,其原因可能是减雨处理下限制了氮肥肥效的释放,导致在N₅₀水平才出现“峰值”。W×N₀处理植物群落物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均高于CK×N₀处理,而R×N₀处理各指数均低于CK×N₀处理,与白春利等^[18]对植物物种多样性研究结果相似,说明在无氮素处理下增雨有助于植物群落多样性的增加,减雨则相反。双因素方差分析同样表明,水氮交互作用对物种丰富度和多样性指数均有显著影响。

3.2 水氮耦合对荒漠草原植物地上生物量的影响

在同一水分处理随着施氮水平的增加荒漠草原地上生物量有上升的趋势,但无显著差异($P >$

0.05),且地上生物量的增加幅度有减小的趋势,整体上W×N>CK×N>R×N,与Gough等^[27]和LeB-aue和Treseder^[28]对荒漠草原地上生物量研究结果相似;CK和R处理下多年生禾草和一、二年生植物的生物量显著增加($P < 0.05$),R处理下多年生杂草显著下降($P < 0.05$);W处理下多年生杂草和一、二年生植物的生物量显著增加($P < 0.05$),多年生禾草显著下降($P < 0.05$)。在同一施氮水平不同水分处理下地上生物量均表现为W>CK>R,且W处理各氮素水平均显著增加($P < 0.05$),表明W处理有利于地上生物量的积累。在N₀水平不同水分处理下,W有利于一、二年生植物、多年生禾草、多年生杂草和半灌木、小半灌木生物量显著增加($P < 0.05$),同时一、二年生植物和半灌木、小半灌木分配比增加;N₃₀、N₅₀及N₁₀₀水平W处理有利于一、二年生植物、多年生杂草和半灌木、小半灌木生物量显著增加($P < 0.05$),同时这3种植物群落生物量分配比增加;R×N₅₀和R×N₁₀₀处理一、二年生植物显著增加($P < 0.05$),R×N₃₀和R×N₁₀₀处理多年生禾草显著增加($P < 0.05$)。表明:1)单一水分或氮素的添加均有利于地上生物量的积累,而水氮交互作用下,水分的添加对氮素肥效的释放有积极的影响,使得地上生物量显著增加,而减雨则相反,但植物对氮素的吸收具有一定的阈值,在一定范围内浓度越高,生物量越高,其原因可能符合植物对养分的吸收特性即报酬递减率。2)W×N处理有利于一、二年生植物、多年生杂草和半灌木、小半灌木植物群落生物量分配比增加,CK×N和R×N较CK-N₀有利于多年生禾草和一、二年生植物群落生物量分配比增加,说明不

同水氮处理对不同植物群落生物量影响不同。

3.3 水氮耦合对荒漠草原植物地下生物量的影响

在同一水分处理下随着氮水平的增加,CK 和 R 处理下地下生物量呈现先增加后降低的趋势,在 N_{50} 水平出现“峰值”且显著增加($P < 0.05$),其原因可能是:1) N_{100} 水平植物拥有充裕的养分即容易获取养分,故其根系不发达,所以地下生物量降低即最优分配假说^[2];2) 高浓度的 N 肥对根系有胁迫作用,所以地下生物量减少;W 处理下地下生物量出现增加的趋势但增量在减小,当 N_{30} 水平显著增加($P < 0.05$),其原因可能是水分促进了生态系统氮循环及养分利用率^[29]。同一氮水平不同水分处理下, N_0 水平 CK、W、R 无显著差异即水分对地下生物量无显著影响($P > 0.05$);在 N_{30} 和 N_{50} 水平 W 较 R 处理显著增加($P < 0.05$); N_{100} 水平 W 较 CK 和 R 显著增加即 $W \times N$ 交互对地下生物量有显著影响($P < 0.05$)。

地下生物量分土层处理后,在不同水氮交互作用下,荒漠草原地下生物量随着土层深度的增加有减少的趋势,但无显著降低($P > 0.05$),且 80% 的地下生物量主要集中在 0—30 cm 土层,与 Bhark 和 Small^[30] 对荒漠草原生物量研究结果相似。 $W \times N$ 处理深层次土层的生物量所占比例有上升的趋势,说明水肥可促进地下生物量的积累和纵向延伸。

3.4 水氮耦合对荒漠草原植物根冠比的影响

随着施氮量增加,W 处理荒漠草原根冠比无显著降低($P > 0.05$);CK 和 R 处理根冠比显著降低

($P < 0.05$)。 N_0 和 N_{30} 水平下各水分处理均有显著差异($P < 0.05$); N_{50} 水平下 R 处理有显著差异($P < 0.05$); N_{100} 水平下各水分处理均无显著差异($P > 0.05$)。整体上 $W-N$ 处理根冠比较低。表明适量的养分添加,在植物生长过程中会优先分配给地上部分,有较高的地上生物量,即符合平衡生长理论^[7]。整体上与贺星等^[31] 对荒漠草原研究相比,地上生物量和地下生物量均增加了,其原因可能是 2016 年降水量和温度均增加造成的(图 1)。

4 结论

1) 随氮沉降增加,CK 和 R 处理植物物种多样性呈现先上升后下降的趋势,W 处理下植物物种多样性降低($P < 0.05$)。

2) 同一水分处理下(CK、W), N_{50} 和 N_{100} 较 N_0 水平显著增加($P < 0.05$)。水氮交互作用对一、二年生植物群落生物量有显著影响($P < 0.05$)。地上生物量整体上呈现 $(W \times N) > (CK \times N) > (R \times N)$ 。

3) 不同水分及氮素处理下地下生物量随土层增加生物量在减少,且主要集中在 0—30 cm 土层。 $W \times N$ 交互作用下可促进根系向深层土壤生长,且 $W-N_{30}$ 较 $W-N_0$ 处理下地下生物量显著增加($P < 0.05$)。CK 和 R 处理下随着施沉降增加地下总生物量呈现先增加后降低的趋势。

4) 不同水分处理下, $W \times N_{30}$ 和 $R \times N_{30}$ 较 $CK \times N_{30}$ 处理下根冠比显著降低($P < 0.05$)。

参考文献 References:

- [1] Ladwig L M, Collins S L, Swann A L, Xia Y, Allen M F, Allen E B. Above and below ground responses to nitrogen addition in a Chihuahuan Desert grassland. *Oecologia*, 2012, 169(1): 177-185.
- [2] 樊维, 蒙荣, 陈全胜. 不同施氮水平对克氏针茅草原地上地下生物量分配的影响. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(2): 74-75.
Fan W, Meng R, Cheng Q S. Effects of nitrogen additions on ground/underground biomass allocation of *Stipa krylovii* community. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 31(2): 74-75. (in Chinese)
- [3] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [5] 孔维静, 郑征. 山民江上游茂县退化生态系统及人工恢复植被地上生物量及净初级生产力. *山地学报*, 2004, 22(4): 445-450.
Kong W J, Zheng Z. The aboveground biomass and net primary productivity of degraded and artificial communities in Maoxian, upper reach of Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(4): 445-450. (in Chinese)
- [6] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 董全民, 吴海艳, 盛利, 杨时海, 李世雄. 黄河源区高寒草甸小同植被生物量及土壤养分状况研究. *草地学报*, 2011, 19(1): 1-6.
Wang Y L, Ma Y S, Shi J J, Dong Q M, Wu H Y, Sheng L, Yang S H, Li S X. Investigation of biomass and soil nutrition of differ-

- ent vegetation type at alpine meadow in Yellow River Headwater Area. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] 张金凤, 徐雨晴. 水氮添加对内蒙古多伦县退耕还草地生物量、生产力及其分配的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2): 192-200.
- Zhang J F, Xu Y Q. Responses of plant biomass and net primary production to nitrogen fertilization and increased precipitation in re-grassed croplands in Duolun County of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2): 192-200. (in Chinese)
- [8] 杜宇凡, 古琛, 王亚婷, 赵天启, 陈万杰, 乌力吉, 安海波, 李志国, 王成海, 赵萌莉. 放牧率对短花针茅根际和非根际土壤氮素的影响. *草业科学*, 2016, 33(6): 1021-1027.
- Du Y F, Gu C, Wang Y T, Zhao T Q, Chen W J, Wuliji, An H B, Li Z G, Wang C H, Zhao M L. Effects of grazing on nitrogen contents in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Stipa breviflora*. *Pratacultural Science*, 2016, 33(6): 1021-1027. (in Chinese)
- [9] 秦建蓉, 马红彬, 王丽, 虎巧能, 沈艳, 许冬梅. 宁夏荒漠草原植物群落特征对不同轮牧开始时间的响应. *草业科学*, 2016, 33(5): 963-971.
- Qin J R, Ma H B, Wang L, Hu Q N, Shen Y, Xu D M. Effect of different rotational grazing start time on plant community characteristics in desert steppe in Ningxia. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5): 963-971. (in Chinese)
- [10] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 涂文霞, 张青青. 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.
- Zhao X F, Xu H L, Zhang P, Tu W J, Zhang Q Q. Effects of nutrient and water additions on plant community structure and species diversity in desert grasslands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 167-177. (in Chinese)
- [11] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 修伟明, 张贵龙, 皇甫超河, 杨殿林. 氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响. *生态学报*, 2015, 35(19): 6460-6469.
- Li W J, Liu H M, Zhao J N, Xiu W M, Zhang G L, Huangfu C H, Yang D L. Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6460-6469. (in Chinese)
- [12] 张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞, 云建英. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应. *生态学报*, 2014, 34(10): 2737-2745.
- Zhang L M, Liu X P, Zhao X Y, Zhang T F, Yue X F, Yun J Y. Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2737-2745 (in Chinese)
- [13] 韩炳宏, 尚振艳, 袁晓波, 安卓, 文海燕, 李金博, 傅华, 牛得草. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草光合特性的影响. *草业科学*, 2016, 33(6): 1070-1076.
- Han B H, Shang Z Y, Yuan X B, An Z, Wen H Y, Li J B, Fu H, Niu D C. Effects of N addition on photosynthetic characteristics and leaf senescence in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2016, 33(6): 1070-1076. (in Chinese)
- [14] 文海燕, 傅华, 牛得草, 张永超. 大气氮沉降对黄土高原土壤氮特征的影响. *草业科学*, 2013, 30(5): 694-698.
- Weng H Y, Fu H, Niu D C, Zhang Y C. Influence of nitrogen deposition on soil nitrogen characteristics in the typical steppe on Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2013, 30(5): 694-698 (in Chinese)
- [15] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*, 2008, 28(12): 2665-2673.
- Reng S J, Yu G R, Tao B, Wang S Q. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 2008, 28(12): 2665-2673. (in Chinese)
- [16] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 张铜会. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究. *环境科学*, 2010, 31(8): 1716-1725.
- Li Y L, Mao W, Zhao X Y, Zhang T H. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions, North China. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1716-1725. (in Chinese)
- [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.
- Zhang Y, Cui X M, Fan M S. Atmospheric N deposition and its influences on the grassland biodiversity. *Pratacultural Science*, 2007, 24(7): 12-17. (in Chinese)

- [18] 白春利,阿拉塔,陈海军,单玉梅,额尔敦花,王明玖.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.
Bai C L, Alata, Cheng H J, Shan Y M, Erdunhua, Wang M J. Effects of addition of nitrogen and water on plant community characteristics of *Stipa breviflora* desert steppe. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(2): 69-75. (in Chinese)
- [19] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 211-220.
- [20] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, Roberto J, Fernández. Modifying the pulse reserve paradigm for deserts of North America: Precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 2004, 141(2): 194-210.
- [21] Chesson P, Gebauer R L E, Schwinning S, Huntly N, Wiegand K, Ernest M S K, Sher A, Novoplansky A, Weltzin J F. Resource pulses, species interactions, and diversity maintenance in arid and semi-arid environments. *Oecologia*, 2004, 141(2): 236-253.
- [22] Muldavin E H, Moore D I, Collins S L, Karen R, Wetherill, David C. Aboveground net primary production dynamics in a northern Chihuahuan Desert ecosystem. *Oecologia*, 2008, 155(1): 123-132.
- [23] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, 291: 481-484.
- [24] Hall S J, Sponseller R A, Grimm N B, Huber D, Kay J P, Clark C, Collins S. Ecosystem response to nutrient enrichment across an urban airshed in the Sonoran Desert. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 640-660.
- [25] 郭永盛,陆嘉惠,张际昭,李鲁华,危常州,褚贵新,董鹏,李俊华.施氮肥对新疆荒漠草原生产力及植物多样性的影响.石河子大学学报(自然科学版),2011,29(5):536-541.
Guo Y S, Cheng J H, Zhang J S, Li L H, Wei C Z, Zhu G X, Dong P, Li J H. Effects of nitrogen fertilization on productivity and species diversity of desert grassland in Xinjiang. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2011, 29(5): 536-541. (in Chinese)
- [26] Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science*, 2009, 324: 636-638.
- [27] Gough L, Osenberg C W, Gross K L, Collins S L. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. *Oikos*, 2000, 89(3): 428-439.
- [28] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [29] 王斌,黄刚,马健,李彦.5种荒漠短命植物养分再吸收对水氮添加的响应.中国沙漠,2016,36(2):415-422.
Wang B, Huang G, Ma J, Li Y. Responses of nutrients resorption of five desert ephemeral plants to water and nitrogen additions. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(2): 415-422. (in Chinese)
- [30] Bhark E W, Small E E. Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan Desert, New Mexico. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 185-196.
- [31] 贺星,马文红,梁存柱,红梅,柴曦,赵巴音那木拉.养分添加对内蒙古不同草地生态系统生物量的影响.北京大学学报(自然科学版),2015,51(4):657-666.
He X, Ma W H, Liang C Z, Hong M, Chai X, Zhao Bayinnamula. Effects of nutrient addition on community biomass varied among different grassland ecosystems of Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(4): 657-666. (in Chinese)

(责任编辑 武艳培)