

施肥对羊草割草地植物群落和土壤 C : N : P 生态化学计量学特征的影响

白玉婷¹, 卫智军^{1*}, 代景忠¹, 闫瑞瑞², 刘文亭¹, 王天乐¹

1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 10008;

3. 内蒙古农业大学理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018

摘要:以呼伦贝尔羊草 (*Leymus chinensis*) 草甸天然割草场为研究对象, 通过设置不同种类肥料和不同施肥量处理, 探讨植物群落生产力、植物群落和土壤 C : N : P 生态化学计量学特征, 试图筛选出适合该地区草地生长的施肥种类与施肥量的最优组合。结果表明: 随着施肥水平的增加, 2014 年群落地上生物量呈上升趋势, H3 (尿素 10.5 g·m⁻²+过磷酸钙 5.1 g·m⁻²) 的生物量最高 (505.8 g·m⁻²); 2015 年群落地上生物量先增加后减少, 施肥水平 H2 (尿素 7.0 g·m⁻²+过磷酸钙 3.4 g·m⁻²) 生物量最高 (264 g·m⁻²)。2014 年和 2015 年不同施肥处理下植物群落 C、N 和 P 含量差异不显著。2014 年不同处理间植物群落 C : N 差异显著, H3 施肥水平的 C : N (29.28) 显著高于其他水平 ($P<0.05$), 而 2015 年 C : N 随着施肥水平的增加而增加; 与 C : N 变化趋势完全相反, 2014 年、2015 年群落的 C : P 和 N : P 均随施肥水平增加而减少。2014 年与 2015 年不同处理下土壤全 C、全 N 和全 P 中, 除 2014 年 0~10 cm 土层 H2 和 H3 的全 N、H1 的全 P 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 其他指标在不同处理间差异均不显著。2014 年 3 层土壤的 C : N、C : P 和 N : P 受施肥量的影响相对较小, 变化范围分别为 18.31~19.42、64.06~102.51、3.38~5.19。2015 年 3 层土壤的 C : N、C : P 和 N : P 变化范围为 11.33~12.51、25.59~53.49、2.17~4.41。对比 2 年比值的变化, 2015 年 C : P 和 N : P 较 2014 分别下降了 47.8%~59.7%和 15.0%~35.8%。研究结果表明: 从植物群落和土壤的化学计量比角度来看, N 可能是本地区限制植物生长的一个主要因素, P 处于相对平衡的状态, 在未来的 N、P 混施管理中, 需降低或不添加磷肥, 适量添加 N 素, 才能使群落呈现适中的化学计量比。**关键词:** 割草场; 施肥; 生物量; 植物 C : N : P 计量比; 土壤 C : N : P 计量比

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.04.011

中图分类号: S812.29; X173

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2017) 04-0620-08

引用格式: 白玉婷, 卫智军, 代景忠, 闫瑞瑞, 刘文亭, 王天乐. 2017. 施肥对羊草割草地植物群落和土壤 C : N : P 生态化学计量学特征的影响[J]. 生态环境学报, 26(4): 620-627.

BAI Yuting, WEI Zhijun, DAI Jingzhong, YAN Ruirui, LIU Wenting, WANG Tianle. 2017. Responses of plant and soil C : N : P stoichiometry to fertilization in *Leymus chinensis* mowing meadow [J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(4): 620-627.

生态化学计量学是研究生态系统能量和多重化学元素平衡的科学, 是近年来新兴的一个生态学研究领域, 为研究植物-土壤相互作用与 C、N、P 循环提供了一种新的综合方法 (Stern et al., 2002; 王振兴, 2011)。植物通过储存超过自身需要的养分以适应其生长环境变化, 这个过程将导致植物组织化学计量比值发生变化。植物群落的临界比值可以作为植物群落生产力受到哪种元素的限制的判断依据, 因此植物 C : N : P 生态化学计量特征研究为探索植物的养分利用状况提供了一种重要的手段 (曾德慧等, 2005)。由于植物-土壤系统 C、N、P 循环是在植物和土壤之间相互转换的, 故将植物和土壤作为一个系统, 探讨系

统组分间 C : N : P 的相互作用及养分限制类型具有重要意义。

针对植物和土壤 C : N : P 化学计量学特征及其在各组分之间的差异和相关性, 目前较丰富的研究报道 (Niklas et al., 2005; Niklas, 2006)。国外从群落水平研究 C : N : P 化学计量临界值存在很大争议, 大部分学者认为 N : P < 10 受 N 限制, N : P > 20 受 P 限制, 也有部分观点认为 N : P < 21 与 N : P > 23 分别受 N、P 限制 (Koerselman et al., 1996; Gusewell, 2004; Zhang et al., 2004; Ladanai et al., 2010)。通过对中国草原植被 C : N 和 N : P 化学计量比及其影响因子进行了分析, 指出中国草原植物缺 N, 导致其 N : P 比值低于全球水平 (He et al.,

基金项目: 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (2013060); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500603)

作者简介: 白玉婷 (1990 年生), 女, 博士研究生, 主要从事草地资源与生态管理研究。E-mail: nmngndbyt@163.com

***通信作者:** E-mail: nmndwzj@163.com

收稿日期: 2017-03-04

2006)。内蒙古草原的植物群落 N : P 比值是相对稳定的, 可以作为判断生境中 N 或 P 不足的指标, 认为内蒙古草原草本植物的 N : P < 21 时, 受 N 限制; 当 N : P > 23 时, 则受 P 限制 (Zhang et al., 2003; 王绍强等, 2008; 银晓瑞等, 2010)。目前国内有关这方面的研究主要集中在不同尺度和区域植物化学计量学特征的研究上, 而有关植物群落和土壤相结合的化学计量特征及其在外界因素扰动下的变化却鲜有研究。

草地生态系统的生产力、物种组成、生物多样性和种群动态受养分供应量的影响, 养分供应量是否充足影响有机体生长、种群结构、物种相互作用和生态系统稳定性。由于养分需求、养分获取策略及首选养分类型不同, 植物群落和土壤对施肥的响应不同。施肥可以快速、有效地消除或缓解草地土壤营养匮乏的限制, 显著地提高草地生态系统的地上生物量 (Craw, 1997; 周兴民, 2001; 戎郁萍等, 2002; 李志坚等, 2003; 李本银等, 2004; 潘庆民等, 2005)。同时, 施肥以补充土壤中限制性元素含量的形式影响土壤和植物的化学计量学特征, 并且有助于确定植被的最适化学计量比值和判定其限制元素类型 (黄菊莹等, 2013; 宾振钧等, 2014)。

以呼伦贝尔羊草 (*Leymus chinensis*) 草甸天然割草场为研究对象, 通过设置不同种类肥料和不同浓度施肥量处理, 探讨植物群落生产力、植物群落和土壤 C : N : P 生态化学计量学特征, 试图筛选出适合该地区草地生长的施肥种类与施肥量的最优组合, 以期为天然草原的管理利用、保护和恢复提供一些新的资料。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

试验地位于中国农业科学研究院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站附近, 北纬 49°23'13"、东经 120°02'47", 海拔 627~635 m。该地区属于中温带半干旱大陆性气候, 年均气温 -2.4 °C, 极端最高、最低气温分别为 36.17 °C 和 -48.5 °C, 年积温 1580~1800 °C, 无霜期 110 d; 年平均降水量 350 mm, 多集中在 7—9 月且变率较大。2014 年和 2015 年的年降雨量分别为 405 mm 和 230 mm。试验地为长期割草利用的羊草草甸草原固定草场 (利用时间 > 20 年), 刈割频率为每年 1 次, 刈割时间为每年 8 月末。土壤为暗栗钙土, 地带性植被为草甸草原羊草群落, 主要优势种为羊草, 亚优势种有山野豌豆 (*Vicia amoena*)、展枝唐松草 (*Thalictrum squarrosom*)、细叶白头翁 (*Pulsatilla turczaninowii*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*),

常见种有寸草苔 (*Carex duriuscula*)、双齿葱 (*Allium bidentatum*)、裂叶蒿 (*Artemisia tanacetifolia*) 等。

1.2 试验设计

样地选取长期割草利用的羊草草甸草原固定草场, 于 2014 年 5 月初建立试验区。为减少土壤肥力等非处理因素的影响, 采取单因素随机区组设计, 5 种处理, 3 个区组, 共计 15 个小区。每个小区面积为 6 m×10 m, 中间设置 2 m 的缓冲带。随后用 9QP-830 型草地破土切根机进行切根处理, 切根深度为 15 cm, 切根长宽度为 30 cm×30 cm, 呈网格状。根据 2013 年土壤养分本底调查结果 (0~30 cm 土壤全 N 含量为 2.86 g·kg⁻¹、全 P 为 0.49 g·kg⁻¹、全 C 为 31.67 g·kg⁻¹), 选取 CK (切根) 和切根基础上的 4 个施肥浓度的小区试验结果进行分析, 分别为: H0 (N 0 g·m⁻²+P 0 g·m⁻²)、H1 (N 3.5 g·m⁻²+P 1.7 g·m⁻²)、H2 (N 7.0 g·m⁻²+P 3.4 g·m⁻²) 和 H3 (N 10.5 g·m⁻²+P 5.1 g·m⁻²), 共计 5 个处理, 15 个小区。于 2014 年和 2015 年 6 月初进行施肥, 施肥方式为氮磷加水混匀后人工喷施。N 选择有机态尿素 (CON₂H₄, 总氮含量 ≥ 46.4%), P 选择有机态过磷酸钙 (P₂O₅ 含量 ≥ 16%)。

1.3 取样方法及样品测定方法

分别于 2014 年 8 月中旬和 2015 年 8 月中旬进行样品采集。在每个小区内设定 3 个 1 m×1 m 的随机样方, 齐地面刈割, 带回实验室后在 65 °C 的烘箱内烘 48 h 备用; 将烘干后的植物样品用剪刀绞碎后充分混合, 采用“四分法”抽取足量混合样品用“植物样品粉碎机”研磨, 最后通过相应的方法测定其主要养分含量。主要测定指标为: 群落地上生物量 (CAB)、群落全碳 (CTC)、群落全氮 (CTN)、群落全磷 (CTP)。

在刈割后的样方内采集土壤样品, 每个样方设置 3 个随机取样点, 用直径为 7 cm 的土钻分 3 层 (0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm) 采集地下土壤, 将 3 点同层的土壤混匀后带回实验室风干备用。然后将 3 点土壤混匀后用“四分法”取足量土带回实验室风干, 先过 2 mm 土壤筛, 去除石子、叶片残枝等杂物, 然后用研钵研磨土壤后分别过 1 mm 和 0.149 mm 的土壤筛, 最后测定土壤的养分含量。主要测定指标分别为: 全碳 (STC)、全氮 (STN)、全磷 (STP)。

1.4 数据处理

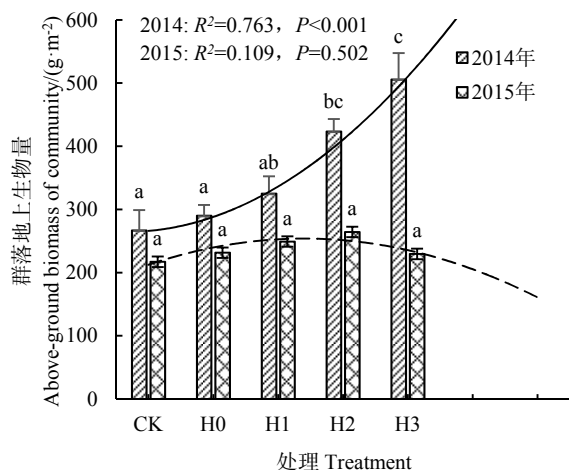
采用统计软件 (SPSS 21) 对相关指标进行单因素方差分析, 以施肥量作固定因子, 分别以群落生物量、植物群落和土壤 C、N、P 含量及其化学计量比作因变量, 采用 Duncan 法进行多重比较, 同时对相关指标进行直线和曲线回归分析, 用 *F*

值检验其显著性,采用 Office Excel 2013 进行作表和绘图。

2 结果与分析

2.1 植物群落生物量对施肥的响应

2014 年和 2015 年植物群落生物量 (CAB) 对不同施肥水平的响应不同。2014 年 CAB 的变化趋势明显 (图 1), 随着施肥水平的提高 CAB 逐渐增加 (CK<H0<H1<H2<H3), 最高施肥量 H3 的生物量 ($505.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 极显著高于 CK ($P<0.001$)。2015 年不同处理间的 CAB 在 $217\sim 264 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, H2 生物量最高。随着施肥水平的增大, CAB 有先增后减的趋势。2015 年各施肥处理 CAB 均低于 2014 年 ($P>0.05$), 最多下降了 220%。



平均值±标准误差; 不同大写字母表示同一年份不同施肥水平之间的显著性差异 ($P<0.01$), 不同小写字母表示同一年份不同施肥水平之间的显著性差异 ($P<0.05$); $n=3$ 。以下同

M±SE; Different capital letters represent significant difference in different fertilization level ($P<0.05$) and different lowercase letters represent significant difference ($P<0.05$); $n=3$. The same as follow

图1 群落地上生物量的变化

Fig. 1 The variation tendency of community above-ground biomass

2.2 植物群落 C、N、P 含量变化及其计量比对施肥的响应

2014 年和 2015 年不同施肥处理下植物群落 C、N 和 P 含量差异均不显著 ($P>0.05$)。2014 年植物群落全碳 (CTC) 和全氮 (CTN) 变化范围在 $40.91\%\sim 42.43\%$ 、 $1.47\%\sim 1.98\%$, 整体趋势比较平稳 (图 2a、b)。与 CTC、CTN 变化趋势完全相反 (图 2c), 植物群落全磷 (CTP) 随着施肥水平的增加而逐渐上升 ($P<0.05$); 2015 年, CTC、CTN 含量呈随着施肥水平增加呈逐渐下降的趋势 ($P<0.05$)。除 2015 年 H2 的 CTP 含量显著低于 2014 年外, ($P<0.05$), CTP 含量总体呈逐渐增高的趋势。

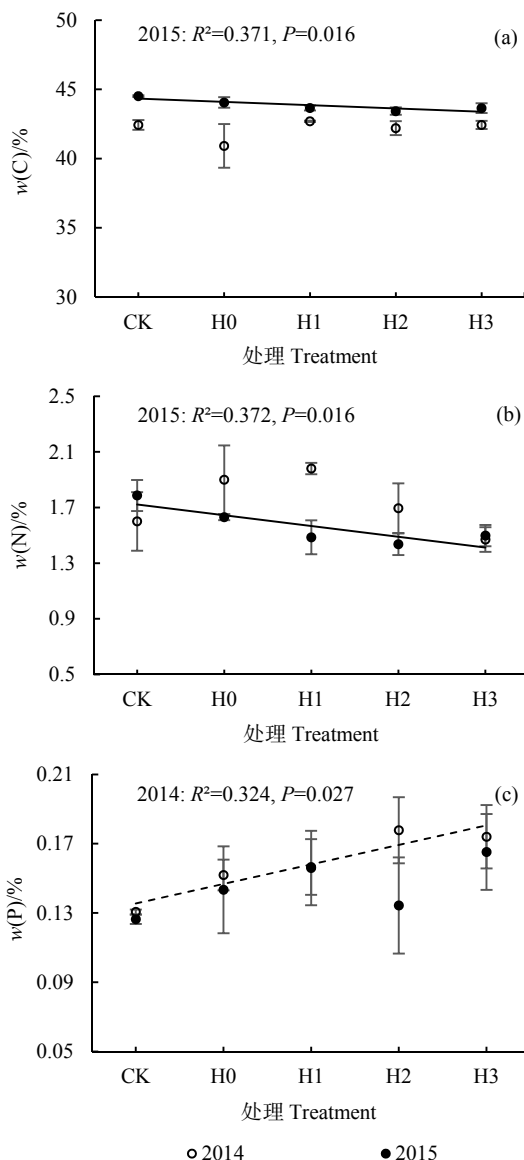


图2 群落养分含量的变化

Fig. 2 The variation of the community nutrient content

植物群落的化学计量比同样发生了明显的改变。2014 年和 2015 年不同处理间植物群落 C:N 变化范围分别为 $22.13\sim 36.61$ 和 $25.12\sim 3.14$ 。其中, 2014 年 C:N 在各处理间差异显著 (图 3a), H3 显著高于 CK、H0、H2 ($P<0.05$), 但 C:N 并未随施肥水平的提高呈现显著的变化趋势 ($P>0.05$); 2015 年植物群落 C:N 随着施肥水平的提高呈现直线上升的变化趋势 ($P<0.05$)。与 C:N 变化趋势完全相反, 2014、2015 年群落的 C:P 和 N:P 均随施肥水平增加呈现出逐渐下降的变化趋势, 其中, 2014 年群落的 C:P 变化趋势达到显著水平 (图 3b、图 3c)。

2.3 土壤 C、N、P 及其计量比对施肥的响应

土壤 C、N、P 含量整体上呈垂直分布, 随着

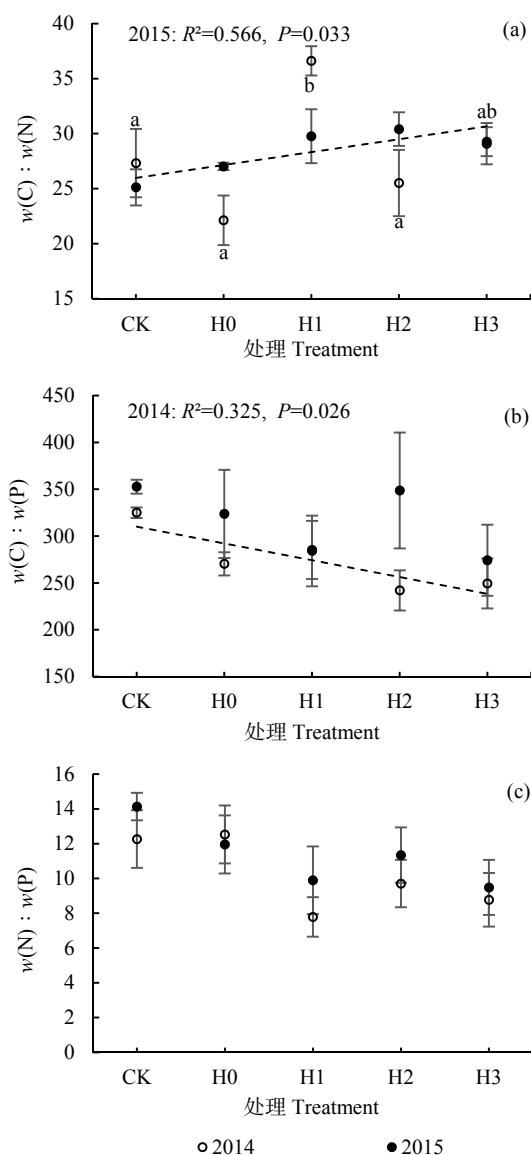


图3 群落化学计量的变化

Fig. 3 The variation of community chemometry

土层增加其含量逐渐下降(图4)。2014年与2015年,不同处理下土壤全C(STC)并未因为肥料的添加而发生显著性改变($P>0.05$),3个土层中的STC含量均具呈垂直分布且每个土层之间差异显著($P<0.05$),每层土壤STC的含量都较上一层降低了20%~30%(图4a、b)。2014年全N(STN)含量随着施肥水平的增加呈缓慢下降趋势(图4c、d),3个土层STN含量并未受显著性影响($P>0.05$);2015年STN含量随着施肥水平的增加呈显著下降趋势($P<0.05$),其中,H2、H3的0~10 cm土层中STN含量显著高于其他处理($P<0.05$)。2014年10~20 cm土层处理间的全P(STP)含量差异显著(图4e、f),其中,H1显著高于CK、H3($P<0.05$);而2015年3个土层的STP含量在各处理间差异不

显著($P>0.05$),整体呈现出先降后升的变化趋势;2015年3个土层的STP含量均显著地高于2014年,最多高出了44%。

从年际变化上看,2014年相同处理下的3个土层STC含量均高于2015年,降低幅度在28%~38%之间;2015年3个土层的STN含量比2014年高1.29%~14.5%;2015年3个土层的STP含量比2014年高4%~58%。

土壤C、N、P的化学计量比随施肥浓度增加而呈现不同程度的变化,并且个别比值呈现出显著的变化趋势(图5)。2014年3层土壤的C:N、C:P和N:P受施肥水平的影响相对较小,变化范围分别为18.31~19.42、64.06~102.51、3.38~5.19。0~10 cm、10~20 cm土层中C:N有缓慢上升趋势,20~30 cm土层中C:N有缓慢下降趋势,其中,CK处理20~30 cm土层C:N高于0~10 cm土层。土壤N:P和C:P变化相似,0~10 cm土层的比值最高,20~30 cm土层最低,比值的下降幅度较为均匀。

2015年3层土壤的C:N、C:P和N:P变化范围为11.33~12.51、25.59~53.49、2.17~4.41。C:N整体呈下降趋势,除10~20 cm外,其他土层下降趋势均达显著性水平(图5b);随着施肥水平的增加,0~10 cm土层C:P和N:P呈上升趋势,10~20 cm层变化较为平缓,而20~30 cm土层有下降趋势。对比2年比值的变化,2015年C:P和N:P较2014年分别下降了47.8%~59.7%和15.0%~35.8%。

3 讨论

3.1 施肥对群落生物量的影响

草地施肥打破了土壤养分固有的平衡,缓解了群落对限制性元素的需求,有利于植物干物质的形成和积累,提高了群落生物量。在一定范围内,随着施肥水平的增大,草地的地上生物产量也随之提高(何玉惠等,2015;李文娇等,2015)。有学者通过研究植物地上生物量与施肥水平的关系,建立了函数方程,为定量施肥提供了参考(周青平等,2005)。本试验对施肥水平与群落地上生物量的关系进行了回归分析,证实了施肥与产量之间确实有直接的联系,但由于不同地区气候、土壤的差异,施肥阈值的确定并不唯一。关于施肥阈值的研究也有不同结论,每年 $10.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的氮素施用量是整个欧亚大陆成熟或退化草地的一个添加阈值,如果超过这个用量,群落生物量、物种多样性、功能群结构的变化将不再明显(Bai et al., 2010; 曹文侠等, 2015; 宗宁等, 2014)。有研究表明, $7.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的氮素施用量对内蒙古典型草原割草场地上生物量的提高效果明显,当肥料用量超过 $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,施肥

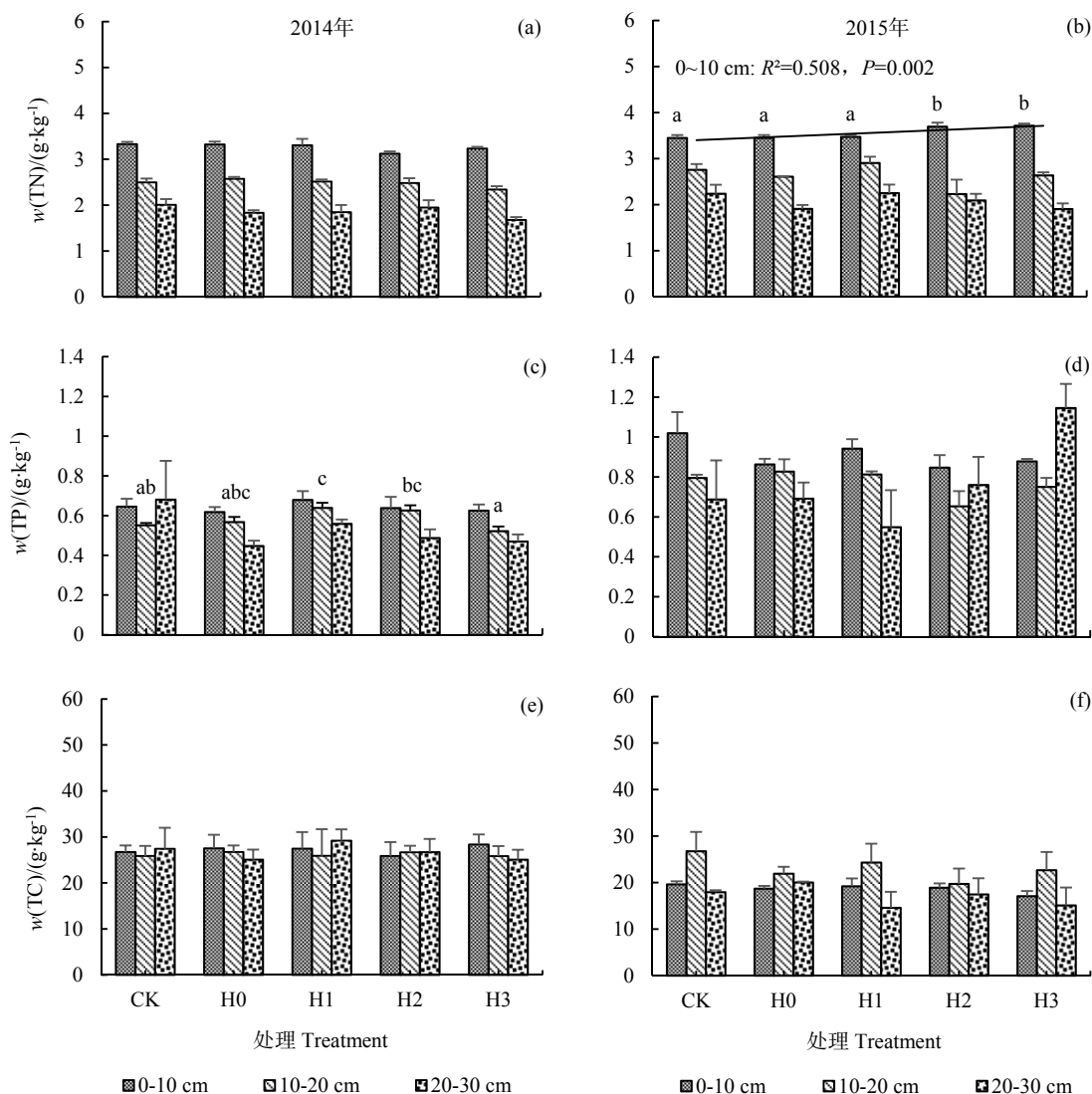


图4 3层土壤全量元素的变化

Fig. 4 The variation of soil total element amount in three soil lay

对草地上生物量的增加效果就不再明显(宝音陶格涛等, 2011; 邱波等, 2004)。从内蒙古西部到东部, 适宜的施肥量亦存在较大差异(孙浩智, 2014)。本研究2014年地上生物量的拟合结果显示, 即使在H3 ($N\ 10.5\ g\cdot m^{-2}+P\ 5.1\ g\cdot m^{-2}$)的高施用量下, 群落生物量依然表现出明显的增高趋势, 可能是N、P之间存在很强的交互作用(于丽等, 2015), N、P配施会使草地主要限制因子(N、P)的添加效应放大, 从而大幅提高了本地区的施肥阈值(郭继勋等, 1994)。2015年中等水平肥料施用量($N\ 7.0\ g\cdot m^{-2}+P\ 3.4\ g\cdot m^{-2}$)下, 草地群落生物量最高。同时, 2015年不同处理群落生物量均低于2014年, 可能是由于研究期内年降水量的大幅波动极大的影响了群落地上生物量的变化趋势和肥料阈值。水分是制约天然草场群落产量的主导因子, 而产量变化与

主要气候因子的变化规律在时间上基本是同步的, 植物生长季内降雨的多少将直接决定植物地上产量的高低(曾冬萍等, 2013)。可见, 在水分充足的条件下, 该地区的最适肥料浓度阈值也会有所增加, 水分变化也是确定施肥标准的基础。

3.2 施肥对植物群落C、N、P及其计量比的影响

植物群落C、N和P含量的高低, 在一定程度上体现了植物群落对当地土壤条件的适应状况, 而元素化学计量学比在反映生态系统中大部分元素的循环模式的同时还可以反映植物的生长速率, 也可以将其作为一个植物生长限制性因素的判断标准(王绍强等, 2008; 管宇等, 2009)。从本研究群落C:N的变化上看, 施肥两年中群落的C:N均随着施肥水平的增加而呈现上升趋势, 这一结果与前人的研究结果相似, 产生这一结果的原因主要

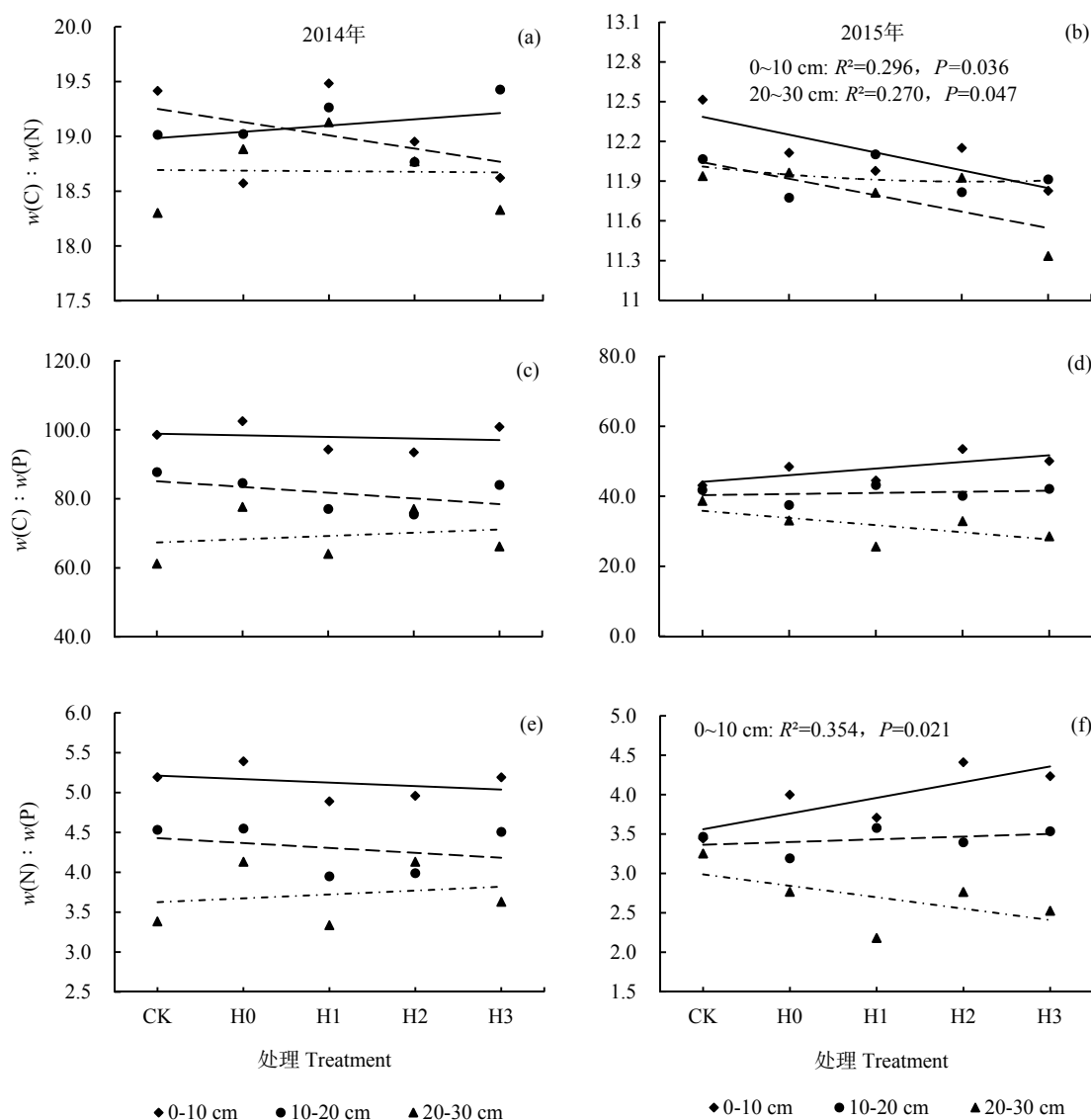


图5 3层土壤元素化学计量的变化

Fig. 5 The variation tendency of soil stoichiometric ratio in three soil lay

与群落氮素养分含量高低有关(黄菊莹等, 2013)。2014年和2015年两年的群落全C变化相对平稳, 而群落全N却随施肥水平的变化呈现两种不同的趋势。2014年植物群落对土壤氮素的利用效率高, 土壤氮素向植物流动, 但高浓度的施氮抑制了这一作用效果(许秀美等, 2001); 而2015年由于年降雨量(230 mm)低于该地区年平均降水量(350 mm), 使得这种抑制效果加重。虽然干旱环境中植物的生长速率会降低, 但有研究认为植物在较低的生长速率下却具有较高的吸收速率(Zhang et al., 2004)。研究表明, 中国草本植物的C:N通常在16左右(管宇等, 2009), 而试验中所有处理中的群落C:N均在22以上, 远高于全国平均水平, 这也从侧面反映了该地区氮素相对匮乏的现象。许多学者认为植物体内的C:P越低, 那么它就具有越

高的生长速率(Elser et al., 2007; 张杰琦, 2011)。本试验中群落C:P随施肥水平的增高而逐渐下降, 原因是由于施肥水平的增加可能带来了植物群落整体生长速率的增大。N:P随着施肥水平的增大而降低, 可能是N、P肥混合施用使群落N:P变化趋势发生改变。有研究认为, 当植物群落的N:P小于14时, 植物生产力受N的限制较多; 当N:P大于16时, 则受P的限制较大; 介于两者之间时, 则受N、P的共同限制(Koerselman et al., 1996; 罗亚勇等, 2012)。也有不同研究表明, N:P小于21时为N限制, N:P大于23时为P限制。无论以哪种结论为判别标准, 本地区群落更多地表现为N限制, 因为所有处理中的N:P均小于16(张杰琦, 2011)。结合以上化学计量比的研究可知, 在未来的N、P混施管理中, 需降低或不添加磷肥,

才能使群落呈现适中的化学计量比。

3.3 施肥对土壤 C、N、P 及其计量比的影响

不同施肥浓度下土壤元素之间的化学计量比, 可以作为土壤限制性因素和肥力变化的指标(丁小慧等, 2012)。本试验中, 2014 年土壤 C、N、P 比值的变化对不同浓度的氮磷添加响应较小且无明显变化规律, 这与许多研究结论一致(黄菊莹等, 2013; 李艳, 2014)。2015 年土壤 C:N 和 N:P 出现了明显变化趋势, 原因可能是 2015 年降水较为匮乏, 土壤养分与植物利用的关系变弱, 肥料中的元素更多地被贮存到土壤之中, 施肥效应更多地体现在土壤层面。中国的土壤 C:N 平均值在 10:1~12:1 之间(黄昌勇, 2000), 而王绍强等(2008)认为腐殖质较高的土壤 C:N 比大致为 14:1, 本试验 2014 年所有处理土壤 C:N 均在 18.5~19.5 之间, 高出以上水平很多。在自然状态下, 有机质高的土壤其 C:N 越高(Batjes, 1996), 说明本地区土壤全 C 依然丰富。土壤 N:P 也可以指示土壤 N 或 P 限制, 一般可以接受的观点是, 较低的土壤 N:P 更适合群落的生长(邬畏等, 2010), 它反映了植物受 N 限制; 而较高的 N:P 则反映植物受 P 限制(黄菊莹等, 2013)。2015 年 0~10 cm 的土壤 N:P 随施肥水平的增高呈直线上升的趋势, 更多 N、P 停留在土壤中, 引起土壤中 N:P 的增大, N、P 浓度的增加可能加剧了上层土壤的 P 限制。

4 结论

由于施肥两年降雨量的差异, 2014 年施肥处理 H3(N 10.5 g·m⁻²+P 5.1 g·m⁻²) 草地群落生物量最高, 而 2015 年施肥处理 H2(N 7.0 g·m⁻²+P 3.4 g·m⁻²) 草地群落生物量最高。

2014 年和 2015 年不同施肥处理下植物群落 C、N 和 P 含量差异均不显著($P>0.05$)。试验中所有处理中的群落 C:P 和 N:P 均随着施肥水平的增大而降低, C:N 均在 22 以上, N:P 均小于 16, 表现为 N 限制。

本试验 2014 年土壤 C、N、P 比值的变化对不同水平的氮磷添加响应较小且无明显变化规律。2015 年 STN 含量随着施肥水平的增加呈显著下降趋势($P<0.05$), 其中 H2、H3 的 0~10 cm 土层中 STN 含量显著高于其他处理。2014 年所有处理中土壤 C:N 均在 18.5~19.5 之间, 说明本地区土壤全 C 依然丰富。2015 年 0~10 cm 的土壤 N:P 随施肥水平的增高呈直线上升的趋势, 更多 N、P 停留在土壤中, 引起土壤中 N:P 的增大, N、P 浓度的增加可能加剧了上层土壤的 P 限制。

结合以上化学计量比的研究可知, N 可能是本地区限制植物生长的一个主要因素, P 处于相对平

衡的状态, 在未来的 N、P 混施管理中, 需降低或不添加磷肥, 适量添加 N 素, 才能使群落呈现适中的化学计量比。

参考文献:

- BAI Y F, WU J G, CLARK C M, et al. 2010. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia grasslands [J]. *Global Change Biology*, 16(1): 358-372.
- BATJES N H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Europe Journal of Soils Science*, 47: 151-163.
- CRAWLEY M J. 1997. *Plant Ecology* [M]. Cambridge: Mass: Blackwell Science.
- ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 10(12): 1135-1142.
- GUSEWELL S. 2004. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 164(2): 243-266.
- HE J S, FANG J, WANG Z, et al. 2006. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. *Oecologia*, 149(1): 115-122.
- KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. 1996. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 33(6): 1441-1450.
- LADANAI S, GREN G I, OLSSON B A. 2010. Relationships between tree and soil properties in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Sweden [J]. *Ecosystems*, 13(2): 302-316.
- NIKLAS K J, COBB E D. 2005. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth [J]. *American Journal of Botany*, 92(8): 1256-1263.
- NIKLAS K J. 2006. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates [J]. *Annals of Botany*, 97(2): 155-163.
- STERNER R W, ELSE J J. 2002. *Ecological Stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press.
- ZHANG L X, BAI Y F, HAN X G. 2003. Application of N:P stoichiometry to ecology studies [J]. *Acta Botanica Sinica*, 45(9): 1009-1018.
- ZHANG L X, BAI Y F, HAN X G. 2004. Differential responses of N:P stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N additions in a steppe ecosystem in Nei Mongol [J]. *Acta Botanica Sinica*, 46(3): 259-270.
- 宝音陶格涛, 刘美玲, 包青海, 等. 2011. 氮素添加对典型草原区割草场植物群落结构及草场质量指数的影响[J]. *草业学报*, 20(1): 7-14.
- 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 等. 2014. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. *植物生态学报*, 38(3): 231-237.
- 曹文侠, 李文, 李小龙, 等. 2015. 施氮对高寒草甸草原植物群落和土壤养分的影响[J]. *中国沙漠*, 35(3): 658-666.
- 曾德慧, 陈广生. 2005. 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*, 29(6): 141-153.
- 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 2013. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. *生态学报*, 33(18): 5484-5492.
- 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 2012. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. *生态学报*, 32(11): 3467-3476.

- 管宇, 刘丽君, 董守坤, 等. 2009. 施氮对大豆植株氮素和蛋白质含量的影响[J]. 东北农业大学学报, 40(7): 1-4.
- 郭继勋, 祝廷成. 1994. 气候因子对东北羊草草原羊草群落产量影响的分析[J]. 植物学报, 36(10): 790-796.
- 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 2015. 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, 35(1): 66-71.
- 黄昌勇. 2000. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社.
- 黄菊莹, 赖荣生, 余海龙, 等. 2013. N 添加对宁夏荒漠草原植物和土壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 32(11): 2850-2856.
- 李本银, 汪金舫, 赵世杰, 等. 2004. 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响[J]. 中国草地学报, 26(1): 14-17.
- 李文娇, 王慧, 赵建宁, 等. 2015. 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, 37(2): 7-13.
- 李艳. 2014. 刈割、施肥对高寒草甸土壤、植物 N、P 化学计量特征的影响[D]. 西安: 陕西师范大学.
- 李志坚, 祝廷成, 胡跃高. 2003. 不同施肥水平与组合对饲用黑麦生产性能的影响研究 I 对饲用黑麦产草量的影响[J]. 草业学报, 12(4): 104-110.
- 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 2012. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志, 31(2): 254-260.
- 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 2005. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. 植物生态学报, 29(2): 311-317.
- 邱波, 罗燕江, 杜国祯. 2004. 施肥梯度对甘南高寒草甸植被特征的影响[J]. 草业学报, 13(6): 65-68.
- 戎郁萍, 韩建国, 王培. 2002. 不同草地恢复方式对新麦草草地土壤和植被的影响[J]. 草业学报, 11(1): 17-23.
- 孙浩智. 2014. 青藏高原东缘高寒草甸不同管理方式下土壤酶活性的研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 28(8): 3937-3947.
- 王振兴. 2011. 国内生态化学计量学研究进展[J]. 绿色科技, (7): 195-196.
- 邬畏, 何兴东, 周启星. 2010. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. 中国沙漠, 30(2): 296-302.
- 许秀美, 邱蛟蛟, 周先学, 等. 2001. 植物对磷素的吸收、运转和代谢[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 32(3): 397-400.
- 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 2010. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报, 34(1): 39-47.
- 于丽, 赵建宁, 王慧, 等. 2015. 养分添加对内蒙古贝加尔针茅草原植物多样性与生产力的影响[J]. 生态学报, 35(24): 8165-8173.
- 张杰琦. 2011. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学.
- 周青平, 金继运, 德科加, 等. 2005. 不同施氮水平对高寒草地牧草增产效益的研究[J]. 土壤肥料, (3): 29-31.
- 周兴民. 2001. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社.
- 宗宁, 石培礼, 牛犇, 等. 2014. 氮磷施肥对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 25(12): 3458-3468.

Responses of Plant and Soil C : N : P Stoichiometry to Fertilization in *Leymus chinensis* Mowing Meadow

BAI Yuting¹, WEI Zhijun^{1*}, DAI Jingzhong¹, YAN Ruirui², LIU Wenting¹, WANG Tianle¹

1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;

2. Institute of Agriculture Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 010010, China;

3. College of Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

Abstract: The experiment was conducted to study the effects of plant community productivity, plant community and soil C : N : P ecological characteristics of chemometrics In hulunbuir *Leymus Chinensis* Mowing Meadow, by using different kinds of fertilization and different fertilizer treatment, in order to select the optimal combination of the grassland types and fertilizer rate for this region. Our objective was to explore the influence of nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizer levels on carbon C : N : P stoichiometry of plant community and soil with *Leymus Chinensis* Mowing Meadow. Our results showed that adding the concentration fertilizer reduced community biomass on the ground was on the rise in 2014 and H3 (N 10.5 g·m⁻²+P 5.1 g·m⁻²) has the highest biomass (505.8 g·m⁻²), but community biomass on the ground climbed up and then declined in 2015 and H2 (N 7.0 g·m⁻²+P 3.4 g·m⁻²) was the highest biomass (264 g·m⁻²). The total carbon, total nitrogen and total phosphorus of plant community had no marked change in 2014. It is opposite change tendency that C: P and N: P; Other indexes were not significant difference besides total N of H2 and H3, total P of H1 in 2014. In 2014, the change range of three layers of soil C : N and C, P and N : P is influenced by fertilization concentrations are relatively small, is respectively 18.31~19.42, 64.06~102.51 and 3.38~5.19. The change of the contrast ratio of 2 years, C : P and N : P in 2015 had decline about is 47.8%~59.7% and 15.0%~35.8%. It indicates that nitrogen element may be a major factor of limiting plant growth and phosphorus element can make the nutrient ratio in a relatively balanced state by the view of plant community and soil stoichiometric ratio in this region. The short-term fertilization for the region to ease restrictions on the nitrogen and phosphorus element, but too much nitrogen element added could lead to a change in limiting factor.

Key words: mowing land; fertilization; biomass; plant C : N : P stoichiometry; soil C : N : P stoichiometry.