

# 养分专家系统推荐施肥在番茄上的应用效果

山楠<sup>1</sup>, 串丽敏<sup>2</sup>, 李明悦<sup>3</sup>, 刘继培<sup>4</sup>

(1. 唐山学院新材料与化学工程学院 河北唐山 063000; 2. 北京市农林科学院数据科学与农业经济研究所 北京 100097; 3. 天津市农业资源与环境研究所 天津 300192; 4. 北京市大兴区土肥工作站 北京 102600)

**摘要:**为提高番茄科学施肥水平,通过田间试验,研究了养分专家系统推荐施肥对番茄产量、纯收益和养分利用率的影响,为番茄方便快捷进行施肥决策提供理论、技术和工具支撑。养分专家推荐施肥处理(OPT)确定的番茄试验地N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O施用量分别为390、166和410 kg·hm<sup>-2</sup>。与农民习惯施肥处理(FP)相比,该方法分别减少氮、钾肥用量17.20%和34.19%,增施了9.57%的磷肥用量,番茄经济产量显著提高13.83%,纯收益提高26 503.68元·hm<sup>-2</sup>,并且提高了肥料的农学效率1~5倍和养分回收率10.72~30.75个百分点,促进了养分的高效利用。有机肥替代20%化肥氮处理(OPT+OM)较OPT外的其他处理可以提高番茄生物产量(15.83%~31.65%)。养分专家系统推荐施肥充分利用了土壤的基础养分供应,调控了氮磷钾养分的合理施用量,从而达到降低化肥投入、提高番茄产量和肥料利用效率的效果。

**关键词:**番茄;产量反应;农学效率;推荐施肥;养分吸收量;肥料利用率

中图分类号:S641.2 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2022)04-045-06

## Application effects of Nutrient Expert fertilizer recommendation on tomato production

SHAN Nan<sup>1</sup>, CHUAN Limin<sup>2</sup>, LI Mingyue<sup>3</sup>, LIU Jipei<sup>4</sup>

(1. School of New Materials and Chemical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, Hebei, China; 2. Institute of Data Science and Agricultural Economics, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China; 4. Daxing Soil and Fertilizer Workstation, Beijing 102600, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the application effects of a decision support system named Nutrient Expert on yield, profits and fertilizer use efficiency. The system could be a quick tool to provide technical support of fertilization recommendation for tomato production. Treatments included farmer practice (FP), fertilizer recommendation based on Nutrient Expert (OPT), 20% chemical N substitution with organic fertilizer (OPT+OM), and N, P and K omission based on OPT. OPT recommended fertilizer application for N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O were 390, 166 and 410 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. Compared with farmer practice fertilization, Nutrient Expert recommendation reduced 17.20% of nitrogen and 34.19% of potassium, increased 9.57% of phosphate, significantly increased the tomato economic output by 13.83%, increased the net income by 26 503.68 yuan·hm<sup>-2</sup>, and improved fertilizer use efficiency by 1-5 times and nutrient recovery efficiency 10.72-30.75 percentage points. The results also showed that substitution of 20% chemical N with organic fertilizer improved tomato biological yield 15.83%-31.65%. Nutrient Expert recommendation based on soil nutrients, yield response and fertilizer use efficiency improved yields, fertilizer use efficiency and profitability of tomato production.

**Key words:** Tomato; Yield response; Agronomic efficiency; Fertilizer recommendation; Nutrient taken; Fertilizer use efficiency

收稿日期:2021-07-20;修回日期:2021-11-06

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0200103);北京市农林科学院创新专项(KJCX20200403;KJCX20200203);唐山学院博创基金经费资助(1401903)

作者简介:山楠,女,讲师,主要从事农业碳氮循环与固体废弃物处理与资源化研究。E-mail:sn.47@163.com

通信作者:串丽敏,女,副研究员,主要从事农业栽培与农业经济研究。E-mail:xiaochuan200506@126.com

集约化农业生产模式能够有效为人类社会生存和发展提供充足的产品供应。近年来,随着人们对农产品需求的不断增长,设施蔬菜因其具有生长快、周期短和效益高等特点,规模迅速扩大,但是同时存在集约化程度高、化肥施用量大、肥料利用率不高、易带来环境污染风险等问题。番茄属茄科植物,含维生素 C、维生素 E、番茄红素、胡萝卜素、类黄酮等多种丰富的营养物质以及钾、磷和镁等元素,是主要设施蔬菜之一。据统计,2018 年全国设施番茄的种植面积达 2 041.5 万  $\text{hm}^2$ ,占全国番茄总种植面积的 57.2%<sup>[1]</sup>。有研究发现,氮、磷和钾养分的供应水平对番茄的产量和品质有决定性的影响<sup>[2-4]</sup>。另据调查显示,中国在番茄上的肥料投入高达 1 354.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,番茄生产存在盲目过量和不平衡施肥现象。不科学的施肥管理不仅会降低作物产量,还会降低肥料利用效率,影响农田土壤质量,甚至给全球生态环境造成一定的负面影响<sup>[5-7]</sup>。因此,减少肥料损失,提高养分利用效率,降低农业生产的环境污染风险,是番茄种植保产提效、实现农业可持续发展必须解决的重要问题。

提高科学施肥水平是解决这一问题的重要途径。依据土壤测试制定施肥方案,以及在作物生长过程中借助叶绿素仪、叶色卡、冠层反射仪等<sup>[8-10]</sup>即时无损诊断的施肥管理模式逐渐发展成熟,应用也较为广泛,同时也积累了大量的作物产量、施肥量、养分吸收、养分利用等多种农学数据。如何对现有成千上万个农学试验数据和各指标之间相互关系进行深入挖掘,研发更加便捷的施肥决策方法,则是一项更有价值的工作。养分专家系统(微信公众号)推荐施肥正是基于多年多点的农学试验数据库,建立作物产量反应与农学效率的关系,无需进行土壤测试,仅依据具体地块的种植信息,便可做出施肥决策的一种便捷系统,是更为方便、快捷、适合于大小不同田块应用的科学养分管理方法。养分专家系统推荐施肥认为作物施肥后的产量有两部分组成,一是来自土壤本身的基础养分供给,其余则来自施肥的贡献<sup>[11]</sup>。在推荐氮肥用量时,由于考虑到氮肥的环境风险,主要基于作物氮肥产量反应和氮肥农学效率之间的响应关系得出;在推荐磷肥和钾肥的用量时,除了作物产量反应所需的养分外,结合上一季作物秸秆还田所带入的养分和当季作物收获所移走的养分,从磷钾肥养分的平衡与可持续供应角度,对磷钾肥用量进行了适时调整。

近年来,养分专家系统推荐施肥方法主要应用

于小麦、玉米、水稻等粮食作物,在白菜、萝卜等蔬菜作物上也开展了初步研究<sup>[12-16]</sup>,但是在茄科类蔬菜尤其是番茄上的应用研究还不够深入。因此,笔者选取番茄为研究对象,通过布置田间试验,研究养分专家系统基于产量反应和农学效率推荐施肥方法在番茄上的应用效果,为番茄方便快捷进行施肥管理提供理论与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

2018 年 3—7 月在北京市大兴区礼贤镇设置大棚番茄田间试验。该地点位于北京市南郊,属暖温带半湿润大陆性季风气候,春、夏、秋、冬四季分明,2018 年降水量约 575.50 mm。番茄试验供试土壤类型为沙壤。试验开始前 0~20 cm 耕层土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基础理化性质

参数	pH	w(有机质)/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	w(碱解氮)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	w(有效磷)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	w(速效钾)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
数值	8.04	16.29	114.40	18.95	250.00

### 1.2 试验设计

番茄田间试验设置农民习惯施肥处理(FP)、基于养分专家系统的推荐施肥处理(OPT)、OPT 基础上有机肥替代 20%化肥氮处理(OPT+OM)以及与 OPT 处理对应的减氮(OPT-N)、减磷(OPT-P)和减钾处理(OPT-K)共 6 个处理。其中,OPT-N、OPT-P 和 OPT-K 3 个处理为对照处理,用于计算番茄施肥后的增产效果、农学效率和养分利用率指标。每个处理具体施肥量见表 2。小区面积分别为 22.5  $\text{m}^2$ ,每个处理 3 次重复,随机排列。化肥分别为尿素(N, 46%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$ , 12%)和硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$ , 50%)。

试验于 2018 年 3 月 5 日种植,于 7 月 16 日收获。供试番茄品种为迪安娜,为无限生长型粉果品

表 2 各处理施肥量

处理	化肥施用量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			有机肥 施用量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	总肥料施用量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		
	N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$		N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$
FP	471	151.5	623	0	471	151.5	623
OPT	390	166	410	0	390	166	410
OPT+OM	321	127	371	7900	390	166	410
OPT-N	0	166	410	0	0	166	410
OPT-P	390	0	410	0	390	0	410
OPT-K	390	166	0	0	390	166	0

种,抗黄化曲叶病毒、生长势强、果实硬度大、耐贮藏、连续坐果能力强。种植模式为起垄覆膜宽窄行种植,宽行行距 1.5 m,窄行行距为 80 cm,株距为 31 cm。灌溉条件为沟灌。按照当地常规田间管理方法进行统一管理。

### 1.3 养分指标测定

番茄分次收获,且每个小区单独测定番茄果实和番茄秧产量,记录各处理鲜样质量。收获后,每个小区取代表性番茄果实和番茄秧样品,于 105 °C 杀青 30 min,65 °C 烘干至恒质量称质量,用于计算番茄果实和番茄秧的含水量。将烘干样品粉碎后经过 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 方法消煮,采用凯氏定氮法、钼钒黄比色法和原子吸收分光光度计法测定番茄果实和番茄秧中的全氮、全磷和全钾含量。

番茄果实 N 累积量 = 果实 N 含量 × 果实干物质质量;

番茄秧 N 累积量 = 秧 N 含量 × 秧干物质质量;

番茄植株 N 累积量 = 番茄果实 N 累积量 + 番茄秧 N 累积量;

氮素回收利用率/% = (施氮处理植株氮累积量 - 不施氮处理植株氮累积量) / 施氮量 × 100;

氮素农学效率 = (施氮处理番茄果实产量 - 不施氮处理番茄果实产量) / 施氮量;

氮素偏生产力 = 施氮处理番茄果实产量 / 施氮量;

磷和钾养分利用效率指标计算同氮。

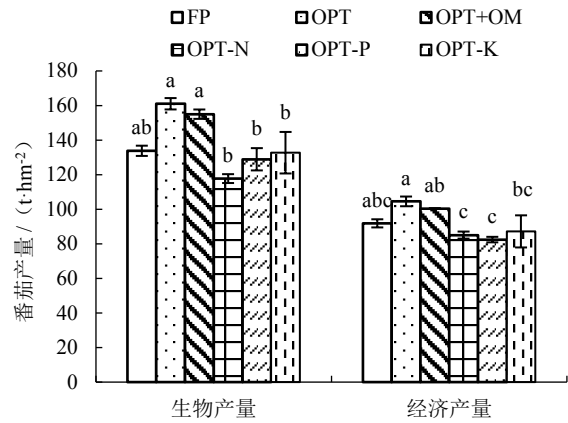
### 1.4 数据分析

试验数据采用 IBM SPSS 19.0 软件进行 One-way ANOVA 法单因素方差分析和 LSD 法多重比较,用 Microsoft Excel 2016 软件对试验数据进行处理和图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 番茄产量

由图 1 可以看出,在 6 个处理中,OPT 处理番茄产量和经济产量均最高,均显著高于 OPT-N、OPT-P、OPT-K 处理,而 OPT 与 FP、OPT+OM 三者之间番茄产量和经济产量差异均不显著。与 FP 处理相比,OPT 处理减少了 17.20% 的氮肥和 34.19% 的钾肥,增施了 9.57% 的磷肥,番茄生物产量提高了 27.21 t·hm<sup>-2</sup> (20.34%),经济产量提高了 12.70 t·hm<sup>-2</sup> (13.83%)。有机肥替代 20% 化肥 N 的 OPT+OM 处理与 OPT 处理相比,番茄生物产量和经济产量分别降低了 6.03 t·hm<sup>-2</sup> 和 4.14 t·hm<sup>-2</sup>,但较 FP 处理分



注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

图 1 不同施肥处理番茄产量

别增产 15.83% 和 9.32%。与对应的 OPT-N、OPT-P、OPT-K 处理相比,OPT 处理条件下番茄生物产量分别增加 43.29、32.11 和 28.31 t·hm<sup>-2</sup>,提高了 36.77%、24.91% 和 21.33%;经济产量分别增加了 19.49、22.10 和 17.36 t·hm<sup>-2</sup>,提高了 22.92%、26.81% 和 19.91%,氮、磷和钾肥增产效果显著。

### 2.2 养分累积量

由图 2 可以看出,番茄对钾元素有着较强的养分需求,FP、OPT 和 OPT+OM 处理的钾素累积量均在 300 kg·hm<sup>-2</sup> 以上。FP、OPT 和 OPT+OM 处理番茄地上部生物量的氮、磷和钾养分累积量均表现为 OPT > OPT+OM > FP。其中,OPT 处理的磷和钾养分累积量均显著高于 FP 处理,分别增加了 20.24 和 81.88 kg·hm<sup>-2</sup>,氮养分累积量则与 FP 处理无显著性差异。OPT+OM 处理的氮磷钾养分累积量均与 FP、OPT 处理未达显著差异水平。基于养分专家系统推荐施肥的番茄地上部生物量养分累积量整体

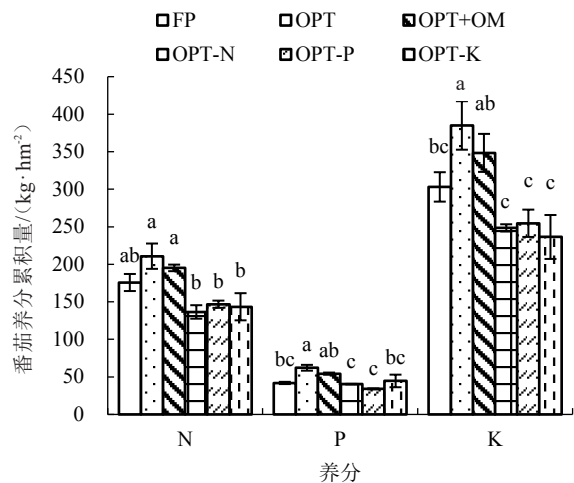


图 2 不同施肥处理番茄 N、P、K 养分累积量

高于当地农民习惯施肥。

### 2.3 肥料利用效率

2.3.1 肥料偏生产力 氮素是蔬菜生长必需养分。由表3可知,番茄种植中FP处理的氮肥偏生产力显著低于其他处理,OPT处理和OPT+OM处理的氮肥偏生产力与FP处理相比,分别显著增加了73.07、62.45 kg·kg<sup>-1</sup>,但OPT与OPT+OM处理间差异不显著。各处理间OPT处理磷肥偏生产力最高,较FP处理和OPT+OM处理分别提高23.58、24.95 kg·kg<sup>-1</sup>,3个处理间磷肥偏生产力无显著差异。试验中OPT和OPT+OM处理的钾肥偏生产力均显著高于FP处理,分别增加了107.57、97.46 kg·kg<sup>-1</sup>,OPT和OPT+OM处理之间无显著性差异。

表3 番茄肥料偏生产力比较 (kg·kg<sup>-1</sup>)

处理	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
FP	194.98±1.70 b	606.18±3.00 a	147.41±1.48 b
OPT	268.05±2.04 a	629.76±3.12 a	254.98±1.99 a
OPT+OM	257.43±0.56 a	604.81±0.86 a	244.87±0.55 a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。

2.3.2 肥料农学效率 由表4可知,OPT处理和OPT+OM处理的氮肥农学效率均显著高于FP处理,分别增加了35.57和24.95 kg·kg<sup>-1</sup>,而OPT和OPT+OM处理之间氮肥农学效率无显著差异。上述3个处理的磷肥和钾肥农学效率也表现为OPT>OPT+OM>FP。其中,OPT处理和OPT+OM处理磷肥农学效率与FP处理相比,显著增加了71.11和46.16 kg·kg<sup>-1</sup>,钾肥农学效率较FP处理分别显著增加34.87和24.76 kg·kg<sup>-1</sup>,但OPT处理与OPT+OM处理间磷肥和钾肥农学效率均无显著差异。

表4 番茄肥料农学效率比较 (kg·kg<sup>-1</sup>)

处理	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
FP	14.41±1.70 b	62.04±3.00 b	7.47±1.48 b
OPT	49.98±2.04 a	133.15±3.12 a	42.34±1.99 a
OPT+OM	39.36±0.56 a	108.20±0.86 a	32.23±0.55 a

2.3.3 养分回收率 由表5可以看出,番茄OPT处理的氮、磷和钾肥回收利用率在3个处理中均为最高。其中,OPT处理氮肥回收利用率较FP处理和OPT+OM处理分别提高了10.72个百分点和4.00个百分点,OPT+OM处理较FP处理提高了6.72个百分点,且OPT处理与FP处理之间达显著差异水平。OPT处理和OPT+OM处理的磷肥回收利用率均显著高于FP处理,分别高出26.89个百分

点和16.08个百分点,但OPT处理和OPT+OM处理之间差异不显著。番茄FP处理钾肥回收利用率最低,为12.90%;OPT处理的钾肥回收利用率显著高于FP处理,提高了30.75个百分点;OPT处理高于OPT+OM处理10.74个百分点,但二者间差异不显著;OPT+OM处理较FP处理相比,钾肥回收利用率提高了20.01个百分点,但二者之间差异不显著。

表5 番茄养分回收率比较 %

处理	N	P	K
FP	8.33±1.18 b	11.92±1.13 b	12.90±1.48 b
OPT	19.05±1.58 a	38.81±1.76 a	43.65±2.34 a
OPT+OM	15.05±0.61 ab	28.00±1.07 a	32.91±2.07 ab

### 2.4 纯收益

纯收益是基于番茄的收益减去化肥投入的成本得出。由表6可以看出,OPT处理可增加番茄纯收益,较FP处理和OPT+OM处理分别增加26 503.68元·hm<sup>-2</sup>和11 072.33元·hm<sup>-2</sup>,分别提高了14.76%和5.68%,且OPT和FP处理之间的纯收益呈显著性差异。OPT+OM处理番茄纯收益较FP处理增加了15 431.35元·hm<sup>-2</sup>,提高了8.59%。由于有机肥的投入增加了OPT+OM处理的成本投入,使得OPT+OM处理番茄产投比较低,有机肥替代化肥氮的效益和机制有待进一步研究。

表6 不同处理对番茄纯效益的影响

处理	肥料投入/(元·hm <sup>2</sup> )	纯收益/(元·hm <sup>2</sup> )	产投比
FP	4 127.50	179 544.80±4 716.22 b	43.50±0.81 b
OPT	3 033.00	206 048.48±5 611.06 a	67.94±1.03 a
OPT+OM	5 820.00	194 976.15±428.49 a	33.50±0.21 c

注:番茄价格为2.00元·kg<sup>-1</sup>,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O价格分别为5.22、12.50、8.00元·kg<sup>-1</sup>,有机肥价格为600.00元·t<sup>-1</sup>。

## 3 讨论

### 3.1 不同施肥管理对番茄产量和收益的影响

蔬菜的生长发育受施肥方法、管理措施、土壤状况和生长环境等多种因素影响。其中,肥料的养分投入比例是重要的影响因素之一。过量的肥料养分施用不仅不会提高蔬菜产量,还会降低肥效,增加投入成本。番茄试验中,OPT处理在降低了氮和钾肥用量的同时,经济产量和纯收益与FP处理相比分别提高了13.83%和14.76%,且二者纯收益达到差异显著水平,表明基于产量反应和农学效率的养分专家推荐施肥方法可以提高番茄经济产量,显著增加作物收益<sup>[7]</sup>。化肥N以20%有机肥替代的OPT+OM处理,经济产量较FP处理增产9.32%,纯收益显著提高了8.59%。OPT处理与

OPT+OM 处理番茄经济产量差异不显著,原因可能是在养分专家推荐施肥条件下,肥料养分投入量能够满足番茄生长需要,并且可能是速效化肥氮的养分供应有利于提高当季番茄产量<sup>[18-20]</sup>。OPT+OM 处理的番茄产投比显著低于 OPT 处理和 FP 处理,这是因为有机肥的成本较高,且投入量偏大,导致 OPT+OM 处理的效益偏低。虽然近年来国家提倡有机肥的田间施用,但是亟需建立并形成有机肥替代化肥的补偿机制,以此来提高农民实施有机肥替代化肥的积极性,从而促进农业种养业有效循环发展,有利于促进实现化肥的“零增长”,但有机肥替代化肥的合理比例仍需进一步研究。

### 3.2 不同施肥管理对番茄肥料利用率的影响

肥料养分不合理投入降低肥料利用率的同时,还会对环境带来污染风险<sup>[21-22]</sup>。在番茄试验期间,3个处理的氮肥、磷肥和钾肥的养分累积量和回收利用率均表现为 OPT>OPT+OM>FP,且 OPT 处理的氮肥、磷肥和钾肥回收利用率与 FP 处理呈显著性差异,表明基于产量反应和农学效率推荐施肥处理(OPT 处理和 OPT+OM 处理)可提高肥料利用率,与王丹丹等<sup>[23]</sup>在研究养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量、养分转运及肥料利用的影响结果相近。养分专家推荐施肥处理(OPT 处理和 OPT+OM 处理)下的番茄磷肥农学效率均高于氮肥,说明在番茄的生产过程中,调节磷肥适宜施用量对其增产效果有积极作用,与前人研究结果相似<sup>[24-25]</sup>。在北京郊区种植番茄过程中,与农民习惯施肥(FP)相比,基于产量反应和农学效率的推荐施肥(OPT 和 OPT+OM)有利于增加番茄产量和经济收益,在提高肥料回收利用率的同时,降低了肥料的损失,减小了由于过量施肥对生态环境的污染风险。

## 4 结 论

在本试验中,基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法,确定的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 施用量分别为 390、166、410 kg·hm<sup>-2</sup>。基于产量反应和农学效率的养分专家系统推荐施肥,减少了 17.20%和 34.19%的氮肥和钾肥用量,增加了 9.57%的磷肥用量,番茄经济产量显著提高了 13.83%,纯收益提高了 26 503.68 元·hm<sup>-2</sup>,并且提高了肥料的农学效率和养分回收率,促进了养分的高效利用,可作为北京郊区番茄种植过程中施肥用量的依据。有机肥替代 20%化肥的施肥方法在减少化肥投入、保障番茄产量的同时,提高了肥料养分回收利用率,有利于促

进养殖业废弃物资源化利用。本试验结果表明了基于产量反应和农学效率的养分专家推荐施肥方法在番茄上的应用具有可行性,该方法在番茄实际生产中结合了土壤肥力差异,从磷钾养分的平衡与可持续供应角度,合理调控了氮磷钾养分供应量,为促进实现化肥“零增长”目标和番茄生产的高产高效,提供了可选择的途径。

### 参考文献

- [1] 全国设施蔬菜种植面积和分布情况,搜狐长江蔬菜门户网站,2020.01.16,https://www.sohu.com/a/367200509\_158363.
- [2] AKHTAR M E, KHAN M Z, RASHID M T, et al. Effect of potash application on yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Pakistan Journal of Botany, 2010, 43(2): 1695-1702.
- [3] ALMESELMANI M, PANT R C, SINGH B. Potassium level and physiological response and fruit quality in hydroponically grown tomato [J]. International Journal of Vegetable Science, 2010, 16(1): 85-99.
- [4] BECKLES M D. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 63(1): 129-140.
- [5] JU X T, ZHANG C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: a review [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2848-2862.
- [6] 刘钦普. 中国化肥面源污染环境风险时空变化 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1247-1253.
- [7] 山楠, 赵同科, 杜连凤, 等. 华北平原中部夏玉米农田不同施氮水平氨挥发规律 [J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 32-40.
- [8] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 95-102.
- [9] 魏全全, 苟久兰, 张萌, 等. 氮素营养诊断技术的发展及其在冬油菜上的应用 [J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(2): 300-308.
- [10] DEBTANU M, DAS D K, TANMOY K, et al. Management of nitrogen through the use of leaf color chart (LCC) and soil plant analysis development (spad) or chlorophyll meter in rice under irrigated ecosystem [J]. The Scientific World Journal, 2004, 4: 838-846.
- [11] 何萍. 基于产量反应和农学效率的作物推荐施肥方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [12] 刘奕, 王寅, 李春林, 等. 吉林省中部一季稻区推荐施肥方法研究 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 273-278.
- [13] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1458-1467.
- [14] CHUAN L M, ZHENG H G, SUN S F, et al. A sustainable way of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for Chinese cabbage [J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4368-4384.
- [15] CHUAN L M, HE P, PAMPOLINO M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency [J]. Field Crop

- Research, 2013, 140: 1-8.
- [16] XU X P, HE P, YANG F Q, et al. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for rice in China[J]. Field Crop Research, 2017, 206: 33-42.
- [17] 山楠, 串丽敏, 刘继培, 等. 养分专家系统推荐施肥在萝卜上的应用效果[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3719-3728.
- [18] 张佳佳, 丁文成, 艾超, 等. 优化施肥对萝卜产量和肥料利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 187-199.
- [19] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 不同施肥方式对甘薯光合特性及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(1): 47-50.
- [20] 山楠, 串丽敏, 刘继培, 等. 基于产量反应和农学效率的白菜推荐施肥方法可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1681-1690.
- [21] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 68-75.
- [22] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 163-170.
- [23] 王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 等. 养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量、养分转运及肥料利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1692-1702.
- [24] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864-873.
- [25] 杜加银, 茹美, 倪吾钟, 等. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 523-533.