

黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层累积的定量研究

党廷辉^{1,2}, 郭胜利^{1,2}, 郝明德²

(1. 中国科学院水土保持研究所; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)
水利部

摘 要: 在黄土旱塬长期定位测定结果表明, 长期过量或不平衡使用氮肥将导致硝态氮在土壤深层的严重积累。不同施肥处理对比, 14年后0~200 cm 硝态氮的累积量 $NPM > N > NP > M$, 对应的硝态氮累积率分别为20.3%、30.98%、15.49%和8.51%。化肥配比试验表明, 土壤剖面 $NO_3^- - N$ 的累积量与累积率一般随氮肥用量的增加而增加, 而且 $NO_3^- - N$ 累积深度随氮肥用量的递增而加深。氮磷严重失调时, 硝态氮累积率剧增, 15年后最大累积率达到42.3% (单施氮 180 kg/hm^2 处理)。在施氮引起 $NO_3^- - N$ 严重累积的情况下, 配施磷肥可以明显的减少硝态氮的累积数量和累积率, 而且随磷肥用量的增加减少幅度愈大。从土壤氮素平衡来看, 加大施氮量降低氮素利用率, 配施磷肥则增加氮肥利用率。

关键词: 硝态氮; 累积量与累积率; 黄土旱塬

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)01-0058-03

The Amount and Ratio of $NO_3^- - N$ Accumulation Under Long-term Fertilization in Dry Highland of Loess Plateau

DANG Ting-hui^{1,2}, GUO Sheng-li^{1,2}, HAO Ming-de²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: A long-term experiment in dry highland of Loess Plateau was conducted, the results show that serious nitrate accumulation would be found in soil deep profile in long-term overuse or unbalance application of nitrogen. Comparing treatments after 14-year, nitrate rates of accumulation in 0~200 cm are $NPM > N > NP > M$, the ratios of accumulation are 20.3%, 30.98%, 15.49% and 8.51% respectively. Long-term application of combination of N and P fertilizer experiment shows that in soil profile the amount and ratio of nitrate accumulation would increase with applied N rate, and the depth of its accumulation would deepen with the N rate. Nitrate accumulation would leap when N and P combination is very imbalance, the most ratio is 42.3% in treatment N 180 kg/hm^2 after 15 years. In case of nitrate accumulation in severity, applying P fertilizer might reduce the amount and ratio. The more applying P is, the bigger extent-decrease is. In view of nitrogen balance, applying P would improve NUE, but reverse in N overuse.

Key words: $NO_3^- - N$; the amount and ratio of accumulation; dry highland of Loess Plateau

农田氮肥的不合理施用将会产生严重的环境问题^[1]。氮素淋失作为氮素损失途径之一, 并可能随水分淋溶下渗或随径流迁移而污染地下水源和河流^[1,2]。有关氮素淋溶的一些研究都侧重于水田方面^[3,4,5], 而对旱地旱作土壤中氮素淋溶的观测与评价甚为缺乏^[5]。已有研究认为, 我国稻田都有一定数量的氮素淋失, 水田淋失较多, 旱地较少甚至不发生^[6]。我们对黄土旱塬长期施用氮肥后土壤剖面硝态氮的分布状况报道认为^[7,8], 过量施用氮肥将导致硝态氮严重积累, 成为

氮素损失的重要途径。施肥的种类和数量直接影响硝态氮在土壤剖面中的累积范围和多少, 定量评价该区旱地长期施肥土壤硝态氮的累积量和累积率, 对于指导科学施肥, 提高氮肥利用率, 预防潜在的环境污染有重要意义。

1 材料与方法

(见本期樊军“旱地长期轮作施肥对土壤肥力影响的定位研究”。

* 收稿日期: 2002-11-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413-5); 国家科技攻关项目(2001BA508B18)。

作者简介: 党廷辉(1964-), 男, 在职博士, 副研究员, 主要从事土壤作物营养与施肥研究。

2 结果与讨论

2.1 长期不同施肥处理土壤剖面NO₃⁻-N 累积率

从不同施肥处理 0~ 200 cm 剖面中NO₃⁻-N 累积量可知(表 1),

表 1 长期定位施肥 14 年后各处理土壤剖面NO₃⁻-N 累积量与累积率

项 目	深度/cm	NPM	NP	N	M
不同土层深度	0~ 20	130.3	33.8	109.5	48.9
	20~ 40	27.0	6.0	9.4	15.9
	40~ 60	24.4	3.1	9.6	13.5
	60~ 80	66.0	4.4	29.1	8.6
	80~ 100	115.7	30.9	41.9	11.4
	100~ 120	169.5	83.7	30.9	0.8
	120~ 140	45.2	52.8	61.4	0.0
累积量/ (kg·hm ⁻²)	140~ 160	5.5	17.4	97.5	0.0
	160~ 180	2.3	14.6	71.5	0.3
	180~ 200	3.1	13.5	59.8	4.7
总累积量/ (kg·hm ⁻²)	0~ 200	589.2	260.3	520.5	104.0
	0~ 100	363.5	78.3	199.4	98.3
	100~ 200	225.7	182.0	321.1	5.7
NO ₃ ⁻ -N 累积率/ %	0~ 200	20.30	15.49	30.98	8.51
	0~ 100	12.52	4.66	11.87	8.04
	100~ 200	7.78	10.83	19.11	0.47

^{*} 表中NO₃⁻-N 累积率(%)= 总NO₃⁻-N 累积量/总投N 量。N 为化肥 120 kg/hm² 纯N,M 为有机肥 87.3 kg/hm² 纯N。

14 年后NO₃⁻-N 累积量大小顺序为:NPM>N>NP>M,对应的硝态氮累积率(即累积量占总投入氮量的比率)分别为 20.3%、30.98%、15.49% 和 8.51%。单独施用氮处理(N),180~ 200 cm 硝态氮累积量依然较高,可能 200 cm 以下还有硝态氮的累积,因此,N 处理实际的硝态氮累积量和

累积率比计算结果还要高。硝态氮累积数量大小与氮肥投入量和配施肥料有关,氮素投入愈多NO₃⁻-N 累积量愈多,配施磷肥NO₃⁻-N 累积减少。在不同施肥基础上,NO₃⁻-N 累积率的大小与投氮量、累积量不存在必然的相关性。纯施氮肥累积率最高,纯施有机肥累积率最低。

氮肥配施磷肥后NO₃⁻-N 的累积率显著降低。同一处理不同土层中NO₃⁻-N 的累积量也有显著差异。M 处理NO₃⁻-N 累积量集中在 0~ 100 cm 内,且随深度的增加而减少。施化肥氮处理NPM、NP、N 土壤剖面中,除耕层外,NPM 处理NO₃⁻-N 累积量在 60~ 140 cm 土层明显升高,峰值出现在 100~ 120 cm,该层累积量高达 169.5 kg/hm²;N 处理NO₃⁻-N 累积量在 60~ 200 cm 土层明显升高,峰值出现在 140~ 160 cm,该层累积量达到 97.5 kg/hm²;NP 处理NO₃⁻-N 在 80~ 140 cm 土层明显积累,但峰值低于NPM 和N 处理。施用化学氮肥,深层 100~ 200 cm NO₃⁻-N 累积量和累积率增加,单施氮肥硝态氮的下移深度将超过 200 cm。施有机肥上层 0~ 100 cm NO₃⁻-N 累积量和累积率较高,而 100 cm 以下没有累积,这可能与有机肥改善土壤结构,增加了土层蓄水性有直接关系。表明有机肥对防止NO₃⁻-N 的深层淋溶有积极作用。

2.2 化肥不同用量长期施用NO₃⁻-N 的累积率

从氮磷配比定位试验 15 年后测定结果知,不同处理NO₃⁻-N 的累积最大深度一般不超过 320 cm,因此,我们计算NO₃⁻-N 的累积量为 0~ 320 cm 范围内。结果显示(表 3,表 4),不同施肥处理土壤剖面中NO₃⁻-N 的累积量与累积率存在明显差异。

2.2.1 NO₃⁻-N 的累积量、累积率与氮肥用量关系

表 2 土壤剖面NO₃⁻-N 的累积量、累积率与氮肥用量的关系

施肥量/ (kg·hm ⁻²)		15 年后NO ₃ ⁻ -N 累积量/ (kg·hm ⁻²)				NO ₃ ⁻ -N 累积率/ %					
	N	0~ 100	100~ 200	200~ 260	260~ 320	0~ 320	0~ 100	100~ 200	200~ 260	260~ 320	0~ 320
P ₂ O ₅	N										
0	90	111.27	242.69	11.26	5.05	370.27	8.24	17.98	0.83	0.37	27.43
	180	270.56	703.42	131.51	37.08	1142.57	10.02	26.05	4.87	1.37	42.32
45	45	25.98	1.90	6.05	6.53	40.47	3.85	0.28	0.90	0.97	6.00
	90	50.03	3.92	5.32	5.08	64.35	3.71	0.29	0.39	0.38	4.77
	135	185.83	229.95	2.75	0.18	418.71	9.18	11.36	0.14	0.01	20.68
90	45	32.45	2.80	2.27	1.36	38.89	4.81	0.42	0.34	0.20	5.76
	90	21.71	3.43	2.86	1.49	29.50	1.61	0.25	0.21	0.11	2.18
	135	151.91	148.05	6.22	10.73	316.91	7.50	7.31	0.31	0.53	15.65
135	180	178.10	255.72	15.86	10.22	459.90	6.60	9.47	0.59	0.38	17.03
	45	12.47	1.77	4.27	1.38	19.90	1.85	0.26	0.63	0.20	2.95
	90	74.69	4.76	4.59	4.53	88.57	5.53	0.35	0.34	0.34	6.56
180	135	80.34	108.43	5.30	3.56	197.63	3.97	5.35	0.26	0.18	9.76
	90	60.09	10.12	6.52	4.73	81.46	4.45	0.75	0.48	0.35	6.03
	180	122.00	134.08	5.87	3.48	265.43	4.52	4.97	0.22	0.13	9.83

注:土壤剖面各层单位为 cm。

由表 2 知,同一磷肥基础上,整个剖面NO₃⁻-N 的累积量与累积率一般随氮肥用量的增加而增加,而且,NO₃⁻-N 累积深度随氮肥用量的递增而加深。换句话说,即N/P 比越大,NO₃⁻-N 的累积量、累积率和淋溶深度越大。本试验中,很多处理NO₃⁻-N 累积量超过了年度施氮量,表明旱地硝态氮的累积是氮素多年残留逐渐积累形成的。15 年后 0~ 320 cm 硝态氮累积量、累积率最大的处理为N₁₈₀P₀,分别达到

1 142.57 kg/hm² 和 42.32%。单施氮肥两个处理都产生了NO₃⁻-N 的严重累积,N₉₀P₀ 处理也有 27.43% 的累积率,累积量亦达 370.27 kg/hm²。在配施磷肥的基础上,只有氮肥用量超过一定水平,才可能引起NO₃⁻-N 的严重累积。如果按累积率超过 10% 作为累积严重的界限,那么,在 P₄₅、P₉₀ 时,氮施用量只有超过 135 kg/hm² 才有NO₃⁻-N 的严重累积。P₄₅N₁₃₅、P₉₀N₁₃₅、P₉₀N₁₈₀ 处理,NO₃⁻-N 的累积率分别为

20.68%、15.65% 和 17.03%。在 P₁₃₅、P₁₈₀ 时, 尽管累积率没有超过 10%, 但土壤剖面中 NO₃⁻-N 的累积量都超过了 180 kg/hm² 年度最大施氮量。

表 3 施用氮肥对土壤硝态氮累积率与氮素平衡的影响

施肥量		0~ 320 cmNO ₃ ⁻ -N 氮肥利用率/氮回收率/ 亏缺率/			
P ₂ O ₅	N	累积率/%	%	%	%
0	90	27.43	42.33	69.76	30.24
	180	42.32	32.54	74.86	25.14
45	45	6.00	52.62	58.62	41.38
	90	4.77	61.19	65.96	34.04
	135	20.68	45.31	65.99	34.01
90	45	5.76	65.20	70.96	29.04
	90	2.18	57.70	59.88	40.12
	135	15.65	54.09	69.74	30.26
	180	17.03	47.26	64.29	35.71
135	45	2.95	66.04	68.99	31.01
	90	6.56	53.42	59.98	40.02
	135	9.76	51.52	61.28	38.72
180	90	6.03	58.37	64.40	35.60
	180	9.83	50.56	60.39	39.61

从表 2 结果看出, 只要施用氮肥, 各处理 0~ 100 cm 都有不同程度的 NO₃⁻-N 累积。累积严重时, NO₃⁻-N 的累积深度可以到 100~ 200 cm, 一般很少到达 200 cm 以下。只有

表 4 土壤剖面 NO₃⁻-N 的累积量与累积率与磷肥用量的关系

施肥量/ (kg·hm ⁻²)		15 年后 NO ₃ ⁻ -N 累积量/ (kg·hm ⁻²)				NO ₃ ⁻ -N 累积率/ %					
P ₂ O ₅	N	0~ 100	100~ 200	200~ 260	260~ 320	0~ 320	0~ 100	100~ 200	200~ 260	260~ 320	0~ 320
45	45	25.98	1.90	6.05	6.53	40.47	3.85	0.28	0.90	0.97	6.00
	90	32.45	2.80	2.27	1.36	38.89	4.81	0.42	0.34	0.20	5.76
	135	12.47	1.77	4.27	1.38	19.90	1.85	0.26	0.63	0.20	2.95
90	0	111.27	242.69	11.26	5.05	370.27	8.24	17.98	0.83	0.37	27.43
	45	50.03	3.92	5.32	5.08	64.35	3.71	0.29	0.39	0.38	4.77
	90	21.71	3.43	2.86	1.49	29.50	1.61	0.25	0.21	0.11	2.18
	135	74.69	4.76	4.59	4.53	88.57	5.53	0.35	0.34	0.34	6.56
	180	60.09	10.12	6.52	4.73	81.46	4.45	0.75	0.48	0.35	6.03
135	45	185.83	229.95	2.75	0.18	418.71	9.18	11.36	0.14	0.01	20.68
	90	151.91	148.05	6.22	10.73	316.91	7.50	7.31	0.31	0.53	15.65
	135	80.34	108.43	5.30	3.56	197.63	3.97	5.35	0.26	0.18	9.76
180	0	270.56	703.42	131.51	37.08	1142.57	10.02	26.05	4.87	1.37	42.32
	90	178.10	255.72	15.86	10.22	459.90	6.60	9.47	0.59	0.38	17.03
	180	122.00	134.08	5.87	3.48	265.43	4.52	4.97	0.22	0.13	9.83

从表 5 施用磷肥对土壤氮素平衡的影响看出, 对同一氮肥条件下, 施用磷肥不但减少了硝态氮的累积率, 而且提高了氮肥利用率。再次证明提高旱地氮肥利用率的重要途径就是要减少硝态氮的累积, 配施磷肥是重要措施之一。磷肥对氮素回收率和亏缺率影响没有明显规律性。

2.2.3 NO₃⁻-N 的累积量、累积率与氮磷肥用量的数学表达式 根据氮磷配比定位试验 15 年后的土壤分析结果, 不同土层 0~ 320 cm NO₃⁻-N 累积量 (A_a, kg/hm²)、累积率 (A_r, %) 与 N (kg/hm²) 和 P (P₂O₅ kg/hm²) 的关系用二元二次方程回归结果如下:

N/P 比例严重失调 (如单施氮肥), 硝态氮的累积深度才可能超过 200 cm, 甚至超过 260 cm。累积量和累积率基本存在相似分布规律。

不同磷肥施用基础上, 随氮肥用量的增加土壤氮素平衡状况明显不同 (表 3)。一般氮肥用量增加, NO₃⁻-N 累积率增加, 氮肥利用率降低。氮素的回收率, 指硝态氮累积率与氮肥利用率之和, 变化幅度在 58.62%~ 74.86% 之间。不同氮磷配合方式引起硝态氮累积率变幅较大 (2.12%~ 42.32%), 降低硝态氮累积率应该是提高氮肥利用率优先考虑的途径。由差减法计算出氮亏缺率数值范围为 25.14%~ 41.38%。

2.2.2 NO₃⁻-N 的累积量、累积率与磷肥用量关系

由表 4 结果看, 在施用氮引起 NO₃⁻-N 严重累积的情况下, 配施磷肥可以明显的减少硝态氮的累积数量和累积率, 而且随磷肥用量的增加减少幅度愈大。在 N₁₃₅P₄₅ 时, 增施磷肥到 90 kg/hm²、135 kg/hm², 剖面硝态氮的累积量分别减少 24.3% 和 52.8%, 累积率由 20.68% 下降到 15.65% 和 9.76%。在 N₁₈₀ 时, 配施磷肥 90 kg/hm²、180 kg/hm², 硝态氮累积量分别减少 59.7% 和 76.8%, 累积率由 42.34% 下降到 17.03% 和 9.83%。表 4 同时表明, 施用磷肥不但减少各层 NO₃⁻-N 累积量, 而且降低 NO₃⁻-N 的累积深度, 即硝态氮累积深度变浅。磷肥对 NO₃⁻-N 累积率的影响, 与对累积量的影响趋势基本一致。

$$A_a = 4.9655 + 1.6131N + 0.0254N^2 - 1.7011P + 0.0208P^2 - 0.0376NP \quad (R = 0.9733^{**}, n = 14)$$
$$A_r = 8.873 + 0.1310N + 0.0003N^2 - 0.1985P + 0.0011P^2 - 0.0010NP \quad (R = 0.9171^{**}, n = 14)$$

两个方程均达到极显著水平, 表明方程能反映因素间的相互关系。从方程一次项系数的正负和大小可以清楚的看出, NO₃⁻-N 累积量、累积率与 N 呈正相关, 而与 P 呈负关系。

(下转第 75 页)

经 4 季作物吸收利用后仍然保持原有水平, 但施磷量增加到 375, 450, 600 kg/hm² 时, 速效磷含量依次为 14.5, 16.5, 20.0 mg/kg, 远远高于基础土壤含磷水平, 说明增施磷肥对提高土壤速效磷具有重要作用。结合 4 年试验产量, 在本试验年份的降水条件下, 施 P₂O₅300 kg/hm² 可基本满足 4 季冬小麦的需要。

3 小 结

(1) 旱地土壤施用磷肥, 能提高土壤有效磷含量, 一次性施 P₂O₅75, 150, 300 kg/hm² 至少保持 4 季作物有残效, 并且

参考文献:

[1] 张兴高, 崔明九, 武天云, 等. 旱塬土壤施肥培肥技术研究[A]. 王吉庆. 陇东高原半湿润偏旱农业综合发展研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 148- 155

[2] 山仑, 等. 黄土高原旱地农业的理论与实践[M]. 北京: 科技出版社, 1993

(上接第 60 页)

表 5 施用磷肥对剖面硝态氮累积率与氮素平衡的影响					
施肥量/(kg·hm ⁻²) NO ₃ -N 氮肥利用率/氮回收率/ 亏缺率/					
P ₂ O ₅	N	累积率/%	%	%	%
45	45	6.00	52.62	58.62	41.38
	90	5.76	65.20	70.96	29.04
	135	2.95	66.04	68.99	31.01
90	0	27.43	42.33	69.76	30.24
	45	4.77	61.19	65.96	34.04
	90	2.18	57.70	59.88	40.12
	135	6.56	53.42	59.98	40.02
135	180	6.03	58.37	64.40	35.60
	45	20.68	45.31	65.99	34.01
	90	15.65	54.09	69.74	30.26
	135	9.76	51.52	61.28	38.72
180	0	42.32	32.54	74.86	25.14
	90	17.03	47.26	64.29	35.71
	180	9.83	50.56	60.39	39.61

3 结 论

长期试验表明, 黄土旱塬长期不平衡或过量施用氮肥,

用量增加, 残效相应提高, 但从绝对产量来看, 随着种植年限延长, 残效则逐年下降。在分配施磷条件下, 残效基本随施磷量的增加而降低。施 P₂O₅300 kg/hm² 可基本满足 4 季冬小麦对磷的需求。因此, 利用磷肥残效时, 既要考虑它的增产效果, 更重要的是看对作物产量的影响程度, 这对合理经济施磷有重要意义。

(2) 磷肥的利用率随用量增加而降低, 单季利用率低, 累计利用率高, 施 P₂O₅75~ 300 kg/hm² 时, 单季利用率为 12.0%~ 4.3%, 累计利用率达 25.0%~ 12.4%, 是首季利用率的 2.1~ 2.9 倍。

土壤剖面中硝态氮的深层累积是不可避免的, 其累积数量、深度和累积率与氮磷施用量及搭配比例密切相关。硝态氮在土壤深层累积的深度通常在 60 cm 以下, 严重时可以超过 200 cm。因施肥组合方式的不同, 14 年后 0~ 200 cm 硝态氮累积率为 8.5%~ 31.0%, NPM>N>NP>M。如果氮磷肥按不同比例搭配, 在氮磷比例严重失调时, 硝态氮累积率剧增, 15 年后最大累积率达到 42.3% (单施氮 180 kg/hm² 处理)。试验表明, 土壤剖面 NO₃-N 的累积量与累积率一般随氮肥用量的增加而增加, 而且 NO₃-N 累积深度随氮肥用量的递增而加深。在 NO₃-N 严重累积的情况下, 配施磷肥可以明显的减少硝态氮的累积数量和累积率, 且随磷肥用量的增加而减幅增大。从土壤氮素平衡来看, 施氮量越大, 氮素利用率越低; 配施磷肥越多, 氮肥利用率越高。为了防止硝态氮的严重积累及其对环境的潜在威胁, 在生产上切实可行的措施就是氮磷肥合理配施。

参考文献:

[1] Keeney, D R. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution[A]. In: F J. Stevenson (ed.), Nitrogen in Agricultural Soils[M]. Madison: Wisconsin Agronomy, 1982. 605- 949

[2] 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

[3] 张福珠, 熊先哲, 戴同顺. 应用¹⁵N 研究土壤- 植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学, 1984, 5(1): 21- 24

[4] 王家玉, 王胜佳, 陈义. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 28- 35

[5] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, 6: 291- 297

[6] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 45- 51

[7] 郭胜利, 党廷辉, 郝明德. 黄土高原沟壑区不同施肥条件下土壤剖面中矿质氮的分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(1): 22- 27

[8] 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