

董 环, 娄春荣, 王秀娟, 等. 氮、钾运筹对设施番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 378-383.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.02.019

## 氮、钾运筹对设施番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响

董 环, 娄春荣, 王秀娟, 赵 颖, 何志刚

(辽宁省农业科学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:** 施肥影响设施蔬菜的产量、质量和土壤环境, 因此, 开展设施番茄氮肥和钾肥配合施用方案的研究, 对区域设施农业优质、高效、健康发展具有重要意义。本研究以番茄新品种辽粉 185 为试验材料, 采用氮、钾 2 因素 4 水平完全随机设计, 探讨氮、钾配合施用对设施番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响。结果表明, 果实硝酸盐含量随氮和钾施入水平的提升而增加, 土壤硝态氮含量随氮施入水平的提升而增加, 随钾施入水平的提升而降低。氮、钾施入水平对番茄产量的影响均为先促进后抑制, 通过回归模型获得番茄最高产量的氮、钾推荐施肥量分别为 323.6 kg/hm<sup>2</sup> 和 377.0 kg/hm<sup>2</sup>。采用 TOPSIS (Technique for order preference by similarity to an ideal solution) 法进行综合评价, 获得的结果表明, 氮是影响番茄产量、质量和环境的重要因素, 氮投入 142.9~285.7 kg/hm<sup>2</sup> 可作为区域设施番茄栽培决策施肥的参考区间。

**关键词:** 氮; 钾; 设施番茄; 产量; 果实硝酸盐; 土壤硝态氮

**中图分类号:** S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)02-0378-06

## Effects of nitrogen and potassium application on tomato yield, fruit nitrate content and soil nitrate nitrogen content

DONG Huan, LOU Chun-rong, WANG Xiu-juan, ZHAO Ying, HE Zhi-gang

(Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** The application of fertilizers affects yield and quality safety of vegetables in greenhouse and soil environment. So the research on the application of nitrogen and potassium for tomato in greenhouse has a great significance to the high-quality, high-efficiency and healthy development of the regional facility agriculture. Using a new tomato cultivar Liaofen 185 as experimental material, the experimental scheme was two-factor and four-level completely randomized design of nitrogen and potassium, and the effects of nitrogen and potassium on yield and fruit nitrate content of tomato and soil nitrate nitrogen content were studied. The results showed that tomato nitrate content increased with the increase of potassium and nitrogen application levels. Soil nitrate nitrogen content increased with the increase of nitrogen application levels and decreased with the increase of potassium application levels. The yield of tomato increased firstly and then decreased with the increase of nitrogen and potassium application levels. The recommended fertilizer rates of nitrogen and potassium for the highest yield of tomato by

regression model were 323.6 kg/hm<sup>2</sup> and 377.0 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The analysis result of technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) showed that nitrogen was important to yield and quality safety of tomato and environment. The optimal nitrogen application rate is 142.9~285.7 kg/hm<sup>2</sup> in this region.

**Key words:** nitrogen; potassium; greenhouse tomato; yield; fruit nitrate; soil nitrate nitrogen

收稿日期: 2018-06-02

**基金项目:** 辽宁生态农业基地清洁生产示范项目 (2110402-2); 辽宁省科技攻关项目 (2015028); 沈阳市科学技术计划资助项目 (17-148-3-00)

**作者简介:** 董 环 (1979-), 男, 辽宁本溪人, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养和环境资源研究。 (E-mail) xianyu1979@126.com

**通讯作者:** 娄春荣, (E-mail) lcllys@126.com

设施农业是一种高投入、集约化、高收益的农业生产形式<sup>[1]</sup>,在实际生产过程中,往往存在因生产者技术水平低而导致施肥结构不合理,或因盲目追求产量而过量施用肥料的现象,施肥不合理或过量施肥将会带来农业资源浪费,设施土壤次生盐渍化,设施蔬菜产量降低,农产品安全受到威胁,土壤环境污染等诸多问题<sup>[2-3]</sup>。因此,既能够改善土壤和水环境,又能保证农产品产量和安全的配方施肥引起了社会的广泛关注<sup>[4]</sup>。合理施用氮肥、钾肥可保证农作物的产量和品质<sup>[5-11]</sup>。氮肥、钾肥影响蔬菜的质量安全,钾肥影响硝酸盐的运输、吸收和利用,硝酸盐是衡量蔬菜安全的重要指标,而且科学施用氮肥、钾肥将有效避免土壤和地下水硝酸盐超标<sup>[12]</sup>。关于氮肥、钾肥的单因素或多因素交互作用对番茄产量、果实品质或土壤硝态氮影响的研究较多<sup>[13-16]</sup>,但结合地域气候条件、土壤类型、种植模式,针对地方新品种开展的综合考虑产量、质量安全及土壤污染指标的研究较少。本研究拟在北方典型土壤类型和设施栽培模式下,研究氮(N)、钾(K)对番茄新品种辽粉 185 产量、果实硝酸盐含量和土壤硝态氮含量的影响,获得氮肥、钾肥对各指标的影响规律,最优推荐施用量及效应综合评价结果,以期为区域番茄优质、高效、健康、可持续生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验设置在辽宁省海城市温香镇设施番茄大面积种植区,该地区位于辽东半岛与内陆交汇点,属于温带季风气候,年平均气温 8~9℃,全年降水量 640~880 mm。受季风影响,降水多集中在夏季,温差较大,四季分明。温香镇位于海城西北部平原区,该地区地势平坦,土壤肥沃,适宜开展设施农业生产,现已拥有设施大棚 1 200 hm<sup>2</sup>,是鞍山地区最大的农产品产销集散地。番茄是该地区主要种植的蔬菜,超过 40.0%的农户春茬种植番茄。本试验所选地块为棚龄 5 年的设施大棚,有机肥在夏季 7~8 月施入,每年施用 75~105 t/hm<sup>2</sup>猪粪或牛粪。土壤类型为草甸土,土壤有机质 2.980%,全氮 0.164%,全磷 0.146%,全钾 2.560%,速效氮 160.00 mg/kg,速效磷 212.20 mg/kg,速效钾 230.00 mg/kg,pH 6.5。

### 1.2 试验材料

番茄品种为辽粉 185,无限生长型粉红果。果

实扁圆形,色泽亮丽,有绿果肩,口感好,硬度中等,耐贮运。适宜日光温室冬春茬和春茬种植。

供试肥料包括普通尿素(N:46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:12%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O:50%)。

### 1.3 试验设计

试验采用 N、K 2 因素 4 水平完全随机设计,共 16 个处理,3 次重复,随机排列,试验小区面积 20 m<sup>2</sup>。试验设计方案如表 1 显示。

氮肥和钾肥的 20%为基肥,其余为追肥,分 3 次施入,第 1 穗果膨大期追施 20%,第 2 穗果膨大期追施 30%,第 3 穗果膨大期追施 30%。所有处理的施磷量均为 285.71 kg/hm<sup>2</sup>,全部作为基肥一次性施入。2017 年 2 月 3 日定植,番茄栽培共留 5 穗果,每穗留 4 个果实,2017 年 6 月 27 日采收结束。

表 1 试验设计

Table 1 Design of experiment

处理编号	氮施入水平	氮肥施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )	钾施入水平	钾肥施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )
N1K1	1	142.9	1	142.9
N1K2	1	142.9	2	285.7
N1K3	1	142.9	3	428.6
N1K4	1	142.9	4	571.4
N2K1	2	285.7	1	142.9
N2K2	2	285.7	2	285.7
N2K3	2	285.7	3	428.6
N2K4	2	285.7	4	571.4
N3K1	3	428.6	1	142.9
N3K2	3	428.6	2	285.7
N3K3	3	428.6	3	428.6
N3K4	3	428.6	4	571.4
N4K1	4	571.4	1	142.9
N4K2	4	571.4	2	285.7
N4K3	4	571.4	3	428.6
N4K4	4	571.4	4	571.4

### 1.4 测定调查项目与方法

第 3 穗果成熟期到第 5 穗果成熟期分 3 次采收果实,混合样品测定果实硝酸盐含量,果实硝酸盐含量测定采用分光光度计法<sup>[17]</sup>。于收获期调查番茄果实产量,拉秧期采集各处理耕层 0~20 cm 土壤,测定土壤硝态氮含量。土壤硝态氮含量采用 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>溶液浸提,连续流动分析仪(AA3 型)测定<sup>[18]</sup>。

### 1.5 统计分析方法

采用 Microsoft Excel 2007、SPSS22.0 软件进行

方差分析和回归分析,利用 DPS 7.05 进行 TOPSIS (Technique for order preference by similarity to an ideal solution) 法综合评价分析,利用 Matlab2017b 绘制模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮、钾运筹对番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响

表 2 显示,相同氮施入水平下不同钾施入水平间产量差异不显著。相同钾施入水平下,N2 的番茄产量显著高于其他 N 水平的番茄产量 ( $P<0.05$ ), N1、N3 和 N4 水平间番茄产量的差异不显著。

相同氮施入水平下不同钾施入水平,果实硝酸盐含量总体随钾施入水平的提升而增加。N1 水平下,N1K4 处理的番茄果实硝酸盐含量显著高于 N1K1 和 N1K2 处理。N2 水平下,N2K3 和 N2K4 处理的果实硝酸盐含量显著高于 N2K1 和 N2K2 处理。N3 水平下,N3K2、N3K3 和 N3K4 处理间的果实硝酸盐含量差异不显著,但皆显著高于 N3K1 处理。N4 水平下,N4K2、N4K3 和 N4K4 处理间的果实硝酸盐含量差异不显著,N4K3 和 N4K4 处理的果实硝酸盐含量显著高于 N4K1 处理。相同钾施入水平下不同氮施入水平,果实硝酸盐含量总体随氮水

平的提升而增加。K1 水平下,N3K1 和 N4K1 处理的果实硝酸盐含量显著高于 N1K1 和 N2K1 处理。K2 水平下,N3K2 和 N4K2 处理的果实硝酸盐含量均较高,二者间差异不显著,但均显著高于其他 2 个处理。K3 水平下,N2K3、N3K3、N4K3 处理间的果实硝酸盐含量差异不显著,但皆显著高于 N1K3 处理。K4 水平下,N2K4、N3K4、N4K4 处理的果实硝酸盐含量显著高于 N1K4 处理。

相同氮施入水平下不同钾施入水平,土壤硝态氮含量总体随钾施入水平的提升而降低,N3 水平下,各处理间差异不显著。相同钾施入水平下不同氮施入水平,土壤硝态氮含量总体随氮施入水平的提升而增加。

综合考虑番茄产量、质量安全和环境风险,采用 TOPSIS 综合评价法对 3 类指标进行分析,其中产量数据作为高优指标,果实硝酸盐含量和土壤硝态氮含量作为低优指标。根据相对接近度指标得到综合排名,可以看出,1~3 名皆出现在 N1 水平,1~8 名主要集中在 N1 和 N2 水平,9~16 名主要集中在 N3 和 N4 水平,14~16 名皆出现在 N4 水平,由此推断,氮是影响综合效益的重要因素,而 N1 和 N2 的施氮水平 ( $142.9\sim 285.7\text{ kg/hm}^2$ ) 可以作为区域决策施肥的参考区间。

表 2 施肥处理对番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响

Table 2 Effects of fertilizer treatment on tomato yield, nitrate content and soil nitrate nitrogen content

处理	产量 ( $\text{t/hm}^2$ )	果实硝酸盐含量 ( $\text{mg/kg}$ )	土壤硝态氮含量 ( $\text{mg/kg}$ )	相对接近度指标
N1K1	90.53 $\pm$ 1.00cd	68.76 $\pm$ 10.32f	50.13 $\pm$ 4.45d	0.468 2
N1K2	89.20 $\pm$ 0.89cd	62.23 $\pm$ 1.45f	40.48 $\pm$ 3.74e	0.597 3
N1K3	97.01 $\pm$ 2.84c	75.41 $\pm$ 8.18ef	28.59 $\pm$ 3.61f	0.766 9
N1K4	89.43 $\pm$ 2.57cd	84.20 $\pm$ 5.06e	25.70 $\pm$ 2.73f	0.735 3
N2K1	111.06 $\pm$ 4.53ab	64.96 $\pm$ 4.77f	53.79 $\pm$ 3.53d	0.488 2
N2K2	111.90 $\pm$ 2.66ab	87.52 $\pm$ 9.50e	53.29 $\pm$ 4.67d	0.367 5
N2K3	115.26 $\pm$ 1.84a	115.07 $\pm$ 4.47bcd	34.13 $\pm$ 4.60ef	0.517 6
N2K4	107.69 $\pm$ 3.94b	118.75 $\pm$ 9.60bcd	31.86 $\pm$ 3.09ef	0.540 9
N3K1	86.56 $\pm$ 4.57d	101.18 $\pm$ 5.47d	72.85 $\pm$ 3.11bc	0.175 7
N3K2	92.69 $\pm$ 4.79cd	124.34 $\pm$ 10.57abc	68.38 $\pm$ 5.58c	0.119 0
N3K3	94.01 $\pm$ 1.60cd	128.46 $\pm$ 3.07abc	64.07 $\pm$ 6.68c	0.140 3
N3K4	92.33 $\pm$ 2.49cd	132.29 $\pm$ 8.00ab	65.31 $\pm$ 4.99c	0.125 0
N4K1	87.28 $\pm$ 4.70d	112.70 $\pm$ 8.27cd	88.17 $\pm$ 4.35a	0.101 5
N4K2	90.17 $\pm$ 1.87cd	127.90 $\pm$ 4.04abc	80.07 $\pm$ 5.76b	0.059 0
N4K3	92.00 $\pm$ 0.52cd	131.72 $\pm$ 2.63ab	73.09 $\pm$ 7.15bc	0.082 8
N4K4	88.84 $\pm$ 3.01cd	140.21 $\pm$ 8.06a	64.25 $\pm$ 3.79c	0.122 7

各处理见表 1。同列数据后不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平。

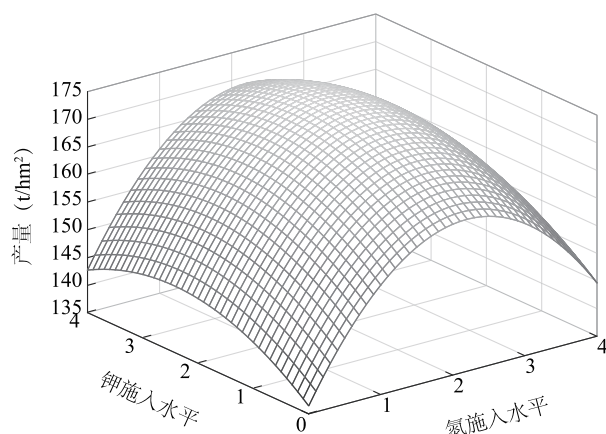
## 2.2 各指标的氮、钾回归模型

为了深入挖掘氮、钾互作对各指标的作用,对各处理下指标的平均值和肥料施入水平进行回归分析,得出氮、钾交互作用对不同指标影响的模型。回归模型可用于了解自变量(施肥配比)对因变量的影响,估测不同施肥配置条件下,各指标的具体数值,并获得最佳的肥料配置。

2.2.1 番茄产量 对各处理产量平均值和各处理氮、钾施入水平进行回归分析,得到氮、钾交互作用下的产量回归模型:

$$Ch = 66.913 + 23.816n + 8.700k + 0.314nk - 5.440n^2 - 1.783k^2 \quad (R^2 = 0.477) \quad (1)$$

式中, $Ch$ 代表番茄产量(kg), $n$ 代表氮施入水平, $k$ 代表钾施入水平。对模型(1)进行绘图,得到氮、钾交互作用对番茄产量影响的效果图(图1),氮和钾对番茄产量的效应呈开口向下的曲面。钾对番茄产量的影响是先促进后抑制,氮对番茄产量的影响也是先促进后抑制。通过对回归模型求偏导得到番茄最高产量为105.37 t/hm<sup>2</sup>,氮和钾最佳施入量分别为N:323.6 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O:377.0 kg/hm<sup>2</sup>。



氮施入水平、钾施入水平见表1。

图1 产量模型

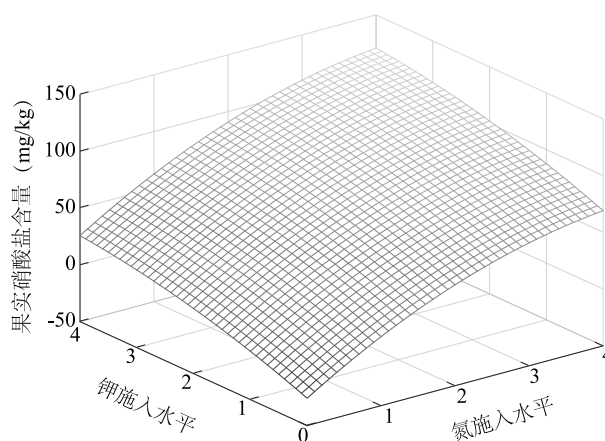
Fig.1 Model of yield

2.2.2 番茄果实硝酸盐含量 对各处理下果实硝酸盐含量均值和氮、钾的施入水平进行回归分析,得到氮、钾交互作用下的果实硝酸盐含量回归模型:

$$FN = -1.775 + 41.117a + 20.329b - 0.109ab - 4.340a^2 - 1.850b^2 \quad (R^2 = 0.922) \quad (2)$$

式中, $FN$ 表示番茄果实硝酸盐含量(mg/kg), $a$ 代表氮施入水平, $b$ 代表钾施入水平。对模型(2)进

行绘图,得到氮、钾交互作用对番茄果实硝酸盐含量影响的效果图(图2),氮和钾对番茄果实硝酸盐含量的效应呈开口向下的曲面,但曲面较平整。试验施肥范围内,钾和氮对番茄果实硝酸盐含量的影响均为促进作用。通过对回归模型求偏导得到番茄最高果实硝酸盐含量为148.7 mg/kg,氮和钾推荐施入量分别为N:667.1 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O:765.3 kg/hm<sup>2</sup>,该推荐施肥量已超出试验设计范围,只代表模型推导结果,实际情况需要具体试验来验证。



氮施入水平、钾施入水平见表1。

图2 番茄硝酸盐含量模型

Fig.2 Model of tomato nitrate content

2.2.3 土壤硝态氮含量 对各处理土壤硝态氮含量均值和氮、钾施入水平进行回归分析,得到氮、钾交互作用下的土壤硝态氮含量回归模型:

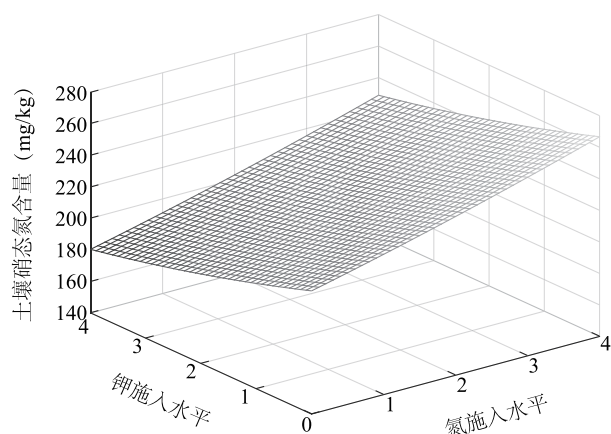
$$TN = 46.970 + 10.431x - 11.941y + 0.773xy + 0.425x^2 + 0.623y^2 \quad (R^2 = 0.927) \quad (3)$$

式中, $TN$ 代表拉秧后耕层土壤硝态氮含量(mg/kg), $x$ 代表氮施入水平, $y$ 代表钾施入水平。对模型(3)进行绘图,得到氮、钾交互作用对土壤硝态氮含量影响的效果图(图3),氮和钾对土壤硝态氮含量的效应近似平面。钾对土壤硝态氮含量的影响为抑制作用,且随着氮施入量的增加,钾对土壤硝态氮含量的抑制能力变小。氮对土壤硝态氮含量的影响为促进作用。表明,减少氮投入,增加钾投入是降低土壤硝态氮含量的有效途径。

## 3 讨论

产量是与农业生产者效益直接相关的因素,而番茄产量受氮肥、钾肥的直接影响。张恩平等<sup>[4]</sup>试





氮施入水平、钾施入水平见表1。

图3 土壤硝态氮含量模型

Fig.3 Model of soil nitrate nitrogen content

验结果表明,番茄产量受氮肥影响最为显著,与本试验结果一致。袁亭亭等<sup>[13]</sup>试验结果表明,在低水平氮、钾条件下,番茄产量随氮、钾施用量的增加而提高,在高水平氮、钾条件下,番茄产量随氮、钾施用量的增加而降低,与本试验模型分析显示的规律一致。但姜慧敏等<sup>[12]</sup>的试验结果表明,1 000 kg/hm<sup>2</sup>纯氮和700 kg/hm<sup>2</sup>纯氮处理下的番茄产量差异不显著,这可能是由试验地基础地力、栽培管理和施肥水平差异引起的。

硝酸盐是影响农产品安全的重要指标。世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织(FAO)制订了食品中硝酸盐的限量标准,该标准规定蔬菜中硝酸盐含量小于432.0 mg/kg为一级标准,一级标准的蔬菜允许生食,对人们身体健康影响较小<sup>[19]</sup>。在本试验条件下生产的番茄,其最高硝酸盐含量为140.2 mg/kg,模型推导的果实硝酸盐含量为148.7 mg/kg,两者皆未超过一级标准,说明,食用本试验中任何配比的肥料所生产的番茄,都不会对人体造成威胁。袁丽萍等<sup>[20]</sup>的研究结果表明,其他条件相同的情况下,番茄果实硝酸盐含量随施氮量的增加而增加,谢安坤<sup>[21]</sup>等试验结果表明,纯氮0~767 kg/hm<sup>2</sup>,番茄果实硝酸盐含量随施氮量的增加而增加,这与本试验研究结果相近。多数研究结果表明,农产品中的硝酸盐含量随着施入钾肥的增多而减少<sup>[22-25]</sup>。而本试验模型分析结果显示,常规施肥条件下,增施钾肥会增加果实硝酸盐含量,这可能是受到土壤肥力、作物类型、品种和氮钾肥施入比例等因

素影响所致。

大量研究结果表明,耕层土壤硝态氮含量随施氮量的增加而增加<sup>[26-28]</sup>,本试验模型分析结果也得出同样的规律。施氮并合理配施其他肥料能够不同程度地降低土壤中硝态氮的含量。赵云英等<sup>[29]</sup>对黄土高原的黑垆土长期定位,试验结果表明,氮与磷或有机肥配施能有效减少土壤剖面中硝态氮的累积。杨莉琳等<sup>[30]</sup>对太行山山前平原潮褐土进行4年定位试验,发现施钾肥抑制了土壤硝态氮积累。刘德平等<sup>[31]</sup>在内蒙古河套灌区试验结果表明,适量配施氮肥和钾肥能够降低土壤中硝态氮的残留量。本试验结果表明,在较低氮水平条件下,施用钾肥可以降低土壤硝态氮含量,但在较高氮水平条件下,施用钾肥降低土壤硝态氮含量的能力减弱。

本试验进行综合分析所使用的方法为TOPSIS综合评价法,这是一种多目标决策方法,适用于处理多目标决策。目前已有少数研究者将这种方法运用到农业科研的效益评价和方案决策中<sup>[32-34]</sup>。

通过模型分析,氮、钾推荐最高产量施肥量为N:323.6 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O:377.0 kg/hm<sup>2</sup>。方差分析及模型分析结果表明,果实硝酸盐含量随氮、钾水平的提升而增加,土壤硝态氮含量随钾水平的提升而降低,随氮水平的提升而增加。因此,减少氮投入,增加钾投入是降低设施土壤硝态氮含量的有效途径。TOPSIS法综合评价结果表明,氮是影响经济效益、蔬菜质量安全和环境风险的重要因素,氮施入量142.9~285.7 kg/hm<sup>2</sup>可作为区域决策施肥的参考区间。

#### 参考文献:

- [1] 姬景红,李杰,李玉影,等. 不同施肥措施对保护地番茄产量、品质及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(5): 35-39.
- [2] 张金锦,段增强. 设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及其分类与分级标准的研究进展[J]. 土壤, 2011, 43(3): 361-366.
- [3] 董元华,张桃林. 基于农产品质量安全的土壤资源管理与可持续利用[J]. 土壤, 2003, 35(3): 182-186.
- [4] 张恩平,谭福雷,王月,等. 氮磷钾与有机肥配施对番茄产量品质及土壤酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(10): 2059-2067.
- [5] 杨长琴,张国伟,刘瑞显,等. 氮肥运筹对麦后直播棉光合性能、生物量、氮素累积及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1028-1035.
- [6] 施毅超,胡正义,龙为国,等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍

- 化土壤盐分离子累积的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):548-553.
- [7] 王化敦,史高玲,张平平,等. 长江中下游小麦品种籽粒品质对氮素的敏感性分析[J]. 南方农业学报,2017,48(9):1568-1573.
- [8] 宋春风,徐 坤. 氮钾配施对芋头产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):167-170.
- [9] 于海燕,付乃鑫,万勇善,等. 不同施氮量对花生生理特性和产量的影响[J]. 山东农业科学,2018,50(6):145-149.
- [10] 马乔玲,张 炎,李青军,等. 钾肥施用对加工番茄产量及效益的影响[J].新疆农业科学,2013,50(11):2046-2053.
- [11] 王亮亮,高志山,宋伟杰,等. 滴灌施肥下钾肥对番茄生长及产质量的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):132-134.
- [12] 姜慧敏,张建峰,杨俊诚,等. 不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(12):2338-2345.
- [13] 袁亭亭,杨建平,徐 坤. 秋延迟番茄氮、磷、钾优化施肥方案研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1246-1251.
- [14] 贺会强,陈凯利,邹志荣,等. 不同施肥水平对日光温室番茄产量和品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(7):135-140.
- [15] 张守才,赵征宇,孙永红,等. 设施栽培番茄的氮磷钾肥料效应研究[J].中国土壤与肥料,2016(2):65-71.
- [16] 李文娆,李建设,芦 燕,等. 不同施肥方式对温室樱桃番茄果实和土壤硝酸盐含量变化的影响[J].西北植物学报,2005,25(9):1798-1804.
- [17] 李育鹏,胡海燕,李兆君,等. 土壤调理剂对红壤 pH 值及空心菜产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2014(6):21-26.
- [18] 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,2001.
- [19] 董 环,娄春荣,史书强,等. 降低收获期马铃薯块茎硝酸盐及土壤硝酸盐含量氮钾运筹方案研究[J].干旱地区农业研究,2012,35(5):138-142.
- [20] 袁丽萍,司力珊,张 力,等. 水氮耦合供应对温室番茄果实硝酸盐累积的影响[J].中国土壤与肥料,2008(5):33-35.
- [21] 谢安坤,李志宏,张云贵,等. 不同施氮水平对番茄产量、品质及土壤剖面硝态氮的影响[J].中国土壤与肥料,2011(1):26-29.
- [22] 熊国华,林咸永,章永松,等. 钾、尿素与有机物料或双氰胺配施对菠菜体内硝酸盐、亚硝酸盐含量影响的研究[J].土壤通报,2005,36(1):62-67.
- [23] 王凤婷,艾希珍,刘金亮,等. 钾对日光温室黄瓜糖、维生素 C、硝酸盐及其相关酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):682-687.
- [24] 孙 权,高艳明,李建设. 氮、磷、钾配合施用对油菜硝酸盐含量的影响[J].中国生态农业学报,2003,11(3):84-86.
- [25] SPIRONELLO A, QUAGGIO J A, TEIXEIRA L A J, et al. Pineapple yield and fruit quality effected by NPK fertilization in a tropical soil[J]. Revista Brasileira de Fruticultura, 2004, 26(1):155-159.
- [26] 郝小雨,高 伟,王玉军,等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):538-547.
- [27] 沈灵凤,白玲玉,曾希柏,等. 施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及 pH 的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(7):1350-1356.
- [28] 杨蕊菊,柴守玺,马忠明. 施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响[J].生态学报,2012,32(24):7905-7912.
- [29] 赵云英,谢永生,郝明德. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1273-1279.
- [30] 杨莉琳,胡春胜. 施肥对华北高产区土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失与作物  $\text{NO}_3^-$ -N 含量及产量的影响[J].应用与环境生物学报,2003,9(5):501-505.
- [31] 刘德平,杨树青,史海滨,等. 氮磷钾平衡施肥对作物收获后土壤硝态氮残留的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(5):42-46.
- [32] 陈伯扬. TOPSIS 法在土壤环境质量评价中的应用[J].现代地质,2008,22(6):1003-1009.
- [33] 李红峥,曹红霞,郭莉杰,等. 沟灌方式和灌水量对温室番茄综合品质与产量的影响[J].中国农业科学,2016,49(21):4179-4191.
- [34] 张 彬,杨联安,冯武焕,等. 基于改进 TOPSIS 和 COK 的土壤养分综合评价[J].干旱区资源与环境,2016,30(7):180-185.

(责任编辑:王 妮)