

日光温室白萝卜生产系统的氮素利用与平衡研究

张贵龙¹, 任天志¹, 邱建军¹, 李志宏¹, 刘宏斌¹, 邹国元²

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100089)

摘要:在日光温室条件下,研究了不同氮素供应水平对白萝卜(*Raphanus sativus* L.)氮素利用和土壤硝态氮累积动态,并对土壤-作物体系的氮素表观平衡进行了评估。结果表明,随氮肥用量的增加,白萝卜产量和干物质累积量均没有显著升高,但根块内富集的硝酸盐含量显著增加。增施氮肥对白萝卜维生素 C(Vc),可溶性糖和可溶性蛋白含量没有显著影响;随施氮量增加白萝卜根块氮素吸收量显著增加,当季氮肥利用率降低;当氮肥用量低于推荐施氮量(有机肥+200 kg urea-N·hm⁻²)时,整个白萝卜生长期,根层(0~60 cm)土壤硝态氮均处于耗竭状态。当施氮量高于推荐施氮量时,根层硝态氮下降幅度减小,并在播种 30 d 以后呈上升趋势;土壤-作物体系中播前无机氮(N_{min})和氮肥投入是主要输入项,输出项中以土壤无机氮残留和作物吸收为主。随施氮量的增加,氮素表观平衡值和土壤残留 N_{min} 明显增加。系统氮素盈余量随施氮量的增加而增加。结合当地地力条件,在有机肥和磷钾肥配施的基础上,秋冬季白萝卜施氮量应控制在 200 kg·hm⁻² 以内。

关键词:白萝卜;氮素利用;硝态氮;氮素平衡

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1500-08

Nitrogen Utilization and Balance of *Raphanus sativus* L. Production System in Greenhouse

ZHANG Gui-long¹, REN Tian-zhi¹, QIU Jian-jun¹, LI Zhi-hong¹, LIU Hong-bin¹, ZOU Guo-yuan²

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science; Beijing 100081, China; 2.Institute of Plant Nutrition and Natural Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: In intensive agricultural systems, excess application of nitrogen(N) fertilizer has been a common phenomenon. Although N is an essential nutrient to crops, traditional N management is difficult to maximize crop yields while reduce its losses to the environment. One major reason is that the transformation and fate of N fertilizer in agricultural soils as largely affected by crop N uptake is still not very clear under specific production systems. The objective of this study was to analyze the effect of different N rates on *Raphanus sativus* L. N utilization and dynamics of nitrate in soil layers, then evaluate N balance in the soil-vegetable system. The trial included six fertilization treatments as follows: N₀, no N fertilizer and manure; N₁, chicken manure 6 326 kg·hm⁻², N₂, chicken manure 6 326 kg·hm⁻² +100 kg urea-N·hm⁻²; N₃, chicken manure 6 326 kg·hm⁻² +200 kg urea-N·hm⁻²; N₄, chicken manure 6 326 kg +300 kg urea-N·hm⁻²; N₅, chicken manure 6 326 kg+1 015 kg urea-N·hm⁻², respectively. All treatments replicated three times and arranged in a completely randomized design. The results showed that the yield and the dry matter of *Raphanus sativus* L. were not remarkably increased with the N fertilizer rate, but the concentration of nitrate in *Raphanus sativus* L. increased significantly with increased N level. There were no obvious treatment effects on vitamin C, soluble sugar and protein contents in *Raphanus sativus* L. by increased N fertilizer rate. The accumulation of N in *Raphanus sativus* L. root was increased and the efficiency of N was decreased with the N fertilizer rate. When the N fertilizer rate was lower than 200 kg urea-N·hm⁻², the nitrate of 0~60 cm soil layer was exhausting during the whole growth period. When the N fertilizer rate was higher than 200 kg urea-N·hm⁻², the decreased extent of the nitrate of 0~60 cm soil layer was reduced and began increasing 30 days later; In the system of soil and *Raphanus sativus* L., N input mainly came from the application of N fertilizer and the residual inorganic nitrogen before planting. Residual inorganic nitrogen in soil and nitrogen absorbed by *Raphanus sativus* L. were main part in N output of system. The apparent N balance and the content of residual inorganic nitrogen in soil were significantly increased with the N fertilizer rate increased. N surplus was increased with the N fertilizer rate in-

收稿日期:2008-11-03

基金项目:农田污染综合防控关键技术研究(2006BAD17B09); 农田污染过程阻断关键技术研究(2006BAD17B03)

作者简介:张贵龙(1974—),男,河南信阳人,博士研究生,研究方向为农田污染防控。

通讯作者:任天志 E-mail:rentz@mail.caas.net.cn

creased; According to the native conditions, on the base of mixing organic fertilizer and phosphor(P) fertilizer and potassium(K) fertilizer together, the N fertilizer rate should be controled below $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for *Raphanus sativus* L. planted in autumn-winter.

Keywords: *Raphanus sativus* L.; nitrogen recovery; nitrate; nitrogen balance

日光温室栽培作为蔬菜集约化生产的一种方式,近年来在我国得到迅速地发展,尤其是在北方城乡接合部相当普遍。由于这种蔬菜生产方式所带来的经济效益较为显著,生产中非常重视肥料的施用,导致肥料过量投入问题日益突出^[1-2]。据资料显示,山东寿光,用日光温室生产一季番茄的氮素投入量最高可达 $1\ 800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而番茄平均产量在 $60\sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的情况下,植株地上部带走的氮素量不超过 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3]。2000 年全国蔬菜生产前 10 位的省份施肥情况调查结果表明,蔬菜生产中氮素投入量平均超过 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,个别地区超过 $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。长期大量施用氮肥超出了作物的需求量和土壤固持能力,将导致土壤硝态氮随降水和灌溉水淋入土壤深层,在根区以下土层积累^[4-5],或经其他形式进入大气^[6-8],给生态环境带来不利影响。另外,大量施用氮肥也是蔬菜累积硝酸盐超标的重要原因^[9]。因此,通过研究蔬菜作物氮素利用规律,探索土壤-作物氮素养分供求平衡机理,实现定量化的氮肥推荐管理,消减菜农传统施氮量,对于化解过量施氮所导致的环境问题具有积极的意义。

近年来,学者们就氮素施用水平与作物利用关系和氮素在土壤中的平衡动态等方面开展了相关研究。张学军等^[10]研究认为,增施氮肥能显著增加番茄植株和果实产量及地上部分吸氮量,随施氮量增加,氮肥利用率明显降低,表观氮素损失量随施氮量的增加而增加。黄绍敏等^[11]对潮土土壤氮素平衡的研究结果表明,不施氮肥土壤平均每年接受外源氮 $23\sim 24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,作物(小麦和玉米)带走 $82\sim 88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,亏缺 $58.6\sim 63.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增施氮肥的土壤每年平均盈余 $238.6\sim 418 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。另一项研究表明^[12],当施氮量高于经济最佳施氮量($310 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时,继续增加氮肥用量大白菜的吸氮量不再增加,但大白菜体内硝酸盐含量随施

氮量($0\sim 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的增加呈线性增加趋势。有研究认为氮素施用量与作物利用率和土壤环境质量变化密切相关^[13]。在相对稳定的条件下,氮素在土壤中的固定和运移会达到一种平衡,而且这种平衡决定系统总的氮素损失和利用^[14]。

白萝卜是秋冬季北方日光温室内广泛种植的根菜类蔬菜,每季农户传统的氮肥投入量较多($1\ 000\sim 1\ 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。目前,有关蔬菜生产中氮肥推荐管理的研究多集中在茄果类和叶菜类蔬菜方面,而在根菜类蔬菜方面的研究报道较少。本文通过与京郊传统的氮肥施用相比较,研究不同氮肥供应水平下日光温室根菜类蔬菜——白萝卜的产量、品质和土壤矿质态氮动态变化,旨在揭示白萝卜生产系统中施氮量对氮素利用和氮素平衡的影响,以期对白萝卜生产实现氮肥推荐管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2007 年 10 月至 2008 年 3 月在北京大兴区白庙蔬菜生产基地进行,该区农业生产以保护地蔬菜栽培为主。试验所用温室已连续种植 10 a,多年轮作方式单一,每年 10 月至翌年 3 月种植白萝卜,3—7 月种植番茄,番茄收获以后栽种叶菜类蔬菜,8—9 月休闲。试验所用白萝卜品种为当地主栽品种(寒雪)。试验地土壤质地为轻壤,类型为褐土。土壤基本性质如表 1。

1.2 试验设计

试验设 6 个氮肥施用水平,3 次重复。6 个施肥水平分别用 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 表示。 N_0 处理为对照,不施有机肥和尿素氮肥; N_1 为单施有机肥处理,有机肥为商品鸡粪(含氮量 1.05%),施用量根据农户习惯

表 1 土壤基础肥力状况

Table 1 Basic conditions of soil fertility

土层深度 Soil layer depth/cm	有机质 Organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	硝态氮 Nitrate nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮 Ammonium nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷 Available Phosphorus/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Readily available potassium/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH 值 pH-value	土壤容重 Soil bulk density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
0~20	18.48	41.80	8.06	1.32	59.63	71.97	7.90	1.34
20~40	14.13	34.38	7.81	1.10	46.03	70.43	8.16	1.46
40~60	8.88	25.53	6.78	0.41	16.15	69.18	8.17	1.43

约为 $6\,326\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (干重); N_2 为减量施氮处理, 有机肥的施用量同 N_1 , 加施尿素氮 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_3 为推荐处理, 有机肥的施用量同 N_1 , 尿素氮量主要参考《北京市测土配方施肥技术指南》^[15] 确定为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_4 为增量施氮处理, 在施用同 N_1 等量商品鸡粪的基础上, 加施尿素氮 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; N_5 为农户习惯施氮处理, 商品鸡粪的施用量同 N_1 , 尿素氮的用量根据农户习惯约为 $1\,015\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。所有处理磷钾肥施用量一致, 与有机肥一起在播种前作基肥一次施用, P_2O_5 和 K_2O 用量分别为 100 和 $160\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别以过磷酸钙和硫酸钾形式施入。 N_2 、 N_3 、 N_4 处理尿素氮肥(2007 年 10 月 8 日)40%作基肥, 分别在 2007 年 12 月 3 日和 2008 年 1 月 23 日追施 30%; N_5 处理尿素氮肥施用时间与其他处理相同, 但每次用量由农户习惯而定。试验小区面积 21 m^2 ($3\text{ m}\times 7\text{ m}$), 小区间设置 100 cm 深的塑料隔膜, 阻止小区之间水分和养分横向迁移。田间水分管理见表 2。

表 2 水分管理
Table 2 Water supply

灌溉日期 Irrigate date	灌溉量 Irrigation norm/ $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$	硝态氮浓度 $\text{NO}_3\text{-N content}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮浓度 $\text{NH}_4\text{-N content}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
2007.10.18	1 504	2.5	0.8
2007.12.03	752	2.4	0.8
2008.01.23	752	2.8	0.1

1.3 试验方法

1.3.1 土样采取与测定

种植前后, 分别在每小区内选 3 个取样点, 每 20 cm 一层, 用土钻采取 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层土样, 分别混匀, 过 2 mm 筛, 称取 12 g 土壤样品, 加入 100 mL 的 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ 溶液, 振荡 60 min 后过滤, 制成浸提液供 Flstar 5000 Analyzer 型连续流动分析仪测定土壤

硝态氮和铵态氮含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 同时用烘干法测定土壤含水量。

1.3.2 植株取样与测定

收获时, 以小区为单位将植株全部收获测产。每小区选 5 个采样点, 每样点采摘 3 颗植株, 立即带回实验室。一部分用于测定根块品质, 硝酸盐含量采用紫外吸光光度法测定^[16], Vc 含量测定采用 2,6-二氯靛酚滴定法^[16], 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[16], 可溶性蛋白测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[14]; 另一部分把根块和叶片分开, 放入烘箱 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青后烘干粉碎, 过 0.5 mm 筛, 并混合均匀后用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解, 用凯氏法^[17]测定全氮含量。

1.3.3 计算公式与方法

氮肥利用率(%)=(施氮区作物吸氮量-无氮区作物吸氮量)/施氮量 $\times 100$

表观残留 $\text{Nmin}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\text{土层厚度}(\text{cm})\times\text{土壤容重}(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})\times\text{Nmin 浓度}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})/10$

氮素表观平衡=(施氮量+土壤初始无机氮+灌水输入氮)-(作物吸收+土壤残留无机氮)

用 Excel 软件对数据处理并进行方差分析, 多重比较采用 Duncan's 新复极差测验法。

2 结果与分析

2.1 施氮量对白萝卜生长和产量的影响

由表 3 可以看出, 随氮肥用量的增加, 不同处理间白萝卜的单根块重、株高、根块长、根块粗度和产量均没有显著的差异。与不施氮处理相比, 施氮处理单位面积根块产量仅增加 $6.4\%\sim 9.3\%$ 。这可能是由于农户连年大量投入氮肥, 导致土壤残留的无机氮(Nmin)已经能满足白萝卜生长的需求, 在此基础上增施氮肥对白萝卜植株生长状况和产量水平已起不到明显的促进作用。

表 3 氮肥对白萝卜生长和产量的影响

Table 3 Effects of N fertilizer on growth and yield of white radish

处理 Treatments	单根块重 Weight of a single radish/kg	株高 Plant highness/cm	根块长 Root length/cm	根块粗 Root thickness/cm	产量 Yield/t $\cdot\text{hm}^{-2}$
N_0	$0.57\pm 0.04\text{a}$	$38.4\pm 0.8\text{a}$	$38.6\pm 1.7\text{a}$	$19.7\pm 0.3\text{a}$	$76.1\pm 3.2\text{a}$
N_1	$0.58\pm 0.07\text{a}$	$37.0\pm 2.3\text{a}$	$40.5\pm 3.6\text{a}$	$19.8\pm 0.2\text{a}$	$81.1\pm 3.5\text{a}$
N_2	$0.60\pm 0.02\text{a}$	$39.2\pm 0.1\text{a}$	$40.2\pm 0.3\text{a}$	$20.6\pm 0.1\text{a}$	$85.4\pm 8.9\text{a}$
N_3	$0.60\pm 0.07\text{a}$	$40.4\pm 1.3\text{a}$	$40.3\pm 1.8\text{a}$	$20.4\pm 0.2\text{a}$	$83.3\pm 1.6\text{a}$
N_4	$0.59\pm 0.04\text{a}$	$38.9\pm 1.1\text{a}$	$39.3\pm 0.2\text{a}$	$20.9\pm 0.1\text{a}$	$82.4\pm 1.5\text{a}$
N_5	$0.57\pm 0.05\text{a}$	$38.0\pm 2.1\text{a}$	$38.2\pm 0.8\text{a}$	$20.6\pm 0.2\text{a}$	$81.0\pm 4.6\text{a}$

注: 同一列不同字母表示差异在 0.05 水平上显著, 相同表示不显著, 以下同。The values in the same line without same letters show significant difference at 0.05 level, the same follows.

2.2 施氮量对白萝卜品质的影响

硝酸盐含量是评价蔬菜品质的重要指标^[18]。蔬菜对硝酸盐的积累受多种因素制约,其中栽培基质中氮素水平是重要的影响因子^[19]。由表 4 可知,单施有机肥处理,白萝卜体内硝酸盐的累积量比不施氮处理稍有降低,在此基础上加施尿素氮,硝酸盐的累积量随施氮量的增加大幅度增加。Vc 能阻断亚硝胺的形成^[12],同时也是一项重要的蔬菜品质指标^[20]。单施有机肥处理白萝卜的 Vc 含量增加,其余处理间没有明显的差异。可溶性蛋白和可溶性糖含量随施氮量的增加没有明显的变化规律。

2.3 施氮量对白萝卜氮素吸收的影响

经不同施氮量处理,白萝卜干物质累积量没有发生明显的变化(表 5)。随氮肥施用量的增加,根块氮素累积量显著升高。施氮处理的叶片氮素累积量在数值上比不施氮处理的高 3.5~9.5 kg·hm⁻²,但处理间的差异并不显著。说明叶片氮素累积量受施氮量的影响程度小于根块。当施氮量高于 N₃ 时,根块氮素累积量的增加幅度不再明显,表明土壤中氮素的供应量已接近根块最大吸收量,再增加施氮量,不能被作物有效吸收利用。当季氮肥利用率整体表现偏低,且随施氮量的增加而降低。这从另一角度反映了试验土壤基础肥力较高,当季施入的氮肥被作物吸收利用较少。

2.4 土壤硝态氮累积动态

在白萝卜生长期,不同施氮量处理的 0~60 cm 土壤剖面硝态氮浓度出现不同的变化趋势(图 1),但总的看来,收获后土壤残留硝态氮浓度随施氮量的增加而增加。N₀ 和 N₁ 处理土层硝态氮浓度随作物生长期的推进逐渐下降。从 N₂ 开始,所有加施尿素氮的处理,施肥后 7 d,土壤硝态氮浓度有不同程度的增加,表明施入的尿素氮肥在土壤中已经转化和释放。N₂ 处理在播种后 30 d,土壤硝态氮浓度迅速下降,30 d 以后一直到收获,下降幅度减小,维持在相对较低的水平(8.3~15.2 mg·kg⁻¹),但收获后土壤硝态氮的残留浓度已经明显高于 N₀ 和 N₁ 处理。N₃、N₄ 和 N₅ 处理在播种后 30 d,土壤硝态氮浓度明显下降,此后一直到收获,土壤硝态氮浓度均表现上升趋势,且随施氮量的增加,上升的幅度加大。收获后,N₄ 处理残留的硝态氮浓度接近播种前,N₅ 处理不同土层硝态氮平均浓度比播种前高出 9.9 mg·kg⁻¹。可见从 N₃ 开始,氮肥的供应量已经明显超出了作物需求。

2.5 作物-土壤系统氮素平衡

相对于土壤无机氮含量的变化,土壤无机氮的表观平衡更准确反映不同氮素供应对作物氮素利用及土壤氮素累积、固定和损失的总体状况^[21]。氮素平衡结果显示(表 6),在系统输入项中,施氮量和播前 N_{min} 占有重要比例,其中播前 N_{min} 高达 312 kg·hm⁻²,

表 4 氮肥对白萝卜品质的影响

Table 4 Effects of N fertilizer on quality of white radish

处理 Treatments	Vc 含量 Content of vitamin C/ mg·100(FW)g ⁻¹	硝酸盐含量 Content of nitrate/ mg·(FW)kg ⁻¹	可溶性蛋白含量 Content of dissolubility protein/mg·(FW)g ⁻¹	可溶性糖含量 Content of dissolubility sugar/mg·g ⁻¹
N ₀	1.1±0.07b	207±17.9c	1.9±0.1a	11.2±0.8a
N ₁	1.3±0.06a	197±37.6c	2.1±0.7a	11.4±0.9a
N ₂	1.2±0.08b	246±21.2b	2.2±0.7a	10.8±0.6a
N ₃	1.2±0.01b	257±15.4ab	2.2±0.4a	11.2±0.3a
N ₄	1.1±0.06b	264±13.3ab	2.8±0.5a	11.5±0.3a
N ₅	1.2±0.04b	283±5.2a	2.7±0.2a	11.0±0.1a

表 5 白萝卜当季氮肥利用

Table 5 Seasonal recovery of N fertilizer for white radish

处理 Treatments	干物质累积量 Quantity of dry matter accumulation/t·hm ⁻²	根块氮素吸收量 Quantity of uptaken N in root/kg·hm ⁻²	叶片氮素吸收量 Quantity of uptaken N in leaves/kg·hm ⁻²	氮素利用率 Use efficiency of N/%
N ₀	5.2±0.2a	50.0±1.0c	31.4±6.7a	—
N ₁	5.6±0.2a	53.9±1.6bc	34.4±1.0a	10.4±0.09a
N ₂	5.8±0.6a	57.5±2.2bc	37.3±4.5a	8.1±0.04a
N ₃	5.7±0.1a	57.6±1.5abc	35.8±7.8a	4.5±0.01b
N ₄	5.6±0.1a	58.0±4.2ab	36.6±1.7a	3.6±0.03b
N ₅	5.5±0.3a	63.8±8.2a	40.9±4.0a	2.2±0.02b

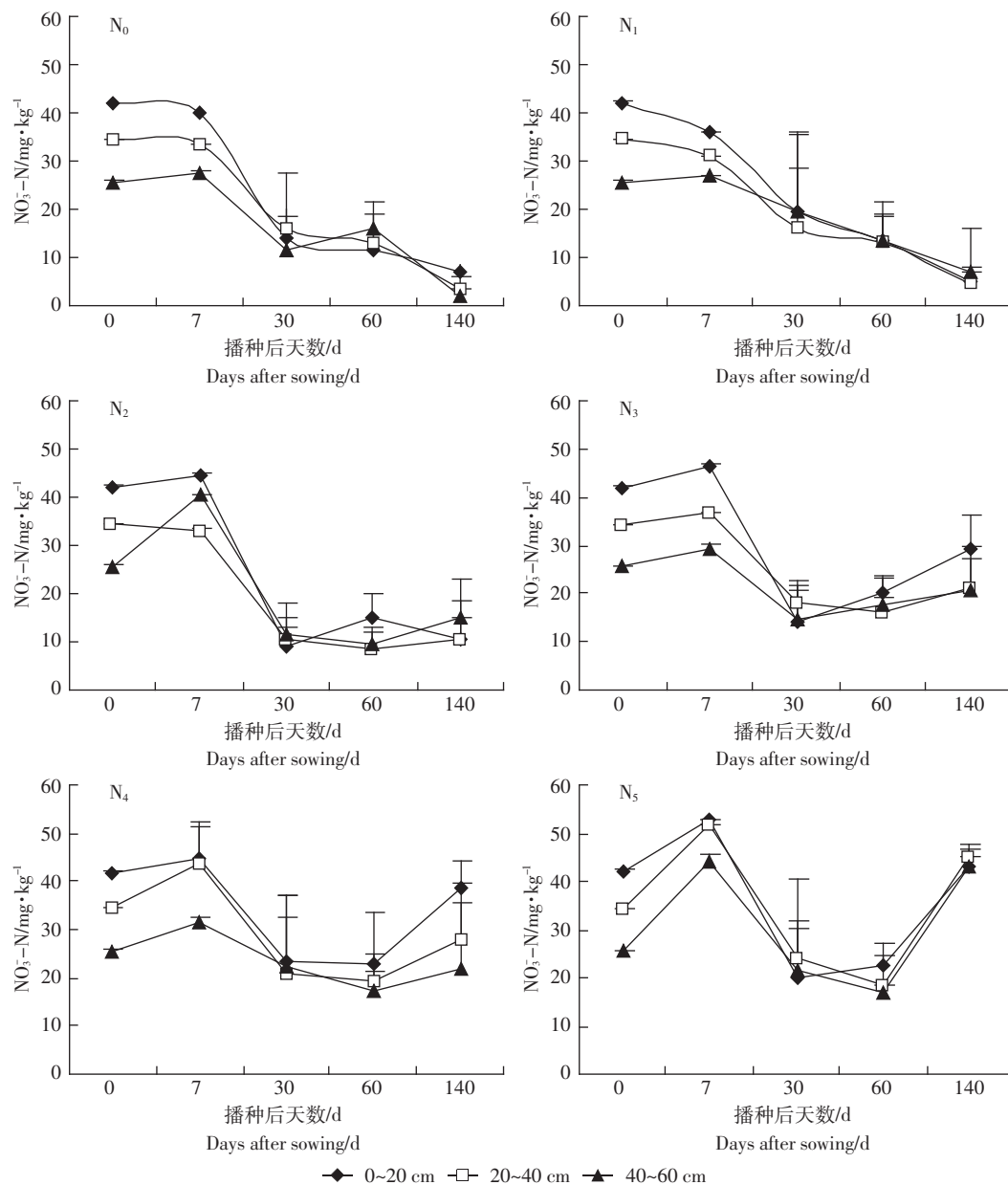


图 1 0~60 cm 土壤硝态氮累积动态

Figure 1 Dynamic of nitrate N in 0~60 cm soil layers

远远超出了所有施氮处理的作物吸氮量。这也进一步说明了该季施氮白萝卜产量不明显增加的原因。在系统输出项中,作物吸收的氮量并不随氮肥投入量的增加显著增加,而是导致土壤残留 $N_{\min}$ 和氮素表观平衡值增加。系统氮素盈余量以表观平衡值为主,且随施氮量的增加而增加。在施氮量低于 N_2 时,土壤残留 $N_{\min}$ 相对较低,处理间没有显著差异;当施氮量高于 N_3 时显著升高,其中 N_5 处理分别比 N_3 和 N_4 处理高 172.8 和 129.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这说明当施氮量高于推荐施氮量时,部分不被作物吸收的氮,以 $N_{\min}$ 形式残留在土壤中。这部分残留的无机氮如果不被下季作物吸

收利用,将会流失到系统之外,进而向环境中转移。在氮素表观平衡计算中,没有考虑土壤有机矿化、氮素固定、干湿降尘,气态损失和淋洗等因素,因此氮素表观平衡值可以看作这些因素的综合值,其值越高,说明系统氮素损失的可能性越大。

3 讨论

蔬菜的产量与氮素吸收利用密切相关^[12]。适当增施氮肥能够显著提高蔬菜产量。当氮肥施用量超过作物需求限度时,氮肥不能表现出明显的增产效应,甚至引起作物体内阶段碳氮代谢失调、源库结构不合理

表 6 0~60 cm 土壤-作物系统氮素表观平衡($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 6 Apparent balance of N in 0~60 cm soil and crop systems($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

项目	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
输入 N Input						
①施氮量 N rate	0	66.1	166	266	366	1 081
②播前 Nmin Nmin before sowing	312±2.3	312±2.3	312±2.3	312±2.3	312±2.3	312±2.3
③灌溉水 Irrigation	9.3±0.4	9.3±0.4	9.3±0.4	9.3±0.4	9.3±0.4	9.3±0.4
输出 N output						
⑤作物吸收 Crop uptake	81.4±7.7a	88.3±2.5a	94.8±6.6a	93.4±6.4a	94.6±4.5a	104.7±12.1a
⑥收获后 Nmin Nmin after harvested	76.1±30.7c	89.8±35.7c	134±47.1c	240±41.4b	284±78.7b	413±17.9a
⑦表观平衡 Apparent balance	164±36.9d	210±35.9cd	260±42.6bc	254±35.0bc	309±77.6b	885±13.7a
盈余(⑥+⑦)N surplus	240±7.7f	300±2.5e	394±6.6d	494±6.4c	593±4.5b	1 298±12.1a

注:有机肥干基折 N=1.04%。The dry content of organic manure, N 1.04%.

等导致产量下降^[22-23]。在本试验中,播前土壤 Nmin 达到 $312 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 已经高出试验处理中作物最高吸氮量($105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 当季施加的氮肥对白萝卜的生长和产量没有表现出显著增进作用。

多数研究证实,蔬菜对硝酸盐的累积量随施氮量的增加而增加^[24-31], 本文的结果也进一步验证了这一结论。目前有关氮肥对蔬菜营养品质影响的研究结论不太一致,如:刘伟等^[32]认为,增施氮肥能够提高菠菜的 Vc 含量,降低可溶性糖含量,熊亚梅等^[33]研究发现,随施氮量的增加,甘蓝的 Vc 和可溶性糖含量均降低,而孙小凤^[24]的研究结果显示,随施氮量的增加,油白菜的 Vc 含量降低,而可溶性糖含量呈现先升后降的变化趋势。本试验结果显示,增加施氮量对白萝卜的 Vc、可溶性糖和可溶性蛋白的含量均没有显著的影响。由此看来,大幅度降低农户施氮量对白萝卜的品质不但没有显著影响,而且有效阻止了硝酸盐的过多累积。

有关研究^[34]表明,温室系统番茄生产过程中,传统施氮($720 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)与增施氮肥($1\ 080 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)两个处理的吸氮量并没有随施氮量增加而显著增加,而减氮($180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和不施氮处理与传统施氮处理的吸氮量相当。肖时运等^[35]研究认为,在一定氮肥施用范围内,莴苣总吸氮量随施氮量的增加而增加,但超出一定范围,总吸氮量反而随氮肥施用量的增加而下降,化学氮肥的利用率随氮肥用量的增加而下降。本文研究认为白萝卜根块的吸氮量随施氮量的增加而增加,但当氮肥用量高于一定限度时(N_3),根块吸氮量的增加幅度不再明显,维持在较高的水平。叶片对氮素吸收量随施氮量的增加没有明显的变化。当季氮肥利用率随施氮量的增加而降低。

硝态氮在土壤剖面中的累积和移动受施氮量和

施氮方法,降雨量和灌溉量等因素影响,存在着非常大的年际变化^[36]。李志宏等^[37]研究认为,在莴苣和西葫芦生长的整个期间,表层土壤(0~20 cm)的硝态氮一直处于耗竭状态,20~40 cm 土壤硝态氮在作物生长早期略有上升,40~60 cm 土壤硝态氮在整个生育期间变化不大。从本文的试验结果来看,高氮量处理 and 低氮量处理,0~60 cm 土层硝态氮浓度有不同的变化趋势。就单个处理而言,各层的硝态氮浓度变化趋势基本一致,没有表现出明显的层次差异。在整个作物生育期内,当施氮量低于 N_3 , 各层硝态氮一直处于耗竭状态,当施氮量再进一步增加,各层土壤硝态氮浓度在作物生长前期明显下降,在作物生长后期表现上升,且上升的幅度随施氮量的增加而加大。

土壤-作物系统中氮素表观平衡明显受氮素投入水平的影响,表观损失随施氮量的增加显著增加^[38]。传统施氮量不仅造成无机氮在土壤中高量残留,而且引起大量氮素从土壤-作物系统中流失。当加施的尿素氮量控制在 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下,能显著减少土壤残留 Nmin,抑制氮素表观损失,有效降低系统氮素盈余。

4 结论

(1)白萝卜当季氮肥利用率随施氮量增加而降低;0~60 cm 土壤硝态氮在不施氮或加施的尿素氮量低于 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 情况下,整个生长期均处于耗竭状态。当施氮量进一步增加,土层硝态氮浓度下降幅度减小,并呈现升高趋势。

(2)在本试验土壤肥力状况下,增施氮肥不能明显提高白萝卜的产量和品质,但能显著增加对硝酸盐的累积。农户习惯施氮量造成土壤硝态氮大量残留,氮素表观损失风险加大。推荐施氮处理土层硝态氮累积明显减少,氮素表观损失显著降低。

(3)在推荐施氮量的基础上适当调整施氮量,进而消减农户习惯施氮量是一项切实可行的氮肥管理决策。结合当地土壤肥力条件,在有机肥和磷钾肥配施的基础上,日光温室冬季白萝卜推荐的尿素氮肥用量控制在 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以内,即可达到与习惯施氮量相当的产量。

参考文献:

- [1] 黄丽华, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 砂质梨园和蔬菜地氮素流失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 687-691.
HUANG Li-hua, SHEN Gen-xiang, QIAN Xiao-yong, et al. Nitrogen loss in sandy pear or chard and vegetable field and impact factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 687-691.
- [2] 杨治平, 张建杰, 张 强, 等. 山西省保护地蔬菜长期施肥对土壤环境质量的影响. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 667-671.
YANG Zhi-ping, ZHANG Jian-jie, ZHANG Qiang, et al. Soil environmental quality with long-term fertilization in Shanxi greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 667-671.
- [3] 宁建凤, 邹献中, 杨少海. 有机无机氮肥配施对土壤氮流失及油菜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 11(23): 95-100.
NING Jian-feng, ZOU Xian-zhong, YANG Shao-hai. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizer on the soil nitrogen leaching and the growth of leaf-used lettuce[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 95-100.
- [4] 汤丽玲, 陈 清, 李晓林, 等. 日光温室秋冬茬番茄氮素供应目标值的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 230-235.
TANG Li-ling, CHEN Qing, LI Xiao-lin, et al. Studies on target value of nitrogen supply for greenhouse tomato growth during autumn-winter season[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(2): 230-235.
- [5] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 施用氮肥对环境的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 8-15.
LV Dian-qing, TONG Yan-an, SUN Ben-hua. Effects of application of N fertilizer on environment[J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 1998, 4(2): 8-15.
- [6] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱地区农田土壤剖面矿化氮的累积和移动机制[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2040-2049.
WU Jin-shui, GUO Sheng-li, DANG Ting-hui. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semiarid region[J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, 23(10): 2040-2049.
- [7] 苏成国, 尹 斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失和稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1884-1888.
SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, et al. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(11): 1884-1888.
- [8] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 黑土区稻田土壤氮肥去向研究[J]. 应用生态学报, 14(11): 1859-1862.
HAN Xiao-zeng, WANG Shou-yu, SONG Chun-yu, et al. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(11): 1859-1862.
- [9] 都韶婷, 章永松, 林咸永, 等. 蔬菜积累的硝酸盐及其对人体健康的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 2007-2014.
DU Shao-ting, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong, et al. Accumulation of nitrate in vegetables and its possible implications to human health[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 2007-2014.
- [10] 张学军, 赵 营, 陈晓群, 等. 氮肥施用量对设施番茄氮素利用及土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3761-3768.
ZHANG Xue-jun, ZHAO Ying, CHEN Xiao-qun, et al. Effects of nitrogen fertilizer rate on recovery of nitrogen and residual of nitrate in soil for greenhouse growth tomato[J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(9): 3761-3768.
- [11] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施用有机和无机肥对潮土氮素平衡与去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 479-484.
HUANG Shao-min, BAO De-jun, HUANGFU Xiang-rong, et al. Effect of long term fertilizers and organic inputs on balance and fate of nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 479-484.
- [12] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 126-128.
LI Jun-liang, CUI De-jie, MENG Xiang-xia, et al. The study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in shouguang, Shandong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2): 126-128.
- [13] Parris K. Agricultural nutrient balances as agri-environmental indicators: an OECD perspective[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102: 219-225.
- [14] Salazara F J, Chadwick D, Painc B F, et al. Nitrogen budgets for three cropping systems fertilized with cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96: 235-245.
- [15] 北京市土肥工作站. 北京市测土配方施肥技术指南[M]. 北京, 2006: 86-87.
Beijing Soil and Fertilizer Workstation. The technology direction of soil testing and formul fertilization for Beijing[M]. Beijing: 2006: 86-87.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 7.
LI He-sheng. The theory and technology of experimentation about plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2000: 7.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1.
LU Ru-kun. Analysis methods for soil chemistry of agriculture [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000: 1.
- [18] 邹国元, 刘宝存, 王美菊, 等. 施肥对薤菜生长及品质的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(2): 97-101.
ZOU Guo-yuan, LIU Bao-cun, WANG Mei-ju, et al. Effects of fertilization on growth and quality of water spinach[J]. *Acta Agriculturae Borealisinsic*, 2002, 17(2): 97-101.
- [19] 唐其展, 孔德工, 田忠孝, 等. 施用氮肥对蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 西南农业学报, 2005, 18(2): 149-152.
TANG Qi-zhan, KONG De-gong, TIAN Zhong-xiao, et al. Effect of nitrogen fertilization on the content of nitrate in vegetable[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 18(2): 149-152.
- [20] 王宪泽, 程炳嵩, 张国珍. 蔬菜中的硝酸盐及其影响因子[J]. 植物学

- 通报, 1991, 8(3):34-37.
- WANG Xian-ze, CHEN Bing-song, ZHANG Guo-zhen. Nitrate in vegetable and its effect factors[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1991, 8(3): 34-37.
- [21] 陈 清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006:91-115.
- CHEN Qing, ZHANG Fu-suo. Theories and practices of nutrient management on vegetables[M]. Beijing: The Press of China Agricultural University, 2006:91-115.
- [22] 李 冰, 王昌全, 周 娅, 等. 氮肥不同用量及基追肥比例对芹菜产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2005(5):8-16.
- LI Bing, WANG Chang-quan, ZHOU Ya, et al. Effect of different nitrogen rates and ration of base fertilizer and dressing on yield and quality of celery[J]. *Journal of Soil and Fertilizer Sciences*, 2005(5):8-16.
- [23] 王 柳, 张福锁, 魏秀菊, 等. 不同氮肥水平对日光温室黄瓜品质和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12):225-229.
- WANG Liu, ZHANG Fu-man, WEI Xiu-ju, et al. Effects of different nitrogen fertilization levels on quality and yield of cucumber cultivated in solar greenhouse[J]. *Transactions of The CSAE*, 2007, 23(12):225-229.
- [24] 孙小凤. 不同供氮水平对油白菜产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2005(4):11-13.
- SUN Xiao-feng. Effects of different level of nitrogen Supply on yield and quality of pakchoi [J]. *Journal of Soil and Fertilizer Sciences*, 2005(4):11-13.
- [25] 赵继献, 程国平, 任廷波, 等. 不同氮水平对优质甘蓝型黄籽杂交油菜产量和品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5):882-889.
- ZHAO Ji-xian, CHENG Guo-ping, REN Ting-bo, et al. Effects of different nitrogen level on yield and characters of high quality sphericity yellow seed hybrid cole[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5):882-889.
- [26] 任祖淦, 邱孝煊, 蔡元呈, 等. 施用化学氮肥对蔬菜硝酸盐的积累及其治理研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(6):265-267.
- REN Zhu-gan, QIU Xiao-xuan, CAI Yuan-cheng, et al. Studies of the regulation and nitrate accumulation of vegetable under nitrogen fertilizer[J]. *Chin J Soil Sci*, 1999, 30(6):265-267.
- [27] 王朝辉, 田霄鸿, 李生秀. 叶类蔬菜的硝态氮累积及成因研究[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1136-1141.
- WANG Zhao-hui, TIAN Xiao-hong, LI Sheng-xiu. Study on nitrate accumulation and causes of formation of leafy vegetables[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7):1136-1141.
- [28] 杜红斌, 王秀峰, 崔秀敏. 植物 NO_3^- -N 积累的生理机制研究[J]. 中国蔬菜, 2001(2):49-51.
- DU Hong-bin, WANG Xiu-feng, CUI Xiu-min. Study on accumulation mechanism of the nitrate for plant[J]. *China Vegetable*, 2001(2):49-51.
- [29] 王 庆, 王 丽, 赫崇岩, 等. 过量氮肥对不同蔬菜中硝酸盐积累的影响及调控措施研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1):46-49.
- WANG Qing, WANG Li, HE Chong-yan, et al. Study on accumulation effect and control measure of nitrate with application of excessive nitrogenous fertilizer for different vegetables[J]. *Agro Environ Prot*, 2000, 19(1):46-49.
- [30] 王正银, 李会合, 李宝珍, 等. 氮肥、土壤肥力和采收期对小白菜体内硝酸盐含量的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9):1057-1064.
- WANG Zheng-yin, LI Hui-he, LI Bao-zhen, et al. Influence of nitrogen rates, soil fertility and harvest time on nitrate in Chinese cabbage [J]. *Sci Agric Sin*, 2003, 36(9):1057-1064.
- [31] 赵 静, 白清云, 帕尼古丽, 等. 钼对降低蔬菜硝酸盐积累的效应研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):238-239.
- ZHAO Jing, BAI Qing-yun, PANI Gu-li, et al. Alleviation of nitrate accumulation in vegetable by application of molybdenum[J]. *Agro Environ Prot*, 2001, 20(4):238-239.
- [32] 刘 伟, 徐 坤, 王惠林, 等. 氮素用量对菠菜生长及产量和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2007(1):21-23.
- LIU Wei, XU Kun, WANG Hui-lin, et al. Effects of nitrogen amount on the growth, yield and quality of spinach[J]. *China Vegetable*, 2007(1):21-23.
- [33] 熊亚梅, 梁银丽, 周茂娟, 等. 氮肥水平对甘蓝产量和品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(4):839-843.
- XIONG Ya-mei, LIANG Yin-li, ZOU Mao-juan, et al. Effects of nitrogen fertilizer Level on yield and quality of cabbage and nitrate Content in Soil[J]. *Acta Bot, Boreal Occident Sin*, 2007, 27(4):839-843.
- [34] 张学军, 赵 营, 陈晓群, 等. 滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量、氮素平衡及土壤硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11):2535-2545.
- ZHANG Xue-jun, ZHAO Ying, CHEN Xiao-qun, et al. Effects of application of nitrogen on vegetable yield, nitrogen balance and soil nitrogen accumulation under two years' drip fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2535-2545.
- [35] 肖时运, 刘 强, 荣湘民, 等. 不同施氮水平对茼蒿产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6):913-917.
- XIAO Shi-yun, LIU Qiang, RONG Xiang-min, et al. Effects of different nitrogen fertilizer level on yield and quality of lettuce and the use efficiency of nitrogen fertilizer[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6):913-917.
- [36] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 NO_3^- -N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003, 40(42):538-546.
- JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Accumulation and movement of NO_3^- -N in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4):538-546.
- [37] 李志宏, 张福锁, 郭素英. 菜田土壤有效氮的动态研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(1):19-21.
- LI Zhi-hong, ZHANG Fu-suo, GUO Su-ying. Study on dynamic of availability nitrogen in vegetable plots soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(1):19-21.
- [38] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥效应和平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11):1361-1368.
- JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(11):1361-1368.