

京郊设施黄瓜氮素施用量的优化运筹研究

董 畔^{1,2}, 张成军², 彭正萍¹, 王男男^{1,2}, 赵同科^{2*}

(1 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 2 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要:【目的】京郊设施蔬菜黄瓜普遍存在氮素施用量高, 利用效率较低, 土壤残留多, 黄瓜果实硝酸盐含量较高等问题。研究产量高、品质优且土壤氮素残留水平合理的氮肥施用量, 可为优化施肥、提高生产和环境效益提供科学依据。【方法】采用设施蔬菜田间小区试验法, 以金胚 98 黄瓜为试材, 在施用商品有机肥 15 t/hm² 的条件下, 设置 5 个不同施氮水平, 分别为 0、120、240、360、480 kg/hm², 调查了黄瓜产量、品质、氮素残留、经济效益, 分析不同施氮条件下土壤的氮素平衡。【结果】与不施氮处理相比, 氮素增加后各处理黄瓜产量显著提高, 并随施氮量的增加呈先增加后降低趋势, 当施氮量为 360 kg/hm² 时, 产量最高; 氮素残留量随施氮量的增加呈上升趋势; 黄瓜硝酸盐含量随施氮量的增加而增加, 并在施氮量 480 kg/hm² 时, 黄瓜硝酸盐含量超标; 可溶性糖含量随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势, 在施氮量为 360 kg/hm² 时, 可溶性糖含量最高; 黄瓜氮素含量随着施氮量的增加都有所增加, 施 N 240、360、480 kg/hm² 处理较不施氮处理差异显著($P < 0.05$), 在 N 480 kg/hm² 处理下氮素含量较 N 360 kg/hm² 处理有所降低; 氮肥的施入对磷、钾含量无显著影响($P > 0.05$); 不同施氮情况下氮素利用率在 4.9%~24.9% 之间, 氮素残留率在 24.5%~58.0% 之间, 当施氮量为 240 kg/hm² 时氮素利用率最高, 残留率最低; 随着施氮量的增加, 氮的表观损失量增加, 但当施氮量为 360 kg/hm² 时, 氮的表观损失量较施氮量为 240 kg/hm² 有略微减少。【结论】综合考虑土壤环境和产量之间的关系, 在温室土壤无机氮含量为 35.2 mg/kg 和基施商品有机肥 15 t/hm² 的试验条件下推荐 341.7 kg/hm² 为最佳施氮量, 可获得最高产量 78.4 t/hm²; 当施氮量为 329.6 kg/hm² 时, 是获取最佳经济效益的推荐施氮量。

关键词: 温室黄瓜; 氮肥水平; 产量; 品质; 纯收益

中图分类号: S642.2; S625.5⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)06-1628-08

Nitrogen fertilizer optimization strategy for greenhouse cucumber production in Beijing suburbs

DONG Pan^{1,2}, ZHANG Cheng-jun², PENG Zheng-ping¹, WANG Nan-nan^{1,2}, ZHAO Tong-ke^{2*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;

2 Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: 【Objectives】 Excessive fertilization, lower nitrogen use efficiency, high nitrogen residual and higher nitrate content are common in facility vegetables cucumber in Beijing suburbs. The objective of this study was to research the reasonable nitrogen application rate for higher yield, better quality of vegetable, lower residual nitrogen in soil and much better environmental benefits. 【Methods】 Field plot trail was adopted in this experiment and cucumber cultivar Jinpei 98 was used as test material. Five different N levels were set up: 0, 120, 240, 360, 480 kg/hm². The cucumber yield, quality, nitrogen residue, economic benefits and the nitrogen balance under different N applications were investigated. 【Results】 Compared with no N application treatment, the cucumber yield in all the other treatments were significantly improved with the highest yield at N rate of 360 kg/hm². The nitrogen residual amount was increased with the increasing of nitrogen application rate. The nitrate contents in cucumber were also increased, and exceeded the nitrate critical level at N rate of 480 kg/hm². The

收稿日期: 2015-11-23 接受日期: 2016-01-29

基金项目: 农业部农业生态环境保护项目(2015年度); 国际植物营养研究所 IPNI 中国项目(2015年度)资助。

作者简介: 董畔(1990—), 女, 河北省鹿泉市人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail: dpan528@sina.com

* 通信作者 E-mail: tkzhao@126.com

content of soluble sugar increased first and then decreased with the increasing of N application rate and the content of soluble sugar was the highest at 360 kg/hm². The nitrogen content of cucumber increased with the increasing of N application. Compared with no N treatment, the nitrogen content of cucumber in treatments with N 240, 360 and 480 kg/hm² was significantly increased ($P < 0.05$), but the nitrogen content of treatment with N 480 kg/hm² was lower than the treatment with N 360 kg/hm². The application of nitrogen fertilizer had no significant effect on phosphorus, potassium content ($P > 0.05$). Under different nitrogen application conditions, the nitrogen utilization efficiency was between 4.9%–24.9% and the nitrogen retention rate was between 24.5%–58.0%. Nitrogen utilization efficiency was the highest, residual rate was the lowest when the nitrogen application rate was 240 kg/hm². The loss of nitrogen was increased with the increasing of nitrogen application, the loss of nitrogen in the treatment with N 360 kg/hm² was lower than treatment with N 240 kg/hm².

【 Conclusion 】 Comprehensive consideration of the relationship between soil environment effect and yield under the tested soil condition, the recommended N application rate was 341.7 kg/hm², and the maximum yield was 78.4 t/hm². To obtain the best economic benefits, the nitrogen application rate was 329.6 kg/hm².

Key words: greenhouse cucumber; nitrogen fertilizer rate; yield; quality; net benefit

氮素是植物生长发育必需的营养元素之一, 约占作物体干重的 0.3%~5%, 是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素和一些激素等的重要组成部分^[1], 也是限制作物生长、产量和品质的重要因素。氮源对于陆地和水生生物的多样性, 气候变化以及人类健康至关重要^[2]。氮肥供应不足会造成作物生长缓慢, 产量过低, 但施用过多也造成很多负面效应。近年, 京郊地区设施蔬菜发展迅速, 生产者为了达到高产、高收益的目的, 盲目大量地施用化肥, 特别是氮肥。经调查, 京郊地区菜田和果园化肥施用量较高, 氮、磷、钾肥均显著高于粮田, 菜田氮肥用量为 1741 kg/hm², 是粮田氮肥用量的 4.5 倍^[3]。研究表明, 虽然氮肥的增产效果最佳, 但过量施用氮肥无显著增产效应, 与 20 世纪 80 年代相比, 氮肥利用效率明显降低, 磷肥肥效基本不变, 而钾肥肥效在快速提升^[4]。燕飞等^[5]综合黄瓜品质及产量两个因素, 在中等土壤肥力的塑料大棚黄瓜春季栽培中, 推荐最佳施氮量为 487 kg/hm²。氮肥的过量施入, 非但不会获得高产, 还增加生产成本, 影响产品品质, 使蔬菜硝酸盐含量升高。大量研究表明, 硝酸盐在反硝化作用下转化为亚硝酸盐, 然后在人体内转化成亚硝胺, 亚硝胺是一种有毒物质, 可导致高铁血红蛋白症及消化系统癌变^[6]。封锦芳等^[7]对 2006 年北京蔬菜硝酸盐含量调查表明, 北京市居民每日通过蔬菜摄入的硝酸盐量为 328.2 mg, 比 WHO/FAO 的 ADI 值(300 mg/d)高 9.4%。随施氮量的增加, 果实中硝酸盐含量呈正比例增加^[8], 因此, 需要根据硝酸盐含量标准, 探索出合理的氮肥施入量, 实现品质和产量双收。

大量施用氮肥还会造成土壤氮素累积、土壤酸化, 降低土壤质量^[9]。研究发现, 施入土壤中的肥料氮比自然界中的氮源更容易从土壤中淋洗^[10], 地下水硝酸盐含量超标现象与氮肥施用过量密切相关^[11-12], 施氮量、施肥方式也会直接影响硝态氮在土壤中转化^[13-14]。杜连凤等^[15]研究表明, 土壤、植株和地下水硝酸盐含量与氮肥施用量直接相关, 菜田和果园施氮量大, 其土壤硝酸盐累积明显, 地下水硝酸盐超标率高。高茹等^[16]指出, 土壤硝态氮含量是影响硝态氮淋失强度的决定因素, 控制土壤氮素累积和化肥施用水平是降低其淋失风险的关键环节。中国作为世界最大化肥生产和消费国, 2013 年的化学氮肥用量达 2394.2×10^4 t^[17]。北京 2014 年的氮肥用量 53678 t, 虽然数量同比 2013 年降低 10%^[18], 但由于平原造林使得耕地减少, 氮肥用量仍然处于过量水平。京郊地区土壤氮养分盈余量最多, 农学利用效率只有 24.2%, 施入氮肥大量残留^[19], 造成土壤严重污染。因此, 在现有生产基础上, 本研究采用田间试验, 研究低成本、高产出、高品质的优化施氮量, 以期找到最佳施氮量, 拟为京郊设施蔬菜黄瓜氮肥科学施用提供理论支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

试验在北京市房山区农科所温室进行, 供试土壤为潮土, 其 0—20 cm 土层有机质含量 27.7 g/kg、全氮含量 1.9 g/kg、有效磷含量 0.4 g/kg、速效钾含量 0.6 g/kg、硝态氮含量 30.6 mg/kg、铵态氮含量 4.6

mg/kg, 0—100 cm 总无机氮含量为 169.8 mg/kg。供试黄瓜品种为北京中研惠农种业有限公司培育的金胚 98。供试肥料为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P_2O_5 18%)、硫酸钾 (含 K_2O 52%)、商品有机肥 (有机质含量 $\geq 45\%$, 含 N 2.1%、P 0.8%、K 1.5%)。

1.2 试验设计

设置 5 个施氮水平, 分别为 N_0 、 N_{120} 、 N_{240} 、 N_{360} 、 N_{480} , 每个水平 3 次重复。各处理除氮肥外其他肥料用量均一致, 有机肥 $15 t/hm^2$ 、磷肥 (P_2O_5) $150 kg/hm^2$ 、钾肥 (K_2O) $300 kg/hm^2$, 有机肥和磷肥均作基肥一次性施入, 氮、钾肥分 5 次施入, 第一次基肥施入 20% 氮肥、20% 钾肥, 第二次在根瓜收获后进行追肥, 以后看天气情况, 每 7~10 d 追肥一次 (氮、钾肥的追肥量均为整个生育期的 20%)。随机区组排列, 小区长 6 m、宽 3 m, 实际留苗密度为 $3.3 \times 10^4 plant/hm^2$, 于 2015 年 1 月 31 日定植, 5 月 19 日收获。

1.3 测定项目及方法

在试验末期采集黄瓜测定硝酸盐、可溶性糖, 并烘干部分样品测定全氮、全磷、全钾含量; 采集植株样品, 烘干, 测试全氮含量。种植前采集 0—100 cm 基础土样, 0—20 cm 测定有机质、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾, 其他土层测试硝态氮、铵态氮含量; 收获后每个小区取 100 cm 土层土样, 每 20 cm 一层, 分别测定硝态氮、铵态氮含量。产量根据其长势分批采收计算。

土壤有机质采用重铬酸钾容量—外加热法; 有效磷采用钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定; 全氮采用凯氏定氮法^[20]; 硝态氮、铵态氮经 1 mol/L KCl 浸提并用连续流动分析仪测定; 黄瓜硝酸盐采用水杨酸比色法测定^[21]; 可溶性糖采用蒽酮比色法^[22]测定。

1.4 其他指标计算方法

1.4.1 氮素去向计算 (0—100 cm) 本次试验所设变量仅为化肥氮, 因此计算中所提到的氮素均为化肥氮。

氮素利用率 = (施氮区作物吸收氮总量 - 对照区作物吸收氮总量) / 施氮量 $\times 100\%$

氮素残留率 = (各土层施氮区土壤无机氮残留 - 各土层无氮区土壤无机氮残留) / 施氮量 $\times 100\%$

1.4.2 土壤氮素平衡计算 计算 0—100 cm 土壤氮素平衡时, 氮挥发损失氮量根据本试验设计施氮量并参考文献^[23]。

损失氮 (kg/hm^2) = 氮输入 - 氮输出

氮输入 = 施入肥料氮 + 有机矿化氮 + 基础土壤氮

氮输出 = 作物吸收氮 + 收获时土壤残留氮 + 氨挥发氮

有机矿化氮通过不施肥试验求得:

有机矿化氮 = 作物吸收氮 + 收获时土壤残留氮 - 基础土壤氮^[24]

1.4.3 经济效益分析 用黄瓜各处理总产值减去肥料成本和其他田间管理成本定为纯收益。各处理除了氮肥用量不同外, 其他均一致。黄瓜按批发价 1.9 yuan/kg 计算^[18]。各处理所用的化肥价格: 尿素 2.0 yuan/kg、过磷酸钙 1.2 yuan/kg、硫酸钾 7.5 yuan/kg、有机肥 0.4 yuan/kg。幼苗成本 0.6 yuan/plant。其他田间管理费, 包括机耕、农药、灌溉、各种农艺措施用工等。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel2003 和 SPSS17.0 进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥用量调控对黄瓜产量的影响

由图 1 可以看出, 氮肥的施用显著提高黄瓜产量, 且随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势, 其中在 N_{360} 处理下产量最高, 为 $80.3 t/hm^2$ 。各施氮处理 N_{120} 、 N_{240} 、 N_{360} 、 N_{480} 产量较 N_0 分别增产 6.7%、8.2%、13.9%、8.8%。说明黄瓜在生长过程中对氮素的需求较大, 产量会随着施氮量的增加而增加, 但达到一定施氮量后, 继续增施氮肥, 反而会使产量下降, 原因可能是大量氮肥的施用导致黄瓜植株贪青晚熟, 从而引起果实产量降低。

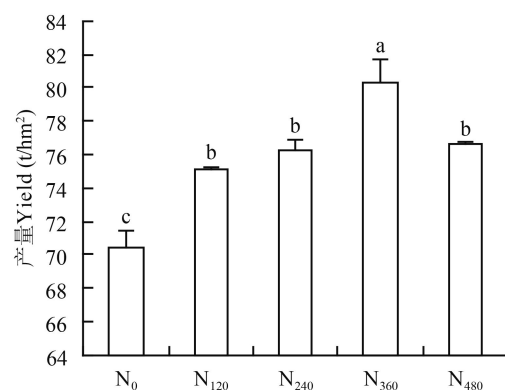


图 1 不同施氮水平的黄瓜产量

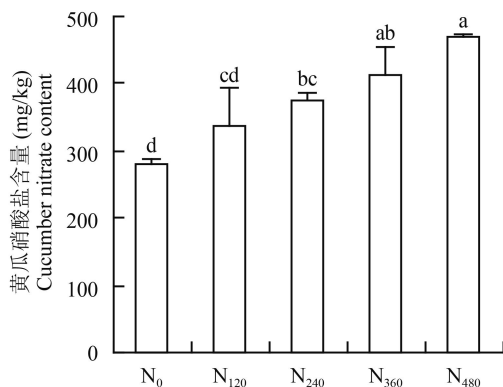
Fig. 1 Cucumber yield under different N application rates

[注 (Note): 柱上不同字母代表处理间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.]

2.2 不同氮肥用量调控对黄瓜品质的影响

2.2.1 不同氮肥用量调控对黄瓜硝酸盐含量的影响

除 N_{120} 处理外, 其他各施氮处理的黄瓜硝酸盐含量较对照显著增加 ($P < 0.05$) (图 2)。各施氮处理硝酸盐含量高出对照 19.7%~66.7%, 且随着施氮水平的升高, 黄瓜硝酸盐含量升高。其中 N_{480} 处理的硝酸盐含量最高, 为 468.9 mg/kg, 高出我国蔬菜硝酸盐允许含量 432 mg/kg^[5]。徐坤范等^[25]研究表明, 随着施氮量的增加, 黄瓜果实的硝酸盐含量大幅度升高, 施氮量与硝酸盐含量呈显著正相关。通过本试验硝酸盐含量与施氮量间的相关分析 ($R^2 = 0.9935$) 结果表明, 当施氮量大于 391.2 kg/hm² 时, 黄瓜硝酸盐含量超标。



2.2.2 不同氮肥用量调控对黄瓜可溶性糖含量的影响

不同施氮处理的黄瓜可溶性糖含量随施氮水平的升高而升高, 各施氮处理的可溶性糖含量较对照提高 1.5%~12.6%, N_{360} 、 N_{480} 处理与对照差异显著 ($P < 0.05$) (图 2)。 N_{360} 处理的可溶性糖含量最高, 为 1.8%, 但在其水平上继续增加施氮量, 可溶性糖含量则有所降低。可溶性糖对黄瓜的综合风味影响较大, 黄瓜可溶性糖含量高, 生食甜味较浓, 粗纤维含量低, 瓜肉则细嫩而脆^[25]。黄瓜甜度和香气均可与可溶性糖的含量线性正相关^[26], 因此本次试验表明适量施氮处理可以有效改善黄瓜的口感, 但超过一定施氮量, 反而降低。

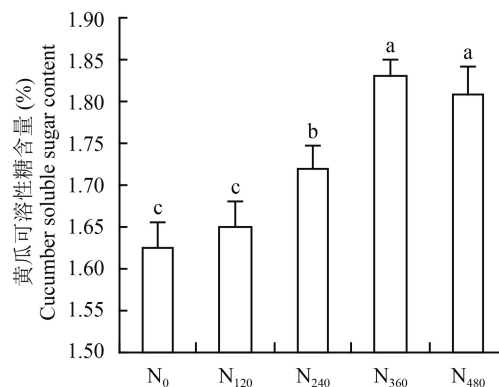


图 2 不同施氮水平的黄瓜硝酸盐、可溶性糖含量

Fig. 2 Nitrate content and soluble sugar content of cucumber under different N application rates

[注 (Note): 柱上不同字母代表处理间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.]

2.2.3 不同氮肥用量调控对黄瓜矿物元素含量的影响

黄瓜氮素含量随着施氮量的增加都有所增加, N_{240} 、 N_{360} 、 N_{480} 较不施氮处理差异性显著 ($P < 0.05$), 在 N_{480} 处理下氮素含量较 N_{360} 有所降低, 可能是由于较多的施氮量导致植株生长旺盛, 从而使果实对养分的吸收量减少。试验中所有处理磷、钾施入量相同, 从表 1 可知, 不同的施氮量下磷、钾含量较不施氮处理差异性不显著 ($P > 0.05$), 表明氮肥的施入对黄瓜磷、钾含量无显著影响。

2.3 不同氮肥用量调控对氮素利用及其损失的影响

2.3.1 不同氮肥用量调控对氮素利用影响

表 2 表明, 各施氮处理的地下部无机氮残留量均高于地上部吸氮量, 随着施氮量的增加, 地上部吸氮量呈先增加后降低的趋势, 各施氮处理地上部吸氮量较对照增加 4.9%~24.9%, 且在 N_{360} 水平地上部吸氮量最高; 随着施氮量的增加, 地下部无机氮残留量呈上

表 1 不同氮水平下黄瓜养分含量

Table 1 Cucumber nutrient content under different N treatments

处理 Treatment	施氮量 N rate (kg/hm ²)	N (%)	P (%)	K (%)
N_0	0	3.33 c	1.20 a	6.10 a
N_{120}	120	3.58 bc	1.24 a	5.87 a
N_{240}	240	3.85 a	1.19 a	6.10 a
N_{360}	360	3.89 a	1.19 a	5.70 a
N_{480}	480	3.85 a	1.20 a	5.60 a

注 (Note): 同列数字后不同字母代表在处理间 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column mean significant difference among treatments at 5% level.

升趋势 (图 3); 从氮素利用率和氮素残留率可以看出, N_{240} 水平的氮素利用率最高, 氮素残留率最低。随着施氮量的增加氮素利用率呈先增加后降低的趋势, 氮素残留率呈先降低后增加的趋势。综上所述

表 2 不同氮水平下的氮素去向

Table 2 Nitrogen uptake and residue under different N treatments

处理 Treatment	施氮量 (kg/hm ²) N rate	地上部吸氮量 (kg/hm ²) Aboveground uptake	地下部无机氮残留量 (kg/hm ²) Underground N residue	氮素利用率 (%) N efficiency	氮素残留率 (%) N residual rate
N ₀	0	182.95	213.16		
N ₁₂₀	120	191.89	257.38	7.46	36.84
N ₂₄₀	240	241.48	272.07	24.39	24.54
N ₃₆₀	360	246.80	383.89	19.92	47.42
N ₄₈₀	480	229.00	491.65	9.59	58.02

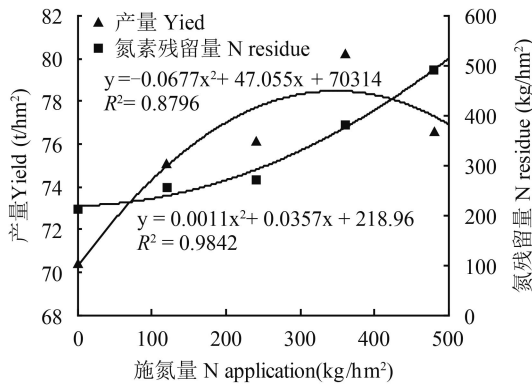


图 3 不同氮水平下氮素残留量和黄瓜产量的二次曲线模拟

Fig. 3 Quadratic curve of N retention and cucumber yield under different N treatments

述, N₂₄₀ 处理对提高氮素利用率降低氮素残留率的作用效果最佳。

2.3.2 不同氮肥用量调控下的氮素损失量 由表 3 可知, 根据 N₀ 处理得出的有机矿化氮在氮输入项中起着重要的作用, 占氮总输入的 25.8%~45.9%, 与作物吸氮量接近。随着施氮量的增加, 氮损失量也增加, 且在 N₃₆₀ 处理氮损失量较低, 即 N₄₈₀ > N₂₄₀ > N₃₆₀ > N₁₂₀, 表明氮肥的不合理施入是 N 损失的直接因素, 当施氮量为 360 kg/hm² 时, 是氮的表观损失量最少的优化施氮量。因此在保证作物需求的情况

下, 合理安排氮肥用量, 可以降低氮损失, 更好地调节氮平衡。

2.4 温室黄瓜优化施氮量及经济效益分析

不同氮肥调控下的氮素残留量和黄瓜产量分别与施氮量间呈显著一元二次模型相关 (图 3), 当施氮量为 347.5 kg/hm² 时, 黄瓜产量最高为 78.5 t/hm²。综合考虑土壤环境问题和产量, 可以得出当施氮量为 341.7 kg/hm² 时, 氮素残留量最低为 359.6 mg/hm² 时, 产量最高为 78.4 t/hm²。

除肥料成本以外, 不同施氮量的其他成本均一致 (表 4)。氮肥的施入都有效地增加了黄瓜的纯收益, N₁₂₀、N₂₄₀、N₃₆₀、N₄₈₀ 纯收益较 N₀ 增加了 8.5%~17.3%。随着施氮量的增加, 纯收益呈先升高后降低的趋势, 在 N₃₆₀ 水平上增加施氮量, 纯收益降低。N₃₆₀ 水平的纯收益最高, 其较 N₀ 的增收率是其他施氮处理的 2 倍。将纯收益与施氮量进行二元曲线模拟得出方程 $y = -0.1554x^2 + 102.45x + 96985$, 可知当施氮量为 329.6 kg/hm² 时, 纯收益最高为 148000 yuan/hm²。据调查, 京郊设施黄瓜农民习惯施肥肥料成本为 15000 yuan/hm², 总收入为 143000 yuan/hm², 若将农民其他成本与本试验一致, 其纯收益为 104000 yuan/hm², 较 N₀ 增收只有 4.4%。由此可见, 农民习惯施肥虽总收入可观, 但其忽视了成本, 大量肥料投入并没有带来较高的纯收益。

表 3 不同氮水平下的土壤氮素平衡

Table 3 Soil nitrogen balance under different N treatments

处理 Treatment	氮输入 N input (kg/hm ²)			氮输出 N output (kg/hm ²)			
	肥料 Fertilizer	起始土壤 Initial soil	有机矿化 Org. mineralization	作物吸收 Plant uptake	土壤残留 Soil residual	氨挥发 Ammonia volatilization	氮损失 N loss
N ₁₂₀	120	169.75	226.36	191.89	257.38	7.77	59.07
N ₂₄₀	240	169.75	226.36	241.48	272.07	11.35	111.21
N ₃₆₀	360	169.75	226.36	246.80	383.89	14.92	110.50
N ₄₈₀	480	169.75	226.36	229.00	491.65	18.50	136.96

表 4 不同氮水平下的经济效益

Table 4 Economic benefits under different N treatments

处理 Treatment	施氮量 N rate (kg/hm ²)	总收入 Total revenue (yuan/hm ²)	肥料成本 Fertilizer (yuan/hm ²)	幼苗成本 Seedling (yuan/hm ²)	管理成本 Management (yuan/hm ²)	纯收益 Net benefits (yuan/hm ²)	增收 Increment (%)
N ₀	0	134600	11166.7	20000	3816	99600	
N ₁₂₀	120	143600	11688.4	20000	3816	108000	8.48
N ₂₄₀	240	145600	12210.2	20000	3816	109500	9.96
N ₃₆₀	360	153400	12731.9	20000	3816	116800	17.25
N ₄₈₀	480	146400	13253.6	20000	3816	109300	9.74

3 讨论与结论

施肥是设施蔬菜生产中的一项关键技术,它直接影响到蔬菜的产量和品质。由于设施栽培生态条件和栽培方式与常规露地栽培不同,因此对肥水管理等提出了特殊要求^[27]。程福皆等^[28]研究结果表明,在施氮 0~900 kg/hm² 范围内,随施氮量的增加,可溶性蛋白、游离氨基酸含量逐渐升高。本试验在温室土壤无机氮含量为 35.20 mg/kg 和基施商品有机肥 15 t/hm² 的条件下,研究了获得优质高产且能维持土壤氮素平衡的最佳施氮量。本研究结果表明,不同氮肥处理下黄瓜总产量较对照差异性显著, N₃₆₀ 的增产效果最佳,为 80.3 t/hm²,较崔健等^[29]研究出的嫁接黄瓜产量 60.4 t/hm² 增产 33.0%,在其基础上增加施氮量产量则降低。各施氮处理的黄瓜硝酸盐含量均明显高于对照, N₄₈₀ 水平下的硝酸盐含量超标。可溶性糖含量随着施氮量增加而增加,在 N₃₆₀ 达到最高为 1.8%,增施氮量可溶性糖含量则降低。黄瓜氮素含量随着施氮量的增加都有所增加, N₂₄₀、N₃₆₀、N₄₈₀ 与 N₀ 差异性显著, N₄₈₀ 氮素含量较 N₃₆₀ 有所降低;氮肥的施入对磷、钾含量无显著影响。不同施氮水平处理下的氮素利用率在 4.9%~24.9% 之间,氮素残留率在 24.5%~58.0% 之间。将氮素残留量与产量进行二次曲线模拟得出施氮量为 341.7 kg/hm² 是解决环境和产量问题的最佳施氮量。当施氮量为 329.6 kg/hm² 时,纯收益最高,为 148000 yuan/hm²。

试验结束时正值黄瓜采收旺季,土壤中的氮素还没有被充分利用,因此得出的氮素利用率较低。本试验 360 kg/hm² 的施氮量加上基施有机肥中 2% 的含氮量与当地的施氮量 1741 kg/hm²^[3] 相比,本试验的施氮量仅是其施氮量的 43.7%。经调查,当地设施蔬菜黄瓜整个周期(按 5 个月计)最高产量为 165 t/hm²。本试验在 N₃₆₀ 处理下的黄瓜平均每月产量为

26.8 t/hm²,若按 5 个月计,黄瓜产量为 133.8 t/hm²,是当地黄瓜产量的 80.1%,对氮素的吸收量为 343.6 kg/hm², N₃₆₀ 处理下的氮素残留量(表 2)完全可以满足。研究发现,在我国一年两季的粮食生产中,每年氮肥施用量为 550~600 kg/hm²,远远超过作物的吸收量^[12]。本次试验得出的氮素利用率较赵营等^[30]研究得出的氮素利用率(2%~6%)整体提高了 75%。综合考虑环境和产量的最佳施氮量为 341.7 kg/hm²,较前人研究的施氮量 487.8 kg/hm²^[4]降低 30.0%。残留在土壤中的氮素养分仍然可以被利用^[31-33],当下一茬作物生长时,土壤中残留的氮素养分则发挥其供给效应。董娴娴等^[34]研究了肥料氮在两个轮作季四茬作物中的后效,结果表明后三茬作物均能吸收利用第一茬冬小麦残留在土壤中¹⁵N 标记肥料。卜容燕等^[35]研究结果表明,水稻季施用的氮肥残留相当于在油菜季施氮 5~33 kg/hm² 的增产效果。由于设施蔬菜土壤中氮残留量日趋严重,为了在维护土壤环境的基础上提高经济效益,生产者开始注重有机无机配施^[36-37]。本研究选择一定的有机肥及磷钾用量,合理利用土壤中残留氮源,优化运筹氮素,探索设施栽培黄瓜合理的有机无机配施量,从而为设施蔬菜科学施肥提供技术指导。

综上所述,在本试验条件下(土壤无机氮含量为 35.2 mg/kg 和基施商品有机肥 15 t/hm²),当施氮量为 360 kg/hm² 时,增产效果最佳,品质最佳;当施氮量为 240 kg/hm² 时,氮素利用率最高;综合考虑土壤环境和产量,推荐 341.7 kg/hm² 为最佳施氮量,可获得最高产量 78.4 t/hm²,施氮量为 329.6 kg/hm² 是获取最佳经济效益的推荐施氮量。

参考文献:

- [1] 黄建国. 植物营养学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004. 106-107.
Huang J G. Plant nutrition[M]. Beijing: China Forestry Press, 2004. 106-107.

- [2] Townsend A R, Howarth R W. Fixing the global nitrogen problem[J]. *Scientific American*, 2010, 302(2): 64–71.
- [3] 杜连凤, 吴琼, 赵同科, 等. 北京市郊典型农田施肥研究与分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (3): 75–78.
Du L F, Wu Q, Zhao T K, *et al.* Investigation of fertilizer application in different farmlands in suburbs of Beijing[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009, (3): 75–78.
- [4] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 552–558.
Liu F, Tong Y A, Wang X Y, *et al.* Effects of N, P and K fertilization on wheat yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 552–558.
- [5] 燕飞, 邹志荣, 董洁, 等. 不同施肥处理对大棚黄瓜产量和品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(5): 272–275.
Yan F, Zou Z R, Dong J, *et al.* Effects of different fertilization treatment on yield and quality of cucumber in plastics greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(5): 272–275.
- [6] 李涛, 万广华, 蒋庆功, 等. 施肥对蔬菜中硝酸盐含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (4): 20–21, 24.
Li T, Wan G H, Jiang Q G, *et al.* The effect of applying fertilizer on the nitrate content in vegetables[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (4): 20–21, 24.
- [7] 封锦芳, 施致雄, 吴永宁, 等. 北京市春季蔬菜硝酸盐含量测定及居民暴露量评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2007, 18(6): 514–517.
Feng J F, Shi Z X, Wu Y N, *et al.* Assessment of nitrate exposure in Beijing residents via consumption of vegetables[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2007, 18(6): 514–517.
- [8] 刘玉梅. 不同施氮水平对嫁接黄瓜不同部位硝酸盐含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(2): 225–228.
Liu Y M. Effects of different nitrogen levels on nitrate content in different parts of grafted cucumber[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(2): 225–228.
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [10] Crews T E, Peoples M B. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 102(3): 279–297.
- [11] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [12] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 938–945.
- [13] 于红梅, 李子忠, 龚元石. 不同水氮管理对蔬菜地硝态氮淋洗的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1849–1855.
Yu H M, Li Z Z, Gong Y S. Effects of different water and nitrogen management on vegetables field nitrate leaching[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1849–1855.
- [14] Home P G, Panda R K, Kar S. Effect of method and scheduling of irrigation on water and nitrogen use efficiencies of Okra (*Abesculentus esculentus*)[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55(2): 159–170.
- [15] 杜连凤, 赵同科, 张成军, 等. 京郊地区3种典型农田系统硝酸盐污染现状调查[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2837–2843.
Du L F, Zhao T K, Zhang C J, *et al.* Investigation on nitrate pollution in soils, ground water and vegetables of three typical farmlands in Beijing region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2837–2843.
- [16] 高茹, 李裕元, 杨蕊, 等. 亚热带主要耕作土壤硝态氮淋失特征试验研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 839–852.
Gao R, Li Y Y, Yang R, *et al.* Study on nitrate leaching characteristics in arable soils in subtropical region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 839–852.
- [17] 中华人民共和国. 中国统计年鉴[M]. 北京, 中国统计年鉴出版社, 2013.
The People's Republic of China. *China statistical yearbook*[M]. Beijing: China Statistical Yearbook Press, 2013.
- [18] 中华人民共和国. 中国统计年鉴[M]. 北京, 中国统计年鉴出版社, 2014.
The People's Republic of China. *China statistical yearbook*[M]. Beijing: China Statistical Yearbook Press, 2014.
- [19] 王柳. 京郊日光温室土壤环境特征与黄瓜优质高产相关性的研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2003.
Wang L. The relationship between solar greenhouse soil environment and cucumbers' quality and yield[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2003.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 264–268.
Bao S D. *Soil agro-chemical analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 264–268.
- [21] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 35–37.
Hao Z B, Cang J, Xu Z. *Plant physiology experiment*[M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2004: 35–37.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 世界图书出版公司, 2000: 145–148.
Gao J F. *Plant physiology experiment technology*[M]. World Publishing Corporation, 2000: 145–148.
- [23] 聂文静, 李博文, 郭艳杰, 等. 氮肥与DCD配施对棚室黄瓜土壤NH₃挥发损失及N₂O排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(10): 2500–2508.
Nie W J, Li B W, Guo Y J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and DCD application on ammonia volatilization and nitrous oxide emission from soil with cucumber growing in greenhouse[J]. *Journal of Environmental Science*, 2012, 32(10): 2500–2508.
- [24] 陈清, 张宏彦, 张晓晟, 等. 京郊大白菜的氮素吸收特点及氮肥推荐[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 404–408.
Chen Q, Zhang H Y, Zhang X C, *et al.* Characteristics of N uptake and N recommendation for autumn Chinese cabbage in Beijing suburb[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 404–408.
- [25] 徐坤范, 李明玉, 艾希珍. 氮对日光温室黄瓜呈味物质、硝酸盐含量及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 717–721.
Xu K F, Li M Y, Ai X Z. Effect of nitrogen on taste compounds, nitrate and yield of cucumber in solar-greenhouse[J]. *Plant Nutrition*

- and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 717-721.
- [26] 刘春香, 何启伟, 孟静静. 黄瓜感官检验与主要芳香物质, 可溶性糖的相关关系[J]. 中国蔬菜, 2005, (1): 8-10.
Liu C X, He Q W, Meng J J. Correlations between sensory analysis, major volatile compounds and sugar content in cucumber fruit[J]. China Vegetables, 2005, (1): 8-10.
- [27] 王小波. 设施蔬菜施肥亟待解决的问题及其方法[J]. 现代农业, 2007, (4): 26-27.
Wang X B. Facility vegetable fertilization problem to be solved and its methods[J]. Modern Agricultural, 2007, (4): 26-27.
- [28] 程福皆, 曹辰兴, 康鸾, 等. 不同氮钾水平对春棚小黄瓜产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 276-279.
Cheng F J, Cao C X, Kang L, *et al.* Effects of different levels of nitrogen and potassium on yield and quality of spring mini-cucumber in arched shed[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 276-279.
- [29] 崔健, 刘素芹, 宋云云, 等. 嫁接与施肥对黄瓜产量及氮吸收利用效率的研究[J]. 农学学报, 2012, 2(7): 63-65.
Cui J, Liu S Q, Song Y Y, *et al.* Effect of grafting cultivation and nitrogen application on yield and nitrogen utilization of cucumber[J]. Agricultural Science, 2012, 2(7): 63-65.
- [30] 赵营, 张学军, 罗健航, 等. 施肥对设施番茄-黄瓜养分利用与土壤氮素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 374-383.
Zhao Y, Zhang X J, Luo J H, *et al.* Effect of fertilization on nitrogen leaching loss from soil and nutrients utilization by tomato and cucumber in greenhouse[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 374-383.
- [31] Macdonald A J, Poulton P R, Stockdale E A, *et al.* The fate of residual ¹⁵N-labelled fertilizer in arable soils: its availability to subsequent crops and retention in soil[J]. Plant and Soil, 2002, 246:123-137.
- [32] Zhang L J, Ju X T, Gao Q, *et al.* Recovery of ¹⁵N-labeled nitrate injected into deep subsoil by maize in a calcareous alluvial cambisol in North China Plain[J]. Communication of Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(11-12):1563-1577.
- [33] 孙政才. 冬小麦施氮在下茬夏玉米后效定量研究[J]. 北京农业科学, 1997, 15(4): 19-20.
Sun Z C. Quantitative research on the after effect of nitrogen applied in winter wheat for following summer maize[J]. Beijing Agricultural Science, 1997, 15(4): 19-20.
- [34] 董娴娴, 刘新宇, 任翠莲, 等. 潮褐土冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥后效及去向研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2209-2216.
Dong X X, Liu X Y, Ren C L, *et al.* Fate and residual effect of fertilizer nitrogen under winter wheat-summer maize rotation in north China in meadow cinnamon soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(11): 2209-2216.
- [35] 卜容燕, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻-油菜轮作条件下氮肥效应及其后效[J]. 中国农业科学, 2012, 45(24): 5049-5056.
Bu R Y, Ren T, Lu J W, *et al.* Study on N fertilizer efficiency and the residual effect under rice-oilseed rape rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(24): 5049-5056.
- [36] 张红梅, 金海军, 丁小涛, 等. 有机肥无机肥配施对温室黄瓜生长、产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 247-253.
Zhang H M, Jin H J, Ding X T, *et al.* Effects of application of organic and inorganic fertilizers on the growth, yield and quality of cucumber in greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 247-253.
- [37] 刘益仁. 有机无机肥配施提高麦稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 81-86.
Liu Y R. Mechanisms for the increased fertilizer nitrogen use efficiency of rice in wheat-rice rotation system under combined application of inorganic and organic fertilizers[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 81-86.