

黄土高原旱地长期施肥对土壤硝态氮淋失的影响

陈磊^{1,2}, 郝明德², 李占斌²

(1. 长安大学杂志社, 西安 710064; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:对 1984 年建设的渭北旱塬的长期肥料定位试验土壤剖面硝态氮含量进行了分析,结果表明:施肥 12 a 后单施有机肥处理的硝态氮含量在 60 cm 以下土层,与 CK、P 含量接近,未发现硝态氮淋溶;NPM 处理的累积峰在 60—140 cm,氮磷配施在 100—120 cm。22 a 后,除 CK 和 P 外,各处理均在 40—100 cm 土层出现累积峰,其中 N、NP、NPM 处理硝态氮分布呈现出双峰曲线(在 60 cm 和 200 cm 处均出现累积峰),表现出向更深土层淋溶的趋势。单施氮肥平均每年累积量高达 73.5 kg/hm²,虽然 NP 和 NPM 年均累积速率比 N 处理分别减少了 57.7% 和 78.6%,长期超量施用有机肥依然存在生态风险,必将造成氮素的大量损失,但该区的地下水埋藏深厚(50 m),对地下水污染风险小。

关键词:长期试验;施肥;土壤剖面;硝态氮;累积;淋溶

中图分类号:S153.6⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)02-0043-04

Effects of Long-term Application of Fertilizers on Nitrate Accumulation in the Loess Plateau Dryland

CHEN Lei^{1,2}, HAO Ming-de², LI Zhan-bin²

(1. *Magazines Company, Chang'an University, Xi'an 710064, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The nitrate distribution in the soil profile was analyzed based on a long-term fertilization experiment of continuous wheat in the fixed site since 1984. The results showed that NO₃⁻-N content was similar to that in the control and the phosphorus treatment after 12 years with organic fertilizer treatment only, and no nitrate leaching was found. The cumulative concentration peak NO₃⁻-N of the NPM treatment was between 60—140 cm, it was at about 100—120 cm in NP treatment. Moreover, for the N, NP, NPM treatments, the double peak of the cumulative NO₃⁻-N concentration appeared in both 60 cm and 200 cm depths showing a downward leaching trend. Thus the long-term continuous excessive application of manure still presented the ecology risk. The annual nitrate cumulative content could be as high as 73.5 kg/hm² in the N treatment, while the content also was 31.1 kg/hm² in the NP treatment which will cause a large amount of nitrate loss. But it had little effect on the pollution of the underground water due to the deep underground water table.

Key words: long-term experiment; fertilization; soil profile; nitrate; accumulation; leaching

长期施用氮肥导致土壤深层 NO₃⁻-N 的大量累积^[1-5],且 NO₃⁻ 随土壤水分下渗对地下水造成影响,张维理等^[6]对中国北方 14 个县市的调查指出,50% 地区的地下中水硝酸盐含量超标,长期饮用有致癌风险^[3]。彭琳等^[7-8]研究指出,黄土高原旱地夏季高温多雨,硝态氮向下淋失 1 cm 需要 2~3 mm 降水,但该区地下水埋藏深厚(50 m),硝态氮不会渗入进入

地下水。樊军等^[9]指出小麦连续施用 120 kg/hm² 尿素 15 a 后,硝态氮累积在 1~2 m 之间;配施有机肥处理的施氮量增加,但累积层在 60—100 cm 之间,相当于累积了 3.0 a 的施肥量。造成土壤剖面中 NO₃⁻-N 深层积累的主要原因是大量施用氮肥,其损失的主要途径为淋失到 1 m 土层以下^[10]。1 m 土层以下的硝态氮也可随水分运动向上迁移至根区,因此

收稿日期:2013-08-15

修回日期:2013-09-24

资助项目:国家科技支撑计划重大项目“农田水土保持关键技术研究示范”(2011BAD31B01);宁夏农业综合开发科技推广项目(NTKJ-2013-03-1)

作者简介:陈磊(1982—),男,陕西三原人,博士,主要从事黄土高原生态环境恢复方面的研究。E-mail:chenl061@163.com

通信作者:郝明德(1957—),男,陕西华县人,研究员,博士研究生导师,主要从事黄土高原综合治理。E-mail:mdhao@ms.iswc.ac.cn

提高深层硝态氮的利用率,成为目前研究的热点^[11-16]。

本文基于 1984 年建立的黄土高原旱地长期定位试验,对比分析长期施肥对硝态氮淋失的影响,揭示长期施肥后硝态氮在土壤剖面中分布特征,以期为该区合理施肥、非点源污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

长期肥料定位试验位于黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村旱地上(东经 107°40′,北纬 35°12′),黄土堆积深厚,土壤为黄盖黏黑垆土,试验地海拔 1 200 m,年均降水 578.5 mm,是典型的雨养农业区。1984 年布设试验时耕层土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾含量分别为 10.5 g/kg,0.57 g/kg,37.0 mg/kg,0.659 mg/kg,3.0 mg/kg,129.3 mg/kg。试验地在黄土高原旱地有一定代表性。

该长期试验包括 36 个处理的轮作试验和 24 个处理的肥料配比试验,本文选取小麦连作 6 个处理:(1) CK(不施肥);(2) N(单施氮肥);(3) P(单施磷肥);(4) NP(配施氮、磷肥);(5) M(单施有机肥);(6) NPM(配施氮、磷和有机肥)。随机区组设计,3 次重复,试验小区面积 $6.6 \times 10 = 66.6 \text{ m}^2$ 。氮肥(尿素)为纯 N 120 kg/hm²,磷肥(过磷酸钙)为纯 P 26.4 kg/hm²,有机肥为廐肥 75 t/hm²(全氮含量为 2.65 g/kg,相当于纯氮 198.8 kg/hm²)。小麦 9 月下旬播种,6 月下旬收获,6—9 月为休闲期。每年小麦播种前将肥料撒施地表,翻入土中。

对 1997 年和 2006 年采集的土壤样品进行分析(取样深度为 0—300 cm,分层为 20 cm),取风干储存的土样 10 g,于 150 ml 塑料瓶中;加入 100 ml 浓度为 0.01 mol/L 的 KCl 提取液,并振荡 60 min,定量

分析滤纸过滤。浸提液的硝态氮(NO₃-N)含量用流动注射分析仪测定(结果以风干基计)。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面硝态氮分布

对 1997 年时长期施肥试验中 6 个处理土壤硝态氮含量分析发现,土壤剖面硝态氮分布受施肥的显著影响(图 1,2):连续种植冬小麦 13 a 后,对照和 P 处理(未施用氮肥)耕层含量略有增加;因长期缺乏 N 肥的补给,加之小麦吸收利用,60—300 cm 含量低于 1.0 mg/kg,趋于耗竭。施用有机肥和单施氮肥的硝态氮含量在 0—60 cm 土层显著增加;但在 60 cm 以下,单施有机肥与对照无差异,而单施氮肥各土层均显著增加;在 0—300 cm 内硝态氮累积量为对照的 15 倍以上。耕层土壤硝态氮含量以氮磷有机肥配施最高,达 25.5 mg/kg;单施氮肥和有机肥分别为氮磷有机肥配施的 29.1%和 38.9%;对照和单施磷肥相当,仅占 9.8%;氮磷配施仅占 2.8%。在 20—60 cm 土层的硝态氮含量,氮磷有机肥配施约为 10 mg/kg;单施氮肥、氮磷配施和单施有机肥含量为 2.3~4.0 mg/kg;CK 和 P 含量仅为 0.8~1.6 mg/kg。在 60 cm 以下土层,对照、单施磷肥和单施有机肥均未发现硝态氮淋溶,而施氮处理(N、NP、NPM)的硝态氮累积显著。单施氮肥硝态氮累最高,在 80—220 cm 出现累积现象,在 220 cm 以下含量为 3.7~9.4 mg/kg,仍显著高于其他处理;有机肥的施用能显著提高耕层硝态氮累积量,但对耕层以下的影响不大。其原因可能与氮磷配施、氮磷有机肥配施促进小麦根系生长,提高了深层土壤中氮素的吸收利用,其土壤硝态氮累积峰分别出现在作物易利用区(60—140 cm 和 100—120 cm),残留累积量显著减少。

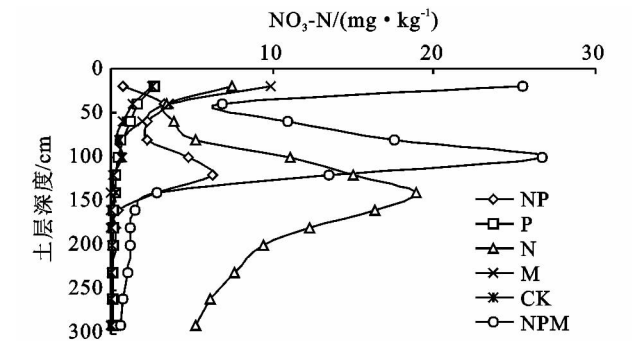


图 1 1997 年土壤剖面硝态氮分布

2006 年时 N、NP、NPM 处理土壤硝态氮在 60 cm 和 200 cm 处均出现累积现象,分布呈现双峰曲线。耕层土壤中 CK 处理土壤硝态氮含量为 6.5 g/kg,与 CK 相比,N 与 CK 相当;NP 增加了 24.9%,M

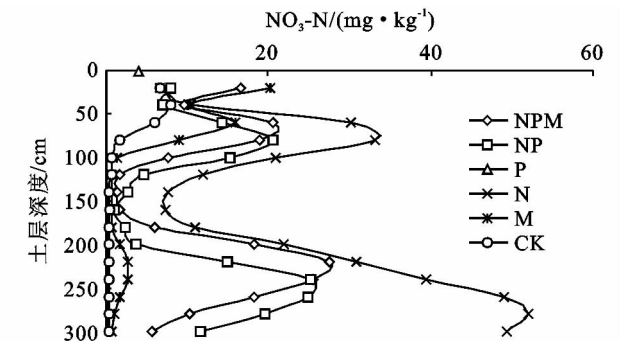


图 2 2006 年土壤剖面硝态氮分布

和 NPM 含量大于 15 g/kg,增加了 2 倍以上。在 40—80 cm 土层,除 CK 和 P 外,N、NP、M、NPM 处理均出现硝态氮累积峰,80—200 cm 土层硝态氮含量均显著下降,其中单施氮肥下降至 10 mg/kg 左右,

其它处理下降至 1.0 mg/kg 左右。值得注意的是 NP、NPM 和 N 处理在 200 cm 以下硝态氮含量呈增加趋势,维持在 10~40 mg/kg,在 250 cm 处再次出现累积峰,呈现出向深层土壤淋溶的趋势。

2.2 土壤硝态氮残留量

结合已有监测资料和近 3 a 的土壤容重分析,0—40,40—80,80—140,160—200,200—300 cm 土层容重取值分别取 1.30,1.40,1.35,1.32,1.30 g/cm³,计算各层土壤硝态氮累积,结果见表 1。由表 1 可知,耕层土壤硝态氮累积显著,在 1997 年时,以 NPM 最大,达 66.40 kg/hm²;N 和 M 相当,约 20 kg/hm² 左右;而 12 a 未施用任何氮肥的 CK 和 P 处理约为 6.8 kg/hm²。22 a 后,N 处理土壤硝态氮含

量略有减少,NPM 减少了 23.58%,CK、P、M、NP 分别增加了 91.14%,29.02%,70.01%,140.06%。

1997 年时,与对照相比,单施磷肥各土层硝态氮累积略有增加;N 在 0—300 cm 增加了 21.2 倍,NPM 增加了 18.7 倍(0—60 cm 增加尤为显著)。与 1997 年的试验结果比较,2006 年时 0—60 cm 土层硝态氮累积量均增加,其中 NPM 仅增加了 26.25%,其它处理增加显著(206.15%~475.82%)。在 0—300 cm 土壤剖面内,CK 的硝态氮累积量为 69.37 kg/hm²。与 CK 相比,长期单施磷肥减少了 6.2%;N 的残留量高达 1 006.41 kg/hm²,增加了 13.5 倍;NPM 和 NP 分别增加了 6.2 倍和 5.7 倍,单施 M 增加了 1.7 倍。

表 1 土壤剖面硝态氮累积量

时间	土层深度/ cm	累积量/(kg·hm ⁻²)					
		CK	P	N	M	NP	NPM
1997 年	0—20	6.68	6.93	19.33	25.83	1.88	66.40
	20—60	4.61	5.75	14.68	11.88	11.85	33.12
	60—300	4.29	8.50	311.29	4.94	50.75	207.58
2006 年	0—20	16.97	10.61	17.10	52.23	21.11	42.93
	20—60	37.27	28.21	111.61	71.31	57.95	82.71
	60—300	15.13	26.26	877.7	60.64	384.97	375.25
增量	0—20	10.29	3.68	-2.23	26.4	19.23	-23.47
	20—60	32.66	22.46	96.93	59.43	46.1	49.59
	60—300	10.84	17.76	566.41	55.7	334.22	167.67

2.3 深层土壤硝态氮累积率

长期施肥造成 NO₃⁻-N 累积,在雨养农业区降水作用下淋溶至深层土壤,淋出根系吸收范围,造成氮肥大量损失。对比分析 1997—2006 年间不同施肥处理对硝态氮累积的影响,结果见表 2。由表 2 可知,CK 和 P 处理的硝态氮累积量相当,为 40~50 kg/hm²,平均每年累积 5.0~6.0 kg/hm²,但长期无氮肥补充,其增加的氮素可能是由于作物种子以及氮沉降等带入的,有待于进一步研究。

表 2 1997—2006 年土壤硝态氮累积率

处理	9 a 总累积量/ (kg·hm ⁻²)	年均累积速率/ (kg·hm ⁻²)	年氮素输入/ (kg·hm ⁻²)	年累积 率/%
CK	53.8	6.0		
P	43.9	5.0		
N	661.1	73.5	120.0	56.23
NP	399.6	44.4	120.0	32.01
M	141.5	15.7	198.8	4.91
NPM	193.8	21.5	318.8	4.88

1997—2006 年,硝态氮累积量以单施氮肥的最大,达 661.1 kg/hm²,每年平均的累积速率为 73.5 kg/hm²,相当于年施肥量的 56.23%;氮磷肥配施累积量为 399.6 kg/hm²,比单施氮肥减少了 39.6%,年

累积速率为 44.4 kg/hm²,减少显著,相当于年施肥量的 32.01%;有机肥处理均能显著减少硝态氮累积,相当于肥料施用量的 5%,其中 M 和 NPM 硝态氮累积量分别为 141.5,193.8 kg/hm²,年平均累积速率为 15.7,21.5 kg/hm²,配施有机肥是减少土壤硝态氮累积率的有效途径,其原因与有机肥不仅增加土壤中的氮素,同时 P、K 等元素也显著提高,促进小麦的氮利用率。

3 结论

土壤硝态氮淋溶是黄土高原旱地氮素损失的重要途径之一。长期施肥 22 a 后,在 40—80 cm 土层,除 CK 和 P 外,N、NP、NPM、M 处理均出现硝态氮累积峰,在 200 cm 以下土层,施 N 处理(NP、NPM 和 N)的显著增加,硝态氮含量维持在 10~40 mg/kg,250 cm 处再次出现累积峰,有向深层土壤淋溶的趋势。9 a 后 0—300 cm 土壤硝态氮累积残留量,以 N 处理最高,高达 1 006.41 kg/hm²,NPM、NP 分别为 500.89,464.03 kg/hm²,M 为 184.18 kg/hm²,CK 的硝态氮累积量为 69.37 kg/hm²,P 比 CK 减少了 6.2%。

单施氮肥的硝态氮累积率相当于当年施肥的56.23%残留于土壤中, NP相当于32.01%, M仅相当于5%。配施有机肥是减少土壤硝态氮累积率的有效途径, NPM累积量比NP减少了22.9 kg/hm²。

平衡施肥是保证作物产量, 提高氮肥利用率, 避免过量氮素向环境流失的关键。1997—2006年间的长期试验结果表明, 长期单施氮肥的土壤硝态氮年累积量高达73.5 kg/hm², 氮磷配合施用也高达44.4 kg/hm²。1997年时, M处理在60 cm以下的硝态氮含量与CK、P含量接近, 未发现累积与淋溶现象; 而9 a后, 有机肥处理也出现累积峰。英国洛桑试验站预测厩肥区和化肥区的硝态氮淋溶损失分别为124.25 kg/hm², 表明长期超量施用有机肥造成大量的氮素损失, 依然存在生态风险。但黄土高原地区地下水埋藏深厚, 对地下水污染较小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.
- [3] Nosengo N. Fertilized to death[J]. Nature, 2003, 425: 894-895.
- [4] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 31(11): 885-89.
- [5] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤氮素淋溶的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 114-116.
- [6] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下

水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.

- [7] 彭琳, 彭祥林, 卢宗凡. 娄土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用[J]. 土壤学报, 1981, 18(3): 212-222.
- [8] 郭胜利, 吴金水, 郝明德, 等. 长期施肥对NO₃-N深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 75-78.
- [9] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 23-26.
- [10] 刘晓宏, 田梅霞, 郝明德, 等. 黄土旱塬长期轮作施肥土壤剖面硝态氮的分布与累积[J]. 土壤肥料, 2001(1): 9-12.
- [11] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [12] Yang S M, Malhi S, Li F M, et al. Long-term effects of manure and fertilization on soil organic matter and quality parameters of a calcareous soil in Northwestern China[J]. Plant and Soil Sci., 2007, 170(2): 234-243.
- [13] Macdonald A J, Poulton P R, Jenkinson D S. The fate of residual 15N labelled fertilizer in arable soil: its availability to subsequent crops and retention in soil[J]. Plant and Soil, 2002, 242(1): 123-12738.
- [14] 李世清, 李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价[J]. 中国农业科学, 2000, 33(1): 76-81.
- [15] 党廷辉, 高长青, 彭琳, 等. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 61-64, 103.
- [16] 党廷辉, 郭胜利, 郝明德. 黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层累积的定量研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 58-60.

(上接第42页)

- [13] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2006, 19(1): 51-53.
- [14] 范胜龙, 黄炎和, 林金石. 表征土壤有机碳区域分布的优化空间插值模型研究: 以福建省龙海市为例[J]. 水土保持研究, 2012, 18(6): 1-5.
- [15] 姜小三, 潘剑君, 李学林. 江苏表层土壤有机碳密度和储量估算和空间分布分析[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 501-503.
- [16] 袁芳, 赵小敏, 乐丽红, 等. 江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 268-272.

- [17] Stolt M H, Drohan P J, Richardson M J. Insights and approaches for mapping soil organic carbon as a dynamic soil property[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(5): 1685-1689.
- [18] Jeny H, Raychaudhuri S P. Effect of Climate and Cultivation on Nitrogen and Organic Matter Reserves in Indian Soils[M]. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi, 1960.
- [19] 张忠启. 样点布置模式及密度对揭示土壤有机碳空间变异的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2010.