

低量施氮对小青菜生长和氮素损失的影响

曹兵^{1,2,3}, 金雪霞¹, 蔡贵信¹, 范晓晖¹, 孙红霞⁴

(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, 江苏南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100089; 4 南京市雨花区农林局, 江苏南京 210012)

摘要: 采用田间试验和微区试验相结合, 研究了低量施氮对小青菜 (*Brassica chinensis*) 产量、氮肥利用率和氮素损失的影响, 其中氮素总损失用¹⁵N示踪法测定, 氨挥发用通气密闭室法测定, 反硝化损失用乙炔抑制-原状土柱培养法测定, 不加乙炔测定 N₂O 排放。结果表明, 施用氮肥显著增加了小青菜的产量和吸氮量, 在 75 和 150 kg/hm² 氮肥水平下, 氮肥利用率分别为 46.8% 和 39.4%。由于试验地土壤 pH 低 (5.38), 各处理的氨挥发均很低且差异不大, 施用氮肥没有增加氨挥发。试验地土壤反硝化损失和 N₂O 排放量较高, 分别为 N 4.34 kg/hm² 和 N 2.65 kg/hm², 施用氮肥没有增加反硝化损失和 N₂O 排放, 表明氮源不是反硝化作用的限制因子。在 N 75 和 150 kg/hm² 两个施氮水平下, 氮素回收率分别为 103% 和 91.3%, 并且土壤残留氮主要累积在 0–20cm 土层, 表明肥料氮损失很少, 这与氨挥发、反硝化损失较低的结果相吻合。

关键词: 小青菜; 氮肥利用率; 氮素损失

中图分类号: S643.306

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2005)04-0519-05

Effects of low rate nitrogen application on *Brassica chinensis* growth and N losses

CAO Bing^{1,2,3}, JIN Xue-xia¹, CAI Gui-xin¹, FAN Xiao-hui¹, SUN Hong-xia⁴

(1 State Key lab. of Soil and Sustainable Agric., Inst. of Soil Sci., CAS, Nanjing 210008, China; 2 Graduate School of CAS, Beijing 100049, China; 3 Inst. of Plant Nutr. and Resour., Beijing Academy of Agric. and For. Sci., Beijing 100089, China;

4 Agric. and For. Bureau of Yuhua District, Nanjing 210012, China)

Abstract: Understanding N-cycling in the soil-plant-atmosphere system is essential to maximize nitrogen use efficiency (NUE) and optimize nitrogen budget for crop production. Most researches on N loss and its environmental consequence mainly focused on the soil cultivated with field crop, however, few researches were carried out on the vegetable field. This study aimed to the effects of N fertilization on the fate of nitrogen and green cabbage (*Brassica chinensis*) growth. A field and a microplot experiment were combined to investigate the changes of green cabbage yield, NUE and nitrogen losses subjected to a low rate application of N fertilize. Labeled ¹⁵N technique, enclosure method, and acetylene inhibition-soil core incubation technique were used to measure total nitrogen loss, ammonia volatilization, denitrification loss and nitrous oxide emission, respectively. Results showed that yield and N uptake capacity of green cabbage increased significantly due to the application of nitrogen fertilizer. NUE was 46.8% and 39.4% at rate of N 75 and 150 kg/ha, respectively. The increase of ammonia volatilization was negligible mainly due to low soil pH (5.38). Denitrification loss (N 4.34 kg/ha) and N₂O emission (N 2.65 kg/ha) in the soil without nitrogen supply were rather high, and it was not affected by the application of nitrogen. Total recovery of applied N at rate of 75 and 150 kg N/ha was 103% and 91.3%, respectively. The majority of residue ¹⁵N concentrated on 0–20cm layer, indicating fertilizer nitrogen losses were small, which coincided with the results of low ammonia volatilization and denitrification losses.

Key words: green cabbage (*Brassica chinensis*); nitrogen use efficiency; nitrogen losses

收稿日期: 2004-07-07

修改稿收到日期: 2004-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40171048)资助。

作者简介: 曹兵(1970—), 男, 湖北枝城人, 博士研究生, 主要从事植物营养与施肥研究。

氮素是影响作物生长最主要的营养元素之一,通常被认为是作物产量的限制因子。据估计,作物的氮肥利用率大多在 50% 以下^[1-2]。氮素在土壤中非常活跃,若土壤中累积较多量的矿质氮时,则可能通过氨挥发、硝化、反硝化和硝酸盐淋溶等途径损失而造成对地下水和大气环境的污染。明确氮肥对作物生长、氮素损失程度和主要损失途径是合理施肥的基础。氮素损失途径及主要影响因子的研究一直是国内外氮循环研究的热点。过去有关氮素损失及其对环境的影响的研究主要集中在水稻、小麦、玉米等粮田土壤上,而对菜地土壤氮素损失方面的研究工作相对缺乏^[1]。

随着我国农业种植结构的调整和蔬菜在人们饮食结构中的比重增加,蔬菜的种植面积正急剧扩大。1978~1998 年期间,中国蔬菜种植面积扩大近 4 倍,1995 年后增加速度更快,2001 年蔬菜种植面积已占农作物总播种面积的 10.5%^[3],而且还有增加趋势。与一般粮食作物相比,蔬菜生产有“三高多”特点,具体表现为产量高、养分含量高、复种指数高、移走养分多,因此蔬菜施肥量一般较粮田作物高^[4]。在实际生产中,菜农在高产出、高收益刺激下,往往盲目高量投入化肥(尤其是氮肥),从而导致了蔬菜作物营养失调,硝酸盐和亚硝酸盐严重超标,品质下降;同时菜田土壤性状恶化,地下水富营养化且被严重污染^[5]。近年来,国内关于蔬菜合理施肥以及施肥对蔬菜产量、品质等方面的研究较多,但关于施肥对菜地土壤氮素损失及其对环境的影响的研究还不多见。为此,以南京市秋冬季主栽蔬菜品种之一的小青菜(*Brassica Chinensis*)为试材,通过田间小区和¹⁵N 微区试验,研究了不同施氮量对小青菜产量、氮肥利用率以及土壤氮素损失的影响,以期为合理施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验点位于南京市雨花区江苏武警总队蔬菜生产基地,土壤为马肝土。耕层土壤有机质含量为 2.26%,全氮含量为 0.152%,无机氮(N_{min}) 27.88mg/kg,有效 P 45.9mg/kg,有效 K 115mg/kg,pH 5.38。

2002 年秋天进行田间小区试验,小区面积 43m²,设 3 个处理:对照(不施氮肥,仅施磷钾,N0 表示),适氮(即农民习惯施肥量,尿素 N 150 kg/hm²,N150 表示)和低氮(尿素,N 75 kg/hm²,N75 表示),3

次重复,随机区组排列。各处理磷、钾肥用量相同,作底肥一次施入,磷肥为过磷酸钙,用量为 P₂O₅ 80 kg/hm²,钾肥为氯化钾,用量为 K₂O 80 kg/hm²。小青菜品种为矮脚黄,8 月下旬育苗,9 月 18 日整地,施底肥并平畦后移栽,行株距均为 20cm。氮肥用量的 60%作底肥撒施后耕翻,40%作追肥,在 9 月 28 日溶于水浇施。

移栽后 4d 内每天下午浇缓苗水,以后视土壤干湿状况 3~4d 左右浇水 1 次,水量以土表湿润为基准

1.2 取样与测定方法

1.2.1 ¹⁵N 同位素微区试验 采用原子百分超为 5.22% 的标记尿素进行微区试验。将 50cm(长)×40cm(宽)×40cm(高)的微区框埋进土壤至 10cm 露出地面,微区单位面积肥料用量和施用方法与小区相同,微区框内定植 4 棵小青菜。收获时,将小青菜地上部和地下部分开采收,随后测定鲜重、烘干重、含氮量和¹⁵N 丰度;将微区框内 0—20cm 土层土壤全部取出,称重并混合均匀后取 1 千克分样,将 20—40、40—70 和 70—100cm 土层用土钻取 5 钻土混合。分别测定土样的含水量、全氮含量、硝态氮和铵态氮含量,并将浸提液浓缩后测定¹⁵N 丰度。

1.2.2 反硝化与 N₂O 排放 用乙炔抑制原状土柱培养法。采用 PVC 材料制作成 15cm(15cm 的圆形培养桶,桶盖中心有一取气孔(用橡皮塞塞住),每个桶中放入 9 个用内径 3.2cm 的不锈钢土钻取出的 15cm 长原状土柱,土柱随机采样,土柱放入桶中密封,一组充入 10% 乙炔气体,另一组不充气,埋在地里培养 24h。取出后用注射器混匀气体并抽取 20mL 气体注入 18mL 的真空瓶中,带回室内分析。取完气体后,将不加乙炔的培养罐中土柱破碎混匀后取样测定土壤含水量和硝态氮含量。

气样分析采用 Agilent 4890D 气相色谱仪,色谱柱为填充 80~100 目 porapak Q 的填充柱,柱温 55℃,检测器温度 330℃,ECD 检测,采用十通进样反吹阀和四通切换阀进样,进样量 15mL,载气为高纯氮气,流量 30cm³/min。

1.2.3 氨挥发 采用通气密闭室法测定氨挥发,用 2% 的硼酸液吸收,吸收液用标准硫酸滴定。密闭室为直径 15cm、高 15cm 的圆柱形,换气频率 15 次/min 以上,每天上午 9:00~11:00 测定,该通量值作为每天氨挥发的平均通量^[6]。施肥后即开始测定,直到连续 3d 各施肥处理与对照氨挥发值一致停止测定。同时用专用采土器采集各小区表层 0—1cm 土样,带

回实验室分别测定表层土壤含水量、pH 和铵态氮含量。

所得试验数据采用 SAS 中单因素程序对数据进行方差分析和多重比较,5%显著水平。

2 结果与分析

2.1 产量和吸氮量

施用氮肥显著增加了小青菜产量,随着氮肥用量增加,小青菜的产量也随之增加,但两个施氮处理小青菜产量差异不显著(表 1)。小青菜的吸氮量也随着氮肥用量的增加而增加,施氮处理小青菜的吸氮量显著高于对照,而两个施氮处理间小青菜的吸氮量没有显著差异。从田间表现来看也是施氮处理的小青菜颜色浓绿。

表 1 不同处理小青菜的产量和吸氮量

处理 Treatment	鲜菜产量 Fresh yield (t/hm ²)	吸氮量 N uptake (N kg/hm ²)
N0	42.2 ± 11.60 a	63.6 ± 2.7 a
N75	63.5 ± 5.64 b	102.0 ± 10.6 b
N150	69.2 ± 5.01 b	124.0 ± 18.4 b

注:同列内不同字母表示差异达 5% 显著,下同。
Note : Different letters in the same column mean significant at 5% level, same as follows.

2.2 氮素损失

2.2.1 氨挥发 各处理氨挥发损失均较低(表 2),与对照相比,施用氮肥后氨挥发增加不多。虽然氨挥发表现出随氮肥用量增加而增加的趋势,但两个施氮处理的氨挥发损失均不足氮肥用量的 0.5%。造成这种结果的主要原因是土壤 pH 值低。图 1 显示,虽然尿素施用后不同程度地增加了土壤 pH 值,但幅度不大,各处理 0—1cm 表层土壤 pH 值大多在 6 以下。

图 2 表明,施用氮肥显著地提高了表层土壤铵态氮含量,而且随着氮肥用量增加,铵态氮含量也越高,并且在整个测试期间,两个施氮处理 0—1cm 土层的铵态氮含量几乎没有下降,这也进一步证实了试验期间氨挥发很少发生。

2.2.2 反硝化损失和 N₂O 排放 表 3 看出,施基肥后,氮肥施用几乎没有增加 0—15cm 土壤硝态氮含量;而在追肥后,氮肥对土壤硝态氮含量增加的影

表 2 不同处理土壤氨挥发损失(N kg/hm²)

处理 Treatment	施基肥后 After basal dressing	追肥后 After top dressing	全生育期 Whole growth period
N0	1.02 ± 0.110	0.348 ± 0.033	1.37 ± 0.142
N75	1.11 ± 0.180	0.508 ± 0.444	1.62 ± 0.624
N150	1.27 ± 0.111	0.532 ± 0.446	1.81 ± 0.558

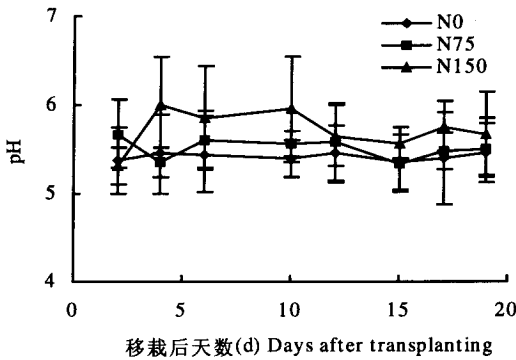


图 1 测定期间 0—1cm 土层 pH 值
Fig. 1 pH in 0—1cm soil layer during measurement

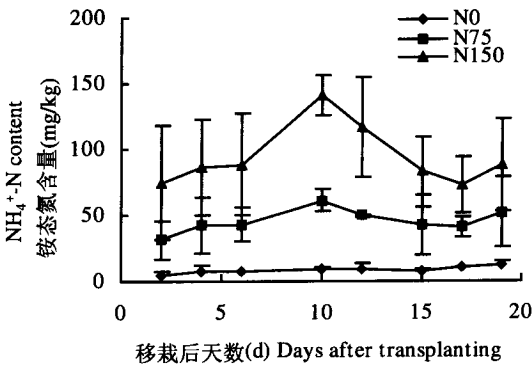


图 2 测定期间 0—1cm 土层铵态氮含量
Fig. 2 Ammonium content of 0—1cm soil layer during measurement

响才逐步表现出来,并且随着氮肥用量增加而增加。氮肥施用没有增加氮的反硝化损失和 N₂O 排放。试验中所有处理的反硝化损失和 N₂O 排放量基本一致(表 4),说明本试验中氮源不是影响反硝化损失和 N₂O 排放的限制因子。表 4 还看出,土壤反硝化损失大于 N₂O 排放,土壤空间变异性导致反硝化和 N₂O 排放的测定结果存在极大的变异性,反硝化损失的变异度为 13.8%—63.5%,N₂O 排放的变异度为 35.1%—50.5%。

表 3 小青菜生长期 0—15cm 土层硝态氮含量(mg/kg)

Table 5 NO₃⁻ - N concentration in 0—15cm soil layer during green cabbage growth period

项目 Item	取样日期(日/月) Sampling date (d/mon)						
	22/9	25/9	29/9	1/10	4/10	7/10	11/10
N0	40.23 ± 9.32	44.35 ± 14.48	31.61 ± 5.34	26.18 ± 5.77	16.63 ± 6.42	16.49 ± 9.76	12.99 ± 0.34
N75	44.47 ± 17.36	40.41 ± 13.87	47.35 ± 10.06	44.69 ± 4.52	25.42 ± 6.76	31.90 ± 8.36	31.17 ± 9.11
N150	46.14 ± 11.52	49.08 ± 13.28	40.56 ± 15.77	45.05 ± 10.80	47.82 ± 31.12	48.69 ± 4.06	43.18 ± 3.68

表 4 不同处理反硝化损失和 N₂O 排放

Table 4 Denitrification loss and N₂O emission from different treatments

处理 Treatment	反硝化 Denitrification loss		N ₂ O 排放 N ₂ O emission	
	平均值 Mean	CV %	平均值 Mean	CV %
	(N kg/hm ²)		(N kg/hm ²)	
N0	4.34 ± 2.75	63.5	2.65 ± 1.34	50.5
N75	4.09 ± 0.57	13.8	3.26 ± 1.14	35.1
N150	4.14 ± 1.48	35.6	2.03 ± 0.93	45.9

2.2.3 氮肥去向 试验结果(表 5)表明,N75 和 N150 处理的氮肥利用率分别为 46.8% 和 39.4%, N75 比 N150 的氮肥利用率略高。两个处理的土壤残留率都高于 50%,且土壤残留氮基本累积在 0—20cm 耕层土壤中,在 20cm 以下土层中¹⁵N 含量极低,说明试验期间肥料氮几乎没有往下层迁移而淋失。表 5 还看出,N75 的氮素回收率达 100%,基本没有氮素损失,而 N150 的氮素回收率也高于 90%,总损失仅为 8.7%。说明本试验条件下,两个氮肥用量水平和施肥方法,几乎没有肥料氮的损失,这与氨挥发和硝化反硝化的测定结果相吻合。

表 5 ¹⁵N 标记尿素的回收率及氮素总损失

Table 5 Recovery of labeled urea and total nitrogen loss

处理 Treatment	植物回收 Plant recovery (%)	土壤回收 Soil recovery(%)				总回收 Total recovery (%)	总损失 Total loss (%)
		0—20cm	20—40cm	40—70cm	70—100cm		
N75	46.8 ± 10.11	53.3 ± 14.0	2.36 ± 4.08	0.62 ± 0.54	0.81 ± 0.80	103.9 ± 7.0	0
N150	39.4 ± 2.96	50.0 ± 10.3	0.37 ± 0.45	0.53 ± 0.56	1.09 ± 0.24	91.3 ± 7.4	8.7 ± 7.4

3 讨论

近年来关于菜地土壤氮素损失对环境质量的影响逐渐引起了国内外广大学者的关注。但是相比小麦、玉米、水稻等粮田作物,有关施肥对菜地土壤氮素损失的田间测定还不多,而系统研究不同氮素损失途径相对重要性的综合田间试验更少^[1,7]。即使在有限的文献中,由于气候、土壤、作物和管理措施的差异也缺乏一致的结论。Neeteson 和 Carton^[8]认为,菜地土壤氮素损失的主要途径是硝酸盐淋洗,硝化、反硝化次之,而氨挥发最少。Ryden 等^[6]对多种蔬菜种植期间反硝化损失的直接测定结果表明,所施氮肥的 14%~52% 通过反硝化损失。Whitmore^[9]用模型模拟的结果表明,菜地土壤硝酸盐淋失主要发生在蔬菜收获后菜地休闲时,而这期间反硝化损失则非常低。

本试验结果表明,施用氮肥没有增加菜地土壤

氮素损失,除了小青菜生长期较短外,主要原因是:首先,氮肥用量不高且分 2 次施用,从而避免了土壤中氮肥累积量过高;其次,试验地土壤 pH 值较低,从而抑制了氨挥发发生。许多研究^[1,10-12]表明,在众多影响氨挥发的土壤因子中,pH 起着决定性作用。当土壤 pH 低于 7 时,尿素在土壤中水解后更利于形成铵态氮,氨态氮只占铵态和氨态氮总量的 1% 以下,氨挥发潜势非常低从而显著降低氨挥发。第三,本试验中氮源不是影响反硝化损失的主要限制因子,通常来说只有在氮源成为影响反硝化损失的限制因素,土壤无机氮含量增加或施氮才会增加反硝化损失。如果土壤硝态氮含量大于某一“临界值”时,即使其他因素如温度、水分状况和碳源供应都非常有利于反硝化发生,反硝化损失也与底物浓度无关;而在不同的试验条件下,土壤硝态氮含量的“临界值”也不一样^[13-14]。本试验中 3 个处理的反硝化损失排放量没有差异,说明不施氮肥土壤中

的氮已高于其“临界值”。小青菜生长期间土壤氮的反硝化损失和 N_2O 排放量较高,主要是因土壤蒸发强度较大而采用频繁浇水这种水分管理措施致使耕层土壤处于强烈的干湿交替状态。一些研究^[15-18]表明,土壤经历干湿交替后比一直处于高含水量时更有利于反硝化损失和 N_2O 排放。另外,试验期间反硝化损失约为 N_2O 排放量的 1 倍,说明反硝化损失的 N_2O 有很大部分被继续还原为 N_2 。由于硝化作用和反硝化作用都能产生 N_2O ,而乙炔抑制-原状土柱培养法所用 0.1~10 kPa C_2H_2 阻断了 N_2O 进一步还原为 N_2 ,因此不能明确硝化作用和反硝化作用对 N_2O 排放的贡献。目前只有采用 ^{15}N 技术和硝化抑制剂如低浓度 C_2H_2 (5~10 Pa) 才能区分硝化作用和反硝化作用对 N_2O 排放的贡献^[19-20]。最后,微区试验结果表明,小青菜生长期间,肥料氮在 20cm 以下土层中累积很少,说明没有硝酸盐淋洗发生。这是因为试验期间降雨较少且每次灌溉水量不大,客观上不会造成明显的水分下渗和硝酸盐淋洗。庄舜尧等^[21]在邻近试验点的微区试验中观测到甘蓝生长期间几乎没有硝酸盐淋洗到 30cm 以下土层,而随后的大白菜生长季则有明显的硝酸盐淋洗发生,可能是大白菜生长期间有明显的水分下渗。此外,马肝土质地粘重也降低了硝酸盐淋洗发生的可能性。

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.
Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992.
- [2] Hauck R D. Slow release and bio-inhibitor-amended nitrogen fertilizers [A]. Engelstad O P (ed.). Fertilizer technology and use (3rd ed.) [M]. SSSA, Madison, WI, 1985. 293-322.
- [3] 中国农业年鉴[M]. 2002.
Chinese agricultural yearbook [M]. 2002.
- [4] 李晓林,张福锁,米国华. 平衡施肥与可持续优质蔬菜生产[M]. 北京:中国农业大学出版社,2001.
Li X L, Zhang F S, Mi G H. Fertilizing for sustainable production of high quality vegetables [M]. China Agricultural University Press, 2000.
- [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[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Investigation of nitrate pollution on ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(2): 80-87.
- [6] 熊正琴. 稻麦轮作农田中肥料氮去向的定量评价及环境后果[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2002.
Xiong Z Q. Quantification of fate of N fertilizer and environmental impact on rice/wheat rotation system [D]. Ph D Dissertation, Graduate School of Chinese Academy of Sciences. 2002.
- [7] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data[J]. Journal of Environmental Quality. 1990, 19: 272-280.
- [8] Neeteson J J, Carton O T. The environmental impact of nitrogen in field vegetable production[J]. Acta Hort. 2001, 563: 21-28.
- [9] Whitmore A P. Modeling the release and loss of nitrogen after vegetable crops[J]. Neth. J. Agric. Sci. 1996, 44: 73-86.
- [10] He Z L, Alva A K, Calvert D V, Banks D J. Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH [J]. Soil Sci., 1999, 164(10): 750-758.
- [11] Duan Z H, Xiao H L. Effects of soil properties on ammonia volatilization[J]. Soil Sci., Plant Nutr., 2000, 46(4): 845-852.
- [12] Delaune R D, Patrick W H. Urea conversion to ammonia in water-logged soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1970, 34: 603-607.
- [13] Antonio V, Jose A, Diez L M, Lopez V. Nitrous oxide emission and denitrification nitrogen losses from soils treated with isobutylenediurea and urea plus dicyandiamide[J]. Biol. Fert. Soils. 2001, 34: 248-257.
- [14] Limmer A W, Steele K W. Denitrification potentials: Measurement of seasonal variation using a short-term anaerobic incubation technique [J]. Soil Biol. Biochem., 1982, 14: 179-184.
- [15] Ryden J C, Lund L J. Nature and extent of directly measured denitrification loss from some irrigated vegetable crop production units[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 40: 505-511.
- [16] Mulvaney R L, Kurtz L T. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from nitrogen-15 fertilized soil cores subjected to wetting and drying cycles[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48: 596-602.
- [17] Patten D K, Bremner J M, Blackmer A M. Effects of drying and air-dry storage on their capacity for denitrification of nitrate[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 67-70.
- [18] 梁东丽,同延安, Ove Emteryd, 等. 干湿交替对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 28-31.
Liang D L, Tong Y An, Ove E *et al*. The effects of wetting and drying cycles on N_2O emission in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(2): 28-31.
- [19] Klemetsson, Svensson S H, Rosswall T. A method of selective inhibition to distinguish between nitrification and denitrification as sources of nitrous oxide in soil[J]. Biol. Fert. Soils, 1988, 6: 112-119.
- [20] Muller C, Sherlock R R, Williams P H. Field method to determine N_2O emissions from nitrification and denitrification[J]. Biol. Fert. Soils, 1998, 28: 51-55.
- [21] 庄舜尧,孙秀廷. 肥料氮在蔬菜地中的去向及平衡[J]. 土壤, 1997(2): 80-83.
Zhuang S Y, Sun X T. Fate and balance of N fertilizer in vegetable fields [J]. Soils, 1997(2): 80-83.