

南京郊区大白菜生长期氮素的供应及利用

贺发云¹, 尹斌^{1*}, 曹兵², 蔡贵信¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100089)

摘要: 在南京郊区露地生产条件下, 研究了不同施肥处理秋季大白菜生长期的土壤 N 素供应、作物养分吸收利用和肥料 N 素损失。结果表明, 在大白菜整个生育期, 耕层土壤供 N 量为 50.7 kg/hm², 占土壤全 N 量的 1.07%。作物收获期地上部分生物量和 N 素含量随施 N 量的提高而升高, 施用 N 肥显著增加了大白菜的生物量, 提高幅度高达 3~4 倍。植株吸收 N 量 70% 以上来源于肥料 N。在本试验条件下, 尿素 N 肥表观利用率为 26%~35%, 土壤 NO₃⁻-N 含量随 N 肥施用量的增加而升高, 主要累积在 0~40 cm 土层中。

关键词: 大白菜; 土壤供氮量; 氮肥利用率

中图分类号: S143.1

近年来, 随着我国农业种植结构的调整, 蔬菜种植面积不断扩大, 2003 年蔬菜播种面积已占农作物总播种面积的 11.8%^[1]。蔬菜生育期较短、种类繁多、对养分的需求各异, 但与大田作物比较, 有吸收养分高、需肥量高的特点。张福锁等^[2]的调查结果表明, 蔬菜的施肥量, 尤其是 N 肥远远高于粮食作物, 也远高于蔬菜 N 肥推荐量。N 肥的过量施用, 不仅降低了 N 肥的利用率, 增加农业成本, 而且 N 素损失对环境造成潜在危害^[3-6]。

大白菜是我国主要栽培的蔬菜品种之一。其株型大、产量高、对土壤养分的耗竭明显, 及时合理地供给养分, 是保证大白菜优质高产的关键措施之一^[7]。合理的 N 素管理, 需要了解蔬菜的养分吸收规律和土壤 N 素的供应状况。搞清土壤-作物体系中土壤 N 素的供应、作物对 N 素的需求量和施入 N 肥的利用率, 是确定适宜 N 肥用量的关键^[8]。为此, 本文以南京郊区露地生产条件下的秋季大白菜为研究对象, 设置不同施肥处理, 研究大白菜生长期 N 素吸收累积规律、土壤 N 素的供应过程以及对化学 N 肥的利用, 为大白菜合理施用 N 肥和确定施肥期提供基本参数和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计与管理

进行。供试大白菜品种为青杂三号, 株行距为 40 cm × 50 cm。试验设对照 (CK)、施有机肥 (OM)、低 N (LN) 和高 N (HN, 农民习惯施肥量) 4 个处理, 施化肥 N 量依次为 0、0、300 和 600 kg/hm², 4 次重复, 随机区组排列, 小区面积为 25 m²。低 N 和高 N 两处理均施用普通尿素, 其中 25% 作基肥、25% 在莲座期追施、50% 在结球初期追施。对照 (CK) 不施有机肥料, 其他 3 个处理整地前施入等量的有机肥 (腐熟猪粪, 30 t/hm²); 4 个处理施入等量的 P 肥和 K 肥 (P 肥为过磷酸钙, K 肥为氯化钾, 以 P₂O₅ 和 K₂O 计各 150 kg/hm²)。肥料撒施后翻入土中, 耙平。在移栽当天及随后每隔 3~4 天浇水, 或视土壤干湿状况而定。追肥尿素后浇水 (约 150 m³/hm²)。

试验地的土壤为下蜀黄土发育的马肝土, 耕层土壤 (0~20 cm) 的 pH 7.69, 有机质 25.3 g/kg, 土壤全 N 1.52 g/kg、全 P 2.75 g/kg、全 K 22.9 g/kg、速效 P (Olsen 法) 48.0 mg/kg 及速效 K (1 mol/L NH₄OAc 浸提) 135 mg/kg, 属肥力较高的土壤。

1.2 取样及测定方法

土壤样品采集: 施底肥前随机采集 5 点耕层 (0~20 cm) 土壤样品, 分析测定土壤基本理化性质^[9]。施底肥前、作物生长期和收获后, 在各小区采集

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40171048) 资助。

* 通讯作者 (byin@issas.ac.cn)

作者简介: 贺发云 (1974—), 男, 江西莲花人, 助理研究员, 主要从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail: hfy@issas.ac.cn

3 点根层 (0 ~ 40 cm) 土样, 同层土样相混组成混合样。将新鲜土样碾碎过 3 mm 孔筛后, 立即用 2 mol/L KCl 溶液 (土水比 = 1:5) 浸提, 振荡 1 h 后过滤。滤液用连续流动分析仪测定土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。烘干法 (105 °C 下烘 24 h) 测定土壤水分含量。

大白菜取样: 分别在移栽、大白菜各生育期和收获时采集地上部植株样品。每小区取 3 株, 用于测试植株地上部的生物量和全 N 含量。大白菜经济产量及生物产量的测定以小区为单位计产。依据大白菜地上部的 N 素浓度及干重计算出养分吸收量, 并按单位面积株数及小区实际产量计算出单位面积养分累积量以及形成单位重量产品的养分吸收量。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥处理对大白菜生物量及养分吸收的影响

由表 1 可知, 施尿素 (LN 和 HN) 处理大白菜地上部生物量显著高于不施 N (CK) 和只施有机肥 (OM) 处理, 其中 HN 处理显著高于 LN 处理; 单施有机肥非但没有增产效果, 反而导致大白菜生物量明显偏低, 其原因可能是有机肥腐熟不彻底影响大白菜的前期生长 (田间长势明显较差), 从而降低了大白菜的生物量; N 肥的施用显著提高了大白菜地上部的 N 素含量, 但对白菜地上部 P 和 K 的含量并没有影响。

表 1 不同处理收获期大白菜地上部生物量、养分吸收量及肥料利用率
Table 1 Yield, nutrient uptake and fertilizer recovery rate of Chinese cabbages at harvest

处理	生物量 (t/hm ²)	养分含量 (g/kg)			大白菜需养分量 (kg/t)			N 肥利用率 (%)
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	19.4 c	18.9 c	7.1 a	36.2 a	1.83 b	0.65 b	3.53 a	-
OM	11.1 c	16.2 c	7.9 a	33.8 b	1.71 b	0.79 a	3.64 a	-
LN	59.1 b	32.3 a	6.3 a	37.1 a	2.11 a	0.40 c	2.51 b	35.2
HN	81.3 a	33.8 a	6.1 a	34.2 b	2.15 a	0.38 c	2.18 c	25.9

注: 同列内相同字母表示差异未达到 $P < 0.05$ 显著水平 (下同)。

从表 1 可看出, 每生产 1 t 大白菜的 N 吸收量随着生物产量的提高而增多, P 和 K 的吸收量则随着生物产量的提高而降低, 即与 N 相比, P 和 K 的吸收比例随施 N 量和生物量的增加而降低。CK 处理下, 大白菜生物量为 19.4 t/hm², N、P、K 的吸收比例为 1.0:0.35:1.93; 而高 N (HN) 处理生物量为 81.3 t/hm², N、P、K 的吸收比例为 1.0:0.18:1.0。利用差值法计算施用 N 肥处理 (LN 和 HN) 的 N 肥利用率, 变化在 25.9% ~ 35.2% 之间 (表 1), 其趋势是随着 N 肥施用量的增加而降低。这与李俊良等人^[10]在山东大白菜上试验的结果相差不大。

2.2 大白菜生长期土壤的供 N 量

土壤供 N 量是指作物生长期土壤为作物提供的有效 N 量。主要有两个来源: 其一是土壤中的矿质 N; 其二是作物生长期土壤有机 N 矿化出的 N 量。土壤 N 素矿化过程很大程度上反映出土壤供 N 过程。土壤供 N 量和过程是确定适宜 N 肥用量和时期的重要参数^[8]

根据对照区不同生育期 0 ~ 20 cm 土层中土壤矿质 N 含量的变化以及大白菜吸收的 N 素数量, 可以计算出土壤 N 素供应量。从表 2 看出, 从播种至大白菜包心前期, 作物对 N 素的吸收数量相对较多

表 2 大白菜不同生育期 0 ~ 20 cm 耕层土壤供 N 量的估算 (kg/hm²)
Table 2 Estimated soil nitrogen supply in 0 ~ 20 cm layer during the growth period of Chinese cabbage

项目	包心前		包心期		包心后		整个生育期	
	9/1	10/17	10/17	11/17	11/17	12/5	9/1	12/5
起始时土壤矿质 N	37.9 ± 1.2		26.1 ± 2.1		17.7 ± 0.4		37.9 ± 1.2	
作物 N 素吸收量	14.0 ± 0.9		12.3 ± 0.7		9.20 ± 0.9		35.5 ± 1.1	
结束时土壤矿质 N	26.1 ± 2.1		17.7 ± 0.4		15.2 ± 0.6		15.2 ± 0.6	
土壤供 N 量	40.1 ± 2.0		30.0 ± 1.5		24.4 ± 2.1		50.7 ± 1.3	

注: 土壤供 N 量 = 生育期间作物吸 N 量 + 结束时土壤矿质 N 量。

(14.0 kg/hm²), 0~20 cm 土壤的矿质 N 量降低也较多 (11.8 kg/hm²), 计算出这期间 N 素的供应量为 40.1 kg/hm², 但因生育期较长且植株生物量较小, 大白菜日均吸 N 量不高 (0.3 kg/hm²)。包心期和包心后期大白菜的日均吸 N 量分别为 0.4 kg/hm² 和 0.5 kg/hm², 而土壤的 N 素供应量则为 30.0 kg/hm² 和 24.4 kg/hm²。与大白菜包心前相比, 包心期至收获的 50 天中, 由于作物进入旺盛生长阶段, 对 N 素的需求量增加很快, 土壤 N 素的供应量也较高, 达 54.4 kg/hm²。从整个生育期来看, 按 0~20 cm 土层计算, 土壤对大白菜的供 N 量为 50.7 kg/hm², 占该土层全 N 储量的 1.07%。

不同试验条件下土壤 N 素供应量差异很大。朱兆良^[8]在研究和总结了水稻和小麦等主要粮食作物上耕层土壤 N 素供应的试验结果表明, 土壤 N 素供应量变化在 34.5~126 kg/hm² 之间, 占 0~20 cm 土层全 N 储量的 1.2%~3.3%。李俊良^[10]报道 0

~60 cm 土壤 N 素供应量高达 193 kg/hm², 占土壤全 N 储量的 5.68%; 而陈清等人^[11-12]研究表明土壤 N 素的供应量和供应率分别只有 38 kg/hm² 和 0.49%。不同试验结果差异如此之大, 原因在于土壤 N 素矿化作用是由微生物驱动的将有机 N 转化为无机 N 的过程, 在一段时间内, 矿化产生的无机 N 量不仅取决于有机 N 的多少和性质, 而且与微生物活动的外部条件诸如温度、水分等因素有关。对同一土壤来说, 对不同作物的供 N 量主要决定于该作物生长期的长短以及生长期内气温和降水或灌溉等的情况^[8]。本试验大白菜生长期间土壤 N 素供应量和供应率较低与大白菜生长期较短和土温较低有关, 也意味着该种土壤有机 N 比较难以分解。

2.3 土壤和 N 肥对大白菜吸收 N 素的贡献

对不同处理条件下大白菜各生育期的 N 素吸收动态的研究表明 (表 3), 各处理大白菜吸收 N 素的过程相似, 即包心期吸收量最大、包心前次之、包

表 3 不同处理大白菜各生育期地上部分的吸 N 量 (kg/hm²)

Table 3 N uptaken by Chinese cabbage during the growth period in different treatments

处理	包心前	包心期	包心后	整个生育期
	9/1—10/17	10/17—11/17	11/17—12/5	9/1—12/5
CK	14.0 (0.30) c	12.3 (0.40) c	9.20 (0.48) b	35.5 (0.37) c
OM	8.80 (0.19) d	8.80 (0.28) c	1.40 (0.07) c	19.0 (0.20) d
LN	20.6 (0.45) b	94.1 (3.04) b	10.0 (0.53) b	124.7 (1.30) b
HN	43.7 (0.95) a	112.5 (3.63) a	18.4 (0.97) a	174.6 (1.82) a

注: 括号内为每天吸 N 量。

心后最小。在包心前期 46 天内, 各处理地上部分日均吸收 N 量 < 1 kg/hm², 以 HN 处理最高, 为 0.95 kg/hm²; OM 处理在此阶段 N 素吸收量和日均吸 N 量均最少, 但其占整个生育期 N 素吸收总量的 46.3%。在包心期 31 天内, LN 和 HN 处理的大白菜地上部吸 N 量迅速增加, 分别占 N 素吸收总量的 75.5% 和 64.4%, 日均吸 N 量也达 3.04 kg/hm² 和 3.63 kg/hm²。包心后期各处理吸 N 量明显减少, 除 CK 处理以外, 其他处理的吸 N 量只占总吸 N 量 10% 以下, 而 CK 为 25.9%。从表 3 还可以看出, 大白菜地上部的吸 N 量随着施 N 量的增加而增加, 这与大白菜生物量的增加趋势一致; 而不施肥的 CK 处理地上部吸 N 量则随生育期的延长而逐渐减少。低 N (LN) 和高 N (HN) 处理在大白菜包心期吸收的

N 素中分别有 86.9% 和 89.1% 来自肥料 N, 而在包心后期 HN 处理大白菜吸收的 N 素仍然有 50% 来自肥料 N。从整个生育期来看, LN 和 HN 处理大白菜生长对土壤供 N 量的依赖性随着施 N 量的增加而降低, 分别为 28.5% 和 20.3%。曾壁容^[13]试验结果也表明, 大白菜吸收的 N 素中 33.7% 来自土壤。据朱兆良等^[8]的研究结果表明太湖地区水稻高产时对土壤 N 素的依赖性为 67.2%~75.9%, 北方地区有的高达 85%。土壤肥力状况、作物类型和品种以及环境条件等诸多因素影响土壤供 N 量的相对大小。本试验结果表明, 大白菜对 N 肥的依赖性较大, 需 N 最多的时期是包心期, 此时期对 N 素的吸收速率最快, 容易造成土壤中 N 素亏缺。因此, 在大白菜中后期尤其是包心初期及时追施 N 肥对

于满足作物养分需求是非常必要的。

2.4 土壤矿质 N 含量与大白菜吸 N 量的关系

从大白菜生长期地上部吸 N 量的动态变化看出(表 3、图 1), 施 N 肥(LN 和 HN) 处理大白菜吸收 N 素的时期主要集中在包心期(10 月 17 日—11 月 17 日), 其生长时间仅占全生长期的 1/3, 而地上

部吸 N 量则占总吸 N 量的一半以上。CK 和 OM 处理整个生育期的 N 素吸收较低, 地上部吸 N 量随生长期的延长而呈线形增加。

土壤矿质 N 的动态变化可划分为两种类型: 一是递减型, 即随着生育期延长, 矿质 N 含量不断降低; 二是先增后减再增型(图 1)。

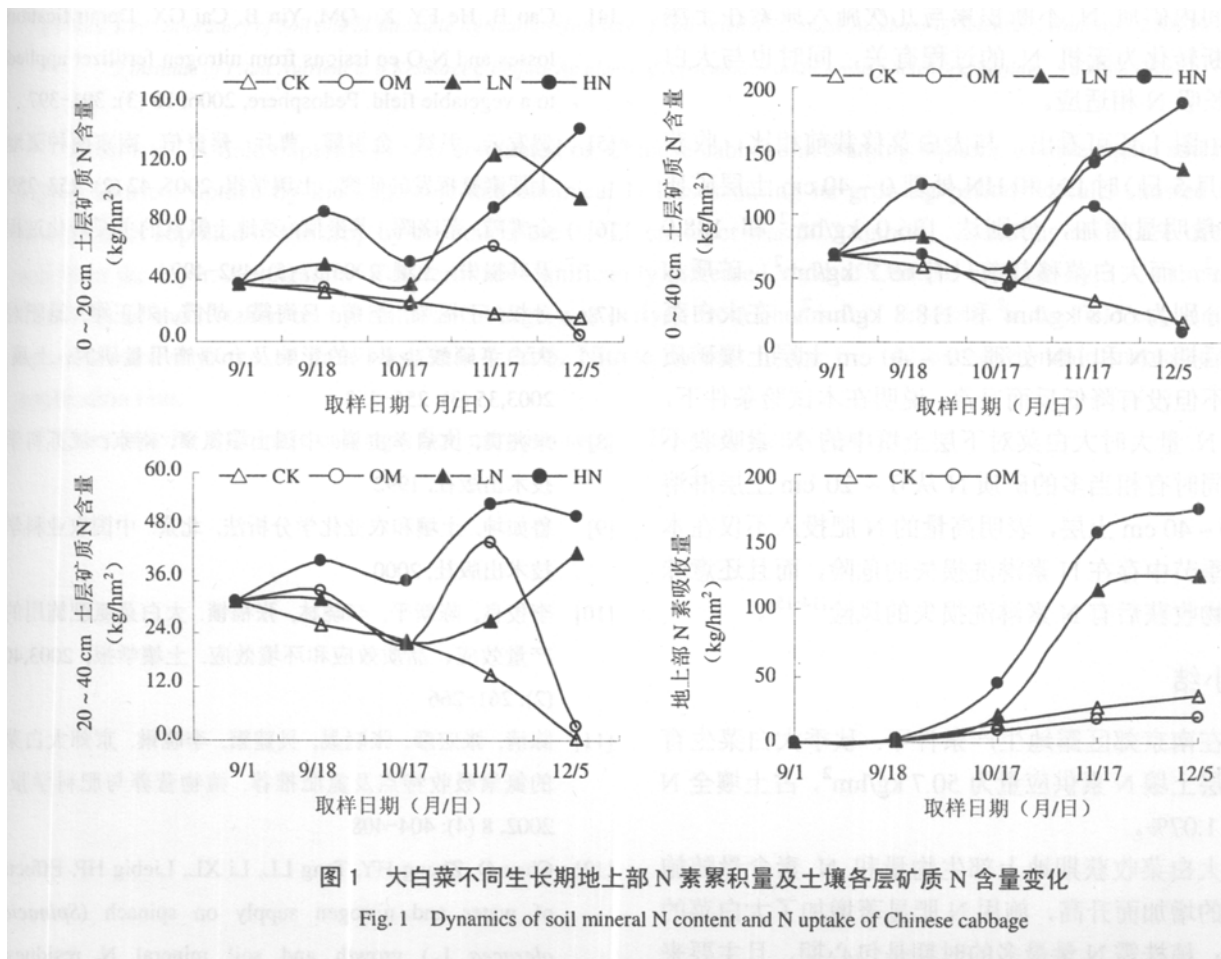


图 1 大白菜不同生长期地上部 N 素累积量及土壤各层矿质 N 含量变化

Fig. 1 Dynamics of soil mineral N content and N uptake of Chinese cabbage

对照(CK)处理 0~40 cm 土层土壤矿质 N 含量的变化表现为递减型, 其中 0~20 cm 土层矿质 N 量在整个生长期中均较低(15.2~38.0 kg/hm²), 且未随地上部吸 N 量增加而表现明显波动; 该处理 20~40 cm 土层矿质 N 量在大白菜包心前(10 月 17 日前)也无明显变化, 仅在大白菜包心初期到收获期, 随地上部吸 N 量迅速增加, 才表现出较为明显的降低趋势(图 1)。CK 处理在大白菜生长前期因生物量少, 需肥不多, 大部分根系分布在 0~20 cm 土层, 主要靠表层土壤矿质 N 来提供其所需的 N 素。而在生育中后期, 随着生物量的增大和根系伸展, 对 N 素需求量增多, 表层土壤的矿质 N 已经不能满足大白菜的需求。此时有部分根系下扎到 20 cm 以下, 增加了对深层 20~40 cm 土壤矿质 N 的吸收利

用。CK 处理 0~40 cm 土层土壤中矿质 N 累积量与大白菜吸 N 量的相关关系分析表明, 二者之间呈极显著线性负相关($y = -1.34x + 66, R^2 = 0.97$)。

施有机肥(OM)、低 N(LN)和高 N(HN) 3 个处理的矿质 N 量动态变化表现为先增后减再增加类型(图 1)。无论是 0~20 cm 及 20~40 cm 土层还是 0~40 cm 土层, 3 种处理土壤矿质 N 量的第 1 个峰值大致出现在施肥后的第 20 天(9 月 18 日), 之后表现下降趋势; 土壤矿质 N 量的第 2 个高峰值出现的时间因不同土层和处理有所不同, 0~20 cm 与 0~40 cm 土层的 OM 和 LN 处理高峰值出现的时间相同并要早于 HN 处理, 分别大致在移栽后第 77 天(11 月 17 日)和第 96 天(12 月 5 日), 之后 OM 和 LN 处理表现下降趋势; OM 和 HN 处理 20~40

cm 土层的高峰值出现的时间相同并早于 LN 处理, 分别大致在移栽后第 77 天 (11 月 17 日) 和第 96 天 (12 月 5 日) 左右, 之后 OM 和 HN 处理表现下降趋势; 同时各土层所有处理的第 2 个峰值远高于第 1 个峰值。OM 处理出现峰值的原因与有机肥分解和矿化的结果有关。LN 和 HN 处理中较长时间内矿质 N 不断积累与几次施入尿素在土壤中不断转化为无机 N 的过程有关, 同时也与大白菜生长吸 N 相适应。

由图 1 还可看出, 与大白菜移栽前相比, 收获 (12 月 5 日) 时 LN 和 HN 处理 0~40 cm 土层矿质 N 含量明显增加, 分别达 136.0 kg/hm² 和 188.0 kg/hm², 而大白菜移栽前只有 69.2 kg/hm², 矿质 N 增量分别为 66.8 kg/hm² 和 118.8 kg/hm²。在大白菜生长后期 LN 和 HN 处理 20~40 cm 土层土壤矿质 N 量不但没有降低反而升高, 说明在本试验条件下, 在施 N 量大时大白菜对下层土壤中的 N 素吸收不多, 同时有相当多的矿质 N 从 0~20 cm 土层淋溶到 20~40 cm 土层, 表明高量的 N 肥投入不仅在本生产季节中存在 N 素淋洗损失的危险, 而且还意味着作物收获后有 N 素淋洗损失的风险^[14-15]。

3 小结

在南京郊区露地生产条件下, 秋季大白菜生育期耕层土壤 N 素供应量为 50.7 kg/hm², 占土壤全 N 量的 1.07%。

大白菜收获期地上部生物量和 N 素含量随施 N 量的增加而升高, 施用 N 肥显著增加了大白菜的产量; 植株需 N 量最多的时期是包心期, 且主要来源于肥料 N。

在本试验条件下, 尿素 N 表观利用率约为 30%; 土壤矿质 N 含量随 N 肥施用量的增加而升高, NO₃⁻-N 主要积累在 0~40 cm 土层。

参考文献:

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会编. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2004
- [2] 张福锁, 巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识. 土壤学报, 2002, 39 (增刊): 41-55
- [3] Zhu ZL, Chen DL. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2002, 63 (1): 117-127
- [4] Cao B, He FY, Xu QM, Yin B, Cai GX. Denitrification losses and N₂O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field. Pedosphere, 2006, 16 (3): 391-397
- [5] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 曹兵, 蔡贵信. 南京两种菜地上尿素氮挥发的研究. 土壤学报, 2005, 42 (2): 253-259
- [6] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信. 菜地土壤氮素的主要转化过程及其损失. 土壤, 2005, 37 (5): 492-499
- [7] 孙权, 丁福荣, 李鹏, 吕海霞, 胡霞, 刘正军. 氮肥对大白菜硝酸盐累积的影响及合理施用量研究. 土壤, 2003, 35 (3): 255-258
- [8] 朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
- [9] 鲁如坤. 土壤和农业化学分析法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- [10] 李俊良, 陈新平, 李晓林, 张福锁. 大白菜氮肥施用的产量效应、品质效应和环境效应. 土壤学报, 2003, 40 (2): 261-266
- [11] 陈清, 张宏彦, 张晓晟, 吴建繁, 李晓琳. 京郊大白菜的氮素吸收特点及氮肥推荐. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (4): 404-408
- [12] Chen Q, Zhang HY, Tang LL, Li XL, Liebig HP. Effects of water and nitrogen supply on spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth and soil mineral N residues. Pedosphere, 2002, 12 (2): 171-178
- [13] 曾壁容, 蒋佩弦, 彭群. 叶菜吸收养分的特性及配方施肥. 中国科学院南京土壤所蔬菜中试基地论文集. 1990: 35-39
- [14] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境. 土壤学报, 2002, 39 (增刊): 1-11
- [15] Stites W, Kraft GJ. Groundwater quality beneath irrigated vegetable fields in a north-central US sand plain. Journal of Environmental Quality, 2000, 29 (5): 1509-1517

N Supply and N Recovery by Chinese Cabbage During the Growing Period in Nanjing Suburbs

HE Fa-yun¹, YIN Bin¹, CAO Bing², CAI Gui-xin¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Institute of Plant Nutrient and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: A field experiment was conducted on Chinese cabbage in Nanjing suburbs to investigate soil nitrogen supply, nutrient uptake by the vegetable and chemical N losses during its growing period. Results showed that the amount of N supplied to the crop by the soil in the 0 ~ 20 cm layer was 50.7 kg/hm², accounting for 1.07% of the total soil N in the layer. Application of N fertilizer significantly increased yield of Chinese cabbage by 3 ~ 4 times. More than 70% of the N taken up by Chinese cabbage was derived from chemical N fertilizer. In the field experiment, the apparent recovery rate of urea was 26% ~ 35%. Nitrate content in the 0 ~ 40 cm soil profile increased with N application rate.

Key words: Chinese cabbage, Soil nitrogen supply, Efficiency of N fertilizer