

# 矮嵩草草甸氮素利用率对养分添加与冬季增雪的短期响应\*

魏 晴<sup>1,2</sup> 周华坤<sup>1\*\*</sup> 姚步青<sup>1</sup> 王文颖<sup>2</sup> 刘泽华<sup>2</sup> 赵新全<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810000; <sup>2</sup> 青海师范大学, 西宁 810008)

**摘 要** 研究设 4 个实验处理 [冬季增雪 (W)、施 N 肥、施 P 肥和对照], 通过<sup>15</sup>N 稳定性同位素标记研究短期内增施氮磷肥及水分对青藏高原矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸氮素利用率的影响。结果表明: 群体水平上, 植物地上部分<sup>15</sup>N 绝对浓度最高; 土壤中氮素残留量较高, 说明短期内氮素未被充分吸收利用, 且活体植物氮素的吸收利用大于凋落物; 氮素利用率为 P 处理 > N 处理 > W 处理 > CK。说明养分与水分是限定矮嵩草草甸的氮素利用率的因子, 其中养分是最关键因子。

**关键词** <sup>15</sup>N 标记; 冬季增雪; 施 N 肥; 施 P 肥; 矮嵩草草甸

中图分类号 Q948 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)2-0491-06

**Short-term effects of nutrient additions and snow increase in winter on nitrogen utilization rate of *Kobresia humilis* meadow.** WEI Qing<sup>1,2</sup>, ZHOU Hua-kun<sup>1\*\*</sup>, YAO Bu-qing<sup>1</sup>, WANG Wen-ying<sup>2</sup>, LIU Ze-hua<sup>2</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 81000, China; <sup>2</sup>Qinghai Normal University, Xining 810008, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 491–496.

**Abstract:** The effects of nutrient and water additions on nitrogen utilization rate of alpine plants were investigated using the <sup>15</sup>N labeling technique in a *Kobresia humilis* meadow over a short term period. Four treatments were set up as follows: increased snow in winter (W), N fertilization (N), P fertilization (P), and control (CK). About one month after the labeling, the <sup>15</sup>N absolute abundance of below-ground of plants was the highest. More added N was recovered in the soil. This indicates that N was not fully used by plants in the short term, and less N was transferred into litter. The N utilization rates for plants under different treatments were in order of P treatments > N treatments > W treatments > CK. This reflects that nutrient and moisture modify N utilization rate of alpine plants in *K. humilis* meadows, and the nutrient is more important.

**Key words:** <sup>15</sup>N labeling; snow increase in winter; N fertilization; P fertilization; *Kobresia humilis* meadow.

DOI:10.13292/j.1000-4890.2015.0068

养分是高纬度地区生态系统演化的限制性因子之一 (Sundqvist *et al.* 2014); 水分与氮磷肥又是干旱半干旱地区生态系统影响植物生长的主要限制因子 (Harpole *et al.* 2007)。近年来全球变暖趋势逐渐加强, 40 年来青藏高原地区年降水量呈现冬春降水增多, 夏秋降水减少的变化格局。青藏高原气候

独特, 生态环境脆弱, 是气候变化敏感区 (赵新全等 2009), 高寒矮嵩草草甸是在高寒条件下发育的一种特殊的草地类型。该地区速效磷与速效氮比较缺乏 (王文颖等 2012)。

氮素是所有植物生长发育不可缺少的元素, 生命物质最重要的组成成分之一, 同时也是生态系统物质循环的重要组成部分, 而且需求量大 (王政等, 2005; 刘俊英 2010; 王刘杰 2010)。氮素在自然界中含量极其丰富, 氮素占大气成分的 3/4, 但是植物不能直接利用这些氮素, 必须要转化成化合态的氮才能被植物利用, 所以氮是植物最易缺乏的营养元

\* 国家自然科学基金项目 (31172247, 31201836 和 31472135)、青海省自然科学基金项目 (2013-Z-916)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05070202)、国家科技支撑项目 (2011BAC09B06-02 和 2014BAC05B03) 和青海省重点实验室发展专项 (2013-Z-Y07、2014-Z-Y01) 资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: 729492987@qq.com

收稿日期: 2014-06-23 接受日期: 2014-09-11

素(王刘杰 2010)。邓建明等(2014)的研究也印证了高寒草甸生态系统有机质分解缓慢,植物可利用氮普遍比较缺乏的特点。Xu等(2011)研究表明,不同高寒草地类型主要植物种和功能群的氮素利用效率及动态均有差异。但短期内添加养分与水分对高寒草甸整个生态系统氮素利用效率影响如何?能被植物有效吸收利用吗?对矮嵩草草甸的发展演化有利吗?这些科学问题的报道较少。

近年来,稳定性同位素 $^{15}\text{N}$ 技术在生态系统氮循环研究中发挥了极其重要的作用(Jones *et al.*, 2005; Harrisona *et al.*, 2008; Gioseffi *et al.*, 2012; 邓建明等 2014),其技术的完善使其逐渐成为评价生态系统氮素状态和示踪氮去向的新方法。因此,本文利用 $^{15}\text{N}$ 同位素示踪技术,通过模拟添加水分以及N、P养分的条件下,探讨矮嵩草草甸生态系统氮素利用率,以期反映短期内添加水分与养分对矮嵩草草甸氮素利用率的影响程度?矮嵩草草甸植物功能群在氮素利用策略上如何适应氮素限制或水分限制的?

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究地区概况

研究地点位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站,该地区处在青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷( $37^{\circ}29'\text{N}$ — $37^{\circ}45'\text{N}$ ,  $101^{\circ}12'\text{E}$ — $101^{\circ}23'\text{E}$ ),海拔3200 m。平均气温较低,多年平均气温为 $-1.7^{\circ}\text{C}$ ;年降水量较高,约580 mm,多集中在5—9月份(占全年降水量的80%)。该区地带性植被多为高寒矮嵩草草甸、金露梅(*Potentilla fruticosa*)草甸和藏高草(*Kobresia tibetica*)沼泽化草甸为主要建群种的植被类型(王启兰等, 2004)。本研究以该地区最主要的植被类型矮生嵩草草甸为研究对象。其建群种和优势种为莎草、禾草和可食杂类草等(邓建明等 2014)。土壤类型为高山草甸土,土壤形成过程比较年轻,有机质分解缓慢,淋溶较弱,大多盐基饱和(周兴民等 2006; 邓建明等 2014)。土壤总氮、总磷和钾的储量较丰富。由于矿化作用弱,营养物质缺乏,特别是速效氮和速效磷缺乏(王文颖等 2012)。

### 1.2 实验设计

2009年在海北站水肥控制试验样地(属于典型的高寒矮嵩草典型草甸)建立36个 $3\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的小样方,每个小样方中间有 $>3\text{ m}$ 隔离带,以防止相互

干扰和边际效应;并分为4个处理(试验处理与重复数如表1)。

该区域由于常年低温,有机质含量丰富;氮磷肥与水分又是陆生植物生长的限制因子;40年来青海省年内降水格局变化较大,表现为冬春降水增多,夏秋降水减少(赵新全等 2009),所以本试验采用生长季施肥与冬季增雪的处理方法。2009年样地建立后,试验每年进行增雪和施肥。人工增雪在每年的1、2和3月,人工增雪共计 $50\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ;每年6月下旬增施氮磷肥。以 $\text{CO}(\text{NH})_2$ 形式施氮肥,纯N的施加量为 $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;以TSP形式(重过磷酸钙)施磷肥,纯P的施加量同纯N(白永飞等, 2014; 叶鑫等 2014)。

2010年开始同位素实验准备。首先,在每个小区内设置12个直径30 cm,高45 cm的PVC微区,其中6个进行标记处理(标记微区),6个作为对照(非标记微区),共192个微区。2011年7月20日开始标记,标记量为 $2.02\text{ g }^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ (原子百分超为5%) /微区(邓建明等 2014)。标记微区采用注射法进行同位素施肥。为了使肥料在微区内分布均匀,采用专门设计的3层20孔(外层10孔,中层6孔,内层3孔,中心1孔)圆盘作为注射孔均匀分布的统一标尺。标记前,把每个微区的同位素硝酸铵配成400 mL的溶液,用一个针长35 mm的特制注射器把同位素肥料均匀施入0~30 cm土壤中。每孔注射20 mL标记溶液。注射前先用一个钢针钻一个深30 cm的洞,钢针抽出后把注射器插到底然后一边匀速推液体一边向上拔针,当针头拔出地面时,液体注射完毕(邓建明等 2014)。

### 1.3 样品采集

取样时间为2011年8月下旬(植物生长季的最大生物量期),包括微区土壤容重、凋落物、植物的地上部分及地下部分。取样时选择3个标记微区和3个非标记微区。用规格为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的环刀取出土壤;植物0~30 cm的根用直径为6 cm的根钻取

表1 样地的试验处理及代码

Table 1 Experiment treatments and codes

试验处理	试验处理代码	重复数
对照	CK	6
冬季增雪	W	6
氮肥	N	3
磷肥	P	3

出; 整个物种取出时(注意不破坏植物地上部分), 用自来水把土壤冲干净, 最后把根系在蒸馏水中轻轻漂摆中根据地上的植物种把根系逐渐分开, 然后样品在 80 °C 下烘干 称重(邓建明等 2014)。用质谱仪(DELTA V Advantage) 分析同位素样品。分析测定原理: 样品在元素分析仪中高温燃烧后生成  $N_2$ , 质谱仪通过检测  $N_2$  的  $^{15}N$  与  $^{14}N$  比率, 并与国际标准物(大气  $N_2$ ) 比对后计算出样品的  $\delta^{15}N$  比率值(王文颖等 2012), 测定精度:  $\delta^{15}N$  为  $\pm < 0.2\%$ ; 氮素吸收量 =  $N(\%) \times$  生物量  $\times$  样品中  $\delta^{15}N$  丰度( $\%$ ); 氮素利用率( $\%$ ) =  $[N(\%) \times$  生物量  $\times$  样品中  $\delta^{15}N$  丰度( $\%$ )] / 肥料中  $^{15}N$  量  $\times 100$

$$\delta^{15}N = \left( \frac{R_{\text{样}} - R_{\text{标}}}{R_{\text{标}}} \right) \times 100$$

#### 1.4 数据处理

利用 Excel 2003 计算处理数据; 用 SPSS 17.0 软件进行 ANOVA 统计分析与 LSD 检验; 使用 GraphPad Prism 5 软件进行作图。数据为平均值  $\pm$  标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 凋落物、土壤、植物地上部分与地下部分 $^{15}N$ 绝对丰度( $\%$ ) 对水分及氮、磷添加的响应

$^{15}N$  同位素示踪剂标记 36 d 后, 增施氮磷及水分处理会造成凋落物、土壤、植物地上部分及地下部分  $^{15}N$  绝对丰度变化。凋落物及植物地上部分变化

不显著; 土壤的绝对丰度在冬季增雪处理下显著低于对照及施磷肥处理 ( $P < 0.05$ ); 植物地下部分  $^{15}N$  绝对丰度在施磷肥处理下显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ) (图 1)。

$^{15}N$  绝对浓度的高低: 植物地上部分  $>$  凋落物  $>$  植物地下部分  $>$  土壤(图 1)。说明  $^{15}N$  短期内主要被活体植物地上部分吸收。

### 2.2 凋落物、土壤、植物地上部分与地下部分 $^{15}N$ 吸收量对水分及氮、磷添加的响应

图 2 表明:  $^{15}N$  示踪剂标记 1 个月后, 各处理下凋落物的  $^{15}N$  吸收量差异性不显著; 土壤的  $^{15}N$  残留值在各处理下均低于对照, 说明各处理均对植物氮素的吸收利用有利, 但影响不显著; 植物地上部分在施氮肥处理下绝对丰度最高, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。说明施氮肥有利于植物地上部分氮素吸收; 植物地下部分在施磷肥处理下, 氮素吸收量显著高于对照及其他处理, 说明施磷肥有利于植物地下部分氮素的吸收。

各处理下, 土壤残留量均大于其他部分的吸收值(图 2), 说明氮素在短期内没能被植物吸收而残留在土壤中。活体植物氮素的吸收利用大于凋落物(图 2)。

### 2.3 不同处理下矮蒿草草甸 $^{15}N$ 流失量及吸收利用率

施磷肥处理下, 矮蒿草生态系统  $^{15}N$  的流失量

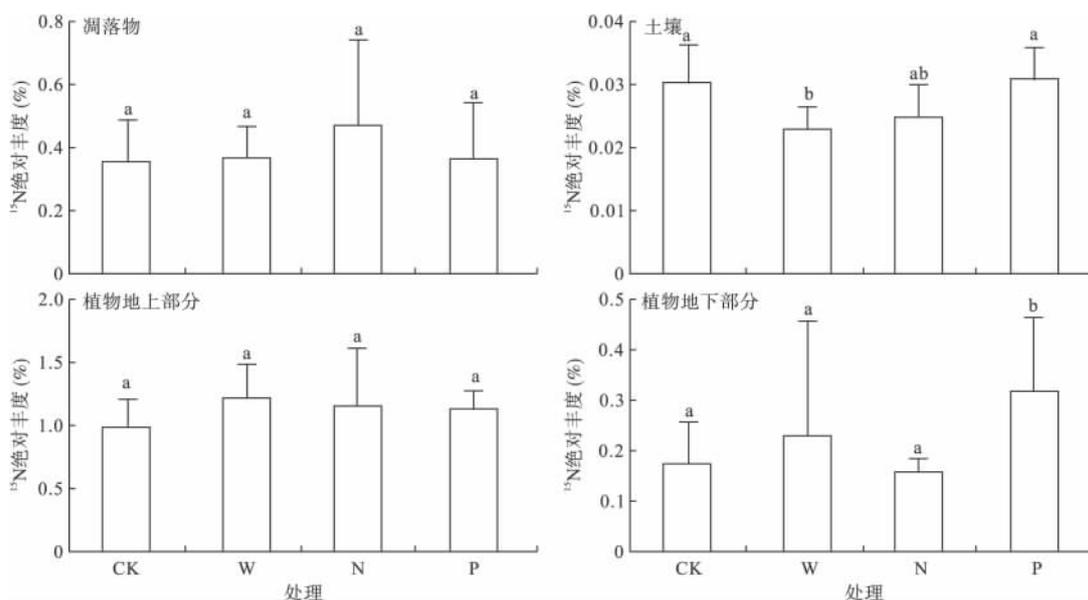


图 1 不同处理下凋落物、土壤、植物地上部分与地下部分  $^{15}N$  丰度

Fig. 1  $^{15}N$  abundances of litter, soil, shoot and root

CK: 对照; W: 冬季增雪; N: 施氮肥; P: 施磷肥。不同小写字母表示各处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。

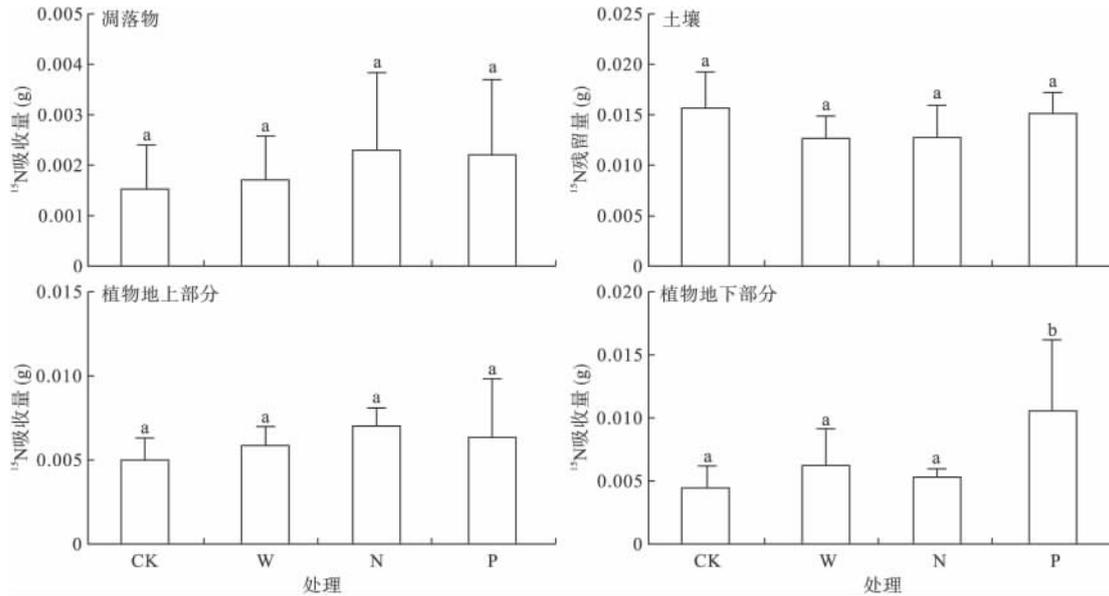


图2 不同处理下凋落物、土壤、植物地上部分与地下部分 $^{15}\text{N}$ 吸收量

Fig. 2  $^{15}\text{N}$  absorbed amount of the litter, soil, shoot and root

CK: 对照; W: 冬季增雪; N: 施氮肥; P: 施磷肥。不同小写字母表示各处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。

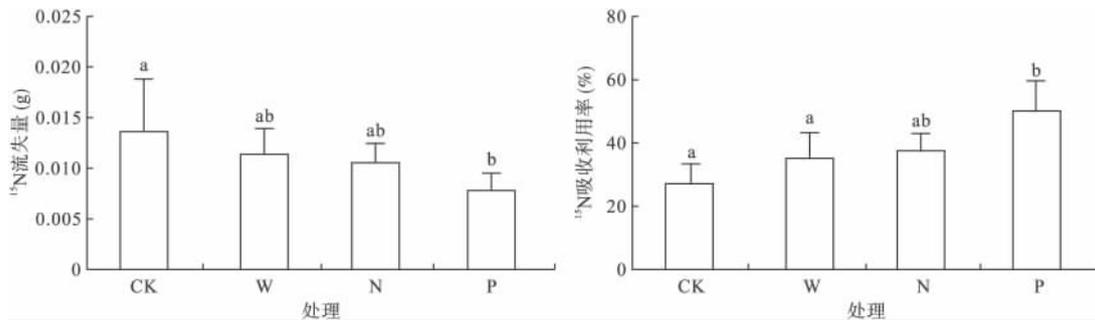


图3  $^{15}\text{N}$ 流失量及吸收利用率

Fig. 3  $^{15}\text{N}$  loss quantity, absorption and utilization rate

CK: 对照; W: 冬季增雪; N: 施氮肥; P: 施磷肥。不同小写字母表示各处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。

显著低于对照,说明施磷肥最有利于该生态系统的氮素利用。 $^{15}\text{N}$ 吸收利用率图也证实了这一结论:施磷肥处理下的 $^{15}\text{N}$ 吸收利用率显著高于对照 ( $P < 0.05$ ) (图3)。冬季增雪与施氮肥下矮蒿草草甸的氮素利用率也高于对照,但差异不显著。这也印证了Sundqvist等(2014)提出的养分是高纬度地区生态系统的限制因子之一。

邓建明等(2014)指出,植物根冠比与 $^{15}\text{N}$ 吸收能力呈反比关系。本研究结果也证实了这一点。本研究中,矮蒿草草甸主要植物的根冠比在不同处理下的规律为:P处理 < N处理 < W处理 < CK(表2)而矮蒿草草甸的氮素利用率为:P处理 > N处理 > W处理 > CK(图3)。

矮蒿草草甸植物科类的根冠比大小为:禾草 <

委陵菜 < 菊科 < 龙胆科 < 莎草科 < 豆科(表2),氮素利用率则相反。

### 3 讨论

近年来,国内外进行了大量的养分添加实验(Wedin *et al.*, 1996; Bobbink *et al.*, 1998; Collins *et al.*, 1998; Gough *et al.*, 2000; Stevens *et al.*, 2004; 牛克昌等 2006; Xu *et al.*, 2008; Bai *et al.*, 2010; Gu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; 邓建明等 2014) 这些实验结果普遍认为:可以增加生态系统生产力,竞争力较强的物种可以获得较多资源,从而抑制了较弱物种的生长。本研究中,禾草与莎草是矮蒿草草甸中的优势种,在N、P添加处理中,禾草优势作用更明显(权重比例比对照大),而根冠比对照小(比

表 2 2011 年不同处理下矮嵩草草甸植物根冠比

Table 2 Root shoot ratio of *Kobresia humilis* meadow species under different treatments in 2011

	CK	W	N	P
禾草权重	0.35	0.35	0.40	0.39
禾草根冠比	0.65 ± 0.30 <sup>Aa</sup>	0.56 ± 0.11 <sup>Aa</sup>	0.58 ± 0.20 <sup>Aa</sup>	0.46 ± 0.03 <sup>Aa</sup>
莎草权重	0.09	0.10	0.06	0.07
莎草根冠比	2.95 ± 1.57 <sup>Ba</sup>	3.47 ± 1.68 <sup>Bab</sup>	5.19 ± 1.14 <sup>Bb</sup>	3.95 ± 0.55 <sup>Bab</sup>
菊科权重	0.10	0.10	0.10	0.07
菊科根冠比	0.98 ± 0.23 <sup>Aa</sup>	0.94 ± 0.49 <sup>Aa</sup>	1.00 ± 0.00 <sup>ACa</sup>	0.80 ± 0.41 <sup>Aa</sup>
豆科权重	0.11	0.12	0.12	0.14
豆科根冠比	3.28 ± 2.55 <sup>Ba</sup>	2.96 ± 1.92 <sup>Ba</sup>	2.80 ± 2.72 <sup>Ca</sup>	2.93 ± 1.95 <sup>Ba</sup>
龙胆科权重	0.11	0.11	0.09	0.10
龙胆科根冠比	2.59 ± 0.00 <sup>ABa</sup>	2.43 ± 0.00 <sup>Ba</sup>	1.40 ± 0.36 <sup>ACa</sup>	1.64 ± 0.00 <sup>ABa</sup>
委陵菜权重	0.12	0.12	0.12	0.12
委陵菜根冠比	0.73 ± 0.45 <sup>Aa</sup>	0.62 ± 0.00 <sup>Aa</sup>	0.55 ± 0.00 <sup>ACa</sup>	0.63 ± 0.00 <sup>Aa</sup>
以上植物总根冠比	1.32	1.31	1.20	1.16
其他植物权重	0.11	0.11	0.11	0.11

数值为平均值 ± 标准偏差。不同大写字母表示科间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

对照有更强的氮素吸收能力) ,这表明随着时间的推移,禾草会取代莎草中的矮嵩草成为优势种,这与邓建民等(2014)和叶鑫等(2014)的研究结论一致。沈振西等(2002)研究表明,冬季的增雪可显著提高矮嵩草草甸禾草类的盖度,也有利于提高杂类草的盖度(比如菊科、龙胆与委陵菜);施氮最有利于禾草类盖度的增加,这与本研究的结论相符。不同处理下各类草盖度变化较大,体现了各物种在利用有限资源的同时,植物呈现多元的营养利用策略。水分与养分添加时,禾草类通过缩小根冠比来吸收较多的氮素,提高竞争力;莎草类因为地上部分竞争力较弱,只有通过增加地下部分的生物量吸收较多氮素,提高自身竞争力(邓建明等,2014);豆科类植物的根冠比仅次于莎草,这是因为豆科类植物本身可以从大气中固定较多的氮素,不需要从肥料中吸收大量的氮素就可生存(王文颖等,2012);除禾草外,委陵菜、菊科也有较强的氮素吸收能力。

本研究中,经过2年的冬季增雪与养分添加处理,矮嵩草草甸的氮素利用率均比对照高,说明冬季水分与N、P均是矮嵩草草甸生存限制性因素,这3个因素中P又是最关键性因素。当然除此之外,温度也是限制性之一(赵新全等,2009),所以矮嵩草草甸群落维持机制是多个因素共同限定作用的,此结果验证了多因素共同限定假说。在有水分与养分限制作用下,矮嵩草草甸的氮素利用率只有28%左右,养分添加下矮嵩草草甸的氮素利用率可达到50%(图3)。说明养分是高寒矮嵩草草甸生存的主要限制因素,这与Sundqvist等(2014)研究结果

相符。

#### 参考文献

- 白永飞,黄建辉,郑淑霞,等. 2014. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制. 植物生态学报, 38(2): 93-102.
- 邓建明,姚步青,周华坤,等. 2014. 水氮添加条件下高寒草甸主要植物种氮素吸收分配的同位素示踪研究. 植物生态学报, 38(2): 116-124.
- 刘俊英. 2010. 高寒草甸优势物种吸收土壤氮素多元化途径研究(硕士学位论文). 西宁: 青海师范大学.
- 牛克昌,赵志刚,罗燕江,等. 2006. 施肥对高寒草甸植物群落主要组种繁殖分配的影响. 植物生态学报, 30(5): 817-826.
- 沈振西,周兴民,陈佐忠,等. 2002. 高寒矮嵩草草甸植物类群对模拟降水和施氮的响应. 植物生态学报, 26(3): 288-294.
- 王政,刘卫国,文启彬. 2005. 土壤样品中氮同位素组成的元素分析仪——同位素质谱分析方法. 质谱学, 26(2): 71-75.
- 王刘杰. 2010. 高寒草甸豆科植物固氮作用及其对群落的影响(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 王启兰,曹广民,姜文波,等. 2004. 高寒湿地植物残体降解的动态分析. 草业学报, 13(4): 39-44.
- 王文颖,马永贵,徐进,等. 2012. 高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸植物吸收土壤氮素的多元化途径研究. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1264-1272.
- 叶鑫,周华坤,刘国华,等. 2014. 高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应. 植物生态学报, 38(2): 147-158.
- 赵新全,曹广民,李英年,等. 2009. 高寒草甸生态系统与全球变化. 北京: 科学出版社.
- 周兴民,吴珍兰. 2006. 中国科学院北海高寒草甸生态系统定位站植被与植物检索表. 西宁: 青海人民出版社.
- Bai YF, Wu JG, Clark CM, et al. 2010. Tradeoffs and thresh-

- olds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from Inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, **16**: 358 – 372.
- Bobbink R , Hornung M , Roelofs JGM. 1998. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *Journal of Ecology*, **86**: 717 – 738.
- Collins SL , Knapp AK , Briggs JM , et al. 1998. Modulation of diversity by grazing and mowing in native tallgrass prairie. *Science*, **280**: 745 – 747.
- Gioseffi E , de Neergaard A , Schjoerring JK. 2012. Interactions between uptake of amino acids and inorganic nitrogen in wheat plants. *Biogeosciences*, **9**: 1509 – 1518.
- Gough L , Osenberg CW , Gross KL , et al. 2000. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. *Oikos*, **89**: 428 – 439.
- Gu MH , Wen SJ , Zhang ST , et al. 2010. The effects of weed competition , clipping and fertilization treatments on the productivity of cultivated meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Plant Science*, **2**: 173 – 177.
- Harpole WY , Potts D , Suding KN. 2007. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland. *Global Change Biology*, **13**: 2341 – 2348.
- Harrisona KA , Bolb R , Bardgett RD. 2008. Do plant species with different growth strategies vary in their ability to compete with soil microbes for chemical forms of nitrogen? *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 228 – 237.
- Jones DL , Healey JR , Willett VB , et al. 2005. Dissolved organic nitrogen uptake by plants an important N uptake pathway? *Soil Biology & Biochemistry*, **37**: 413 – 423.
- Stevens CJ , Dise NB , Mountford JO , et al. 2004. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, **303**: 1876 – 1879.
- Sundqvist MK , Liu ZH , Giesler R , et al. 2014. Plant and microbial responses to nitrogen and phosphorus addition across an elevational gradient in subarctic tundra. *Ecology*, **95**: 1819 – 1835.
- Wedin D , Tilman D. 1996. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands. *Science*, **274**: 1720 – 1723.
- Xu WH , Wan SQ. 2008. Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography , fire , and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China. *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 679 – 687.
- Xu XL , Ouyang H , Richter A , et al. 2011. Spatio-temporal variations determine plant-microbe competition for inorganic nitrogen in an alpine meadow. *Journal of Ecology*, **99**: 563 – 571.
- Zhang XM , Liu W , Bai YF , et al. 2011. Nitrogen deposition mediates the effects and importance of chance in changing biodiversity. *Molecular Ecology*, **20**: 429 – 438.

---

作者简介 魏 晴,女,1987年生,硕士研究生,主要从事高寒草地生态学研究。E-mail: 876033894@qq.com  
责任编辑 王 伟

---