

长期不同施氮水平对草原植物群落结构的影响

赵乌英¹, 红梅^{1,2*}, 德海山^{1,2}, 刘鹏飞¹, 马尚飞¹, 王文东¹, 杨殿林³

(1 内蒙古农业大学, 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, 呼和浩特 010011; 3 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要: 为探讨施氮对贝加尔针茅草原植物群落结构的影响, 该研究于内蒙古贝加尔针茅草原设置不同施氮水平 0(N0)、15(N15)、30(N30)、50(N50)、100(N100)、150(N150)、200(N200) 和 300(N300) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 研究连续施氮 9 年后贝加尔针茅草原群落物种组成、重要值、多样性及生物量等指标对不同施氮水平的响应。结果表明: (1) 长期施氮导致植物群落物种组成发生了明显的变化, 在高浓度氮素添加量下群落物种数最低, 但可显著提高优势种在群落中的重要值 ($P < 0.05$)。 (2) 长期施氮使贝加尔针茅草原植物多样性指数不同程度地降低, 使优势度指数增加, 其中 N300 添加水平效果最为明显 ($P < 0.05$)。 (3) 长期施氮使草原植被生产力 (地上、地下生物量) 整体呈先上升后下降的趋势, 地上生物量在 N100 水平时出现峰值, 地下生物量在 N50 水平时出现最大值 ($P < 0.05$), 且根系分布具有明显的表聚特征 (0~10 cm)。 (4) RDA 分析表明, 寸草苔和狭叶柴胡地上生物量与土壤 pH 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 展枝唐松草和二裂委陵菜地上生物量与土壤有机质含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。研究认为, 长期不同施氮水平均可改变贝加尔针茅草原群落物种组成, 降低物种多样性, 对植物群落结构有着明显的影响。

关键词: 贝加尔针茅草原; 施氮; 植物群落结构; 植物多样性; 土壤环境

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

Effects of Long-term Different Nitrogen Addition Levels on Plant Community Structure

ZHAO Wuyingga¹, HONG Mei^{1,2*}, DE Haishan^{1,2},

LIU Pengfei¹, MA Shangfei¹, WANG Wendong¹, YANG Dianlin³

(1 Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010011, China; 2 Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Huhhot 010011, China; 3 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: We conducted an experiment on 9 years of continuous nitrogen application to explore the effect of nitrogen addition on plant community structure in *Stipa baicalensis* steppe, with different nitrogen addition levels of 0(N0), 15(N15), 30(N30), 50(N50), 100(N100), 150(N150), 200(N200) and 300(N300) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The responses of community structure and important value, diversity as well as biomass to different nitrogen addition in 9 years of continuous nitrogen application were explored. The results showed that: (1) community structure was significantly responded to long-term nitrogen addition with the lowest species number in high nitrogen application rate, while the highest important value in dominant spe-

收稿日期: 2019-10-16; 修改稿收到日期: 2019-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (31170435)

作者简介: 赵乌英 (1996—), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为草原土壤利用与保护。E-mail: 763533406@qq.com

* 通信作者: 红梅, 教授, 硕、博导师, 主要从事草原土壤利用与保护研究。E-mail: nmhm1970@sina.com

cies under high nitrogen application rate was observed. (2) Plant diversity index in *S. baicalensis* steppe was reduced with varying degrees in long-term nitrogen addition. The dominance index was increased with long-term nitrogen addition with the most prominent value in N300 level addition ($P < 0.05$). (3) The productivity of grassland vegetation (aboveground and belowground biomass) increased firstly and then decreased after long-term nitrogen addition. The peak value of aboveground biomass was observed under N100 level addition, while the maximum value of belowground biomass was appeared at N50 level ($P < 0.05$). Root was characterized at 0–10 cm distribution. (4) RDA analysis showed that aboveground biomass of *Carex duriuscula* and *Bupleurum scorzonerifolium* were significantly positively correlated with soil pH ($P < 0.05$), and *Thalictrum sguarrosus* and *Potentilla bifurca* were significantly positively correlated with soil organic matter ($P < 0.05$). The community structure in *S. baicalensis* steppe was greatly responded to long-term nitrogen addition composition with diversity decreased and changes in community composition.

Key words: *Stipa baicalensis* steppe; nitrogen addition; structure of plant community; plant diversity; soil environment

氮(N)是一种基本的植物营养物质,它对于植物的生长发育、群落组成以及生态系统的结构和功能都起着重要作用^[1-2]。研究表明,多数陆地生态系统适应低氮供应的条件,这种情况往往导致植物群落具有较高的物种多样性。然而,近几年来化石燃料的燃烧以及农业施肥量的增加,许多发达国家大气中生物活性氮的沉积速率是工业化前的 2~7 倍^[3]。目前,中国已成为大气氮沉降的热点地区^[4],平均(大气干湿)氮沉降量约为 $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,并且在未来仍将持续增加^[5-6]。氮沉降量的不断增加改变了原有的土壤环境,对陆地生态系统的结构和功能产生了一系列影响。草地生态系统作为全球陆地生态系统的重要组成部分,具有重要的生态系统服务价值^[7]。因此,探讨草地生态系统对氮沉降的响应成为近年来国内外生态学家关注的热点和焦点之一。

已有研究表明,短期氮沉降提高了土壤中可利用氮的含量,使植物种间竞争加剧,喜氮植物占据主要的生态位,进而造成群落内一些物种的损失,导致植物多样性降低^[8],而植物群落生物多样性在很大程度上决定了草地生态系统的稳定性和可持续性^[9]。也有研究显示,施氮对草地生产力的影响具有年限和氮素添加水平的阈值^[10],在此阈值时地上生物量达到峰值,之后氮素添加对地上生物量促进效应将减小甚至转为负影响^[11-12]。贝加尔针茅草原是亚洲中部草原区所特有的草原群系,是草甸草原的代表类型之一,主要为天然牧场,在畜牧业生产中占有重要的地位,是开展温带草原对氮素添加响应的理想试验平台^[13]。虽然氮沉降对贝加尔针茅草原的相关研究屡见不鲜^[14-15],但对于长期施氮对

贝加尔针茅草原植物群落结构的研究数据并不充分。因此,该研究通过持续 9 年模拟氮沉降增加,揭示长期不同施氮水平对贝加尔针茅草原植物群落组成和物种变化、多样性及生物量等指标的影响差异,为贝加尔针茅草原更加合理有效的利用和可持续发展提供建议和科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验区概况

研究区域位于大兴安岭西麓,内蒙古自治区鄂温克族自治旗伊敏苏木境内($48^{\circ}27' \sim 48^{\circ}35' \text{N}$, $119^{\circ}35' \sim 119^{\circ}41' \text{E}$),海拔 760~770 m。该地区属于温带草甸草原半干旱大陆性季风气候区,年均气温 -1.6°C ,年降水量 348.8 mm,主要分布在 6~9 月,年蒸发量 1 478.8 mm,年积温 $2\,567.5^{\circ} \text{C}$,年均风速 4 m/s,无霜期 113 d,土壤类型为栗钙土。植被类型为贝加尔针茅(*S. baicalensis*)草甸草原,贝加尔针茅为建群种,在群落中占绝对优势,羊草(*Leymus chinensis*)为优势种。羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、寸草苔(*C. duriuscula*)、日阴菅(*Carex pediformis*)、扁蓿豆(*Melilotoides rathenica*)、草地麻花头(*Serratula yamatsutanna*)、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosus*)、多茎野豌豆(*Vicia multicaulis*)、线叶菊(*Filiifolium sibiricum*)、狭叶柴胡(*Bupleurum scorzonerifolium*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)等为常见伴生种。

1.2 试验设计

试验样地自 2010 年起开始围封禁牧,进行模拟氮素添加。氮素添加强度和频度主要考虑当前中国大气氮沉降量及其未来 50 年变化趋势,同时参考了

国际同类研究的处理方法^[16-17]。氮素添加处理共设 8 个水平,换算纯氮施用量为 0、15、30、50、100、150、200 和 300 kg · hm⁻² · a⁻¹ (不包括大气氮沉降),分别记为 N0(对照)、N15、N30、N50、N100、N150、N200 和 N300,每个处理 3 次重复。小区面积为 64 m² (8 m × 8 m),各小区间隔 2 m,重复间隔 5 m。选用氮肥为硝酸铵(NH₄NO₃),分别于每年 6 月和 7 月 2 次施入,每次施氮量为全年的 50%。为了尽量减少氮肥损失同时对地表的扰动,试验中将氮肥溶解于适量水中制成溶液,使用洒水壶将该溶液均匀喷洒到小区内,对照小区内喷洒等量水。

1.3 样品采集

2017~2018 年(连续施氮第 8、9 年)8 月中旬植物生长旺盛季进行样品采集,采用陆地生物群落典型样方调查法^[18]。在不同处理的样地随机选取 1.0 m × 1.0 m 样方,记录样方内各植物多度、高度和盖度等指标并调查植物群落物种组成。然后将植物齐地面分种剪下后装入信封袋带回实验室称鲜质量,采用烘干法在 105 ℃ 杀青 30 min,于 75 ℃ 恒温下继续烘干 24 h,并计算地上部分生物量。采用直径为 7 cm 根钻在靠近该群落优势种基部处按每隔 10 cm 土壤分层采样,取样深度为 0~50 cm;将取出的土壤放入 100 目网袋中将植物根冲洗干净放入纸袋,于 75 ℃ 恒温下继续烘干 24 h,并计算地下部分生物量。采集完植物地上和地下生物量之后,在每个样方内利用土钻选取 0~20 cm 混合土壤样品,用于土壤理化性质指标的测定。

1.4 数据统计与分析

(1) 物种重要值的计算:

物种重要值 = (相对高度 + 相对盖度 + 相对密度) / 3

地下生物量 = 干重 / πr^2 , 式中: $r = 3.5$ cm

依照物种重要值 > 10% 为优势种, > 5% 为亚优势种, < 5% 为伴生种的标准划分群落物种。

(2) 物种多样性的测定:

采用 Shannon 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (E)、Margalef 丰富度指数 (D) 和 Simpson 优势度指数 (C)^[19-20], 物种多样性指数计算公式如下:

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

$$E = H / \ln S$$

$$D = (S - 1) / \ln N$$

$$C = \sum_{i=1}^S (n_i / N)^2$$

式中, P_i 为第 i 个物种的干重占总干重的比率; S 为物种数; N 为总生物量; n_i / N 表明各生物量占总生物量的百分数。

(3) 土壤养分测定:

土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法测定; 土壤 pH 采用 STARTER 2100 型酸度计(土:液 = 1:5)测定; 土壤含水量采用烘干称重法测定; 土壤全氮采用凯氏定氮仪测定(K9840 凯氏定氮仪); 土壤速效磷采用钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提, 火焰光度法测定^[21]。

(4) 数据分析:

采用 Microsoft Excel 2007 和 SigmaPlot 12.5 对数据分析处理与作图, 采用 SPSS 17.0 软件进行统计与分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、用最小显著差数法(least significant difference, LSD)进行多重比较。采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)对植物优势种和常见种地上生物量与土壤环境因子之间进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对植物物种组成及重要值的影响

不同施氮水平对贝加尔针茅草原植物物种组成及重要值的影响存在明显差异(表 1)。植物生长旺盛期群落物种组成分析结果表明, 研究区物种共 42 类, 随着施氮量的增加各处理群落物种数分别表现为 25、27、27、28、22、20、19 和 16 种。与对照 N0 相比, 施氮量在 N50 水平时群落物种数达到最高 28 类, 随后落草、糙隐子草、白婆婆纳、冷蒿、黄芩等植物从 N100 水平开始重要值逐渐降低直至消失, 到 N300 水平时群落物种数仅为 16 类。优势种贝加尔针茅和羊草等个体较高植物重要值随施氮量的增加而增加, 羊草和增加趋势最为明显; 个体高度较为中等的亚优势物种如日阴营、羽茅和草地麻花头等重要值在低、中氮素添加水平有增加, 高氮水平有下降趋势; 而蓬子菜、细叶白头翁、鸭葱、冰草和糙隐子草等个体高度较矮的偶见种植物重要值随施氮量的增加连续下降直至消失。

2.2 不同施氮水平对植物物种多样性的影响

施氮对贝加尔针茅草原植物群落物种多样性指数产生了显著影响(表 2)。2017 年物种多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均在 N0 水平时最高且随着氮素添加水平的递增呈下降趋势。在 N150 水平时多样性指数和均匀度指数与对照 N0 相比显

表 1 不同施氮水平对植物物种组成及重要值的影响

Table 1 The influence of different nitrogen application levels to species composition and importance value

功能群 Group	物种 Species	重要值 Important value							
		N0	N15	N30	N50	N100	N150	N200	N300
多年生禾草 Perennial grass	贝加尔针茅 <i>S. baicalensis</i>	0.12	0.12	0.1	0.12	0.14	0.13	0.14	0.17
	羊草 <i>L. chinensis</i>	0.08	0.12	0.15	0.16	0.29	0.29	0.24	0.34
	潜草 <i>Koeleria</i> sp.	0.01	0.21	0.12	0.11	—	—	—	—
	羽茅 <i>A. sibiricum</i>	0.08	0.09	0.05	0.14	0.08	0.13	0.15	0.09
	草地早熟禾 <i>P. pratensis</i>	0.01	0.05	—	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	0.01	0.02	0.02	0.02	—	—	—	0.01
	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	—	—	—	—	0.04	—	—	—
	日阴菅 <i>C. pediformis</i>	0.04	0.07	0.07	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03
多年生杂草 Perennial weeds	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	—	—	0.03	0.04	0.04	—	—	—
	展枝唐松草 <i>T. squarrosom</i>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03
	斜颈黄芪 <i>Astragalus adsurgens</i>	0.02	0.02	0.03	—	—	—	—	—
	天门冬 <i>Asparagus cochinchinensis</i>	—	0.04	—	—	—	—	—	—
	狭叶柴胡 <i>Bupleurum scorzoneri folium</i>	0.04	0.06	0.08	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02
	细叶百合 <i>Lilium tenui folium</i>	0.02	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	—
	紫花鸢尾 <i>Iris ruthenica</i>	0.01	—	—	—	0.02	—	—	—
	囊花鸢尾 <i>Iris ventricosa</i>	—	—	0.01	0.03	0.02	—	0.02	0.01
	扁蓿豆 <i>M. rathenica</i>	—	0.02	0.01	0.01	0.04	—	—	—
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0.03	0.03	0.04	0.02	0.05	0.04	0.04	0.07
	草地麻头花 <i>S. yamatsutanna</i>	0.08	0.05	0.04	0.05	0.09	0.07	0.04	0.03
	细叶白头翁 <i>Pulsatilla turczaninovii</i>	0.06	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	—
	蓬子菜 <i>Galium verum</i>	0.03	0.03	0.01	0.05	—	0.01	—	—
	鸦葱 <i>Scorzonera austriaca</i>	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	—	0.02	—
	沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	0.01	0.01	0.01	0.01	—	—	0.01	0.02
	披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	0.04	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
	轮叶委陵菜 <i>Potentilla verticillaris</i>	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	—	—	0.01
	线叶菊 <i>F. sibiricum</i>	—	—	—	0.02	—	0.02	0.02	—
	多裂叶荆芥 <i>Schizonepeta multifida</i>	0.11	—	—	—	—	—	—	—
	多茎野豌豆 <i>V. multicaulis</i>	0.01	—	—	—	—	—	—	—
	达乌里苕芭 <i>Cymbaria dahurica</i>	0.02	0.02	—	—	0.02	0.03	0.04	—
	狗舌草 <i>Tephroseris kirilowi</i>	—	—	—	—	—	0.01	—	—
	细齿草木犀 <i>Melilotus dentatus</i>	—	0.01	—	—	—	—	—	—
	棉团铁线莲 <i>Clematis hexapetala</i>	—	0.02	—	—	—	—	—	—
	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	—	—	—	0.02	—	—	—	—
	浮毛山莓草 <i>Sibbaldia adpressa</i>	—	—	0.02	—	—	—	0.04	—
	寸草苔 <i>C. duriuscula</i>	0.12	0.06	0.08	0.08	0.14	0.09	0.11	0.14
	星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	—	0.01	0.02	0.02	—	—	—	—
	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	—	0.01	—	0.03	—	—	—	—
	细叶韭 <i>Allium tenuissimum</i>	—	—	—	—	—	0.03	—	0.02
一、二年生草本 Annual or biennial herb	白婆婆纳 <i>Veronica incana</i>	0.02	—	0.22	—	—	—	—	—
	尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	—	—	0.02	—	0.05	0.03	0.05	0.04
半灌木 Subshrub	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	—	—	0.15	0.09	—	—	0.02	0.05
—	未知 Unknown	—	—	—	0.03	—	0.01	0.01	0.01

注：— 表示该处理下无此物种
Note: — indicates no this species in the treatment

表 2 不同施氮水平对植物物种多样性的影响

Table 2 The influence of different nitrogen application levels to species diversity of the plant community

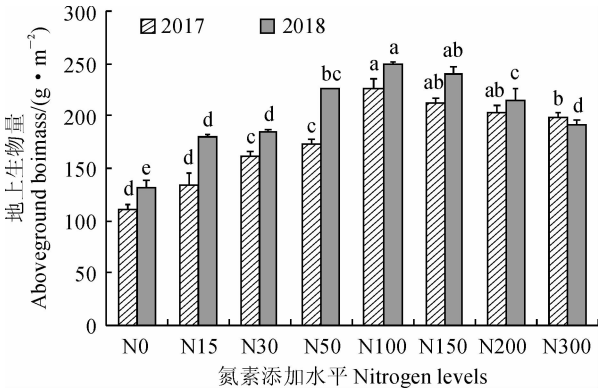
指数 Index	年份 Year	氮素水平 N application level/(kg · hm ⁻² · a ⁻¹)							
		N0	N15	N30	N50	N100	N150	N200	N300
C	2017	0.15±0.01c	0.20±0.01abc	0.16±0.01c	0.17±0.01bc	0.23±0.02a	0.22±0.02ab	0.25±0.01a	0.26±0.02a
	2018	0.14±0.01d	0.23±0.01abc	0.19±0.01d	0.20±0.02d	0.29±0.01a	0.28±0.01ab	0.24±0.01abc	0.26±0.05abc
H'	2017	2.39±0.06a	2.18±0.07ab	2.24±0.07a	2.28±0.03a	2.18±0.11ab	1.97±0.04bc	1.86±0.02cd	1.66±0.02d
	2018	2.41±0.01a	2.20±0.03a	2.17±0.03ab	2.10±0.10ab	2.01±0.04b	1.75±0.07c	1.75±0.05cd	1.61±0.16d
E	2017	0.75±0.00a	0.72±0.01ab	0.74±0.03a	0.71±0.01ab	0.69±0.02abc	0.67±0.02bc	0.64±0.02cd	0.61±0.02d
	2018	0.77±0.01a	0.73±0.03a	0.69±0.00ab	0.68±0.02ab	0.64±0.01bc	0.60±0.03bc	0.60±0.00bc	0.57±0.03c
D	2017	4.10±0.01a	3.62±0.05bc	3.75±0.07b	3.52±0.03c	3.47±0.09c	3.26±0.05d	3.13±0.03d	3.10±0.03d
	2018	4.52±0.14a	3.44±0.25b	3.52±0.12b	3.32±0.00bc	2.52±0.08d	2.79±0.14cd	3.17±0.20bc	3.02±0.08bcd

注:C. 优势度指数;H'. 多样性指数;E. 均匀度指数;D. 丰富度指数;不同小写字母表示不同处理间差异达 0.05 显著水平($P<0.05$),下同
Note:C. Evenness index; H'. Shannon-Weiner; E. Pielou evenness index; D. Species richness index; Different normal letters indicate significant difference between different treatments at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below

著降低($P<0.05$),降幅分别为 21.76%和 10.6%;丰富度指数在 N15 水平时显著降低($P<0.05$),降幅为 11.70%;而优势度指数随氮素水平的递增呈增加趋势,在 N100 水平时与对照 N0 相比显著增加($P<0.05$)34.78%。2018 年物种多样性指数与 2017 年的规律基本一致,但多样性指数和均匀度指数在 N100 水平时比对照 N0 显著降低($P<0.05$),降幅分别为 35.68%和 16.88%;丰富度指数也在 N15 水平时出现显著降低($P<0.05$),降幅为 23.89%;而优势度指数在 N100 水平时显著增加到 51.72%($P<0.05$)。从 2017、2018 年两年数据结果中可以看出,长期施氮后植物丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均下降,而优势度指数增加。

2.3 不同施氮水平对植物地上生物量的影响

不同施氮水平对植物地上生物量皆有显著影响(图 1)。2017 年植物地上生物总量达到 1 321 g/m²,与对照 N0 水平相比,N15、N30、N50 和 N100 施氮水平植物地上生物量均呈显著增加($P<0.05$),且在 N100 水平下增加效果最为明显,由 110.55 g/m² 增加到 226.51 g/m²,增加幅度为 51.19%;但从 N150 到 N300 水平呈逐渐下降趋势,在 N300 水平时达到显著下降($P<0.05$)。2018 年不同施氮水平植物地上生物总量达到 1 622 g/m²,地上生物量的变化趋势基本与 2017 年的保持一致。在 N100 水平时增加效果最为明显,由 131.04 g/m² 增加到 250.36 g/m²,但比 2017 年的增加幅度降低了 3.53%;从 N150 到 N300 水平呈逐渐下降趋势,在 N200 水平时达到显著下降($P<0.05$)。总的来看,2017、2018 年施氮对地上生物量的影响规律基



不同小写字母表示同年不同处理间差异达 0.05 显著水平($P<0.05$)

图 1 2017 和 2018 年不同施氮水平对植物地上生物量的影响

Different normal letters within same year indicate significant difference between different treatments at 0.05 level ($P<0.05$)

Fig.1 Effects of different nitrogen addition levels on the aboveground biomass of plants in 2017 and 2018

本一致,但 2018 年地上生物总量比 2017 年更高。

2.4 不同施氮水平对植物地下生物量的影响

不同施氮水平对地下生物量的影响不同且不同土层中存在明显差异(表 3)。随着土壤土层深度的增加地下生物量呈下降趋势,不同施氮水平地下生物量均在 0~10 cm 土层中最高,具有明显的表聚特征。在同一土层条件下,随着施氮水平的增加地下生物量呈现先增加后降低的趋势。与对照 N0 相比,在 0~10 cm 土层中施氮量在 N150 水平时出现“峰值”且达到显著差异($P<0.05$),而在 10~20 cm、20~30 cm 和 30~40cm 土层中施氮量均在 N100 水平时地下生物量达到最高,但未达到显著差异;在 40~50 cm 土层中施氮量在 N15 水平时地

表 3 不同施氮水平对植物不同土层地下生物量的影响

处理 Treatment	土层 Soil depth					总和 Total
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	
N0	1 070.77±67.82b	596.70±124.58a	317.20±46.72a	302.90±33.84a	257.40±19.26ab	2544.97±18.34b
N15	1 207.27±246.33b	632.67±101.08a	353.60±100.18a	328.03±38.07a	317.63±32.03a	2839.20±18.78ab
N30	1 215.07±60.67b	499.63±42.60a	482.73±42.60a	333.27±129.22a	314.17±25.48a	2844.87±22.82ab
N50	1 427.40±46.59b	811.20±119.45a	495.30±28.90a	328.90±58.78a	287.73±18.33a	3350.53±13.51a
N100	1 460.33±189.06ab	601.47±104.84a	503.10±147.57a	345.8±81.64a	297.27±22.07a	3207.97±16.74ab
N150	1 815.23±43.04a	749.67±38.37a	266.07±25.51a	276.47±10.30a	137.37±27.29b	3244.80±9.95a
N200	1 456.00±29.76ab	721.93±31.37a	306.80±21.55a	270.83±25.83a	221.43±43.51ab	2977.00±18.67ab
N300	1 423.93±148.27b	708.07±118.42a	286.00±11.08a	217.10±38.41a	217.97±55.94ab	2853.07±23.33ab

表 4 长期施氮对土壤环境因子的影响

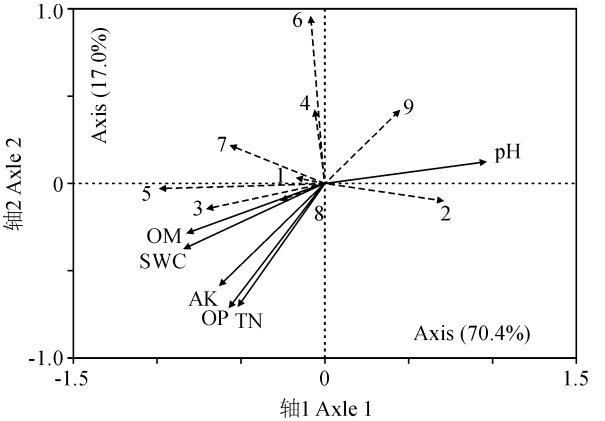
处理 Treatment	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	含水量 Soil moisture /%	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Oslen-P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	pH
N0	49.91±2.52a	11.16±0.56b	2.17±0.12b	2.69±0.07b	134.70±4.54c	7.30±0.05a
N15	50.36±0.54a	10.96±0.56b	1.82±0.17c	2.33±0.30b	116.74±4.59c	7.29±0.03a
N30	50.59±1.76a	12.31±0.70ab	2.50±0.08a	2.71±0.18b	118.61±4.70c	7.26±0.27a
N50	51.16±3.16a	11.24±0.40b	2.30±0.13ab	2.40±0.17b	120.06±10.42c	7.05±0.03ab
N100	51.80±1.69a	12.96±0.12ab	2.38±0.09ab	2.96±0.17b	134.74±5.37bc	6.71±0.10bc
N150	50.58±1.85a	12.64±0.30b	2.05±0.10b	2.36±0.43b	137.55±4.42bc	6.67±0.04bc
N200	52.08±0.64a	12.48±0.67b	2.42±0.14a	3.16±0.05b	157.99±3.01b	6.59±0.08c
N300	52.19±2.95a	13.90±0.64a	2.68±0.09a	4.83±0.70a	251.57±11.2a	6.45±0.08d

下生物量达到最高,但没有显著差异;地下生物总量在施氮量为 N150 水平时达到显著增加($P<0.05$)。

2.5 不同施氮水平对土壤环境因子的影响

不同施氮水平对土壤环境因子的影响不同(表 4)。土壤有机质、含水量、全氮、速效磷和速效钾等指标含量均随施氮量的增加呈增加趋势($P<0.05$);而土壤 pH 值随施氮水平的增加而降低,在 N100 水平时与对照 N0 有显著差异($P<0.05$)。

为进一步探讨贝加尔针茅草原植被生产力与土壤环境因子之间关系,采用冗余分析(RDA)方法进行相关性分析。从图 2 可以看出,第一轴与第二轴分别累计解释了长期施氮条件下植被优势种和常见种地上生物量与土壤环境因子总变量的 70.4%和 17.0%;寸草苔和狭叶柴胡与土壤 pH 值呈现显著正相关性($P<0.05$);展枝唐松草和二裂委陵菜与土壤有机质含量呈现显著正相关性($P<0.05$);日阴营、羽茅、羊草和贝加尔针茅等植物地上生物量与土壤含水量、速效钾、速效磷和全氮也具有显著的相关性($P<0.05$)。



OM. 有机质;TN. 全氮;SWC. 含水量;AK. 速效钾;OP. 速效磷;
1. 寸草苔;2. 狭叶柴胡;3. 二裂委陵菜;4. 草地麻头;5. 羊草;
6. 贝加尔针茅;7. 羽茅;8. 展枝唐松草;9. 日阴营
图 2 植物地上生物量与环境因子 RDA 分析排序图
OM. Organic matter;TN. Total nitrogen;SWC. Soil moisture;
AK. Available K;OP. Oslen-P;1. *C. duriuscula*;
2. *B. scorzenerifolium*;3. *P. bifurca*;4. *S. yamatsutanna*;
5. *L. chinensis*;6. *S. baicalensis*;7. *A. sibiricum*;
8. *T. squarrosus*;9. *C. pediiformis*

Fig. 2 RDA ordination map of aboveground biomass and environmental factors of plants

3 讨 论

3.1 不同施氮水平对植物物种组成及重要值的影响

在草原生态系统中,植物群落结构是衡量草地生态系统功能和生态服务的关键因素^[22]。氮素添加通过土壤环境影响土壤养分含量,改变草地植物地上和地下部分生物量的竞争强度,从而使植物物种组成和重要值发生变化^[23]。李文娇等^[24]在该研究区连续3年施氮试验表明,植物群落结构由66类构成,建群种贝加尔针茅在群落中占绝对优势,羊草为优势种。本研究表明,连续施氮9年后贝加尔针茅草原群落组成共42类植物,优势种为贝加尔针茅和羊草。与短期施氮结果相比,长期施氮明显降低了植物群落物种组成,但植物群落的优势种没有发生变化。本研究结果表明,羊草对长期施氮的反应最为明显,随着施氮量的增加羊草在群落中的重要值显著提高,从对照N0水平0.17增加到N300水平时0.34。植物重要值的不断增加表明该植物高度、盖度和密度值提高,对水分营养和光辐射的竞争在群落中处于优势地位,能获得更丰富的资源。而狭叶柴胡、扁蓿豆和星毛委陵菜等杂草类植物随施氮量增加重要值先增加后下降,直至从植物群落中消失。这可能是由于杂草类植物在获取水分和养分资源中处于不利位置,张杰琦等^[25]对于青藏高原高寒草甸草原养分添加试验得出,植物对光照资源的竞争能力不同是造成群落组成结构发生变化的主要原因。本研究中,禾草类植物迅速生长使得其对下层杂类草的生长抑制作用增强,个体较高的禾草类比杂草类吸收更多的光照资源,导致杂草类植物重要值逐渐降低,甚至发生植物消失。最终,优势物种会朝着更加优势的方向发展,劣势物种处于更劣势的状态^[26]。因此,长期不同施氮水平对植物物种组成及重要值产生了较明显的影响。

3.2 不同施氮水平对植物生物量及多样性的影响

生物量是评价生态系统结构和功能的基本数据^[27]。本研究中,经过长期施氮处理,N100水平地上生物量增加最为明显,分别较对照N0提高了51.19%(2017年)和47.66%(2018年)。表明施氮到N100水平时,对地上生物量的促进作用已经接近饱和状态,但高浓度(N150、N200、N300)施氮水平下地上生物量呈下降趋势,这与前人在该区所做的氮添加试验结果一致^[28-30]。原因可能是超过N100水平时土壤微生物活性降低,微生物群落结

构和功能发生改变进而影响高浓度施氮量下植物生产力^[31]。连续8~9年施氮对贝加尔针茅草原地上生物量的影响规律基本一致,但2017年各处理地上生物量均比2018年低,原因是由于2017年植物生长季气候干旱,降雨量较低。随着施氮量的增加地下生物总量在N50水平时出现“峰值”,与对照N0相比增加24.04%,原因可能是N50水平植物拥有充裕的养分即地上部分茎、叶容易获取养分。长期不同施氮水平下地下生物量分布具有明显的垂直结构,均随土层深度的增加生物量急剧降低,大部分分布于表层(0~10 cm)土壤中,在其他草原类型的研究也发现了类似的结果^[32-33]。其主要原因是草地植被的根系分布受所处土壤环境的制约^[34],由于一般浅层土壤的养分供应能力相对较强,因而浅层土壤根系生物量也较高。同时,本研究结果中,随着施氮水平的提高,贝加尔针茅草原植物群落多样性指数、均匀度指数和丰富度指数明显降低。这与Clark等^[35]在美国明尼苏达草原上长期施氮使群落物种丧失导致群落多样性降低的结果相一致。植物多样性在短期施氮过程中略有增加,随着试验的进行,长期施氮对群落物种丰富度指数和多样性指数表现出降低作用。

3.3 土壤环境因子与植物生物量的相关性

土壤环境因子的变化可造成植物养分分布、生理结构过程等一系列变化,由于研究区植物群落根系主要分布于土壤表层,也就意味着植被对表层土壤理化性质的改善程度最大^[36]。长期施氮对土壤理化性质具有一定的影响,特别是对土壤pH值。随着施氮量的增加,土壤pH值从N100水平开始显著下降($P<0.05$);土壤有机质、含水量、全氮、速效磷和速效钾含量显著增加。这与在内蒙古多伦温带草原^[37]的研究结果基本一致。土壤理化性质与植物生物量的相关性分析表明,植物寸草苔和狭叶柴胡地上生物量与土壤pH值具有显著正相关性($P<0.05$),说明土壤pH值的逐渐下降导致对土壤酸化环境不适应的植物生物量降低直至消失,这也是群落结构发生变化的主要原因之一。展枝唐松草和二裂委陵菜地上生物量与土壤有机质含量呈现显著正相关性($P<0.05$);日阴营、羽茅、羊草和贝加尔针茅等植物地上生物量与土壤含水量、速效钾、速效磷和全氮也具有显著的相关性($P<0.05$)。综上所述,草地生物量变化直接或间接地受环境因子波动的影响,某些物种地上生物量随土壤养分含量的增加而增加。因此,在研究全球气候变化背景下

草原生态系统的生物量分布时,与地下紧密联系的土壤因子也扮演重要角色。

4 结 论

(1)长期施氮改变了贝加尔针茅草原植物群落结构,植物群落物种数随长期施氮水平的增加呈先增加后降低趋势,在 N300 水平时群落物种数最低。禾草类羊草等植物重要值随施氮水平增加而增加,而杂草类植物随施氮水平的增加逐渐减少甚至消失。

(2)长期施氮后植物地上生物量在 N100 水平时达到增加峰值,而地下生物量在 N50 水平时达最高($P < 0.05$),且具有明显的表层分布特征(0~10 cm)。长期不同施氮水平对物种多样性有显著影响,随着施氮量的不断增加物种多样性指数、均匀度指数和丰富度指数不断下降。

(3)长期施氮后贝加尔针茅草原土壤发生酸化,植物生产力受环境因子的影响,一些物种随土壤养分含量的增加而增加,而某些物种随土壤理化性质的变化而消失。

参考文献:

- [1] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6):1 007-1 019.
ZENG D H, CHEN G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 1 007-1 019.
- [2] DURU M, CRUZ P P, RAOUDA A H K, *et al.* Relevance of plant functional types based on leaf dry matter content for assessing digestibility of native grass species and species-rich grassland communities in spring [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(6): 1 622-1 630.
- [3] BOBBINK R, HICKS K, GALLOWAY J, *et al.* Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [4] LIU X J, DUAN L, MO J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview[J]. *Environmental pollution*, 2011, 159(10): 2 251-2 264.
- [5] NIU S L, WU M Y, HAN Y, *et al.* Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 144-155.
- [6] 张 菊,康荣华,赵 斌,等.内蒙古温带草原氮沉降的观测研究[J].环境科学,2013,34(9):3 552-3 556.
ZHANG J, KANG R H, ZHAO B, *et al.* Monitoring nitrogen deposition on temperate grassland in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3 552-3 556.
- [7] BOYER K E, ZEDLER J B. Effects of nitrogen additions on the vertical structure of a constructed cordgrass marsh[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 692-705.
- [8] BOBBINK R, WILLEMS J H. Increasing dominance of *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv. in chalk grasslands: a threat to a species-rich ecosystem[J]. *Biological Conservation*, 1987, 40(4): 301-314.
- [9] 杨殿林,韩国栋,胡跃高,等.放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响[J].生态学杂志,2006,25(12):1 470-1 475.
YANG D L, HANG G D, HU Y G, *et al.* Effects of grazing intensity on plant diversity and aboveground biomass of *Stipa baicalensis* grassland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1 470-1 475.
- [10] 李禄军,曾德慧,于占源,等.氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J].应用生态学报,2009,20(8):1 838-1 844.
LI L J, ZENG D H, YU Z Y, *et al.* Effects of nitrogen addition on grassland species diversity and productivity in Keerqin Sandy Land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1 838-1 844.
- [11] 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(1): 358-372.
- [12] 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[J].中国沙漠,2015,35(1):66-71.
HE Y H, LIU X P, XIE Z K. Effect of nitrogen addition on species diversity and plant productivity of herbaceous plants in desert grassland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 66-71.
- [13] 赵 帅,张静妮,赖 欣,等.放牧与围栏内蒙古针茅草原土壤微生物生物量碳、氮变化及微生物群落结构 PLFA 分析[J].农业环境科学学报,2011,30(6):1 126-1 134.
ZHAO S, ZHANG J N, LAI X, *et al.* Analysis of microbial biomass C, N and soil microbial community structure of *Stipa* steppes using PLFA at grazing and fenced in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1 126-1 134.
- [14] 王 杰,李 刚,修伟明,等.氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(3):237-245.
WANG J, LI G, XIU W M, *et al.* Effects of nitrogen and water on soil enzyme activity and soil microbial biomass in *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia of North China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3): 237-245.
- [15] 刘红梅,李 洁,陈新微,等.贝加尔针茅草原羊草光合特征对氮沉降的响应[J].生态环境学报,2016,25(6):973-980.
LIU H M, LI J, CHEN X W, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Leymus chinensis* in response to simulated nitrogen deposition in Inner Mongolia, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(6): 973-980.
- [16] STEVENS C J, DISE N B, MOUNTFORD J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303: 1 876-1 879.

- [17] CLARK C M, CLELAND E E, COLLINS S L, *et al.* Environmental and plant community determinants of species loss following nitrogen enrichment[J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(7): 596-607.
- [18] GRUBER N, GALLOWAY J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, **451**(7 176): 293-296.
- [19] CALLAHAM M A Jr, RICHTER D D Jr, COLEMAN D C, *et al.* Long-term land-use effects on soil invertebrate communities in Southern Piedmont soils, USA[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, **42**: S150-S156.
- [20] YEATES G W, NEWTON P C D. Long-term changes in topsoil nematode populations in grazed pasture under elevated atmospheric carbon dioxide[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, **45**(8): 799-808.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[D]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 于丰源, 秦 洁, 靳宇曦, 等. 放牧强度对草甸草原植物群落特征的影响[J]. 草原与草业, 2018, **30**(2): 31-37.
- YU F Y, QIN J, JIN Y X, *et al.* Effect of grazing intensity on vegetation plant community characteristic of meadow steppe[J]. *Grassland and Prataculture*, 2018, **30**(2): 31-37.
- [23] 韩 潼, 牛得草, 张永超, 等. 施肥对玛曲县高寒草甸植物多样性及生产力的影响[J]. 草业科学, 2011, **28**(6): 926-930.
- HAN T, NIU D C, ZHANG Y C, *et al.* Effects of fertilization on characteristics of Maqu alpine meadow communities and production[J]. *Pratacultural Science*, 2011, **28**(6): 926-930.
- [24] 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[J]. 中国草地学报, 2015, **37**(2): 7-13.
- LI W J, WANG H, ZHAO J N, *et al.* Effects of nitrogen and water addition on the aboveground biomass of functional groups in the *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, **37**(2): 7-13.
- [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): 1 125-1 131.
- ZHANG J Q, LI Q, REN Z W, *et al.* Effects of nitrogen addition on species richness and relationship between species richness and aboveground productivity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(10): 1 125-1 131.
- [26] 李禄军, 于占源, 曾德慧, 等. 施肥对科尔沁沙质草地群落物种组成和多样性的影响[J]. 草业学报, 2010, **19**(2): 109-115.
- LI L J, YU Z Y, ZENG D H, *et al.* Effects of fertilizations on species composition and diversity of grassland in Keerqin Sandy Lands[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, **19**(2): 109-115.
- [27] 孙金金, 汪鹏斌, 徐长林, 等. 不同施肥水平对果洛高寒草甸草地的影响[J]. 草原与草坪, 2019, **39**(4): 25-30.
- SUN J J, WANG P B, XU C L, *et al.* Effects of fertilization levels on natural grassland of Guoluo Alpine Meadow[J]. *Grassland and Turf*, 2019, **39**(4): 25-30.
- [28] 刘红梅, 张海芳, 皇甫超河, 等. 长期氮添加对贝加尔针茅草原土壤微生物群落多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(4): 709-717.
- LIU H M, ZHANG H F, HUANGFU C H, *et al.* Effects of different long-term nitrogen addition on soil microbial diversity of *Stipa baicalensis* Steppe[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(4): 709-717.
- [29] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 等. 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[J]. 生态学报, 2015, **35**(19): 6 460-6 469.
- LI W J, LIU H M, ZHAO J N, *et al.* Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the *Stipa baicalensis* steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(19): 6 460-6 469.
- [30] 辛小娟, 王 刚, 杨莹博, 等. 氮、磷添加对亚高山草甸地上/地下生物量分配的影响[J]. 生态科学, 2014, **33**(3): 452-458.
- XIN X J, WANG G, YANG Y B, *et al.* Effects of N,P addition on above/below ground biomass allocation in a subalpine meadow[J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(3): 452-458.
- [31] 刘蔚秋, 刘滨扬, 王 江, 等. 不同环境条件下土壤微生物对模拟大气氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2010, **30**(7): 1 691-1 698.
- LIU W Q, LIU B Y, WANG J, *et al.* Responses of soil microbial communities to moss cover and nitrogen addition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(7): 1 691-1 698.
- [32] 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[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, **31**(2): 74-76.
- FAN W, MENG R, CHEN Q S. Effects of nitrogen additions on ground/underground biomass allocation of *Stipa krylovii* community[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, **31**(2): 74-76.
- [33] 贺 星, 马文红, 梁存柱, 等. 养分添加对内蒙古不同草地生态系统生物量的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, **51**(4): 657-666.
- HE X, MA W H, LIANG C Z, *et al.* Effects of nutrient additions on community biomass varied among different grassland ecosystems of Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, **51**(4): 657-666.
- [34] 毛晋花, 邢亚娟, 闫国永, 等. 陆生植物生物量分配对模拟氮沉降响应的 Meta 分析[J]. 生态学报, 2018, **38**(9): 3 183-3 194.
- MAO J H, XING Y J, YANG G Y, *et al.* A meta-analysis of the response of terrestrial plant biomass allocation to simulated N deposition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(9): 3 183-3 194.
- [35] CLARK C M, TILMAN D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands[J]. *Nature*, 2008, **451**(7 179): 712-715.
- [36] 葛生珍, 罗 力, 牛 静, 等. 不同施氮量对土壤理化性质及微生物的影响[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(36): 167-171.
- GE S Z, LUO L, NIU J, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer on soil physical and chemical properties and microbial[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(36): 167-171.
- [37] 薄正熙, 游成铭, 胡中民, 等. 氮素和水分添加对内蒙古温带典型草原生物量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(4): 658-664.
- BO Z X, YOU C M, HU Z M, *et al.* The influence of nitrogen and water addition on biomass in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, **23**(4): 658-664.