

羊草草地土壤氮的总矿化、硝化和无机氮 消耗速率研究

李玉中¹, 祝廷成², Redmann R E³

(¹ 中国农业科学院农业气象研究所,北京 100081; ² 东北师范大学草地研究所,长春 130024;

³ Department of Crop Science and Plant Ecology, University of Saskatchewan, Canada)

摘要: 采用管式取样法和¹⁵N库稀释技术研究了东北羊草草地土壤氮总矿化、硝化速率的季节动态,将其与土壤主要环境因子进行相关分析。结果表明,羊草草地土壤总矿化速率在4~7月呈增加的趋势,7月份达到最高(以干土计,下同,值为 $36.35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),7月份以后矿化速率降低,7、8月份土壤中铵态氮的消耗速率大于氮的矿化速率;总硝化速率随土壤水分及硝化基质含量的变化而变化,波动性很大,硝化速率最高值出现在8月份($46 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),硝态氮含量的变化趋势与总硝化速率的变化趋势相类似。

关键词: 羊草; ¹⁵N库稀释技术; 铵态氮; 硝态氮

A Study on Soil Nitrogen Mineralization, Nitrification and Mineral Nitrogen Consumption Rates of Soil in *Leymus chinensis* Grasslands

LI Yu-zhong¹, ZHU Ting-cheng², Redmann R E³

(¹ Agro meteorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

Grassland Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024; ³ Department of

Crop Sciences and Plant Ecology, University of Saskatchewan, Canada)

Abstract: ¹⁵N isotopic pool dilution in intact soil core method was used to study soil nitrogen gross mineralization, nitrification rates in northeast *Leymus chinensis* grasslands. Results indicated that gross rates of N mineralization are increasing from April to July, and reach the maximum peak value in July, the value is $36.35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ soil $\cdot\text{d}^{-1}$, but the rate declines after July, and the consumption rates of NH_4^+ -N are higher than soil N mineralization rates from July to August. Gross rates of N nitrification fluctuate greatly with soil moisture and basic medium, the peak of gross nitrification rate appears in August, it is $46 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ soil $\cdot\text{d}^{-1}$. The intact soil core methods was adopted to study soil nitrogen net mineralization, nitrification rates. The net rate of soil mineralization and nitrification is $31.1 \text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ for 0-10 cm soil of the grassland.

Key words: *Leymus chinensis*; ¹⁵N pool dilution; NH_4^+ -N; NO_3^- -N

土壤氮主要来源于土壤有机物质,而土壤中可利用的氮主要来自微生物对土壤有机氮的矿化和硝化作用^[1]。有机氮的矿化和硝化速率是土壤供氮能力的一个重要指标。由于土壤温度、湿度等因子

在不同季节差异很大,由土壤微生物的活动所引起氮矿化与硝化强度的季节变化也较大,了解这些变化规律对于合理管理草地具有十分重要的意义。由于技术限制,目前在该领域的研究主要还是局限于

收稿日期:2001-12-11

基金项目:国家自然科学基金国际合作资助项目(9389009-1)

作者简介:李玉中(1964-),男,内蒙古赤峰人,副研究员,博士,主要从事生态学研究。Tel:010-68919399; Fax:010-62119557; E-mail:liyuz@nami.ac.cn

N 的净矿化与硝化作用,对土壤中短时间内发生的总矿化与硝化作用的研究很少^[2],关于净矿化与硝化的研究方法主要有埋袋法、柱型取样法、模型法等,其中柱型取样法由于对土壤的扰动较小,是净矿化与硝化研究比较理想的方法^[3]。在土壤氮总矿化、硝化研究方面,Davidson^[4]等在前人工作基础上,对¹⁵N 库稀释技术进行了改进,并利用该技术测定和比较了草地与森林土壤的总矿化、总硝化和氮的固定等过程的速率^[2,4]。改进后的技术对土壤的扰动小,能对转化速率直接测定。一些研究人员采用¹⁵N 技术还研究了草地上不同土层深度氮转化的差异,土壤中根系生物量和不同的施肥管理对氮转化速率的影响^[5~7]。本文采用该技术研究了东北羊草草地氮总矿化、硝化、无机氮消耗等的速率。

1 材料与方法

试验在 1995 年 4~10 月进行。研究样地位于松嫩平原的羊草草地保护区内,草地植被以羊草 (*Leymus chinensis*) 为单优势种群落。

N 的矿化和硝化研究方法可分为:针对净矿化和硝化 (net mineralization and nitrification); 针对总矿化和硝化 (gross mineralization and nitrification)。本研究采用 Davidson^[4]等改进的¹⁵N 库稀释技术研究土壤氮总矿化、硝化速率。其主要原理是:利用对土壤扰动较小的管式取样法,向管内土壤分别注入¹⁵NH₄⁺和¹⁵NO₃⁻,通过丰度的变化测定氮在土壤中的转化速率。具体操作过程如下:

4~10 月的每月中旬在羊草草地保护区典型地段每隔 50 m 设一取样点,在每个取样点上将内径为 4 cm、高 10 cm 的柱形镀锌铁管打入土壤内,将另一直径为 8 cm、高 10 cm 的柱形取样器以同心圆的形式套在前一个内径为 4 cm 的取样器周围压入土壤,两个取样器同时取出,将两个取样器之间的土壤取出并放在塑料袋内混匀;一部分土壤立即用 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 提取(比例为 30g 干土对 150 ml KCl 溶液),剩余的土壤用作测定土壤含水量(105℃, 24h 烘干)。内径 4 cm 的土壤取样器与其内的土壤一起取出,上部盖好盖子封死,倒置,将丰度为 95%浓度为¹⁵N 80 μg·ml⁻¹的(¹⁵NH₄)₂SO₄或 K¹⁵N O₃分数次、按每克土 2 μg N 的比例均匀注入取样器内的土壤内,然后将底部的盖子盖好,竖过来,放在原取样处培养 24 h 取出,将取样器内的土壤取出,混匀,以 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 提取,用 Whatman 1 号滤纸过滤。取滤液 40 ml,用蒸馏法测定滤

液内铵态氮或硝态氮的含量;馏出液经酸化处理、浓缩,采用凯氏杜马法制样,利用 N150 型¹⁵N 光谱仪进行分析。氮的总矿化速率和硝化速率按下式计算:

$$m = \frac{M_0 - M_1}{t} \times \frac{\log(H_0 M_1 / H_1 M_0)}{\log(M_0 / M_1)}$$

$$c = \frac{M_0 - M_1}{t} \times \frac{\log(H_0 / H_1)}{\log(M_0 / M_1)}$$

此公式是 Kirkham 和 Bartholomew^[8]得出的,其中 M₀:¹⁴⁺¹⁵N 初始的库浓度(N μg·g⁻¹干土); M₁:¹⁴⁺¹⁵N 培养后库浓度(N μg·g⁻¹干土); H₀:¹⁵N 初始的库浓度(N μg·g⁻¹干土),以注入的¹⁵N 与干土比计算,大气中¹⁵N 的天然丰度为 0.3663%,生物圈中不同组分在此值的 1%~2% 范围内变动,由于注入的是丰度高达 95% 的同位素,所以计算初始库时可以忽略土壤中的¹⁵N 天然丰度; H₁:¹⁵N 培养后的库浓度(N μg·g⁻¹干土); m:矿化速率(N μg·g⁻¹干土·d⁻¹); c:N 消耗速率(N μg·g⁻¹干土·d⁻¹); t:培养时间(此处为 1); 注入同位素¹⁵NH₄⁺的 NH₄⁻ 库用 M 和 H 表示,如注入的是¹⁵NO₃⁻, NO₃⁻ 库浓度也用 M 和 H 表示,但式中的 m 要换成 n,以表示硝化速率。本实验样本重复数为 3。

2 结果与分析

2.1 羊草草地保护区内土壤氮的总矿化、硝化和无机氮的消耗速率

利用同位素¹⁵N 研究草地土壤氮的转化过程,首先要准确地测定土壤库中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度,测定的土壤应与所注入同位素的土壤位置尽量接近,以减少误差。保护区土壤库中 4~9 月份 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度见表 1 和表 2。从表 1 和表 2 可看出,这两种形态的氮波动性较大。因注入土壤中的无机氮会影响微生物对氮的转化,利用¹⁵N 库稀释技术应加入的同位素量尽可能少,以防止由于增加土壤库中的无机氮含量影响 N 转化的其它反应过程。所以本研究中尽量保证所注入同位素量在 2 μg N·g⁻¹干土左右(表 1 和表 2)。

表 1 中的数据表明,¹⁵N 的回收率受土壤微生物活动的影响变幅较大。N 的总矿化速率 4~7 月份逐渐升高,7 月最高(36.35 μg N·g⁻¹干土),8 月大幅度下降。这种变化与温度、降水、土壤湿度和土壤可矿化有机氮量有密切关系。4~7 月温度逐渐升高,7 月降水量与土壤湿度都大,积累的易矿化有机氮被迅速矿化,进入 8 月份,由于土壤长期过湿,通气性差,不利于氮的矿化作用。在好气条件下的

表 1 羊草草地保护区土壤氮总矿化速率的季节动态

Table 1 Gross nitrogen mineralization dynamics of soil in *Leymus chinensis* grassland

		4 月 Apr.	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sep.
土壤库 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		5.00	2.40	6.60	11.70	3.00	1.10
Ambient soil pool $\text{NH}_4^+ - \text{N}$							
注入 $^{14+15}\text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		1.32	3.15	2.09	2.73	2.46	2.28
$^{14+15}\text{N}$ injected							
初始库 $^{14+15}\text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	M_0	6.32	5.55	8.69	14.43	5.46	3.38
Initial $^{14+15}\text{N}$ pool							
初始库 ^{15}N ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	H_0	1.30	3.11	2.07	2.70	2.42	2.25
Initial ^{15}N pool							
终止库 $^{14+15}\text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	M_1	7.10	3.90	8.80	8.20	3.50	3.70
Final $^{14+15}\text{N}$ pool							
终止库 ^{15}N ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	H_1	0.10	0.06	0.24	0.06	0.07	0.03
Final ^{15}N pool							
氮总矿化速率 ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	M	18.01	18.61	20.89	36.35	13.48	15.60
Mineralization rate							
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 消耗速率 ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	C	17.23	20.40	20.77	42.78	15.43	15.28
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ consumption rate							

表 2 羊草草地保护区土壤氮总硝化速率的季节动态

Table 2 Gross nitrogen nitrification dynamics of soil in *Leymus chinensis* grassland

		4 月 Apr.	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sep.
土壤库 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		2.00	7.10	3.40	4.90	27.00	3.90
Ambient soil pool $\text{NO}_3^- - \text{N}$							
注入 $^{14+15}\text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)		1.18	3.10	2.09	2.73	2.46	2.28
$^{14+15}\text{N}$ injected							
初始库 $^{14+15}\text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	M_0	3.18	10.20	5.49	7.63	29.46	6.18
Initial $^{14+15}\text{N}$ pool							
初始库 ^{15}N ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	H_0	1.17	3.09	2.08	2.92	2.45	2.27
Initial ^{15}N pool							
终止库 $^{14+15}\text{N}$ ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	M_1	4.10	10.00	9.60	6.40	43.00	14.30
Final $^{14+15}\text{N}$ pool							
终止库 ^{15}N ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	H_1	0.08	0.37	0.35	0.16	0.99	0.29
Final ^{15}N pool							
总硝化速率 ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	N	10.62	23.2	19.17	18.61	46.00	27.98
Gross nitrification rate							
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 消耗速率 ($\text{N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	C	9.70	23.42	14.61	19.84	32.46	19.86
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ consumption rate							

矿化速率比嫌气条件下高^[9],同时,在前几个月易矿化的成分很多已被矿化,可矿化物质减少,因而 N 矿化速率下降。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的消耗包括土壤的胶体吸附、被粘粒矿物晶格固定、微生物同化、植物吸收、自养硝化细菌硝化、挥发等。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的消耗趋势与 N 矿化趋势相同,不同的是其消耗速率在 7 月份大于矿化速率。这与本月氮的干湿混合沉降、环境条件、土壤微生物的活动等有关。夏季是东北羊草草地干湿混合沉降氮向草地生态系统输入量最大的季节,输入的氮以无机氮为主。氮的矿化与微生物同化之间的关系与草地土壤的 C/N 比密切相关。

笔者的相关研究表明,羊草草地的 C/N 比为 21.6,在 C/N 比为 20:1 ~ 30:1 时,有机氮的矿化作用和微生物同化作用大体相等^[10]。7 月份由于植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的大量吸收、反硝化作用以及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 挥发损失量的增加,致使氮的消耗量大幅度升高。

从总的趋势来看,4~8 月的总硝化速率是增加的(表 2),5 月和 8 月的值较高,这与 4 月和 7 月土壤中硝化作用的基质 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高有密切关系。6 月份的硝化作用速率最低,与 6 月份土壤极端干燥有关,而硝化细菌只有在湿润条件下活动才强烈。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的消耗包括微生物同化、植物的吸

收、反硝化作用等。 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的消耗趋势与总硝化速率趋势相类似,只是 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的消耗速率低于硝化速率。比较表1、表2的数据,可以发现硝化速率总的来说大于矿化速率,主要是由于硝化作用的基质除了来自矿化的 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 外,还有一部分来自大气干湿混合沉降中的 $\text{NH}_4^+ \text{N}$,部分可能来自土壤中的有机氮(异氧硝化)^[21]。同时还可看出, $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的峰值总是滞后于 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的峰值,即 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 值高月份的后1个月, $\text{NO}_3^- \text{N}$ 值也比较高,如4月份的 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 含量高,5月份 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的含量就比较高;7月份 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 值高,8月份 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的含量就比较高,此外,总硝化作用强度最高值的出现比总矿化作用最高值晚1个月。这既表明硝化作用主要是以 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 为基质的,也说明东北羊草草地土壤参与硝化作用的主要为自养型细菌。这些结果与东北羊草草地土壤理化性质,尤其是pH值有关,本研究的草地土壤pH值为8.6左右,硝化作用最适pH值范围在7.0~9.0之间,而矿化作用最适宜pH值为5左右。

2.2 土壤氮总矿化、硝化速率与环境因子之间关系

N总矿化速率和土壤 NH_4^+ 浓度相关,土壤的矿化速率较高时, $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的含量也高;硝化作用强度与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的含量也有类似的关系。

N的总矿化作用、总硝化作用以及无机氮的消耗速度与当月降水量、土壤水分含量、土壤温度、土壤中 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 之间的相关分析表明,N总矿化作用和硝化作用与当月土壤温度、土壤湿度和降水量呈正相关, $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的消耗分别与 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 含量呈正相关。

3 结论

1. 羊草草地土壤总矿化速率在4~7月呈增加趋势,7月份达到最高($36.35 \text{ N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),之后降低,7月份土壤中铵态氮的消耗速率大于氮的矿化速率,这与7月份植物和微生物对无机氮的旺盛吸收、干湿混合沉降以及氨挥发损失增加密切相关。

2. 土壤氮的总硝化速率随土壤水分及硝化基质的含量变化而变化,波动性很大,最高值出现在8月份($\text{N } 46 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),硝态氮的变化趋势与总硝化速率的变化趋势相类似,羊草草地土壤硝化速率较高,这与土壤pH值较高等因素有关。

3. 不能用总矿化速率估测净矿化速率,总矿化速率矿化的无机氮有很大一部分很快被微生物、植物吸收利用,转变为有机氮。根据笔者利用管型取样测定的结果,东北羊草草地0~10 cm氮净矿化量为 $31.1 \text{ kg N} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

4. 根据Davidson的研究,天然草地利用¹⁵N同位素库稀释技术测定总矿化、硝化速率时,由于注入的同位素在零时(刚注入时)会被一些未知的过程消耗掉,即存在着“零时效应”,在天然草地测定的总矿化、硝化速率的结果比实际要高。但作为季节动态或用来比较不同处理过程土壤内部氮转化的规律,有一定意义。

References

- [1] Donahue R L, Miller R W, Shickluna J C. Soil: An introduction to soil and plant growth. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 1983: 216 - 221.
- [2] Davidson E A, Hart, Firestone M K. Internal cycling of nitrate in soils of a mature coniferous forest. *Ecology*. 1992, 73: 148 - 156.
- [3] Adams M A, Attiwill P M. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forests of southeastern Australia. II. Indices of nitrogen mineralization. *Plant and Soil*. 1986, 92: 341 - 362.
- [4] Davidson E A, Hart S C, Shanks C A, Firestone M K. Measuring gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification by ¹⁵N isotopic pool dilution in intact soil cores. *Journal of Soil Science*. 1991, 42: 335 - 349.
- [5] Abbasi M K, Zahir Shah, Adams W A. Mineralization and nitrification potentials of grassland soil at shallow depth during laboratory incubation. *Journal Plant Nutrient and Soil Sciences*. 2001, 164(5): 497 - 502.
- [6] Whalen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Short-term transformation in bulk and root-associated soil under ryegrass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(14): 1937 - 1945.
- [7] Hatch D J, Jarvis S C, Parkinson R J, Lovell R D. Combining field incubation with nitrogen-15 labeling to examine nitrogen transformation in low to high intensity grassland management systems. *Biology and Fertility of Soil*. 2000, 30(5): 492 - 499.
- [8] Kirkham D, Bartholomew W V. Equations for following nutrient transformation in soil, utilizing tracer data. *Soil Science Society of America Proceedings*. 1954, 18: 33 - 34.
- [9] Zhu Z X. *Soil Science*. Beijing: Agricultural Press, 1983: 268 - 273. (in Chinese)
朱祖祥. 土壤学. 北京: 农业出版社, 1983: 268 - 273.
- [10] Tisdale S L, Nelson W L, Beaton J D. Soil fertility and fertilizers. Fourth edition, Micmillan Publishing Company, New York. 1985.