

养分添加对内蒙古不同草地生态系统生物量的影响

贺星¹ 马文红^{1,2,†} 梁存柱^{1,2} 红梅³ 柴曦¹ 赵巴音那木拉³ 张宇平¹
杨绍欢¹ 张佳鑫³ 辛晓平^{4,5}

1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心, 呼和浩特 010021;
3. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 4. 中国农业科学院资源区划所, 北京 100081; 5. 呼伦贝尔草原生态系统
国家野外科学观测研究站, 北京 100081; †通信作者, E-mail: whmapku@126.com

摘要 为了比较不同气候条件下草地生态系统对养分添加的响应, 在内蒙古的草甸草原、典型草原和荒漠草原区分别建立长期养分添加试验。在三年试验数据的基础上, 分析不同养分(N和P)添加、不同梯度(N: 10, 5和2.5 g/m²; P: 10 g/m²)对这3种代表性草地群落生物量及其分配的影响。结果表明, 施氮导致内蒙古温带草原地上生物量增加27%~53.3%, 平均增加37.8%, 并且施氮浓度越高, 地上生物量增加越多。地下生物量对施肥的响应比地上生物量小, 整体上, 高浓度的氮添加使内蒙古草原的群落总生物量平均增加10.2%。较干旱的荒漠草原对氮限制的响应比典型草原和草甸草原更明显。磷肥对群落地上、地下生物量的影响不明显。施氮肥促进草甸草原和荒漠草原的根冠比(R/S)降低, 典型草原的根冠比则轻度增加。施肥对内蒙古温带草原根系的垂直分布没有显著影响。位于不同环境条件下的草地生态系统对施肥的响应存在时间和空间差异, 意味着在碳循环模型预算和草地管理中需要考虑不同草地生态系统对养分添加的响应。草地地上生物量对施肥的响应高于地下部分, 如果不考虑地下部分, 可能会高估整个生态系统对施肥的响应。

关键词 养分添加; 内蒙古温带草地; 地上生物量; 地下生物量; 根冠比

中图分类号 Q148

Effects of Nutrient Additions on Community Biomass Varied among Different Grassland Ecosystems of Inner Mongolia

HE Xing¹, MA Wenhong^{1,2,†}, LIANG Cunzhu^{1,2}, HONG Mei³, CHAI Xi¹, ZHAO Bayinamula³,
ZHANG Yuping¹, YANG Shaohuan¹, Zhang Jiaxin³, XIN Xiaoping^{4,5}

1. College of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021; 2. SINO-US Center for Conservation, Energy and Sustainability Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021; 3. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 4. Institute of Natural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 5. National Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Beijing 100081; † Corresponding author, E-mail: whmapku@126.com

Abstract In order to compare the response of community biomass to nutrient additions among different grassland ecosystems, the authors established nutrient addition experiments on three grassland ecosystems along the climate gradient, including meadow steppe, typical steppe and desert steppe in Inner Mongolia. On the basis of the three-year experiment, the impacts of different nutrients (N, P) on different nutrient gradient (N: 10, 5 and 2.5 g/m²; P: 10 g/m²) on above- and belowground biomass of these grassland ecosystems was analyzed. The results show that nitrogen leads to a significant increase in the aboveground biomass of grassland in Inner Mongolia by 27% to

53.3%, an average increase of 37.8%. In addition, the response of biomass to N addition increases with the N gradients. Belowground biomass has a less response to fertilization than aboveground biomass. There is an average of 10.2% increase in the total biomass of grassland community in response to N addition. Biomass responds to P addition less deeply than N addition. Furthermore, the response of biomass to nutrient addition varies among three grassland ecosystems. In arid desert steppe, community biomass is more sensitive to N limitation than the typical steppe and meadow steppe. N addition reduces belowground biomass and R/S ratio in meadow steppe and desert steppe, whereas promotes the values in typical steppe. In contrast, nutrient additions have relatively less and insignificant impacts on the root distribution of temperate grasses. These observations indicate that nutrient addition has different effects on community biomass under different environmental conditions, which means it is necessary to consider the changed response of different grassland ecosystems to nutrient addition in the carbon cycle models budget and grassland management.

Key words fertilization; Inner Mongolia grassland; aboveground biomass; belowground biomass; R/S ratio

草原生态系统是我国最大的陆地生态系统, 面积为 $3110 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。草地生态系统具有重要的生态系统服务价值^[1], 如生态系统碳库、多样性保护以及为畜牧业提供生产力^[2]。草地生物量(或生产力)是草原生态系统的结构与功能的综合体现^[3]。研究草原生物量对草原初级生产力预报、合理利用草原和维持草原的可持续有重要的实际意义^[4]。然而, 由于长期过度放牧和土地利用变化, 我国大面积天然草地已严重退化^[5], 草地植被生产力显著降低, 生态系统固碳能力严重受损^[6]。研究草地生态系统的退化机理和恢复途径成为多年来人们关注的热点之一^[7-8]。

大量研究显示, 围封、禁牧、施肥等草地管理措施对于恢复退化草地的结构和功能具有显著作用^[9-11], 前两种措施是我国退化草地生态系统恢复中常规的管理措施^[12]。在国外, 施肥是常规的草地管理措施^[13], 也有很多研究表明施肥能有效提高草地生产力和生态系统的固碳能力^[14], 因而在生产实践中被广泛应用。但在我国, 草地施肥尚未大面积推广应用, 关于其对草地生态系统影响的研究也较少, 近年来才开始在各类草地生态系统开展有关施肥试验^[15-18]。

温带草甸草原、典型草原和荒漠草原是我国内蒙古高原最主要的草原类型, 这三类草原生态系统的恢复对于维持我国天然草地的功能具有重要意义。近年来在内蒙古草原已经开展了施肥实验, 如潘庆民等^[15]研究氮素添加对典型羊草草原生物量的影响, 结果表明施氮肥显著增加羊草种群的地上、地下生物量。白春利等^[19]对荒漠草原的研究也发现, 氮素添加有助于提高群落地上生产力。尽管目前的研究结果大多显示, 施肥有助于提高植物植被生产力, 但也有研究发现, 在施肥初期草原植

被生产力会随着施肥梯度迅速增高, 增高到一定阈值后就不再增加^[17]。同时, 由于目前多数施肥试验尚处于短期阶段, 并且由于试验采取的方法不同以及不同草地系统在群落组成和结构上的差异等因素, 使得我们尚难得出一般性的规律。因此, 进一步了解施肥对不同草地系统草地群落结构和功能的影响, 对于未来我国退化草地生态系统的恢复和建立科学的草地管理措施十分关键。

我们在内蒙古 3 种草原区域选择代表性草地植物群落, 设计不同养分梯度、不同养分类型(N 和 P)的养分添加试验。本文对连续三年的草原群落生物量及其分配对养分添加的响应进行分析, 旨在揭示不同养分添加对于群落地上、地下生物量的影响, 以及不同的草地生态系统对养分添加的响应差异, 期待为未来的内蒙古退化草地的恢复和科学的草地管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

3 个实验区代表内蒙古自治区 3 个不同类型的草原生态系统(表 1), 分别为: 海拉尔试验样地(HLE), 位于中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 属于草甸草原, 实验区内优势种为羊草(*Leymus chinensis*)和贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*); 锡林郭勒实验样地(XLGL), 位于锡林浩特市内蒙古大学草地生态学实验基地, 属于典型草原, 实验区内优势种为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*); 荒漠草原实验区位于希拉穆仁草原(XLMR), 实验区内优势种为短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb)。实验区域代表了内蒙古温带半干旱气候, 从草甸草原经典型草原再到荒漠草

表 1 3 个实验区基本概况
Table 1 Environmental conditions in the different grassland locations

实验区	草原类型	地理坐标		年降水量/mm	年均温/°C	土壤类型	优势植物
		北纬	东经				
海拉尔(HLE)	草甸草原	49°21'	120°7'	300~400	-3~-1	暗栗钙土	贝加尔针茅、羊草
锡林郭勒(XLGL)	典型草原	44°10'	116°28'	250~300	1~2	栗钙土	克氏针茅、羊草
希拉穆仁(XLMR)	荒漠草原	41°18'	111°13'	200~300	2~4	淡栗钙土	短花针茅

原, 降水逐渐减少, 年均温逐渐升高。

1.2 实验设计

2011年5月, 我们在3个地区选择地势平坦、植被相对均匀和有代表性的地段, 建立养分添加试验。设计6个养分添加处理, 依次为: CK (对照组, 没有任何养分添加)、N (10 g/(m²·a))、N1 (2.5 g/(m²·a))、N2 (5 g/(m²·a))、P (10 g/(m²·a))、N+P (N和P各10 g/(m²·a)), 每个处理5个重复, 共30个实验单元, 每个实验单元的面积是6 m × 6 m, 实验区面积共1080 m²。氮肥选用尿素(CO(NH₂)₂), 磷肥选用重过磷酸钙(Ca(H₂SO₄)·H₂O)。

实验从2011年开始, 历时三年, 每年的施肥时间在5月1日、6月1日、7月1日和8月1日前后, 肥料溶于水后均匀地撒在地表。施肥时要根据天气情况, 在下雨前或阴天施肥, 避免对植物造成伤害。

1.3 生物量测定

在每年生长高峰期8月上旬(根据3个样地实际情况而定)测定草地群落的地上、地下生物量。草甸草原实验区和典型草原实验区用5个0.2 m × 0.5 m的小样方测定群落地上生物量, 由于荒漠草原植物生长较稀疏, 所以该实验区选择3个0.5 m

× 0.5 m的小样方测定群落地上生物量。将植物地上部分分别装入样袋中, 带回实验室, 在65°C烘箱中烘干直至恒重, 分别称量其干重。每个小样方内用直径为7 cm的根钻测定0~5, 5~10, 10~20, 20~40和40~100 cm的地下生物量(共5层, 不分种), 将获得的土样分别放入纱网袋中, 在水中洗去其中的土, 将剩余的根分别放入样袋中, 在65°C烘箱中烘干直至恒重, 分别称量其干重。

群落生物量计算方法如下。

地上生物量: 草甸草原区和典型草原区样方面积为0.1 m², 故AGB=群落干重×10; 荒漠草原区样方面积为0.25 m², 故AGB=群落干重×4。

地下生物量: BGB=干重/πr², r=3.5 cm。

根冠比(R/S)=BGB/AGB。

1.4 数据处理和统计分析

用Excel对所有数据进行初步整理与归纳, 用SPSS 11.5进行数据统计分析, 图表用绘图软件SigmaPlot 10.0绘制。

2 结果

2.1 不同施肥处理对群落地上生物量的影响

经过三年的施肥处理可以看出, 各种施肥处理对地上生物量都具有促进作用(图1, 表2), 在N+P

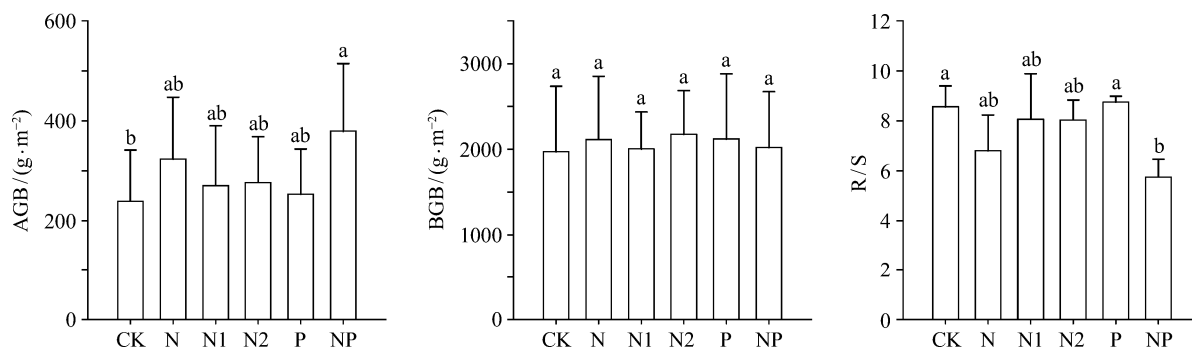


图 1 不同处理的地上、地下生物量及其比值

Fig. 1 Underground biomass, aboveground biomass and its ratio on different treatments

表 2 施肥对 3 种草地生态系统的地上、地下生物量的影响
Table 2 Aboveground and underground biomass on different nutrient additions

g/m²

地区	年份	CK		N		N1		N2		P		N+P	
		AGB	BGB	AGB	BGB	AGB	BGB	AGB	BGB	AGB	BGB	AGB	BGB
HLE	2011	315.0	1742.7	393.5	1785.0	360.0	1502.3	260.4	1598.5	264.6	1613.0	312.2	1390.8
	2012	303.4	2852.1	438.1	3156.5	388.1	2720.5	362.2	3049.1	286.5	2759.2	437.2	2904.2
	2013	414.6	3866.6	544.9	3231.1	458.6	3175.0	488.5	3311.2	436.8	4236.2	763.7	3292.2
	平均	344.3	2820.5	458.8	2724.2	402.2	2465.9	370.4	2652.9	329.3	2869.5	504.4	2529.1
XLGL	2011	124.0	907.7	127.7	1179.4	109.0	977.5	152.1	1126.5	142.0	1238.9	140.6	1198.9
	2012	343.8	1470.4	420.5	1809.0	354.4	1868.8	366.7	1787.0	433.5	1733.7	583.5	1782.2
	2013	229.7	2894.3	337.4	3990.5	257.9	2960.7	297.0	3794.6	244.4	3449.2	468.6	3757.0
	平均	232.5	1757.5	295.2	2326.3	240.4	1935.7	271.9	2236.0	273.3	2140.6	397.6	2246.0
XLMR	2011	135.1	1007.3	159.6	914.4	126.0	1203.9	157.0	1293.1	151.7	1363.8	163.5	980.0
	2012	160.4	1682.5	267.5	1379.7	196.7	2022.3	213.9	2176.6	152.5	1683.8	299.4	1403.2
	2013	124.9	1325.6	217.4	1580.7	179.5	1594.4	192.1	1429.9	153.3	999.5	244.4	1465.0
	平均	140.1	1338.5	214.8	1291.6	167.4	1606.9	187.7	1633.2	152.5	1349.0	235.8	1282.7

处理下群落地上生物量增加最显著($p < 0.05$), 三年平均增加 61.9%。草甸草原、典型草原和荒漠草原三年平均分别增加 46.5%, 71%和 68.2%。其次是 N 添加使得生物量平均增加 37.8%, 3 个站点分别增加 33.3%, 27%和 53.3% (表 2), N1, N2 和 P 添加在一定程度上也使得群落地上生物量分别增加了 13.2%, 19.5%和 7.3%, 但均未达到显著水平($p > 0.05$)。并且, 氮浓度越高, 地上生物量增加越大(图 1), 而施用磷肥对 3 种草地群落的地上生物量增加最低。

尽管施肥对内蒙古草地群落的地上生物量在总体上表现为促进作用, 并且不同气候条件下的实验样地对施用 N+P 均表现出最高的响应, 但对施肥的响应仍存在一定差异(图 2, 表 2)。例如, 草甸草原施 N+P 后地上生物量的增加最多, 施 P 则会轻微降低草甸草原的地上生物量; 荒漠草原对施氮肥(N, N1, N2)的响应明显高于其他两个草地群落; 典型草原对施 P 和 N+P 表现出更高的响应, 对施 N 的响应最小。

另外, 内蒙古温带草原群落的地上生物量对不同处理的响应还存在一定的年际间差异(图 2)。总体上, 各种施肥效应都随着施肥时间延长而增加, 在 2013 年达到最大施肥效应, 例如, 2013 年施 N+P 和 N 导致生物量分别增加 94.6%和 50.8%, 而 2011 年试验初期生物量增加仅为 11.2%和 15.3%。就不同草地系统而言, 对施 N+P 表现出一致的随

时间变化的增加效应; 对 N 和 P 单独施用的时间响应则在不同的草地类型之间表现出不一致的年际间变化。

2.2 施肥对群落地下生物量的影响

相较于施肥对地上生物量的显著影响, 草地群落的地下生物量对施肥的响应相对较小, 并且与地上生物量的响应不一致。总体上, 施肥都促进了地下生物量, 其中 N2 施用后生物量增加最大, 为 14.4%, 其余各施肥处理条件下(图 1), 内蒙古草原平均地下生物量的增加幅度均小于 10%。

不同草地类型间群落地下生物量对施肥的响应存在较大差异。相对于对照 CK, 在草甸草原群落(图 2), 除 P 处理轻微增加群落地下生物量外, 其余各个处理均使之下降; 在典型草原群落, 各个处理均使群落地下生物量增加; 在荒漠草原群落, 除 P 处理外, 其余各处理均使群落地下生物量增加。

另外, 不同施肥处理下, 草地的地下生物量变化也存在较大的年际间差异, 并没有像地上生物量一样表现出随着施肥时间延长施肥效应增加的趋势, 不同的施肥处理表现出不一致的格局。在 3 种草地系统间对各种施肥处理也没有表现出一致的时间效应。

2.3 施肥对根冠比的影响

从结果可以看出, 施肥影响温带草原的生物量分配, 除 P 以外, 其他处理均降低了 R/S, 尤其是 N+P 处理下群落的 R/S 为 5.3, 显著低于对照组

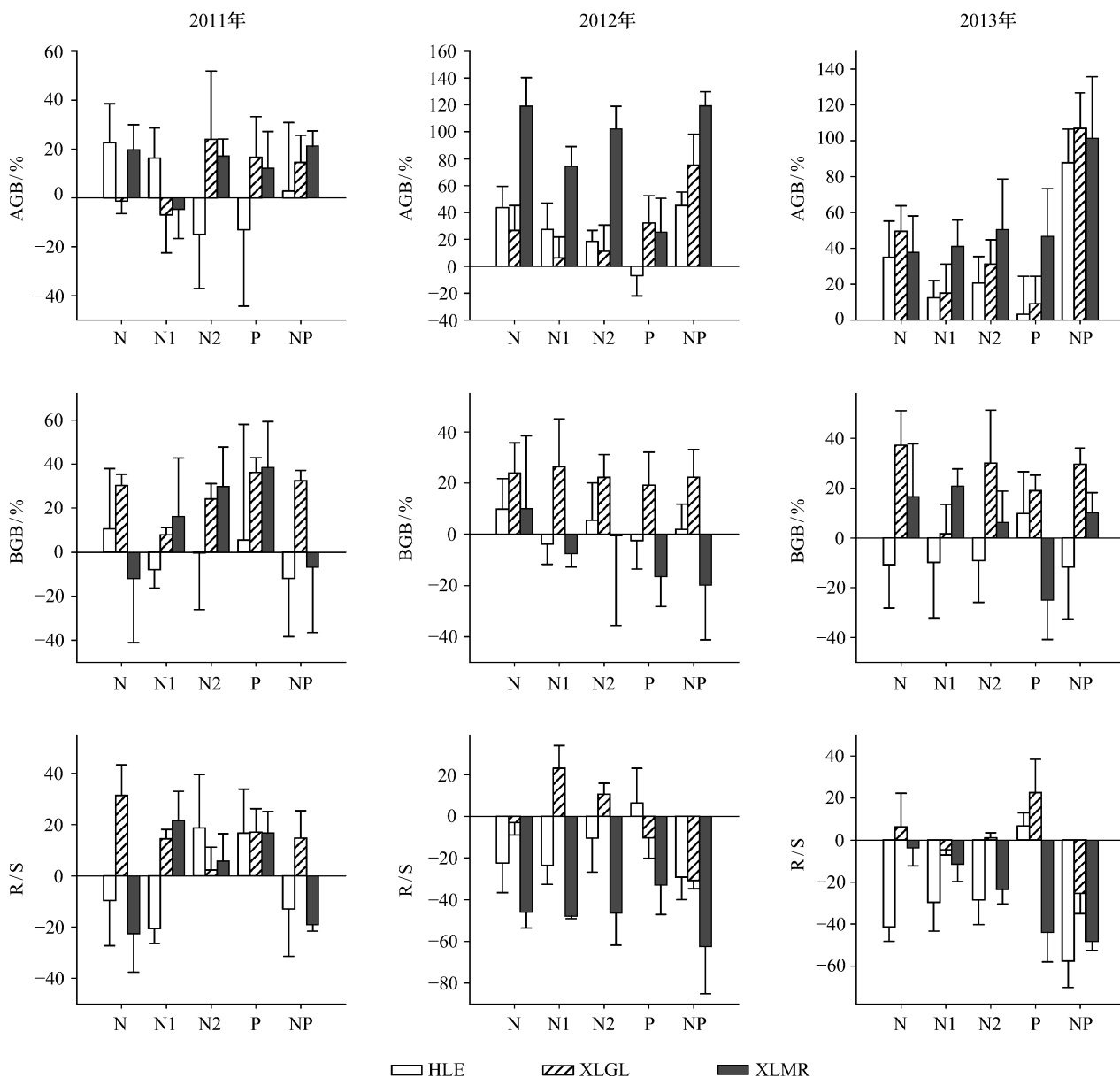


图 2 2011—2013 年不同处理的相对地上、地下生物量及其相对根冠比

Fig. 2 Relative underground biomass, relative aboveground biomass and its relative ratio on different treatments during 2011–2013

(8.3), 其他施肥处理下生物量的分配则没有显著变化(图 1)。

同样地, 不同草地类型间根冠比对施肥的响应也存在较大差异(图 2)。在草甸草原群落(HLE), N, N1, N2 和 N+P 处理均使 R/S 表现为整体下降的趋势; 而 P 处理增加了 R/S。在典型草原群落(XLGL), 只有 N+P 处理导致 R/S 降低, 其余则增加了 R/S。在荒漠草原群落(XLMR), 除 N1 外, 其余处理的 R/S 均下降。

不同处理下、不同草地类型的根冠比变化量也存在年际间差异(图 2)。总体而言, N 和 N+P 处理下 R/S 在三年均表现出下降的趋势, 并且施肥时间越长, R/S 减少幅度越大。而 N1, N2 和 P 处理没有一致的变化。在草甸草原和荒漠草原, 除 P 处理以外, R/S 大多在各年份降低; 而在典型草原, 多数情况下表现出施肥增加了 R/S。

2.4 施肥对地下生物量分布的影响

在温带草原, 地下根系集中分布在表层 20

cm。在本研究中,草甸草原、典型草原和荒漠草原对照小区表层 0~20 cm 的地下生物量平均分别占总地下生物量的 63.4%, 70.8% 和 78.4%。在草甸草原区和典型草原区,各个处理下 0~20 cm 地下生物量相对对照组平均减少 1.76% 和 2.44%,但未达到显著水平 ($p>0.05$); 在荒漠草原区,除 N2 处理使 0~20 cm 地下生物量小幅增加外,其余各个处理下的根系生物量比例均有所下降,但也未达到显著水平 ($p>0.05$)。这意味着各种施肥处理对于内蒙古温带草原植物根系的垂直分布格局并没有产生显著影响。

地下生物量的分布在不同年份间也存在较明显差异,如草甸草原 2013 年对照组和各施肥处理下表层 0~5 cm 地下生物量所占比例较 2011 年平均降低约 15%, 下层 40~100 cm 的根系比例相比 2011 年增加了 15%~18%; 而在荒漠草原出现相反变化,2013 年各实验单元的表层 0~5 cm 根系比例增加 5%~25%(图 3)。尽管不同年份间可能由于气候条件的变异导致根系的分布不同,但显然,在各年份,不同施肥处理下根系的垂直分布与对照组几乎没有明显差异。

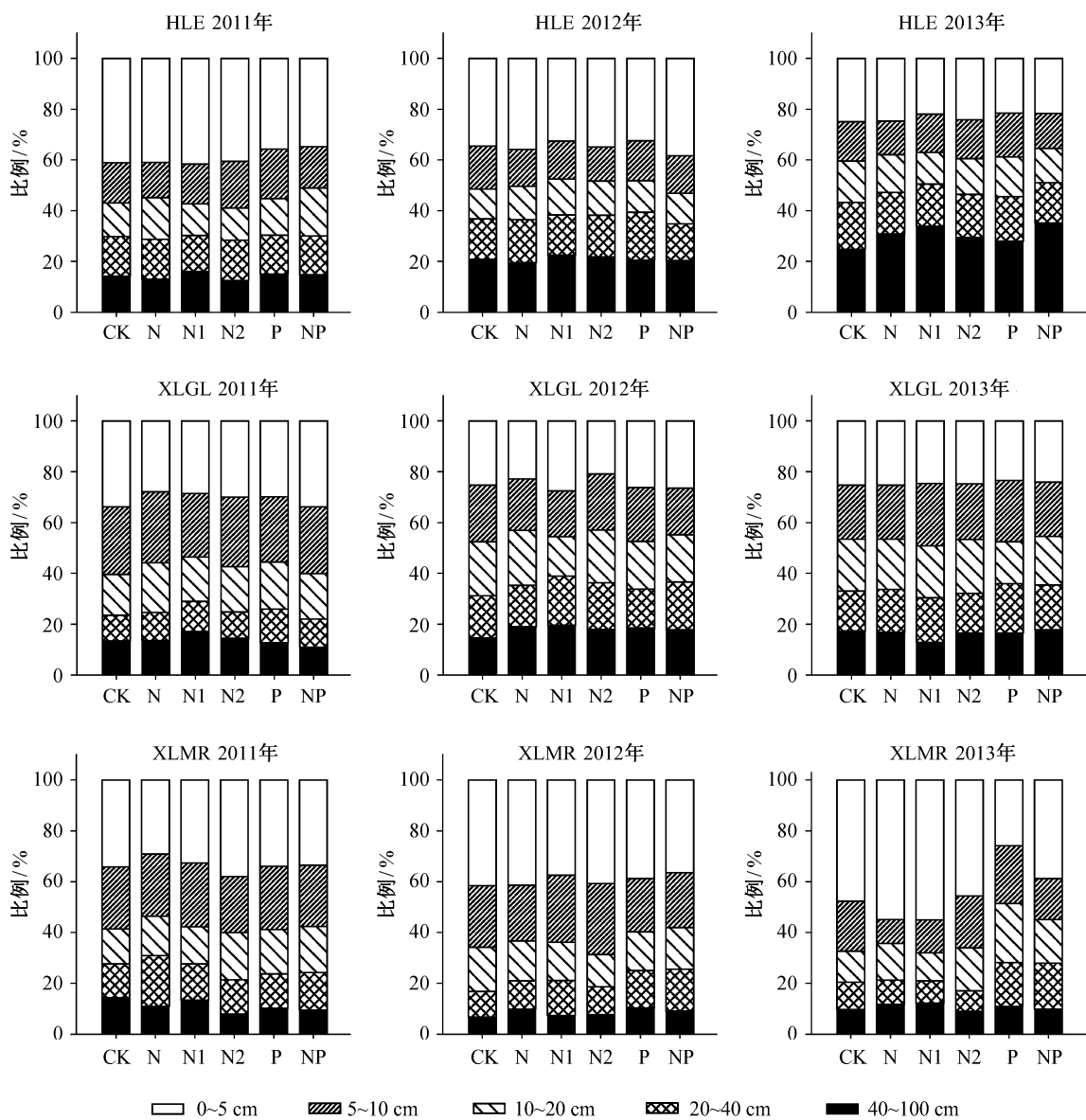


图 3 不同处理下三年地下生物量分配

Fig. 3 Distribution of underground biomass in three years on different treatment

3 讨论

3.1 N 对不同气候带的草地生物量的影响

尽管自然界氮沉降显著增加,但 N 限制在自然界中普遍存在^[20]。很多研究已证实, N 会限制净初级生产力^[21],对 N 限制的生态系统添加 N 会提高生态系统生产力。本研究对内蒙古温带草地生态系统不同气候带的施肥实验结果也表明,经过三年施肥处理,尽管施 N 肥对草地地上生物量的影响存在较大的年间差异, N 添加后草地群落生物量都表现出一定程度的增加,并且施 N 浓度越高,生物量增加越多,高浓度的 N 添加使内蒙古草原的群落总生物量增加 10.2%,说明 3 种草地类型都受 N 限制。本文结果支持前人的结果^[22-23],这意味着内蒙古温带草地的植被生长受到明显的 N 限制,在一定程度上施用 N 肥有助于提高草地生产力。

温度、水分、土壤等环境因子会直接或间接地影响草地生态系统的生产力^[24],生物量是多种环境因子共同作用的结果^[25]。就草地生态系统而言,水热条件成为影响植物生长的主要因素^[26],尤其降水是影响草原生态系统生产力的主要限制因子^[27-29]。Lee 等^[2]认为,草地对 N 添加呈现的不同响应与降水有显著关系,水分越充足,对施肥的响应越大,较湿润草地的地上生物量增加更多。我们的研究并没有支持前人的研究结果。本研究中,尽管整体上 N 添加对不同气候带的 3 种草地群落的生物量都有一定程度的促进作用,但显然荒漠草原对 N 添加的响应更明显,从草甸草原、典型草原到荒漠草原,群落地上生物量的增加量逐渐增大。这意味着更干旱的荒漠草原更多的受 N 限制,随着降水增加, N 限制减弱。可能由于水分条件较好的草地生态系统土壤本身的有效氮含量一般比干旱的生态系统更高^[30],因此对 N 添加的响应不如更缺 N 的生态系统明显。另一方面,尽管水分是影响添加 N 的可用性的重要因素,前人研究也表明,在干旱的草地群落,生物量对 N 添加的响应受水分的影响^[2]。本实验的 N 添加大多是在下雨前或阴天施肥,并且将养分溶于一定量的水中施入土壤,因此,在一定程度上可能提高了土壤 N 的可用性,使荒漠草原并没有明显受水分条件的限制,因而对 N 添加的响应更强。

类似的,不同草地的地下生物量对 N 添加的响应也存在较大差异,没有与地上生物量一致的规律。但相比于地上生物量,温带草地群落的地下生

物量增加幅度较小。这一结果具有重要意义,因为草地生物量相当大的比例位于地下根系^[31],所以总生物量的增加主要来自地下根系。对于草原碳固定而言,地下生产力比地上生产力更为重要^[32]。因此,考虑到地下生物量,施氮肥对草地生态系统生物量的增加作用可能比预期的要小。

3.2 P 及 N+P 对草地生物量及其分配的影响

在自然生态系统中, P 限制不如 N 限制普遍,但仍有一些陆地生态系统存在 P 限制^[33]。本研究发现, P 对草地生物量的增加作用并不显著,生态系统对 P 添加的响应明显弱于对 N 添加的响应,且这种响应在不同时间、不同草地之间的差异很大,并没有一致的规律。草甸草原区的地上、地下生物量对 P 分别表现出负、正效应,而典型草原区和荒漠草原区对 P 的响应一致,都是正效应。这可能是由于荒漠草原和典型草原土壤养分缺乏, P 也是限制因子之一,而草甸草原区和典型草原区不存在明显的 P 限制。

P 对生态系统的限制作用往往不是单独的,而是与 N 耦合在一起^[34],因此本文引用相对耦合指数(RCI)来讨论 N+P 的耦合作用。RCI 指数计算公式如下:

$$RCI_N = (B_N - B_{CK}) / (B_{NP} - B_{CK}),$$

其中, B_{CK} 为对照组 CK 的生物量, B_N 为 N 处理下的生物量, B_{NP} 为 N+P 处理下的生物量。当 RCI_N 在 0~0.5 之间时,说明 N+P 处理的作用比 N 处理显著;当 RCI_N 在 0.5~1 之间时,生态系统主要受 N 限制,其次为 P 限制,且 P 限制作用很小;当 $RCI_N > 1$ 时,表明相对于单独的 N 处理, N+P 处理会起到抑制作用。计算 RCI_P 可用同样的公式。3 种草地类型及不同的生物量参数得到结果并不一致(表 3)。草甸草原群落和荒漠草原群落的地上生物量主要受 N 限制,而典型草原群落 N+P 处理的作用要比 N 处理显著; N 处理对典型草原群落和荒漠草原群落的总生物量的影响比 P 处理要显著。实验结果呈现的 N 处理作用较 P 处理作用显著,意味着内蒙古温带草地更主要受 N 限制,而不受 P 的明显限制。另外,也可能是由于 P 比较容易被土壤固定^[35],比 N 的移动性小得多,根系只有在有 P 存在的土壤中才能吸收到,故磷肥的利用效率比氮肥低。但氮、磷肥混合施用,由于二者的相互作用^[36],可同时促进土壤中脲酶及磷酸酶的活性^[37],

表 3 地上、地下生物量及总生物量的相对耦合指数
Table 3 Relative colimitation index of aboveground biomass, underground biomass and total biomass

地区	相对耦合指数	AGB	BGB	AGB+BGB
HLE	RCI _N	0.72	0.33	-0.14
	RCI _P	-0.09	-0.17	-0.26
XLGL	RCI _N	0.38	1.16	0.97
	RCI _P	0.27	0.78	0.65
XLMR	RCI _N	0.78	0.84	0.70
	RCI _P	0.13	-0.19	0.58

进而促进土壤中有机态氮与有机态磷分解, 增加土壤中可被植物直接利用的无机态氮磷及易溶性物质, 从而促进植物生长。

3.3 养分添加对根冠比及根系垂直分布的影响

很多实验表明, 施 N 会降低植物的根冠比, 而施 P 对根冠比无显著影响^[38-41]。本研究中, 经过三年实验处理, 施 N 处理均使群落的根冠比下降, 施 P 处理则使之略微增加, 与前人的研究一致。施 N 导致根冠比下降, 主要是因为植物生长明显受 N 限制。在不施肥时更多的能量分配给地下部分以从土壤中吸收更多的 N。在施 N 后, 生态系统的 N 限制大大降低, 甚至消失, 所以更多的能量会分配到地上部分以进行光合作用, 因此群落的根冠比就随之下降^[42-43]。

以往的研究证明, 施肥不仅影响植物的地上、地下生物量分配, 还可能影响植物根系内部的分配, 即根系的分布^[44-46]。例如, N 添加会促使植物根系侧根生长, 导致土层中的根系分布变浅^[45-46]; 但也有研究表明, 养分添加对草地地下生物量垂直分布的影响并不显著^[47]。本研究中, 尽管施肥显著改变草地地上、地下生物量的分配格局, 但并没有明显改变 3 个草地群落地下生物量的垂直分布格局。这可能说明, 尽管土壤中养分供应增加, 但植物根系吸收的养分并没有先用于根系的生长, 尤其是表层根系生长并没有明显增加, 而是更多的用于植物地上部分的生长, 植物根系的生长主要依靠植物叶片产生的同化物质运移地下部分。因此, 尽管随着地上部分积累的干物质增加, 运移到地下植物根系的碳水化合物也相应增加, 但对其在各层的相对分布

影响较小。植物根系的垂直分布可能更主要地取决于其他环境条件, 特别是对水分的吸收^[48], 正如本研究观察的结果, 对照组和各施肥处理下根系的分布都有明显的年际间差异。

4 结论

三年的施肥实验结果揭示, 内蒙古温带草地生态系统主要受 N 限制, 不同浓度的 N 添加都在不同程度上提高了草地生态系统生产力, N+P 添加具有最明显的促进作用, 而受 P 的限制相对较小。不同草地生态系统对施肥的效应存在时间和空间差异, 在更干旱的荒漠草原, N 添加对生物量的提高更明显, 而对于相对较湿润的草甸草原, 养分添加的作用相对减弱。另外, 地上生物量对施肥的响应强度大于地下生物量, 意味着在估计施肥对草地生态系统植被生产力时, 如果不考虑地下部分, 可能高估整个生态系统对养分添加的响应。

致谢 感谢北京大学贺金生教授、王永慧博士对本实验工作的指导。感谢中国农业科学院呼伦贝尔草甸草原国家野外生态试验站工作人员对草甸草原实验站工作的指导和帮助。感谢内蒙古大学研究生李强、张立欣、杨波、赵康、万志强、苏立德等同学对野外工作的帮助。

参考文献

- [1] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001(1): 47-53
- [2] Lee M, Manning P, Rist J, et al. A global comparison of grassland biomass responses to CO₂ and nitrogen enrichment. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2010, 365: 2047-2056
- [3] 王玉辉, 周广胜. 内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应. 生态学报, 2004, 24(6): 1140-1145
- [4] 白永飞, 许志信, 李德新. 羊草草原群落生物量季节动态研究. 中国草地, 1994, 16(3): 1-5
- [5] 杨汝荣. 我国西部草地退化原因及可持续发展分析. 草业科学, 2002, 19(1): 23-27
- [6] 王庆锁, 李梦先, 李春和. 我国草地退化及治理对策. 中国农业气象, 2004, 25(3): 41-44

- [7] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997, 30(6): 2-10
- [8] 刘钟龄, 王炜, 郝敦元, 等. 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1): 84-91
- [9] 闫玉春, 唐海萍, 张新时. 草地退化程度诊断系列问题探讨及研究展望. 中国草地学报, 2007, 29(3): 90-97
- [10] 吴德东, 刘淑玲, 李玉航, 等. 围封对沙地草地的影响. 中国草地, 1997, 19(6): 37-41
- [11] 张铜会, 赵哈林, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地灌溉与施肥对退化草地生产力的影响. 草业学报, 2008, 17(1): 36-42
- [12] 张英俊, 杨高文, 刘楠, 等. 草原碳汇管理对策. 草业学报, 2013, 22(2): 290-299
- [13] Conant R T, Paustian K, Elliott E T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecological Applications*. 2001, 11(2): 343-355
- [14] Wang S, Wilkes A, Zhang Z, et al. Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grasslands: a synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3): 329-340
- [15] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响. 植物生态学报, 2005, 29(2): 311-317
- [16] 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. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844
- [17] 邱波, 罗燕江. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响. 兰州大学学报, 2004, 40(3): 56-59
- [18] 郭永盛, 李鲁华, 危常州, 等. 施氮肥对新疆荒漠草原生物量和土壤酶活性的影响. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 249-256
- [19] 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
- [20] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379
- [21] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115
- [22] 何丹, 李向林, 何峰, 等. 施氮对退化天然草地主要物种地上生物量和重要值的影响. 中国草地学报, 2009, 31(5): 42-46
- [23] Li J, Lin S, Taube F, et al. Above and belowground net primary productivity of grassland influenced by supplemental water and nitrogen in Inner Mongolia. *Plant and Soil*, 2011, 340: 253-264
- [24] Coupland R T. *Grassland ecosystems of the world: analysis of grasslands and their uses*. London: Cambridge University Press, 1979
- [25] 郑晓翾, 赵家明, 张玉刚, 等. 呼伦贝尔草原生物量变化及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2007, 26(4): 533-538
- [26] 白永飞. 降水量季节分配对克氏针茅草原群落初级生产力的影响. 植物生态学报. 1999, 23(2): 60-65
- [27] Ni J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecology*, 2004, 174(2): 217-234
- [28] Fang J, Piao S, Zhou L, et al. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 365-370
- [29] Bai Y, Wu J, Pan Q, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: evidence from the Eurasian Steppe. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(5): 1023-1034
- [30] 李香真, 曲秋皓. 蒙古高原草原土壤微生物量碳氮特征. 土壤学报, 2002, 39(1): 91-98
- [31] Fan J, Zhong H, Harris W, et al. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above-and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86: 375-396
- [32] McCulley R L, Burke I C, Nelson J A, et al. Regional patterns in carbon cycling across the Great Plains of North America. *Ecosystems*, 2005, 8(1): 106-121
- [33] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 2007, 10(12): 1135-1142
- [34] Craine J M, Jackson R D. Plant nitrogen and phos-

- phorus limitation in 98 North American grassland soils. *Plant and Soil*, 2010, 334: 73–84
- [35] 车敦仁. 青海高寒牧区禾草施磷施氮的增产效应. *草业科学*, 1990, 7(5): 15–20
- [36] 姚骅, 陆建华, 蔡立群, 等. 玛曲退化草地主要植被特征对不同施肥处理的响应. *甘肃农业大学学报*, 2009, 44(1): 127–131
- [37] 裴海昆. 不同施肥量对天然草地土壤酶活性的影响. *青海畜牧兽医杂志*, 2001, 31(2): 15–16
- [38] 杨鹏鸣, 周修任. 不同施肥水平对南瓜根冠比和壮苗指标的影响. *西南农业学报*, 2010, 23(1): 115–118
- [39] 孟凡枝, 杨鹏鸣. 不同施肥水平对三色堇根冠比和壮苗指数的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(6): 216–218
- [40] 王忠强, 吴良欢, 刘婷婷, 等. 供氮水平对爬山虎 (*Parthenocissus tricuspidata* Planch) 生物量及养分分配的影响. *生态学报*, 2007, 27(8): 3435–3441
- [41] 傅声雷, Ferris H. 植物种类、大气二氧化碳和土壤氮素的交互作用或累加效应控制“植物–土壤”系统的碳分配. *中国科学: C 辑*, 2006, 36(3): 273–282
- [42] Tilman D. *Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988
- [43] Rajaniemi T K. Why does fertilization reduce plant species diversity? Testing three competition-based hypotheses. *Journal of Ecology*, 2002, 90(2): 316–324
- [44] Zerihun A, Montagu K D. Belowground to above-ground biomass ratio and vertical root distribution responses of mature *Pinus radiata* stands to phosphorus fertilization at planting. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(9): 1883–1894
- [45] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. *Science*, 1989, 244: 776–783
- [46] Persson H, Ahlström K, Clemensson-Lindell A. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön — effects on fine-root growth and fine-root chemistry. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1): 199–205
- [47] 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): 74–76
- [48] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389–411