

下层土壤反硝化作用的研究

邹国元^{1,2}, 张福锁², 李新慧¹

(1 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100089; 2 中国农业大学植物营养系, 北京 100094)

摘要:在夏玉米生长期, 采用乙炔抑制-原状土柱培养方法研究了北京褐土下层(15~60cm)土壤的反硝化作用, 并探讨影响该层土壤反硝化作用的主要因素。试验结果表明, 施氮量越高, 反硝化量越大。随着土壤层次的加深, 反硝化量呈直线下降, 但在亚表层土壤(15~30cm)反硝化值仍保持了较高的量, 约相当于表层的 10.7%~33.5%; 下层土壤(15~60cm)的总反硝化量约相当于表层土壤的 14%~51%。加入碳源无论对表层土壤还是下层土壤, 其反硝化损失氮量大大增加, 尤其是对下层土壤增加的趋势更为明显。在计算夏玉米季土壤反硝化损失氮量时, 如果忽略下层土壤的反硝化作用, 肯定会低估其数值。

关键词:玉米; 褐土; 反硝化; 下层土壤

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2001)04-0379-06

我国农田土壤氮肥利用率偏低, 氮的损失量大是一个严重的问题^[1]。北京地区施肥量较高, 存在过量施氮问题, 如冬小麦/夏玉米轮作制下氮肥利用率仅为 25%~30%, 其中夏玉米生长季氮的利用率更低、氮肥损失严重^[2~5]。在过去的研究中发现, 夏玉米生长季氮的损失途径为淋洗、氨挥发和硝化-反硝化。通过差值法等技术手段初步明确硝化-反硝化作用在氮素总损失中占有重要的地位^[6]。但是直接测定该季表层土壤的反硝化损失结果仍明显低于差值法。究其原因, 除了测定方法本身存在偏差需要进一步改进之外, 另一个重要的因素可能是土壤亚表层至深层的反硝化损失未予考虑。

通常土壤表层被视为反硝化作用的最主要层次, 而下层土壤的反硝化作用是极为微弱的。不过在黄土高原和北京褐土上都发现了一个重要的现象, 即有大量淋洗到深层土壤的硝酸盐去向不明, 据推测极有可能发生了反硝化损失^[5,7]。北京夏玉米生长季具有雨热同季的特点^[8], 是一年中发生反硝化作用最有利的季节。根据以上情况, 本研究确定在北京褐土上以夏玉米生长季为突破口, 重点研究下层土壤的反硝化作用, 并探讨影响该层土壤反硝化作用的主要因素。在研究的基础上阐明下层土壤反硝化氮素损失的可能性及强度, 为精确定量氮肥的去向提供校正参数。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验布置于中国农业大学西校区科学园内。土壤类型为草甸褐土, 试验地土壤不同层次基本理化性状见表 1。

按北京地区肥力分级标准, 该试验地属于高肥力土壤。试验于 1999 年夏玉米生长季(6 月至 10 月)在

收稿日期: 2001-03-12

作者简介: 邹国元(1970—), 男, 浙江建德人, 所长助理, 助理研究员, 在职博士生, 主要从事施肥与环境研究。

表 1 试验地土壤的理化性状

Table 1 Physico-chemical properties of experiment soil

物理性状 Physical property			化学性状 Chemical property				
层次 Layer (cm)	质地 Texture	容重 Bulk density (g/cm ³)	层次 (cm) Layer	pH (H ₂ O)	有机质 OM (%)	全氮 Total N (%)	碱解氮 Alk. -hydro. N (mg/kg)
0~20	壤土	1.32	0~20	8.25	2.67	0.143	93.0
20~30	壤土	1.46	20~40	8.17	1.58	0.079	46.5
30~65	粘壤土	1.50	40~60	8.10	0.96	0.039	39.9

大田进行。该试验年份偏旱,夏玉米季总降雨为 194mm,相当于常年降雨的 43%。

试验设 3 个施氮水平,每季施氮量(N kg/hm²)分别为 0(N0)、120(N1)、360(N2)。1999 年 6 月 21 日免耕播种夏玉米,种植密度为 65000 株/hm²。氮肥的 1/2 在三叶期追施,1/2 在十叶期追施,磷、钾肥也在三叶期施入。小区重复 3 次。田间管理为:6 月 29 日喷灌 40mm,7 月 5 日三叶期施肥,先将肥料均匀撒入小区,然后混入 0~10cm 土层,7 月 29 日喷灌 60mm。十叶期追肥 8 月 5 日于雨前撒施。

试验于 7 月 30 日(三叶期追肥后 25 天)在不同施氮处理小区分 4 层(0~15cm、15~30cm、30~45cm、45~60cm)取土柱进行培养,测定反硝化损失氮量,同时测定土壤水分及无机氮含量。为了进一步研究影响下层土壤反硝化的因素,于 8 月 22 日(十叶期追肥后 17 天)在取 3 个施氮水平小区表层土壤(0~15cm)的同时,在 N2 小区分 4 层(0~15cm、15~30cm、30~45cm、45~60cm)取土柱进行培养。其中每个 0~15cm 及 45~60cm 土层土柱增设如下辅助处理:1)CK;2) + 10mL H₂O;3) + 5mL H₂O + 5mL 2% 葡萄糖;4) + 10mL 2% 葡萄糖。

1.2 测定方法

土壤反硝化测定采用乙炔抑制-原状土柱培养法。参照 Ryden^[9]方法,用直径(内径)为 4cm、长 17cm 管壁带眼的 PVC 管插入土中 15cm 取原状土柱。每个试验小区随机取土柱 3 个,放入密闭的培养罐中。培养罐体积为 2400mL。用经过处理的干净乙炔气体置换培养罐中的空气,使罐中乙炔气体体积比达到 10%。将培养罐放在试验地边上预先挖好的土坑中,覆土培养 24 小时后,用 50mL 注射器通过培养罐上的采样阀将罐内气体充分混匀,然后取气体约 12mL 放入预抽真空的气样瓶中,用 704 胶封口。将气样带回实验室上气相色谱仪分析 N₂O 含量,并计算反硝化速率。

2 结果与分析

2.1 不同土层反硝化作用损失氮量

玉米三叶期追肥后(7 月 30 日)不同施肥处理间土壤水分含量无差异,但不同土层间土壤含水量差异较大(图 1)。主要是随着土壤深度的加深,土壤孔隙含水量(WFPS)显著升高,达 58.0%~71.4%之间,处于反硝化作用所需的 WFPS 临界范围的低限^[10,11]。

土壤培养期间平均气温为 33.0℃,其中最低温度为 28.0℃、最高温度为 34.3℃,而 10cm 土温则为 26.3℃。土壤无机氮的

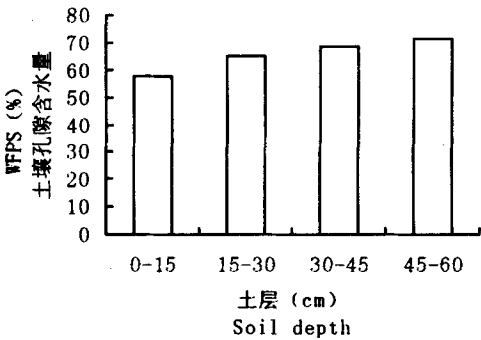


图 1 不同层次土壤孔隙含水量

Fig. 1 WFPS in different soil depth

状况为:铵态氮含量随施肥量的变化没有表现出较明显的规律性,同时在土壤不同层次间也没有多大的变化(表 2),均在较低的范围内变动。这可能是因为施肥后较短时间内(<25 天)绝大部分氮均已经硝化作用转化为硝态氮,而少部分的铵态氮含量则基本上是属于土壤吸附能力的固有性质。土壤硝态氮含量的变化则表现出较明显的规律性(表 2)。其中 0~60cm 土层中,N2 处理的硝态氮累积量显著高于 N0、N1 处理;而 N0 及 N1 处理由于作物吸收土壤剖面硝态氮含量相对较低,但总体来看,N1 处理还是高于 N0 处理。同时不难发现,施肥后的 25 天时间内已有大量的氮以硝态氮的形态向土壤较深层次运移(表 2),N1、N2 处理的 45~60cm 土层已积累了大量的硝态氮。从整个剖面来看,此时 0~60cm 各层土壤均有一定量的硝态氮源可供反硝化作用,特别是 N2 处理氮的累积量较大。

表 2 不同层次铵态氮、硝态氮含量及反硝化损失的氮量
Table 2 The $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in different soil depth and N losses by denitrification

项目 Item	N0			N1			N2		
	AN	NN	DN	AN	NN	DN	AN	NN	DN
0~15	0.31	4.01	79.07	0.10	5.21	293.56	10.09	10.21	471.29
15~30	0.45	5.03	23.11	3.32	3.31	29.56	0.36	6.05	157.91
30~45	0.40	2.19	14.55	0.49	8.22	8.72	0.19	18.91	16.01
45~60	0.07	1.52	2.61	0.96	9.14	3.85	0.38	45.45	11.57

Note: AN,NN means $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content, unit:mg/kg;DN means N losses by denitrification, unit:g/($\text{hm}^2\cdot\text{d}$), same as follows.

夏玉米三叶期追肥后 25 天土壤反硝化氮量仍保持较大速率(表 2)。在表层土壤可以明显地看到,不同施肥处理小区反硝化损失氮量差异极为显著。表现为施氮量越高,反硝化量越大。随着土壤层次的加深,反硝化量呈直线下降。但在亚表层土壤(15~30cm)反硝化值仍保持了较高的量,约相当于表层的 10.7%~33.5%;到较深层土壤(45~60cm)时反硝化量已降到 N 2.61~11.57 g/($\text{hm}^2\cdot\text{d}$)。根据该层土壤无机氮含量、水分状况等因素分析,推测影响反硝化作用的因素来源于有效碳供应的不足。如果将土壤分为表层(0~15cm)与下层(15~60cm)两部分来考虑反硝化损失状况,那么下层土壤的总反硝化量约相当于表层土壤的 14%~51%。由此可以发现在计算大田反硝化损失氮量时,仅仅考虑表层土壤是不够的。

2.2 影响下层土壤反硝化作用的因素

为了进一步研究影响下层土壤反硝化的因素,在 8 月 22 日(夏玉米十叶期追肥后 17 天)第二次采不同深度土柱测定反硝化氮量状况,并增设了相应的处理。培养当天的气温状况为:平均温度 24.3℃,其中最高气温 29.6℃,最低气温 20.0℃,而 10cm 土温为 23.4℃。此次试验发现了与上批试验基本相同的反硝化变化趋势。从表层土壤来看,此次试验期间由于温度相对较低,土壤含水量也略低,因而反硝化氮量也较低。但不同施氮处理的反硝化量随施氮量的增加仍表现出显著的增加趋势(表 3)。这与该层土壤硝态氮含量呈现较好地对应关系。

本次试验取 N2 处理不同层次土壤研究反硝化状况(表 4)同样发现,各层土壤铵态氮含

量较低,硝态氮含量均较高而处于适宜反硝化作用的范围。土壤孔隙水分含量(WFPS)随土壤深度增加有较大幅度的增加。基本情况与第一部分试验相当。土壤反硝化量随土壤深度增加基本呈降低趋势,但在 45~60cm 土层出现了一个相对较高值,可能是土壤空间变异的结果。

取 N2 处理研究下层土壤反硝化的影响因子,是基于考虑到该处理条件下土壤有足够的氮源供应。本试验主要考虑两个因素的影响,即水分与碳源的供应状况。研究结果表明(表 5),在该试验条件下,表层土壤(0~15cm)单纯加水后,对反硝化没有促进作用,而下层土壤(45~60cm)加水后反硝化作用有一定幅度的增长,可能原因需要进一步的分析,但是其增长量与加碳源后的效果相比则要低得多。说明水分并不是限制该期反硝化作用的主要因子。加入碳源(2%葡萄糖)无论对表层土壤还是下层土壤,其反硝化损失氮量大大增加,尤其是对下层土壤增加的趋势更为明显。因此从上述情况来看,在夏玉米生育期施肥后,氮源的供应往往比较充足,如果土壤有机碳供应充足,无论是表层土壤还是下层土壤反硝化损失氮量的潜力相当大。

3 讨论

在研究土壤反硝化损失氮量时,往往将表层土壤作为唯一的考虑因素。这可能是基于反硝化作用主要发生在表层土壤的原因。但实际情况并非完全如此^[12]。本试验研究表明,表层土壤确实是反硝化作用的主要土层,亚表层乃至下层土壤的反硝化作用较弱或极为微小。但是,如果忽略下层土壤的反硝化作用,在计算夏玉米季土壤反硝化损失氮量时,肯定会低估其数值。下层土壤相当于表层土壤 14%~51%的反硝化损失氮量是一个值得关注的问题。在实际操作中,要同时测定土壤表层和下层的反硝化损失目前还有较大的困难。首先,简便易行的下层土柱取样方法需要进一步的研究;其次关于下层土壤的培养条件当前还是不完善的。再者,由于反硝化作用主要是一个微生物过程,时空变异性很大,要精确定量反硝化损失量就需要连续监测土壤各层的反硝化损失状况,工作量很大同时对试验地的要求也很高。因此,在今后的反硝化研

表 3 不同施氮处理土壤反硝化损失氮量状况
Table 3 The nitrogen losses by denitrification from soil treated with different nitrogen rates

处理 Treat.	WFPS%	AN	NN	DN
N0	43.83	0.10	4.06	2.83
N1	47.44	0.10	12.02	22.93
N2	47.16	1.65	35.34	239.42

表 4 N2 处理不同土层反硝化损失氮量状况
Table 4 The nitrogen losses by denitrification from different soil depth in N2 treatment

土层 Layer (cm)	WFPS%	AN	NN	DN
0~15	47.16	1.65	35.34	239.42
15~30	55.72	1.23	7.57	35.97
30~45	60.77	1.42	10.45	9.44
45~60	61.97	0.10	16.87	32.42

表 5 不同处理对土壤反硝化损失氮量的影响
Table 5 The nitrogen losses by denitrification with/without addition of water or carbon source

土层 Layer (cm)	加水量 Added H ₂ O (mL)	加 2% 葡萄糖 Added glu. (mL)	反硝化氮量 DN g/(hm ² ·d)
0~15	0	0	239.4
	10	0	221.7
	5	5	2901.0
	0	10	385.2
45~60	0	0	32.4
	10	0	270.6
	5	5	1386.9
	0	10	2467.0

究中如果仅测土壤表层反硝化损失时,计算整个施氮后反硝化损失氮量中就要注意到数据的完整性问题,也许进行适当的校正是应该的。另一方面,研究合适的取样方法开展下层土壤至少是亚表层土壤的反硝化作用也很有必要。

无论是表层土壤还是下层土壤,如果碳源丰富,反硝化损失氮量是极为可观的。但事实上农田条件下很少有如此适宜的情况。下层土壤受表层耕作措施的影响究竟有多大,表层土壤溶液中的可溶碳是否会向下淋洗,淋洗的量有多少,这些因素对于下层土壤碳的供应有重要的意义,也就可能对反硝化作用产生重要的影响。有报道认为,农田栽培作物对表层土壤浸提液中有效碳的含量并无显著影响^[13],而作物残茬还田则可提高浸提液中的有机碳含量,这种效果在厌氧条件下更为显著。不过来源于作物残茬的水溶性有机碳在表层土壤降解得非常快,真正淋洗到下层土壤的量并不多,这可能是下层土壤的反硝化作用还是不强烈的原因^[14]。尽管如此,在秸秆还田或施用有机肥后加强土壤剖面反硝化作用的监测是必要的;土壤的干湿交替等过程可能带来部分有效碳,可促使下层土壤反硝化作用的增强。对土壤可溶性有机质的研究表明,有效碳的淋溶可达土壤深层^[15],这可能是土壤反硝化微生物重要的碳素来源。总的来看,尽管深层土壤反硝化潜力同样很大,但由于受碳源的限制其实际反硝化损失值恐怕不会太大。但是亚表层土壤是一个重要的过渡层次,反硝化损失氮量值也许是不可忽视的。

通过本试验研究,可以初步明确反硝化作用是导致下层土壤累积的硝酸盐消失的重要原因之一。但最多能消耗多大幅度的累积氮,尤其当硝酸盐淋洗到更深层次的土壤后的情况尚需进一步开展深入的研究,这对搞清硝酸盐的去向和地下水的污染问题将提供有益的启示。

参 考 文 献:

- [1] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向和氮素管理[A]. 朱兆良、文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992. 213-249.
- [2] 吴建繁,黄德明. 北京市农田和土壤肥力施肥情况调查[J]. 华北农学报,2000,15(论文集):82-94.
- [3] 贾良良,陈新平,张福锁,张西科. 北京市冬小麦适宜施氮量的研究[A]. 第七届全国青年土壤暨第二届全国青年植物营养科学工作者学术讨论会组委会. 第七届全国青年土壤暨第二届全国青年植物营养科学工作者学术讨论会会议指南与论文摘要集[C]. 2000. 48-49.
- [4] 李新慧. 京郊粮田土壤氮素损失机制与提高氮肥利用率技术研究[J]. 北京土壤学会简讯,1999,(2):5.
- [5] 巨晓棠. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤-肥料氮的转化及去向[D]. 中国农业大学博士学位论文,2000. 55-78.
- [6] 范晓晖. 中国农田土壤硝化反硝化潜势研究[D]. 中国科学院南京土壤所博士学位论文,1995. 51-54.
- [7] Tong YanAn, Emteryd O, Lu Dianqing; Grip H. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eum-orthic anthrosols profile[J]. Nutrient-Cycling-in-Agroecosystems,1997, 48(3):225-229.
- [8] 《中国农业全书.北京卷》编辑委员会. 中国农业全书.北京卷[M]. 北京:中国农业出版社出版,1999. 8-13.
- [9] Ryden J C, Skinner J H and Nixon D J. Soil core incubation system for the field measurement of denitrification using acetylene-inhibition[J]. Soil Biol. Biochem.,1987, 19: 753-757.
- [10] Aulakh M S and Rennie D A. Gaseous nitrogen losses from conventional and chemical summer fallow[J]. Can. J. Soil. Sci.,1985, 65: 195-204.
- [11] Doran J W, Mielke L N and Power J F. Microbial activity as regulated by soil water-filled pore space[J]. Trans. 14th Internat. Congress. Soil Science, 1990,3: 94-99.
- [12] Paul J W and Zebarth B J. Denitrification during the growing season following dairy cattle slurry and fertilizer application for silage corn[J]. Can. J. of Soil Sci.,1997, 77(2):241-248

- [13] McCarty G W and Bremner J M. Factors affecting the availability of organic carbon for denitrification of nitrate in subsoils [J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1993, 15(2):132-136.
- [14] McCarty G W and Bremner J M. Availability of organic carbon for denitrification of nitrate in subsoils[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1992, 14(3):219-222.
- [15] Schoenar and Bettany. Organic matter leaching as a component of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur cycles in a forest, grassland and gleyed soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51: 646-651.

Study on the denitrification in the subsoil

ZOU Guo-yuan^{1,2}, ZHANG Fu-suo², LI Xin-hui¹

(1 *Inst. of Plant Nutr. and Natural Resour.*, BAAFS, Beijing 100089, China;

2 *Dept. of Plant Nutrition*, CAU, Beijing 100094, China)

Abstract: The experiment was carried out in summer maize season in Beijing cinnamon soil to study subsoil denitrification and factors affecting denitrification. Acetylene inhibition method was used to measure denitrification in a static soil core incubation system. Soil cores from different soil depth up to 60 cm were collected together to be incubated in the jar near the experimental field for 24 hours. The results indicated that denitrification rate were great different between fertilizer N treatments in the surface soil layers. Reduced denitrification were also found in the subsoil, The nitrogen losses by denitrification in the 15~30cm soil layer was amounted to 10.7%~33.5% of that in the 0~15 cm, and the total nitrogen losses by denitrification in the 15~60cm soil layers were amounted to 14%~51% of that in the surface soil. Addition of carbon source greatly raised denitrification both in the 0~15 cm soil layer and 45~60cm soil layer. Discussion was made on factors affecting denitrification of subsoil in the cinnamon soil. Underestimation of N losses by denitrification in the field may be made without considering the subsoil denitrification.

Key words: maize; denitrification; subsoil; cinnamon soil