

露地栽培条件下大白菜氮肥利用率 与硝态氮淋溶损失研究

刘宏斌, 李志宏, 张维理, 林葆

(中国农业科学院土壤肥料研究所, 北京 100081)

摘要: 以我国北方主要蔬菜作物——大白菜 (*Brassica pekinensis*) 为研究对象, 利用渗滤池研究了露地栽培条件下不同供氮水平对氮肥利用率和硝酸盐淋失的影响。结果表明, 施有机肥 (折 N 120 kg/hm²) 的增产效果显著, 不会造成硝态氮向下层土壤剖面淋溶和增加硝态氮的淋洗损失, 有机肥 N 的利用率达 25%。在有机肥的基础上施用化学氮肥的增产效果不明显, 3 个化学氮肥用量 (375、750 和 1125 kg/hm²) 处理下 VCR (产投比) 值均低于 2.0, 而且随氮肥用量增加土壤剖面硝态氮残留量呈线性递增; 渗滤池 1.3 m 处的硝态氮淋失量分别为 16.6、21.0 和 37.6 kg/hm², 呈指数增加; 氮肥表观淋失率为 2.3%、1.8% 和 2.6%, 氮肥利用率分别为 7.9%、2.9% 和 2.6%, 氮肥表观气态损失率分别为 25.4%、37.5% 和 40.5%。总的来看, 露地大白菜施肥水平偏高, 氮肥利用率偏低, 环境风险较大。

关键词: 大白菜; 氮肥利用率; 硝态氮; 淋溶损失

中图分类号: S634.106 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X (2004)03-0286-06

Study on N use efficiency of chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation

LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Wei-li, LIN Bao

(Soil and Fertilizer Institute, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Fate of nitrogen fertilized on chinese cabbage (*Brassica pekinensis*) in open field of vegetable especially leaching loss was studied by lysimeter. The results showed that the yield of chinese cabbage application of organic manure (equivalent N 120 kg/hm²) was much higher than CK, and nitrate concentration no difference in lower soil profile, the leaching loss of nitrate from 1.3m depth of lysimeter was also not increased. Whereas, on the based of organic manure, the yield was not increased remarkably with chemical N fertilization and the VCR (value-cost ratio) was lower than 2.0. On the other hand, with increasing of N rate, the residue of nitrate in soil profile rose linearly and nitrate leaching loss from 1.3m depth lysimeter went up exponentially. For the three rates of chemical fertilizer N 375, 750 and 1125 kg/hm², nitrate leaching loss was N 16.6, 21.0 and 37.6 kg/hm², the apparent fertilizer N leaching loss rate was 2.3%, 1.8% and 2.6%, apparent fertilizer N use efficiency was 7.9%, 2.9% and 2.6%, apparent fertilizer N loss by air was 25.4%, 37.5% and 40.5%, respectively. These results indicated, the rate of N fertilization in open field of vegetable was much higher which might give higher pressure on environment.

Key words: N use efficiency; nitrate; leaching; chinese cabbage

氮肥施用的合理与否, 既关系到蔬菜产量与品质, 又直接影响到土壤与地下水质量安全。自上个

世纪 80 年代以来, 我国蔬菜生产发展十分迅速。1980 年全国蔬菜播种面积仅占农作物总播种面积

收稿日期: 2003-05-14 修改稿收到日期: 2003-07-16

作者简介: 刘宏斌 (1970—), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 副研究员, 主要从事施肥与环境研究。

本试验在农业部植物营养学重点开放实验室完成。

的 2.2%, 2000 年已达 9.8%^[1], 露地蔬菜在蔬菜生产中占有重要地位。以北京市为例, 2000 年全市菜田面积 50825 hm², 其中露地蔬菜 36728 hm², 占 62.3%^[2]。但我国露地蔬菜栽培中氮肥过量施用的问题仍较普遍, 有的甚至超过 N 1200 kg/hm²^[2-4]。因此, 研究露地栽培下氮肥的合理施用及其环境效应具有重要意义。渗滤池是研究田间氮素损失的一种直接方法, 尽管存在优先流问题和底部土水势与田间实际情况不一致等问题^[5], 但与土壤溶液提取器法具有一定的可比性, 仍是一种可取的方法^[6-8]。我国在 50 年代后期曾在不同土壤类型上建立了一批渗滤池, 但由于种种原因未能坚持和深入研究, 直到 90 年代初, 中国农科院土壤肥料研究所^[9-10]才在全国范围内组织有关单位重新开始应用渗滤池进行

氮素淋失方面的研究。为此, 本研究以我国北方露地栽培面积最大的蔬菜作物——大白菜为试材, 应用渗滤池系统研究氮肥利用率和淋溶损失。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 1999 年 8 月 6 日至 11 月 15 日在“国家褐潮土土壤肥力和肥料效益监测基地”(北京昌平)进行。渗滤池为半地下式, 长 200cm, 宽 100cm, 深 130cm, 池中土体按原状土层回填。试验前 2 年渗滤池未栽种作物, 大白菜施肥播种前 15d 将各个池子的表层 20cm 土壤全部挖出、混匀, 然后再回填。池子底部渗漏水可直接流到池外的盛水容器中。试验土壤为轻壤质潮土, 其理化性状见表 1。

表 1 供试土壤的化学性状

Table 1 Chemical properties of soil tested

| 土层深度 Depth of soil (cm) | 有机质 Organic matter (g/kg) | 全氮 Total N (g/kg) | 碱解氮 Alkali-N (mg/kg) | 速效磷 Olsen-P (mg/kg) | 速效钾 NH ₄ OAc-K (mg/kg) | 阳离子代换量 CEC (cmol/kg) |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|---|----------------------------|
| 0—27 | 11.37 | 0.691 | 49.1 | 5.2 | 52.0 | 13.84 |
| 27—55 | 10.77 | 0.576 | 37.6 | 2.9 | 62.2 | 19.32 |
| 55—80 | 14.27 | 0.691 | 38.3 | 2.6 | 63.5 | 23.17 |
| 80—120 | 4.30 | 0.277 | 24.2 | 3.4 | 61.2 | 21.08 |

试验包括 5 个处理, 2 次重复。各处理肥料用量见表 2。所用有机肥种类为腐熟鸡粪, 养分含量为 N 2.0%, P₂O₅ 1.8%, K₂O 2.2%, 无机 N(NO₃⁻-N+NH₄⁺-N)含量为 0.256%, 用量为 6000 kg/hm² (折合 N 120 kg/hm²); 化学氮肥为尿素, 磷、钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾, 磷、钾肥与有机肥全部底施。氮肥分 4 次施用, 每次施用 1/4。整个试验周期自然降水与人工灌水合计为 680 mm。

在大白菜的整个生育期间分别在各池的底部全程收集上部淋下的土壤溶液并测定其硝酸盐含量, 以计算大白菜全生育期的硝酸盐淋失量。收获时, 将池内大白菜全部收获, 测产并取样测定大白菜含氮量, 计算作物吸氮量和氮肥利用率, 同时分 0—30、30—60、60—90、90—120cm 4 个层次取土, 分析土壤硝态氮含量。

表 2 大白菜渗滤池氮肥淋洗试验方案 (kg/hm²)

Table 2 Design for leaching loss of NO₃⁻-N by using lysimeters

| 处理 Treatment | 有机肥 Organic manure | | | 化肥 Fertilizer | | | 合计 Total | | |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|---------------|-------------------------------|------------------|----------|-------------------------------|------------------|
| | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 | 150 | 300 | 0 | 150 | 300 |
| N ₀ | 120 | 108 | 132 | 0 | 150 | 300 | 120 | 258 | 432 |
| N ₃₇₅ | 120 | 108 | 132 | 375 | 150 | 300 | 495 | 258 | 432 |
| N ₇₅₀ | 120 | 108 | 132 | 750 | 150 | 300 | 870 | 258 | 432 |
| N ₁₁₂₅ | 120 | 108 | 132 | 1125 | 150 | 300 | 1245 | 258 | 432 |

1.2 测定和计算方法

植株全氮: 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 凯氏法定 N; 土壤硝态氮和铵态氮测试: 称取 12.00g 过 2mm 筛的新鲜土壤样品于 180mL 的塑料瓶中, 加入 100mL 0.01mol/L 的 $CaCl_2$ 溶液, 振荡 1h, 过滤, 滤液 -8℃ 冷冻保存。测定前解冻, 采用连续流动分析仪法 (TRACCS2000 Continuous Flow Analytical, CFA) 测定滤液和土壤浸提液中 $NO_3^- -N$ 和 $NH_4^+ -N$ 含量。

有关参数计算式如下:

土壤无机氮 (N_{min}) = 土壤硝态氮 + 土壤铵态氮;

氮肥表观利用率 (Apparent N recovery by crop, ANRC): $ANRC = (\text{施氮区作物吸氮量} - \text{无氮区作物吸氮量}) \times 100 / \text{施氮量}$;

氮肥的土壤表观残留率 (Apparent N recovery by soil, ANRS): $ANRS = (\text{施氮区土壤残留 } N_{min} - \text{无氮区土壤残留 } N_{min}) \times 100 / \text{施氮量}$;

氮肥生产率 (N production rate, NPR): $NPR = (\text{施氮区作物产量} - \text{无氮区作物产量}) / \text{施氮量}$;

氮肥的土壤—作物表观回收率 (Apparent N recovery by plant and soil, ANRPS): $ANRPS = \text{氮肥的土壤表观残留率 (ANRS)} + \text{氮肥表观利用率 (ANRC)}$;

氮肥表观淋失率 (Apparent N leaching loss ratio, ANLLR): $ANLLR (\%) = (\text{施氮区无机氮淋失量} - \text{无氮区无机氮淋失量}) \times 100 / \text{施氮量}$;

氮肥表观损失率 (Apparent N loss ratio, ANLR): $ANLR (\%) = 100 - ANRPS$;

氮肥表观气态损失率 (Apparent N loss by air, ANLA): $ANLA (\%) = 100 - ANRPS - ANLR$;

VCR 值 (Value-cost ratio, VCR): $VCR = (\text{施氮作物产值} - \text{无氮区作物产值}) / \text{施入氮肥成本}$ 。

计算时, 大白菜净菜率按北京地区习惯值 75% 计, 净菜价格 0.2Yuan/kg, 尿素 1.3Yuan/kg。

2 结果与讨论

2.1 氮肥用量对大白菜产量的影响

表 3 看出, 施用有机肥增产效果十分明显。与空白对照 (CK) 相比, 单施有机肥 (N_0) 的增产效果为 15000 kg/hm², 增产率达 30.5%。在有机肥基础上施用化肥氮的增产效果较小。其中, 处理 N_{375} 产量最高, 为 72250kg/hm², 比 N_0 处理增产 8000kg/hm², 增产幅度为 12.5%, 高氮处理 (N_{750} 和 N_{1125}) 虽有增产, 但增幅较低, 仅分别为 4.7% 和 9.3%, 说明增加氮肥用量并不能表现出增产效果。

表 3 氮肥施用的经济效益分析

Table 3 Economic analysis of different N treatments

| 处理 Treatment | 净菜产量 Yield (kg/hm ²) | 增产率 Increase rate (%) | 氮肥生产率 N production rate (kg/kg) | 产值 Production value (kg/kg) | VCR (Yuan/Yuan) |
|-----------------|--|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| CK | 7388 | — | — | 7388 | — |
| N_0 | 9638 | 30.5 | 125.0 | 9638 | — |
| N_{375} | 10838 | 12.5* | 21.3* | 10838 | 1.13* |
| N_{750} | 10088 | 4.7* | 4.0* | 10088 | 0.42* |
| N_{1125} | 10538 | 9.3* | 5.3* | 10538 | 0.85* |

* 与 N_0 处理比较 Compared with N_0 .

在肥料经济学研究中通常认为^[12], 只有当 VCR 值均大于 2.0 时, 施用化肥才有意义。3 个施用化学氮肥处理的 VCR 值均小于 2.0, 产量最高的处理 N_{375} 也仅为 1.13, 说明在本试验条件下, 施用化学氮肥无明显效益, 单施有机肥即可满足产量和效益的需求。

2.2 氮肥用量对土壤硝态氮分布与累积的影响

大白菜收获后, 不同处理土壤剖面硝态氮的含

量差异十分显著。空白处理 (CK) 硝态氮含量最低, 整个剖面仅为 1~4 mg/kg; 单施有机肥的处理 (N_0) 仅表层 0—30cm 土壤明显高于 CK, 30cm 以下基本上与 CK 相同; 处理 N_{375} 硝态氮含量明显高于 CK 和 N_0 处理, 各土层含量均超过 15 mg/kg; 高氮处理 (N_{750} 、 N_{1125}) 在 0—30 和 30—60cm 土层基本无差异, 但在 60—90 和 90—120cm 土层差异十分明显, 处理 N_{1125} 分别为 45.6 和 34.3 mg/kg, 比处理

N_{750} 分别高 20.2 和 15.9 mg/kg(图 1a)。这表明,氮肥用量越高,硝态氮淋溶越多,而单施有机肥的处理,在保证经济效益的同时,基本上没有发生淋溶损失。

从硝态氮的剖面残留量来看(图 1b),CK 处理经过一季作物的吸收,0—120cm 土壤剖面硝态氮残留量极低,仅为 39.0 kg/hm²。随氮肥用量增加,土壤剖面硝态氮累积量明显增加。单施有机肥的处理(N_0)剖面累积量略高于 CK,为 81.5 kg/hm²,施用

化肥氮的 3 个处理硝态氮累积量明显高于 CK 和 N_0 处理,氮肥用量越高,硝态氮累积量越高。处理 N_{1125} 剖面硝态氮累积量最高,达 690.9 kg/hm²,相当于处理 N_{750} 和 N_{375} 的 1.30 和 2.15 倍。总的来看,增加氮肥用量,没有发挥增产效果,却直接导致土壤剖面硝态氮富集与向下淋溶。氮肥用量(包括有机肥氮)与收获后土壤剖面硝态氮累积量呈正相关关系,可以用线性模型来描述(图 1),模型决定系数 R^2 值均超过 0.98,达极显著水平。

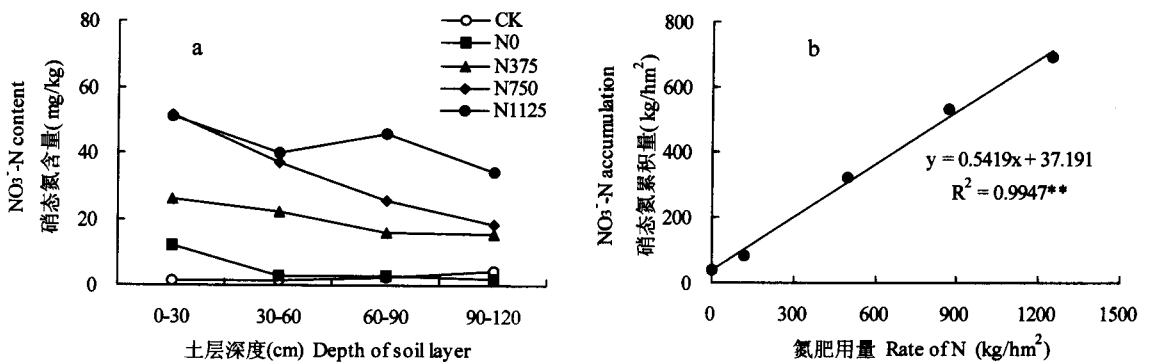


图 1 不同处理土壤剖面硝态氮的分布与累积情况

Fig. 1 Distribution and accumulation of NO₃⁻-N in soil profile with different N treatments

2.3 氮肥用量对硝态氮淋溶的影响

渗滤池底部第一次流出水日期为 1999 年 8 月 14 日(试验开始后第 8d),最后一次为 1999 年 11 月 7 日。试验期间共计收集渗滤液 18 次,渗滤液平均为 124.6 L/Pool。不同渗滤池之间出水量差异不大,最高的 N_{1125} 处理为 135.2 L,最低的 N_0 处理为 119.0 L。

从各个时期池底渗漏水硝态氮含量来看(图 2),试验初期,不同氮肥处理的渗漏水硝态氮含量相差不大,各处理均在 20~50 mg/L,原因在于此期施

用的尿素尚未完成硝化作用,渗出水中的硝态氮主要来源于土壤剖面原有的有机氮矿化。据研究,北京地区尿素态氮完成硝化作用需要 7~10d^[9,11-12],硝化作用完成后随灌水向下淋溶也需要一段时间。试验开始后 21d(8 月 27 日),不同处理间渗漏水硝态氮含量的差异才逐渐表现出来。到 9 月中旬,差异越来越明显。氮肥用量越高,渗漏水硝态氮含量越高。到试验结束时, N_{1125} 处理渗漏水硝态氮含量基本上稳定在 80mg/L 以上,远远超过其他处理。

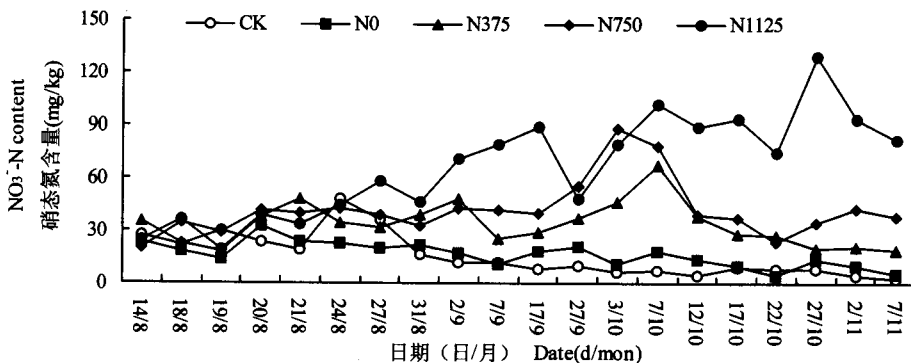


图 2 不同氮肥用量处理下渗滤池 1.3m 处流出水中的硝态氮含量

Fig. 2 NO₃⁻-N content of effluent water at 1.3m depth of lysimeter with different N treatments

从淋失量来看(表 4),CK 与 N_0 处理基本相当,分别为 7.7 kg/hm^2 和 7.8 kg/hm^2 。这表明,与 CK 处理相比,在有机肥氮用量为 120 kg/hm^2 的情况下硝态氮的淋失基本不会增加。Maynard^[13] 的研究结果也表明,连续 3 年施用腐熟的有机肥没有额外加剧地下水硝酸盐污染。同时也说明,即便不施肥,在试验前土壤剖面硝态氮含量较高、灌水量较大的情况下也会发生较为明显的淋失。处理 N_{375} 的硝态氮淋失量为 16.6 kg/hm^2 ,相当于化肥氮用量的 4.4%,比处理 N_0 增加 117%;处理 N_{750} 的淋失量为 21.0 kg/hm^2 ,相当于化肥氮用量的 2.8%,比处理

N_0 增加 167%;处理 N_{1125} 氮肥用量最高,淋失量也最高,为 37.6 kg/hm^2 ,相当于化肥氮用量的 3.3%,比处理 N_0 增加 379%。可以看出,不同化肥氮用量之间虽然淋失率均在 2.8%~4.4%,但绝对淋失量相差十分明显,增加化肥氮用量,明显增加了硝态氮淋失量。

相关分析表明,氮肥用量、土壤剖面硝态氮累积量与硝态氮淋失量均呈正相关关系,用指数模型可以较好的描述其相互关系,模型决定系数 R^2 值均超过 0.97,达极显著水平(图 3)。因此,氮肥用量和土壤硝态氮残留量可在一定程度上预测淋失量。

表 4 渗滤池试验中氮肥去向分析

Table 4 The Fate of N fertilizer in soil and crop system

| 处理 Treat. | 含氮量 N cont. (%) | 吸氮量 N uptake (kg/hm^2) | ANRC (%) | 0—120cm 土壤无机氮残留量(kg/hm^2) N_{min} residue in 0—120cm soil layer | | | ANRS (%) | N 淋失 leaching (kg/hm^2) | ANLLR (%) | ANLA (%) |
|--------------|-----------------------|---|-------------|--|---------------------------|----------|-------------|--|--------------|-------------|
| | | | | $\text{NO}_3^- \text{-N}$ | $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ | 合计 Total | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| CK | 3.21 | 94.9 | — | 39.0 | 32.5 | 71.5 | — | 7.7 | — | — |
| N_0 | 3.23 | 124.5 | 24.7 | 81.5 | 42.4 | 123.8 | 43.6 | 7.8 | 0.2 | 31.5 |
| N_{375} | 3.56 | 154.3 | 7.9 | 321.8 | 43.2 | 365.0 | 64.3 | 16.6 | 2.3 | 25.4 |
| N_{750} | 3.63 | 146.5 | 2.9 | 532.2 | 25.2 | 557.4 | 57.8 | 21.0 | 1.8 | 37.5 |
| N_{1125} | 3.49 | 147.1 | 2.6 | 690.9 | 43.2 | 734.0 | 54.2 | 37.6 | 2.6 | 40.5 |

注(Note): ANRC—氮肥表观利用率 Apparent N recovery by crop; ANRS—氮肥的土壤表观残留率 Apparent N recovery by soil; ANLLR—氮肥表观淋失率 Apparent N leaching loss ratio; ANLA—氮肥表观气态损失率 Apparent N loss by air.

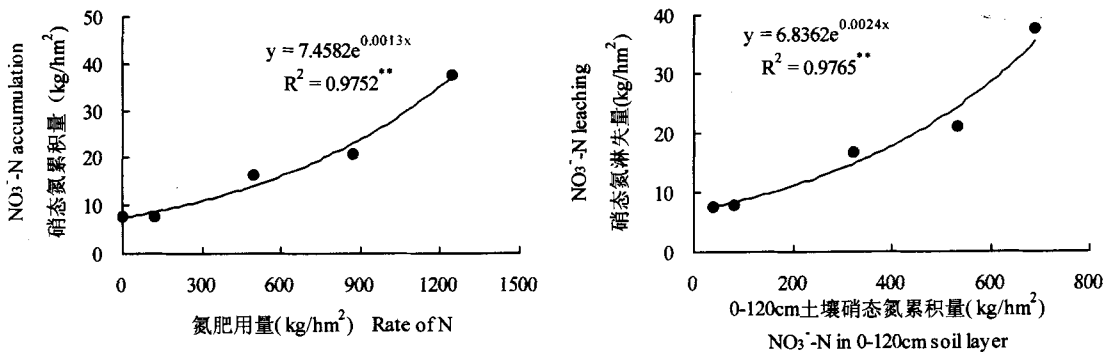


图 3 土壤剖面硝态氮累积量与硝态氮淋失量的关系

Fig. 3 Relationship of N rates, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ accumulation and leaching loss in soil profile of lysimeter

曹兵等的研究表明^[14],在雨量充沛、夏玉米氮肥用量为 225 kg/hm^2 的条件下,从 1.3m 渗滤池淋溶的硝态氮高达 85.5 kg/hm^2 ,氮肥淋失率高达 19.9%,而陈子明等^[9] 的研究结果却仅为 3~4 kg/hm^2 。本试验结果介于两者之间,这种差异可能是由于试验条件不同所致。为了与实际生产条件保持一致,本试验施用了有机肥。有研究表明,合理使用有机肥可以提高土壤对硝态氮的吸附能力,减少

氮素淋失^[15]。此外,试验时期、试验作物和氮肥用量的差异也是造成这种差异的原因。

2.4 氮肥去向分析

有研究表明,我国北方主要粮食作物氮肥利用率一般仅在 30%~41%^[10,16],蔬菜作物由于施肥量高,氮肥利用率更低,仅在 10%左右。从本研究结果来看(表 4),单施有机肥的情况下(处理 N_0),大白菜增产效果最为明显,有机肥氮利用率最高,为

24.7%。北京市大白菜一般均在有机肥的基础上施用化学氮肥,平均用量为 334 kg/hm^2 ^[3],与本试验 N_{375} 处理相当。本试验看出,以有机肥处理(N_0)作为对照,3个施用尿素处理的氮肥利用率均较低, N_{375} 、 N_{750} 和 N_{1125} 处理分别为7.9%、2.9%和2.6%。这一结果与以往研究结果相当,也证实了北京市蔬菜作物在大量施用有机肥的基础上,过量施用氮肥将导致氮肥损失并污染环境。

表4还看出,3个化肥氮处理的氮肥土壤残留率均超过了50%, N_{375} 为64.3%, N_{1125} 为54.2%;氮肥淋失率相差不大,均在1.8%~2.6%。氮肥气态损失率随氮肥用量增加而明显增加, N_{375} 、 N_{750} 、 N_{1125} 3个处理,氮肥气态损失率分别为25.4%、37.5%和40.5%,基本上与粮食作物上的研究结果相同^[16];气态损失量远远超过淋洗损失。需要指出的是,氮肥施入土壤后有一部分转化为有机氮,但氮肥用量越高,以有机结合态存在的肥料氮所占的比例越低。巨晓棠等^[12]用 ^{15}N 示踪试验表明,在氮肥用量为 120 kg/hm^2 时,以有机形态被固定的肥料氮占44.6%;氮肥用量为 240 kg/hm^2 时,占15.4%;氮肥用量为 360 kg/hm^2 时,以有机形态被固定的肥料氮占仅占9.7%。由于本试验中未对此进行测试,因此氮肥的表观气态损失有可能偏高。此外,作物根系中所累积的氮仍残留在土壤中,但未计算到土壤残留氮中,这也是氮的气态损失偏高的一个原因。此外,3个氮肥用量, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别仅占无机氮总量的5%~12%。在渗漏水中所占比例也很低,不超过5%。

3 小结

本试验条件下,与空白对照相比,有机肥($N_{120 \text{ kg/hm}^2}$)的增产效果显著,且不会造成硝态氮向下层土壤剖面淋溶,不会增加硝态氮的淋洗损失,基本没有环境风险。在有机肥的基础上施用化学氮肥的增产效果不明显,包括北京市习惯施肥水平在内的3个氮肥水平的VCR值均低于2.0,施肥价值低。随氮肥用量增加,土壤剖面硝态氮残留量呈线性递增,渗滤池1.3m处的硝态氮淋失量呈指数增

加; N_{375} 、 N_{750} 、 N_{1125} 3个处理硝态氮淋失量分别为16.6、21.0、 37.6 kg/hm^2 ;氮肥表观淋失率为2.3%、1.8%、2.6%;氮肥利用率分别为7.9%、2.9%、2.6%;氮肥表观气态损失率分别为25.4%、37.5%、40.5%。总的来看,常规施肥水平下的露地蔬菜氮肥利用率偏低,环境风险较大。

参考文献:

- [1] 国家统计局农村社会经济调查总队. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [2] 北京市农调队. 北京市农村社会经济统计资料[R]. 2001.
- [3] 刘宏斌. 施肥对北京市农田土壤硝态氮累积与地下水污染的影响[D]. 中国农业科学院博士学位论文, 2002.
- [4] 马文奇. 山东省作物施肥现状、问题与对策[D]. 中国农业大学博士学位论文, 2000.
- [5] Haines B L, Waide J B, Todd R L. Soil solution nutrient concentrations sampled with tension and zero-tension lysimeters: Report of discrepancies[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 658-661.
- [6] Barbee G C, Brown K W. Comparison between suction and free-drainage soil solution samplers[J]. Soil Sci., 1986, 141: 149-154.
- [7] Hansen E M. Comparison of porous ceramic cups and drainage lysimeters for sampling soil water $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration [J]. Tidsskrift for planteavl, 1991, 95.
- [8] Montgomery B R, Prunty L, Bauder J W. Vacuum through extractors for measuring drainage and nitrate flux through sandy soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1987, 51: 271-276.
- [9] 陈子明, 袁锋明, 姚造华. 北京潮土 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土体中的移动特点及其淋失动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 71-79.
- [10] 陈子明, 袁锋明, 姚造华. 氮肥施用对土体中氮素移动利用及其对产量的影响[J]. 土壤肥料, 1995(4): 36-42.
- [11] 袁锋明, 陈子明, 姚造华. 北京地区潮土表层中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化积累及其淋洗损失[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 388-399.
- [12] 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.
- [13] Maynard A A. Compost impact on groundwater [J]. Biocycle BCYCDK, 1993, 34 (4): 76-82.
- [14] 曹兵. 无机氮在土壤中的分布及氮肥损失途径研究[A]. 北京市农林科学院营资所和北京市土肥站. 北京市粮田提高化肥利用率研究与示范技术报告[R]. 2002.
- [15] Maynard A A. Effect of annual amendments of compost on nitrate leaching in nursery stock[J]. Compost Sci. Util., 1994, 2(3): 54-55.
- [16] 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.