

氮肥投入水平对蔬菜地硝态氮淋洗特征的影响

于红梅¹, 李子忠², 龚元石^{2*}, 陈清³, 张宏彦³, 曹一平³

(1 安徽农业大学资源环境学院, 合肥 230036; 2 中国农业大学资源与环境学院土壤和水系, 北京 100094;

3 中国农业大学资源与环境学院植物营养系, 北京 10094)

摘要: 通过3年的田间定位试验研究了不同施N条件下蔬菜地 NO_3^- -N淋洗浓度及淋洗量的变化。结果表明: 在农民习惯的传统施N处理(花椰菜为 450 kg/hm^2 , 茼蒿菜为 100 kg/hm^2 , 菠菜为 309 kg/hm^2)下蔬菜地 NO_3^- -N的淋洗浓度明显高于2个优化施N处理下蔬菜地的 NO_3^- -N淋洗浓度。在花椰菜、茼蒿菜和菠菜生长期, 2个优化施N处理下蔬菜地 NO_3^- -N平均淋洗量分别是传统施N处理下蔬菜地 NO_3^- -N平均淋洗量的19%、18%、9%和13%、34%、21%。试验期间传统施N处理下蔬菜地 NO_3^- -N年季平均累积淋洗量约占年季平均施N量的一半, 其中休闲期 NO_3^- -N平均累积淋洗量占年季平均累积施N量的20%; 而其他2个优化施N处理 NO_3^- -N年季平均累积淋洗量是年季平均累积施N量的27%, 休闲期 NO_3^- -N平均淋洗量占年季平均累积施N量的6%, 而处理间蔬菜产量并未受到明显影响。

关键词: 蔬菜地; 施氮量; 硝态氮淋洗

中图分类号: S143.1; S158.3

据对山东、北京等地的调查, 露地菜田N肥投入量超过蔬菜需求量的数倍^[1-2], 过量地施用N肥不但导致蔬菜质量的下降^[3], 同时也直接影响地下水的 NO_3^- -N含量^[4-6], 威胁人类的健康^[7]。因此, 如何通过合理地施用N肥降低 NO_3^- -N淋洗对地下水的潜在威胁, 一直是世界各国共同关注的问题^[8-10]。有研究表明在玉米种植期内N肥施用量减少到传统施N量的1/3, 即施N量从 500 kg/hm^2 减少到 170 kg/hm^2 , NO_3^- -N的淋洗量由 150 kg/hm^2 降低到 43 kg/hm^2 , 玉米产量未受影响^[11]。在蔬菜生产中也有相关的报道, 施N量为传统施N量的50%, 蔬菜产量比传统施N处理下的蔬菜产量降低5%, 而 NO_3^- -N的淋洗量只有传统施N处理的50%^[12]。但是, 在这些研究中并没有明确生产中如何合理确定施N量。本研究的目的在于分析不同施N量对蔬菜地 NO_3^- -N淋洗量的影响, 为蔬菜生产中合理确定施N量, 又不降低经济效益提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本条件

试验在北京市海淀区东北旺乡中国农业大学试

验基地进行, 地处华北平原北部山前冲积平原区, 位于东经 116.3° , 北纬 39.95° , 气候条件属于暖温带半湿润大陆季风性气候, 年平均气温 11.5°C , 年均降雨量 630 mm , 主要集中于夏季(6—8月)。土壤类型为草甸褐土, 地下水埋深 14 m , 灌溉水 NO_3^- -N含量 3.9 mg/L , NH_4^+ -N含量 0.6 mg/L 。试验地表层土壤(0~30 cm)的有机质含量为 15 g/kg , 全N 1.2 g/kg , 速效P(Olsen-P) 21.9 mg/kg 和速效K($1 \text{ mol/L NH}_4\text{OAc}$ 浸提) 109.6 mg/kg , 土壤pH(H_2O)为7.9。

1.2 试验设计

试验共设3个施N水平, 3次重复, 共9个小区, 小区面积为 $12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 。3个施N水平, N1: 传统施N量, 根据北京地区农民习惯采用施N量而设定, 一般花椰菜为施N 450 kg/hm^2 , 茼蒿菜为施N 100 kg/hm^2 , 菠菜为施N 309 kg/hm^2 ; N2: 根据N素专家系统基本原理设计的优化施N量确定^[13] ($\text{N肥推荐量} = \text{推荐阶段N吸收量} + \text{推荐阶段末根层土壤无机态N目标值} + \text{推荐期间N素损失量} - \text{推荐阶段开始根层土壤无机N量} - \text{推荐阶段根层土壤有机N矿化量} - \text{推荐阶段作物残茬N素矿化量}$),

* 通讯作者 (gongys@cau.edu.cn)

作者简介: 于红梅 (1970—), 女, 吉林磐石人, 博士, 讲师, 主要从事农业水肥资源管理方面的研究。E-mail: hongmeiyujilin@163.com

具体的施肥时间、次数与 N1 处理相同；N3：采用与 N2 处理相同的 N 素推荐方法，在此基础上采用计算施 N 量的 80%。设置该处理的目的在于对 N2 处理的可靠性进行评价，即假定 N2 合理，则在其基础上降低 N 肥用量 20% 不会对产量有很大的影响。

试验期间在每个施 N 处理下选择其中的 1 个小区埋设 TDR（时域反射仪）2 根和张力计 3 根及溶

液提取器 3 个。分别测定 0 ~ 120 cm 土层的土壤含水量，75 cm、105 cm 处土壤基质势及土体 90 cm 处的 NO_3^- -N 浓度，其中 TDR 和张计每 2 天测定 1 次，溶液提取器每周取样 1 次，利用连续流动分析仪 (TAACS2000) 测定 NO_3^- -N 浓度。各小区采用微喷系统进行灌溉，灌溉量依据当地农民习惯采用的灌溉量和灌溉时间，不同蔬菜生长季节内的降雨量和灌溉量如表 1 所示。

表 1 试验期间降雨量、灌溉量及施 N 量

Table 1 Rainfall, irrigation amount and applied N-fertilizer amount in different years during experiment

年份	蔬菜种类	降雨量 (mm)	灌溉量 (mm)	施 N 量 (kg/hm^2)		
				N1	N2	N3
1999	菠菜	64.7	176.1	309.0	82.0	66.0
2000	花椰菜	45.1	294.1	450.0	165.9	189.8
	苋菜	151.0	85.5	100.0	26.0	26.2
	菠菜	65.6	128.2	309.0	81.4	72.0
2001	花椰菜	21.9	290.7	450.0	109.5	71.6
	苋菜	52.7	107.4	100.0	—	—
	菠菜	143.7	123.4	309.0	126.3	99.6

注：“—”未施肥。

试验从 1999 年 9 月到 2001 年 10 月，历时 3 年，1999 年是在前茬作物苋菜收获后，开始种植菠菜，2000 年和 2001 年根据相应的季节变化依次种植花椰菜-苋菜-菠菜。所有处理中有机肥、P 肥和 K 肥施用量完全相同。

1.3 NO_3^- -N 淋洗量计算

根据 Darcy 定律，由土体 75 cm 和 105 cm 处实测的土水势值，计算 90 cm 处的水分通量：

$$q_{90} = K(h) \frac{H_{105} - H_{75}}{30} \quad (1)$$

式中 q_{90} 表示土体 90 cm 处的水分通量，即单位时间通过单位面积土壤的水量 (cm/d)，向下为正，负值表示土壤水分向上运动； H 为土壤剖面某点的总土水势 (cm)。 $K(h)$ 利用 Van Genuchten^[14] 提出的公式来计算：

$$K(h) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} \right)^l \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

式中 K_s 为饱和导水率 (cm/d)， θ 为土壤某一时间段

90 cm 处的土壤含水量 (cm^3/cm^3)， θ_r 为残留土壤含水量； θ_s 为饱和土壤含水量； m 为通过土体 60 ~ 90 cm 的水分特征曲线而得的水力学参数。

在土壤 90 cm 处的 NO_3^- -N 淋洗量 (L_N) 可通过以下公式计算：

$$L_N = q_{90} \times C_{90} \quad (3)$$

式中 q_{90} 是通过公式 (2) 计算出土体 90 cm 处的水分通量； C_{90} 是在同一深度处用溶液提取器提取的土壤溶液中的 NO_3^- -N 含量 (mg/L)。选择土壤 90 cm 处计算土体的水分渗漏量和 NO_3^- -N 淋洗量是根据蔬菜生长期的根长密度来决定的，蔬菜的根系主要分布在土体 90 cm 以上。

2 结果与讨论

2.1 NO_3^- -N 淋洗浓度

由表 2 所示，蔬菜地 NO_3^- -N 平均淋洗浓度以 N1 处理为最高 (118.4 mg/L)，其他两个施 N 处理的 NO_3^- -N 平均淋洗浓度相差不大 (48.2 mg/L 和 54.9 mg/L)。从蔬菜地 NO_3^- -N 淋洗浓度的变化趋势来分

析,在试验初期(即2000年茼蒿种植之前)N1处理下的 NO_3^- -N淋洗浓度较低,随着种植时间的延长, NO_3^- -N淋洗浓度有明显升高的趋势;N2和N3处理中 NO_3^- -N淋洗浓度比较接近而相对于N1处理较低,随种植年限的延长,虽也有增加的趋势,但增加的幅度较小。这一结果是由于处理间施N量的不同所致。N1处理的施N量是N2和N3处理施N量的2~6倍,导致传统施N处理下蔬菜地N素残留

量较大,随着灌溉水或者雨水向下淋洗,其 NO_3^- -N淋洗浓度较高。从蔬菜地休闲期的 NO_3^- -N淋洗浓度上分析,也证明了这一点。除2000年6月份N1处理下蔬菜地休闲期 NO_3^- -N淋洗浓度低于N3处理外,其余年份均以N1处理的 NO_3^- -N淋洗浓度为最高,由于N2和N3处理施N量比较接近以及土体 NO_3^- -N淋洗浓度存在空间变异性^[15],因此两处理下的淋洗浓度差异不大。

表2 不同水氮管理下不同时期蔬菜地90 cm处土壤溶液中 NO_3^- -N的平均浓度(mg/L)

Table 2 Mean NO_3^- -N concentrations in vegetable soil solutions at 90 cm depths in subsequent cropping periods during experiment

年份	蔬菜种类	取样数	N1	N2	N3
1999	菠菜	5	20.9	14.5	21.1
2000	花椰菜	6	68.6	44.9	57.2
	6月休闲	1	62.0	39.9	72.3
	茼蒿	2	106.6	38.7	97.4
	8月休闲	1	323.5	71.5	74.6
	菠菜	2	85.6	68.5	59.1
2001	花椰菜	4	120.3	62.1	46.0
	6月休闲	1	119.4	30.9	45.1
	茼蒿	3	106.9	31.2	32.2
	8月休闲	1	133.6	—	—
	菠菜	8	154.9	80.2	44.2
	平均	34	118.4	48.2	54.9

注:“—”未取样。

另外,蔬菜地8月份休闲期 NO_3^- -N平均淋洗浓度均高于6月份蔬菜地休闲期的 NO_3^- -N的淋洗浓度,这是由于北京地区6月份相对于8月份降雨量较少,蔬菜地水分渗漏量较低,而 NO_3^- -N的淋洗浓度也相应较低。

2.2 NO_3^- -N淋洗量

蔬菜地 NO_3^- -N的累积淋洗量与N肥的施用量有直接的关系(表1、表3),随着施N量的增加, NO_3^- -N的累积淋洗量有增加的趋势。N2处理下花椰菜、茼蒿和菠菜生长期内的单季 NO_3^- -N平均淋洗量分别是传统施N处理(N1)下各季蔬菜生长期平均 NO_3^- -N淋洗量的19%、9%和34%;N3处理下花椰菜、茼蒿和菠菜生长期内的单季 NO_3^- -N平均淋洗量只有N1处理的18%、13%和21%;而N2处理下各季蔬菜生长期平均 NO_3^- -N淋洗量是N3处理的1.1、0.7和1.6倍。从蔬菜地 NO_3^- -N年平均累积淋洗量上分析,在传统施N处理N1中,蔬菜地 NO_3^- -N的年平均累积淋洗量为该处理年平均累积

表3 不同年份蔬菜地 NO_3^- -N淋洗量的变化(kg/hm^2)

Table 3 Cumulative NO_3^- -N leaching amount at 90 cm depths of vegetable fields under different applied N-fertilizer treatments in different years

年份	蔬菜种类	N1	N2	N3
1999	菠菜	22.0	11.0	11.2
2000	花椰菜	64.3	11.7	16.2
	6月休闲	22.1	2.3	3.8
	茼蒿	95.9	6.1	14.6
	8月休闲	213.1	8.1	9.8
2001	花椰菜	164.0	32.6	25.8
	6月休闲	30.3	5.3	5.8
	茼蒿	83.0	9.8	9.5
	8月休闲	91.9	17.7	10.0
	菠菜	120.2	37.3	18.4
	花椰菜生长期平均淋洗量	114.2	22.2	21.0
	茼蒿生长期平均淋洗量	89.5	8.0	12.1
	菠菜生长期平均淋洗量	71.1	24.2	14.8
	6月份休闲期 NO_3^- -N累积淋洗量	52.4	7.6	9.6
	8月份休闲期 NO_3^- -N累积淋洗量	305	25.8	19.8

施 N 总量的 52%, 占施 N 量的一半左右, 其中休闲期蔬菜地 NO_3^- -N 平均淋洗量占年平均施 N 量的 20%, 约有 1/5 的 N 素是在蔬菜地休闲期被淋洗掉了, 因此, 传统施 N 处理下蔬菜地休闲期的 NO_3^- -N 淋洗量是不容忽视的。在 N2 和 N3 处理下蔬菜地 NO_3^- -N 的年平均累积淋洗量都分别占这两个处理年平均累积施 N 量的 27%, 而这两个优化处理蔬菜地休闲期 NO_3^- -N 平均淋洗量是年平均施 N 量的 6%, 明显降低了 N 素的淋洗损失量。

2.3 蔬菜产量

由表 4 可见, 不同年份蔬菜的产量除 1999 年 N1 处理菠菜的产量较 N3 处理高并达到显著水平 ($P<0.05$), 以及 2001 年 N2 和 N3 处理下花椰菜产量明显 ($P<0.05$) 低于 N1 处理外, 其余处理间蔬菜产量均无显著差异。

表 4 不同年份不同施 N 处理下蔬菜的产量 (t/hm^2 , 鲜重)

Table 4 Vegetable yields under different N-fertilizer applied treatments in different years

年份	蔬菜种类	N1	N2	N3
1999	菠菜	16.3a	14.4ab	12.1b
2000	花椰菜	23.4a	19.6a	20.5a
	苋菜	14.3a	13.7a	11.6a
	菠菜	34.8a	32.9a	36.4a
2001	花椰菜	19.1a	16.0b	14.4b
	苋菜	22.8a	18.9a	18.6a
	菠菜	37.3a	35.6a	34.8a

注: 同一行字母相同表示无显著性差异 ($P>0.05$)。

3 结论

蔬菜地 NO_3^- -N 淋洗量与施 N 量有直接的关系, 土壤 N 素残留量愈高, NO_3^- -N 的淋洗风险愈大。加之我国蔬菜种植历史相对较短, 施肥技术相对落后, 施肥过量问题严重。因此, 在蔬菜生长中确定合理的施 N 量尤为重要。本研究利用 N-Expert 系统计算的施 N 量, 不但考虑了土壤中有机 N 的矿化量, 而且考虑到土壤中无机态 N 素的残留量, 充分利用土壤中原有的 N 素, 使优化处理的施 N 量只有目前农民习惯施 N 量的 1/4 ~ 1/2, 明显降低生产成本的同时, 大大降低蔬菜地 NO_3^- -N 的淋洗量。并且处理间蔬菜产量并未受到显著影响, 说明利用 N-Expert 系统确定蔬菜生长过程的施 N 量, 在农业生产中有很大的推广价值。

参考文献:

- [1] 陈新平, 张福锁. 北京地区蔬菜施肥总量与对策. 中国农业大学学报, 1996, 1 (5): 63-66
- [2] 李俊良, 张晓晟, 王复三, 隋方功, 陈宁. 蔬菜生产中土壤与施肥问题的研究 // 李晓林, 张福锁, 米国华. 平衡施肥与可持续优质蔬菜生产. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 177-184
- [3] 于红梅, 龚元石, 李子忠, 张小兰. 不同水氮管理对苋菜和菠菜的产量及硝酸盐含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (3): 302-305
- [4] Iowa Department of Natural Resources. Iowa state-wide rural well-water survey, summary of results: Nitrate and bacteria. Iowa: Iowa Dep. of Natural Resources, 1990
- [5] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. 植物营养与肥料学报, 1995, 1 (2): 80-87
- [6] Ramos C, Agut A, Lidón AL. Nitrate leaching in important crops of the Valencian Community. Environmental Pollution, 2002, 118: 215-223
- [7] Heathwaite AL, Trudgill ST, Burl T. Nitrate: The issues // Burt TP, Heathwaite AL, Trudgill ST. Nitrate: Processes, Patterns, and Management. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1993: 8
- [8] Keeney D. Sources of nitrate to groundwater. Crit. Rev. Environ. Control, 1986, 16: 257-304
- [9] Román R, Caballero R, Bustos A, Díez JA, Cartagena MC, Vallejo A, Caballero A. Water and solute movement under conventional corn in Central Spain. I. Water balance. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 1530-1536
- [10] Díez JA, Caballero R, Roman R, Tarquis A, Cartagena MC, Vallejo A. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. J. Environ. Qual., 2000, 29: 1539-1547
- [11] Moreno F, Cayuela JA, Fernández JE, Fernández-Boy E, Murillo JM, Cabrea F. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. Agricultural Water Management, 1996, 32: 71-83
- [12] Ramos C, Domingo R, Oliver J. Nitrate leaching under two nitrogen managements // Germon JC. Management Systems to Reduce Impact of Nitrates. London: Elsevier Applied Science, 1989: 99-109
- [13] Fink M, Scharpf H. N-Expert -A decision support system

- for vegetable fertilization in the field. *Acta Hortic.*, 1993, 339: 67-74
- [14] Van Genuchten RMT. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 40: 892-898
- [15] Kengni L, Vachaud G, Thony JL, Laty R, Garino B, Cassabianca H, Jame P, Viscogliosi R. Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated corn. *J. Hydrol.*, 1994, 162: 23-46

Effect of N-Fertilizer Input Level on Characteristic of Nitrate Leaching in Vegetable Soil

YU Hong-mei¹, LI Zi-zhong², GONG Yuan-shi², CHEN Qing³, ZHANG Hong-yan³, CAO Yi-ping³

(1 College of Resources and Environmental Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2 Department of Soil and water Sciences, China Agricultural University, Beijing 10094, China;

3 Department of plant nutrition, China Agricultural University, Beijing 10094, China)

Abstract: A 3-year field experiment was conducted at China Agricultural University Field Station in Beijing suburb to study characteristics of nitrate leaching in vegetable fields under different applied N-fertilizer amount treatments. Results showed that nitrate concentrate under traditional N-fertilizer applied treatment was significantly higher than those of two improved N-fertilizer applied treatments; Average nitrate leaching amount during Cauliflower, Amaranth and Spinach growth under two improved applied N-fertilizer amount treatments were of 19%, 18%, 9% and 13%, 34%, 21% of those of traditional treatment; In the whole experiment period and in the fallow period, annual average cumulative nitrate leaching amount under traditional N-fertilizer treatment constituted of 1/2 and 20% of total N-fertilizer applied amount, respectively, contrasting to less than 1/4, 6% under two improved N-fertilizer treatments, respectively. No significant influence on vegetable yields was found between different treatments.

Key words: Vegetable field, Applied N-fertilizer amount, Nitrate leaching