内蒙古典型草原羊草群落氮素去向的示踪研究

潘庆民 白永飞 韩兴国 杨景成

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室 北京 100093)

摘 要 在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的羊草样地,采用 ^{15}N 同位素示踪技术研究了羊草(*Leymus chinensis*) 群落标记氮素的去向。结果表明:在我国典型草原羊草群落,植物对标记氮素的回收率为 31.61%,氮素添加显著影响植物对标记氮素的回收,随着氮素添加量的增加,地上和地下植物器官对标记氮素的回收量均显著提高。标记氮素被凋落物的回收率为 2.92%,地下凋落物的回收率显著高于地上凋落物。标记氮素的土壤存留率为 36.16%,主要分布在地表 0 ~ 40 cm 的土层范围内;各土层存留的标记氮素量均随着氮素添加量的增加而显著提高。标记氮素的当季损失率为 21.77% ~ 43.38%。风险/收益比分析表明,在该试验条件下,添加 $5.25\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}$ 与 $28\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}$ 的处理风险大于收益,添加 $17.5\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}$ 的处理风险最低,收益最高,在草原生态系统的管理中可供参考。

关键词 典型草原 羊草 ^{15}N 氮素回收 氮素存留 氮素损失

STUDIES ON THE FATE OF LABELLED NITROGEN APPLIED TO A *LEYMUS CHINENSIS* COMMUNITY OF TYPICAL STEPPE IN INNER MONGOLIA GRASSLAND

PAN Qing-Min BAI Yong-Fei HAN Xing-Guo and YANG Jing-Cheng

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract An important grassland ecosystem management strategy is the application of nitrogen fertilizer; however, the fate of applied nitrogen is highly correlated with risks and benefits associated with the fertilization of grasslands. The fate of nitrogen tracers applied to a typical Inner Mongolia steppe ecosystem has not been studied previously. We examined the fate of ^{15}N -labelled fertilizer in a *Leymus chinensis* site at the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences. The results showed that after one growing season an average of 31.61% (range from 25.33% to 38.65%) of the applied ^{15}N was recovered in the plant pool. ^{15}N recovered by aboveground and belowground organs significantly increased with increasing nitrogen rates suggesting that nitrogen fertilizer significantly affected the recovery of ^{15}N by plants. About 2.92% (range from 2.58% to 3.16%) of the applied ^{15}N was recovered in the litter, with the percent ^{15}N in the belowground litter significantly higher than in the aboveground litter pool. About 36.16% of the labelled nitrogen was retained in the soil pool, mostly in the 0 – 40 cm soil layer. ^{15}N retained by the soil increased significantly with increases in the nitrogen application rate. The loss of ^{15}N was about 21.77% – 43.38% of the labelled nitrogen. Risk/benefit analysis showed that, under the climatic and soil conditions prevailing during this experiment, fertilizer application rates of $5.25\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}$ and $28\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}$ were associated with high risk/benefit ratios, whereas the $17.5\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}$ fertilizer treatment achieved the lowest risk/benefit ratio among the nitrogen rate treatments. These results provide a reference for future grassland ecosystem management strategies.

Key words Typical steppe, *Leymus chinensis*, ^{15}N , Nitrogen recovery, Nitrogen retention, Nitrogen loss

在草原生态系统中,氮素至少是季节性限制植物的生长和生产力的高低(Harrison *et al.*, 1994; Epstein *et al.*, 2001),因此草地施肥是草原生态系统管理的重要措施。添加氮素的去向一直是草原生态系统研究的关键问题之一。1977年,Clark 根据矮草草原(Shortgrass Steppe)生态系统 5 年的 ^{15}N 同

位素示踪试验,认为在草原生态系统中添加的氮素主要被植物吸收而进入到植物氮素汇中(约占标记氮素的 60%)。但是,后来人们在矮草草原(Schimel *et al.*, 1986; Delgado *et al.*, 1996)的一些试验结果并不支持 Clark(1977)的这个结论,发现植物不是标记

氮素的最主要的汇。由此看来,要确定草原生态系统肥料氮素的去向需要在不同区域不同类型草原上开展更多的试验研究。羊草群落在我国典型草原颇有代表性,陈佐忠等(1985)发现雨季添加氮素对羊草群落的生产力有显著影响,但是未对氮素的去向进行研究。而肥料氮素的去向与草原施肥的风险和收益密切相关。因此,我们采用¹⁵N 同位素示踪技术,对添加氮素的去向进行研究,旨在为我国典型草原生态系统的管理提供依据。

1 试验区自然概况与研究方法

1.1 试验区的自然概况

试验区设在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站 1999 年新围封的羊草样地。其地理坐标为 43°32'45" ~ 43°33'10" N,116°40'30" ~ 116°40'50" E,海拔约 1 224 m。行政区划属内蒙古自治区锡林浩特市白音锡勒牧场境内。该区域气候属半干旱草原气候,冬季寒冷干燥,夏季温和湿润。年平均温度在 2.0℃;年降水量 350 mm 左右,集中于 6~9 月份,占全年降水量的 80% 左右。土壤类型为暗栗钙土。试验区于 1999 年 10 月围封,围封前属冷季放牧场,已经轻度退化,组成群落的植物种约 38 个,以广旱生根茎禾草羊草(*Leymus chinensis*)占优势,其次为大针茅(*Stipa grandis*)、西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibiricum*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等旱生密丛禾草。根据内蒙古草原生态系统定位研究站 25 年的长期监测资料,牧草一般在 4 月中下旬返青,8 月中下旬地上生物量达高峰,9 月中下旬枯黄。

1.2 试验设计

2000 年开始,选择地势平坦、植被均匀的有代表性的地段,实施了长期氮素添加试验。氮素梯度试验共设计了 7 个处理,为了保证氮素是最主要的影响因子,参考美国明尼苏达大学 Tilman 等(1991)的草地氮素梯度试验设计,对于其中的 6 个处理,每年按表 1 施用磷素、钾素和微量元素。6 个处理依次为:N0(不施用氮素,不完全对照)、N1.75(施用 5 g NH₄NO₃·m⁻²)、N5.25(施用 15 g NH₄NO₃·m⁻²)、N10.5(施用 30 g NH₄NO₃·m⁻²)、N17.5(施用 50 g NH₄NO₃·m⁻²)、N28(施用 80 g NH₄NO₃·m⁻²)。同时设置了 1 个不施用任何营养元素的处理 CK(完全对照)。试验小区面积为 5 m×5 m,间距为 1 m,每个处理 9 次重复,完全随机排列。为了提高肥料的利用效率,每年 7 月 5 日(该区域刚进入雨季)实施氮

素梯度处理,同一小区每年施用的氮素梯度相同。表 1 中的营养元素先溶解为液体,用微量喷雾器均匀地混合到洗涤干净烘干后过 60 目筛的细沙中,将细沙再烘干,施肥时,按试验设计的施用量和氮肥混匀后用手撒施。

2001 年 4 月(牧草返青前)根据 2000 年的试验结果,选择了 4 个生产力差异显著的氮素添加梯度的处理(N5.25、N10.5、N17.5、N28),设计了¹⁵N 示踪试验,在每个试验小区内设置了 2 个¹⁵N 微区,规格为 80 cm×60 cm×45 cm(长×宽×高)的铁板框,于 4 月 5 日(牧草返青前)将微区置入。7 月 5 日,在微区外施入普通的 NH₄NO₃ 肥料,在微区内施入相对应数量的¹⁵NH₄¹⁵NO₃ 标记肥料,标记肥料的¹⁵N 丰度为 10.32%,由化工部上海化工研究院生产。

试验实施前,对试验地 1 m 内不同土层的土壤特性及养分含量进行了测定。其中,土壤容重采用环刀法测定,pH 值采用 pH 值电位法(GB6920-86)测定,全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,全碳含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定。

表 1 试验中 P 素、K 素和其它微量元素添加量
Table 1 Applied amount of phosphor, potassium and other elements

营养元素 Element	施用量 Applied amount (g·m ⁻²)	溶液体积 Solution volume (ml)
P ₂ O ₅	10	150
K ₂ O	10	150
MgSO ₄	0.062 5	200
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	22.00	1 000
MnCl ₂ ·4H ₂ O	18.00	1 000
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.30	1 000
H ₃ BO ₃	6.00	1 000

1.3 植物和土壤样品的采集

于 2001 年 8 月 29 日,在每个铁板框内收集地上凋落物,取土样后,用铁锹从侧面将整个钢板框整体挖出,运至冲根池。用自来水将土壤从钢板框下端(40 cm 土层处)逐渐冲出。用尼龙网袋收集冲断的根系。按地上和地下两部分把植物器官分开。样品在 70℃烘干,称干重后,进行粉碎处理,过 0.5 mm 筛后保存。

在将铁板框挖出前,用土钻分 4 层(0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~100 cm)采集土壤样品,采集的土壤样品自然风干后,用镊子剔除根系(拣出的根系清洗干净后与对应小区的根系样品合并),然后研磨,过 0.5 mm 筛后保存。

1.4 植物和土壤样品的分析与计算

植物和土壤样品全氮含量的测定采用半微量凯

表 2 试验地施肥前土壤特性
Table 2 Soil properties of experimental site before fertilization

土壤深度 Soil depth (cm)	pH 值 pH (in H ₂ O)	土壤容重 Dry bulk density (g·cm ⁻³)	土壤全氮 Total soil N (g·kg ⁻¹)	土壤全碳 Total soil C (g·kg ⁻¹)
0 ~ 10	7.79	1.30	1.12	18.86
10 ~ 20	7.72	1.29	0.91	16.21
20 ~ 40	7.84	1.32	0.73	13.21
40 ~ 60	7.83	1.33	0.76	12.77
60 ~ 100	7.81	1.34	0.31	5.66

氏定氮法。¹⁵N 丰度的用质谱仪测定。标记¹⁵N 在植物和凋落中的回收量、回收率以及土壤中的存留量和存留率根据样品的¹⁵N 丰度 按 Hauck 和 Bremner (1976) 的方法计算 , 有关公式如下 :

$$NA(g \cdot m^{-2}) = [N] (\%) \times W(g \cdot m^{-2}) \tag{1}$$

$$[^{15}N] (g \cdot m^{-2}) = NA \times A_{Sample} (\%) / A_{Fertilizer} (\%) \tag{2}$$

$$Ndf (\%) = A_{Plant} (\%) / A_{Fertilizer} (\%) \times 100 \tag{3}$$

$$Ndfs (\%) = 1 - Ndf (\%) \tag{4}$$

公式 (1) ~ (4) 中 , NA (Nitrogen amount) 表示样品氮素总量 ; [N] 表示样品的氮素百分含量 ; W (Weight) 表示样品干物质重量 [¹⁵N] 表示单位面积样品 (植物样品或土壤样品) 中 ¹⁵N 总量 ; A_{Sample} (Abundance of sample) 表示样品的 ¹⁵N 丰度 ; A_{Plant} (Abundance of plant sample) 表示植物样品的 ¹⁵N 丰度 ; A_{Fertilizer} (Abundance of fertilizer) 表示用于标记的氮素肥料的 ¹⁵N 丰度。Ndf (Nitrogen derive from fertilizer) 表示植物吸收的氮素来源于肥料的比例 ; Ndfs (Nitrogen derive from soil) 表示植物吸收的氮素来源于土壤的比例。

$$^{15}N R_{Plant} (\%) = [^{15}N]_{Plant} (g \cdot m^{-2}) / [^{15}N]_{Fertilizer} (g \cdot m^{-2}) \times 100 \tag{5}$$

$$^{15}N R_{Litter} (\%) = [^{15}N]_{Litter} (g \cdot m^{-2}) / [^{15}N]_{Fertilizer} (g \cdot m^{-2}) \times 100 \tag{6}$$

$$^{15}N R_{Soil} (\%) = [^{15}N]_{Soil} (g \cdot m^{-2}) / [^{15}N]_{Fertilizer} (g \cdot m^{-2}) \times 100 \tag{7}$$

$$^{15}N Loss (\%) = 1 - ^{15}N R_{Plant} (\%) - ^{15}N R_{Litter} (\%) - ^{15}N R_{Soil} (\%) \tag{8}$$

公式 (5) ~ (8) 中 , ¹⁵N R_{Plant} (¹⁵N Recovery by plant) 表示植物对标记 ¹⁵N 的回收率 ; ¹⁵N R_{Litter} (¹⁵N Recovery by litter) 表示凋落物对标记 ¹⁵N 的回收率 ; ¹⁵N R_{Soil} (¹⁵N Retention in soil) 表示标记 ¹⁵N 在土壤中的存留率 ; ¹⁵N Loss (¹⁵N Losses) 表示标记 ¹⁵N 的损失率 [¹⁵N]_{Plant} 表示单位面积植物样品 ¹⁵N 总量 ; [¹⁵N]_{Litter} 表示单位面积凋落物样品 ¹⁵N 总量 [¹⁵N]_{soil}

表示单位面积土壤样品 (不同土层) ¹⁵N 总量 ; [¹⁵N]_{Fertilizer} 表示单位面积标记肥料中 ¹⁵N 总量。

1.5 数据的处理与统计分析

采用 SAS 软件进行单因素方差分析 (ANOVA) , 用邓肯多重比较 (Duncan ' s mutiple-range test) 检验在方差分析中有显著差异的变量间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 羊草群落植物对标记氮素的回收

植物体是氮素的主要贮存库之一。由图 1 可以看出 , 氮素添加后 , 被植物回收的 ¹⁵N 占标记氮素 25.33% ~ 38.65% , 表明在我国典型草原羊草群落 , 氮素肥料的当季利用率不足 40%。植物的 ¹⁵N 回收率对氮素梯度的响应表现为单峰曲线。在 5.25 ~ 17.5 g N·m⁻² 范围内 , 随着氮素添加量的增加 , 标记氮素的植物回收率显著增加 (p < 0.05) , 添加 17.5 g N·m⁻² 的处理 , 植物对标记氮素的回收率最高 ; 当氮素添加量增加至 28 g N·m⁻² 时 , 植物对标记氮素的回收率又显著降低 (p < 0.05) 。说明氮素添加对羊草群落植物对氮素的吸收具有显著的调控效果 , 但

图 1 羊草群落¹⁵N 标记肥料的植物回收率
Fig.1 Recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer by plants of *Leymus chinensis* community
图中具有相同字母的柱间差异不显著 (p = 0.05)
The bars share the same letters are not different at p = 0.05

是当氮素添加量超过一定阈值时,这种调控作用的效果会显著降低。

为了进一步了解标记氮素在植物汇中的分布情况,考虑到羊草草原地下生物量是地上生物量的4倍左右(姜恕等,1985),我们按地上和地下两部分分析了羊草群落植物对氮素的回收(表3)。差异显著性分析表明,地下器官和地上器官对标记氮素的回收量和回收率差异均不显著($p > 0.05$),说明植物吸收的氮素平均分配到了植物的地下和地上器官中。氮素添加对羊草群落地上和地下器官对氮素的回收均有显著影响。从回收量看,地上和地下器官对标记氮素的回收量均随氮素梯度增加而显著提高($p < 0.05$);从回收率看,在 $5.25 \sim 17.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的范围内,地上和地下器官对标记氮素的回收率均随氮素梯度增加而显著提高($p < 0.05$),但是,添加 $28 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的处理,显著低于 $17.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的处理。由此可见,尽管羊草草原地下生物量是地上生物量的4倍左右,但是肥料氮素的分配并不与器官的生物量成比例,而是平均的分配到了地下和地上器官中,这可能与氮素是可再利用元素,优先供应旺盛生长的器官或组织有关。

2.2 羊草群落凋落物对标记氮素的回收

由表4可以看出,羊草群落凋落物对标记氮素的回收率在 $2.58\% \sim 3.16\%$,表明,标记氮素当季通过凋落进入土壤有机氮汇的量很低。地下凋落物的标记氮素回收量和回收率均显著高于地上凋落物($p < 0.05$)。随着氮素添加量的增加,羊草群落地上

和地下凋落物对标记氮素的回收量均显著提高($p < 0.05$)。但是地上和地下凋落物对标记氮素的回收率,处理之间差异不显著($p > 0.05$)。表明氮素添加可以增加通过凋落物进入土壤氮汇的量,但是,氮素梯度对凋落物的氮素回收率无显著作用。

2.3 羊草群落标记氮素在土壤中的存留

图2示出,经过一个生长季后,存留在土壤中的 ^{15}N 占添加的标记氮素的 $32.28\% \sim 41.29\%$ 。添加氮素的处理之间,添加 $5.25 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的处理显著高于其它3个处理($p < 0.05$),添加 $10.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $17.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $28 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的3个处理差异不显著。

土壤中的标记氮素主要存留在 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 土层中,占土壤中标记氮素总量的 $85.82\% \sim 94.31\%$, $40 \sim 100 \text{ cm}$ 的土层的标记氮素仅占 $5.69\% \sim 14.18\%$ (表5)。从存留量看,随着氮素添加量的增加,标记氮素的在各土层的氮素存留量均显著增加($p < 0.05$)。但是从存留率看, $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层的氮素存留率随着氮素添加量的增加显著增加($p < 0.05$)。10~20 cm土层的氮素存留率,在 $5.25 \sim 17.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,随着氮素添加量的增加而显著提高($p < 0.05$),但是添加 $17.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的处理与 $28 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 处理间差异不显著($p > 0.05$)。20~40 cm土层的氮素存留率在 $10.5 \sim 28 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,随着氮素添加量的增加而显著提高($p < 0.05$),但是添加 $5.25 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的处理与 $10.5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ 处理差异不显著($p > 0.05$)。40~60 cm土层的氮素存留率,随着氮素添

表3 羊草群落地上和地下植物器官对标记氮素的回收
Table 3 Recovery of ^{15}N -labelled nitrogen by aboveground and belowground organs of *Leymus chinensis* community

氮素梯度 Nitrogen rate ($\text{g N} \cdot \text{m}^{-2}$)	^{15}N 回收量 ^{15}N recovery amount ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)		^{15}N 回收率 ^{15}N recovery (%)	
	地下器官	地上器官	地下器官	地上器官
	Belowground organs	Aboveground organs	Belowground organs	Aboveground organs
5.25	0.59 ^d	0.68 ^d	11.29 ^d	12.86 ^c
10.50	1.90 ^c	1.70 ^c	18.14 ^b	16.21 ^b
17.50	3.70 ^b	3.06 ^b	21.13 ^a	17.49 ^a
28.00	4.40 ^a	3.47 ^a	15.72 ^c	12.38 ^c

同一列中,字母相同者差异不显著($p = 0.05$) Data with same letters are not significant difference at $p = 0.05$ in the same column

表4 羊草群落凋落物对标记氮素的回收
Table 4 Recovery of ^{15}N -labelled nitrogen by aboveground and belowground litters of *Leymus chinensis* community

氮素梯度 Nitrogen rate ($\text{g N} \cdot \text{m}^{-2}$)	^{15}N 回收量 ^{15}N recovery amount ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)			^{15}N 回收率 ^{15}N recovery (%)		
	地上器官	地下器官	合计	地上器官	地下器官	合计
	Aboveground organs	Belowground organs	Total	Aboveground organs	Belowground organs	Total
5.25	44.12 ^d	91.34 ^d	135.46 ^d	0.84	1.74	2.58
10.50	110.24 ^c	221.57 ^c	331.81 ^c	1.05	2.11	3.16
17.50	173.24 ^b	332.53 ^b	505.77 ^b	0.99	1.90	2.89
28.00	246.43 ^a	601.97 ^a	848.40 ^a	0.88	2.15	3.03

a, b, c, d 同表3 See Table 3

表 5 标记氮素在羊草群落不同土层中的存留
Table 5 Retention of ¹⁵N-labelled fertilizer in different soil layer of *Leymus chinensis* community

氮素梯度 Nitrogen rate (g N·m ⁻²)	¹⁵ N 存留量 ¹⁵ N retention amount (g·m ⁻²)				¹⁵ N 存留率 ¹⁵ N retention (%)			
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 100 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 100 cm
5.25	0.48 ^d	0.46 ^d	0.51 ^d	0.24 ^d	9.24 ^d	8.85 ^c	9.62 ^c	4.58 ^a
10.50	1.23 ^c	1.03 ^c	0.95 ^c	0.45 ^c	11.74 ^c	9.83 ^b	9.02 ^c	4.26 ^b
17.50	2.15 ^b	1.90 ^b	1.78 ^b	0.56 ^b	12.27 ^b	10.84 ^a	10.18 ^b	3.22 ^c
28.00	4.10 ^a	2.94 ^a	3.86 ^a	0.66 ^a	14.64 ^a	10.51 ^a	13.79 ^a	2.35 ^d

a , b , c , d 同表 3 See Table 3

图 2 羊草群落¹⁵N 标记肥料的土壤存留率

Fig. 2 Retention of ¹⁵N-labelled fertilizer by soil
图中具有相同字母的柱体间差异不显著 ($p = 0.05$)
The bars share the same letters are not different at $p = 0.05$

图 3 羊草群落¹⁵N 标记肥料的损失率

Fig. 3 Losses of ¹⁵N-labelled fertilizer applied
to *Leymus chinensis* community

图中具有相同字母的柱体间差异不显著 ($p = 0.05$)
The bars share the same letters are not significant difference at $p = 0.05$

加量的增加显著降低 ($p < 0.05$)。这表明, 进入土壤汇的标记肥料氮素主要存留在 0~40 cm 的土层内。尽管氮素添加可以显著增加各土层的标记氮素存留量,但是对各土层标记氮素的存留率影响不一。

2.4 羊草群落标记氮素的损失

图 3 显示,羊草群落标记氮素的损失率在 21.77%~43.38%。在 5.25~17.5 g N·m⁻² 的氮素添加范围内,随着氮素添加量的增加,标记氮素的损

失率显著降低 ($p < 0.05$) ;添加 17.5 g N·m⁻² 的处理,标记氮素的损失率最低,氮素添加量增加至 28 g N·m⁻² 时,标记氮素的损失率又显著增加 ($p < 0.05$)。本试验条件下,以 28 g N·m⁻² 的处理氮素肥料的损失率最高。

3 讨 论

草原生态系统的生产力在很大程度上受到氮素的制约,而放牧场损失的氮素(如氨气和氮氧化合物)对环境 and 人类的健康又有很大影响,因此草原生态系统的氮素循环自 20 世纪 70 年代以来日趋得到重视 (Steele & Vallis, 1987)。我国科学家在农业生态系统的氮素研究中做了大量工作,而对草原生态系统缺少系统的研究,特别是对氮素循环的通量和过程的研究迄今还是空白 (陈佐忠等, 2000)。根据本试验结果,植物对标记氮素的回收率仅为 25.33%~38.65% (图 1)。说明在中国典型草原羊草群落,植物在当季对肥料氮素的回收率很低。这也进一步证实 Clark (1977) 提出的“植物是标记氮素最主要的汇”的结论值得商榷。本试验还表明,植物对肥料氮素的吸收显著地受到氮素梯度的影响 (图 1),说明人类可以通过对草原生态系统的管理而调控氮素循环过程。值得一提的是,被植物回收的氮素的分配并不与生物量的分配成比例,而是近似平均地分配到了地下和地上器官中 (表 3),暗示氮素添加对地上生物量的影响可能要大于对地下的影响。

关于草原生态系统肥料氮素在土壤中的存留,前人已有较多研究 (Schimel *et al.*, 1986; Delgado *et al.*, 1996; Epstein *et al.*, 2001),但研究结果存在较大差异 (28.3%~85.0%)。本试验中,肥料氮素在土壤中的存留率为 32.28%~41.29% (图 2)。说明在我国典型草原施用的氮素肥料经过一个生长季后,有超过 1/3 的肥料氮素被保存在土壤中。而且,进入土壤中的标记氮素主要在地表至 40 cm 的土层范围内 (> 95% (表 5)),与羊草群落根系 (姜恕等, 1985) 的分布范围相一致。这对于改善目前我国草

表 6 羊草群落植物对不同来源氮素的吸收
Table 6 Absorbed N from different sources by plants of *Leymus chinensis* community

氮素梯度 Nitrogen rate (g N·m ⁻²)	吸收氮素总量 N uptake amount (g·m ⁻²)	来源于肥料的氮素 N derived from fertilizer		来源于土壤的氮素 N derived from soil	
		g·m ⁻²	(%)	g·m ⁻²	(%)
ck	16.251 ^e			16.25 ^d	100 ^a
0	16.83 ^e			16.83 ^d	100 ^a
5.25	18.68 ^d	1.27 ^d	6.80 ^d	17.41 ^d	93.20 ^b
10.5	25.11 ^c	3.60 ^e	14.34 ^e	21.51 ^e	85.66 ^c
17.5	29.11 ^b	6.76 ^b	24.22 ^a	22.35 ^b	76.78 ^e
28	38.79 ^a	7.87 ^a	20.29 ^b	30.92 ^a	79.71 ^d

同一列中,字母相同者差异不显著($p=0.05$) Data with same letters are not significant difference at $p=0.05$ in the same column

原生态系统氮素亏缺(关世英等,1997)的状况,促进当季和下一个生长季草地生产力的提高具有重要意义。

导致标记肥料氮素从植物-土壤系统的损失主要包括硝酸盐淋溶、氨挥发和微生物反硝化作用。本试验表明,我国典型草原羊草群落当季的标记肥料损失率为 21.77% ~ 43.38%(图 3)。按照 Cookson 等(2001)的方法,把“标记肥料氮素损失量/植物氮素回收量”定义为氮素标记肥料的“风险/收益比(Risk/benefit)”,本试验的 4 个添加氮素处理的风险/收益比依次为:1.32(N5.25),0.85(N10.5),0.69(N17.5),1.41(N28),平均值为 1.06。这一结果显著高于 Cookson 等(2001)以多年生结实黑麦草(*Lolium perenne*)为材料,在新西兰的坎特伯雷的试验结果(平均值 0.54)。表明我国典型草原羊草群落的氮肥施用风险较大。添加 5.25 g N·m⁻²和 28 g N·m⁻²的处理的 Risk/benefit 比均超过 1,表明其风险大于收益。添加 17.5 g N·m⁻²的处理 Risk/benefit 比最低,在草原生态系统的管理中可以参考。

在非同位素示踪的氮肥回收率的研究中,植物对肥料氮素的回收率一般根据施肥处理与对照(未施肥处理)的氮素吸收量的差值估算(Appel,1994; Blankenau & Kuhlmann,2000),这种差值法的前提是假设未施肥处理的植物与施肥处理的植物吸收了相同的土壤氮素。Blankenau 等(2000)对盆栽条件下冬小麦对氮素的回收率进行了研究,认为差值法和示踪法的结果无显著差异。本试验中,我们对植物所吸收的氮素的来源也进行了分析(表 6),发现在典型草原羊草群落添加氮素不仅促进了植物对肥料氮素的吸收,同时也显著促进了植物对土壤氮素的吸收。与对照(未施氮素处理)相比较,氮素添加的处理,羊草群落植物吸收土壤氮素的量显著增加。因此差值法就会夸大植物对标记肥料氮素的回收率。

所以,在草原生态系统氮素平衡的研究中,为了真正反映植物对不同来源氮素的吸收和利用情况,采取示踪法更为合理和有效。

参 考 文 献

Appel, T. 1994. Relevance of soil N mineralization, total N demand of crops and efficiency of applied N for fertilizer recommendations for cereals-theory and application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **157**:407 ~ 414.

Blankenau, K, H. Kuhlmann & H. W. Olf. 2000. Effects of increasing rates of ¹⁵N-labelled fertilizer on recovery of fertilizer N in plant and soil pools in a pot experiment with winter wheat. *Journal of plant Nutrition and Soil Science*, **163**:475 ~ 480.

Blankenau, K. & H. Kuhlmann. 2000. Effects of N supply on apparent recovery of fertilizer N as crop N and N_{min} in soil during and after cultivation of winter cereals. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **163**:91 ~ 100.

Chen, Z. Z. (陈佐忠), X. W. Sheng (盛修武), Z. G. Yang (杨宗贵) & D. H. Huang (黄德华). 1985. The Ecological effects of fertilization during rainy season on various types of steppe on the Xilin river valley. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences (中国科学院内蒙古草原生态系统研究站) ed. *Research on grassland ecosystem* (NO. 1). Beijing: Science Press. 225 ~ 232. (in Chinese with English abstract)

Chen, Z. Z. (陈佐忠) & S. P. Wang (汪诗平). 2000. Typical steppe ecosystem in China. Beijing: Science Press. 228 ~ 246. (in Chinese)

Clark, F. E. 1977. Internal cycling of ¹⁵ Nitrogen in shortgrass prairie. *Ecology*, **58**:1322 ~ 1333.

Cookson, W. R., J. S. Rowarth, & K. C. Cameron. 2001. The fate of autumn-, late winter- and spring-applied nitrogen fertilizer in a perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) seed crop on a silt loam soil in Canterbury, New Zealand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **84**:67 ~ 77.

Delgado, J., A. Mosier, D. Valentine, D. S. Schimel & W. J. Parton. 1996. Long term ¹⁵N studies in a catena of the shortgrass steppe. *Biogeochemistry*, **32**:41 ~ 52.

Epstein, H. E., I. C. Burke & A. R. Mosier. 2001. Plant effects on nitrogen retention in shortgrass steppe 2 years after ¹⁵N addition. *Oecologia*, **128**:422 ~ 430.

Guan, S. Y. (关世英), J. B. Chang (常金宝), S. H. Jia (贾树海), S. L. Li (李绍良), Y. J. Chen (陈有君) & Y. F. Wang (王玉芬). 1997. The properties of soil and its change regularities in the degraded succession of dark chestnut in *Leymus chinensis* steppe. *Grassland of China (中国草地)*, (3):39 ~ 43. (in Chinese with English abstract)

Harrison, A. F., K. Taylor, J. C. Hatton & D. M. Howard. 1994. Role of nitrogen in herbage production by *Agrostis-festuca* hill grassland. *Journal of Applied Ecology*, **31**:351 ~ 360.

Hauck, R. D. & J. M. Bremner. 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Advance in Agronomy*, **28**: 219 ~ 266.

Jiang, S. (姜恕), Q. H. Qi (戚秋慧) & D. Z. Kong (孔德珍). 1985. A comparative study on production of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* steppe communities at baiinsile livestock farm in Inner Mongolia region. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem station, Chinese Academy of Sciences (中国科学院内蒙古草原生态系统研究站) ed. *Research on grassland ecosystem* (No. 1). Beijing: Science Press. 12 ~ 23. (in Chinese with English abstract)

Schimel, D. S., W. J. Parton, F. J. Adamsen, R. G. Woodmansee, R. L. Senft & M. A. Stillwell. 1986. The role of cattle in the volatile loss of N from a shortgrass steppe. *Biogeochemistry*, **2**:39 ~ 52.

Steele, K. W. & I. Vallis. 1987. The nitrogen cycle in pastures. In: Wilson J. R. ed. *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems*. Oxon: C. A. B International Press. 274 ~ 291.

Tilman, D. & D. Wedin. 1991. Plant traits and resource reduction for five grasses growing on a nitrogen gradient. *Ecology*, **72**:685 ~ 700.

责任编辑：杨允菲 责任编辑：姜联合