

有机无机配施对番茄产量和品质影响的 Meta 分析

姜玲玲^{1,2}, 刘 静², 赵同科^{2*}, 杜连凤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】随着有机肥部分替代化肥行动的推进与实施, 我国科研工作者在全国各地进行了大量的相关试验研究。本研究旨在整合已有的研究结果, 定量分析有机无机配施方式对番茄产量和品质的综合效应, 以期为我国可持续农业与循环农业的发展和政策制定提供参考。【方法】本研究数据来源于知网、Web of Science、Science Direct 和维普文献数据库, 以“番茄”和“产量”为主要关键词检索文献, 共筛选出符合 Meta 分析标准的文献 32 篇。提取文献中有机无机配施和单施化肥处理数据, 番茄产量、Vc、可溶性糖和硝酸盐含量的有效数据分别为 98、39、33 和 21 组。以单施用化肥为对照, 选择反应比作为效应值, 采用 Meta 分析方法, 主要整合分析有机无机配施方法对番茄产量和品质的影响, 并分类分析影响产量效应的因素, 包括时间和区域的变化、土壤有机质和 pH 值及田间管理实践。【结果】通过 Meta 分析处理的番茄产量和品质效应数据的失安全系数均大于 $5n+10$, 其结果可靠度高。除了番茄可溶性糖效应数据, 其他用于 Meta 分析的数据漏斗图均对称 ($P>0.05$), 不存在发表性偏倚。与单施化肥相比, 有机无机配施显著增加了番茄产量, 增产率为 7.1% (5.13%~9.07%); 显著增加了番茄 Vc 和可溶性糖含量, 增长率分别为 21.2% (10.3%~33.3%) 和 14.3% (3.7%~15.6%); 显著降低了番茄中硝酸盐含量 19.4% (27.9%~9.7%)。番茄产量效应的分类分析结果显示, 时间和区域因素对番茄产量效应影响显著, 且随着有机无机配施时间的推移, 有机无机配施番茄增产率呈增加趋势, 东北农区番茄增产效应不显著。土壤有机质与番茄增产率呈显著正相关关系 ($R^2=0.9288$), 土壤 pH 值与番茄增产率呈负相关关系 ($R^2=0.7230$)。田间管理实践对番茄产量效应分析结果表明, 设施栽培番茄增产率高于露地; 现代商品有机肥增产率高于传统有机肥; 各水平种植密度和无机肥施用量下, 番茄增产效应均显著。无机氮肥 (折合纯 N) 施用量控制在 200 kg/hm² 以内即可以得到较高的增产率 (10.7%)。【结论】与单施化肥相比, 有机无机配施能显著提高番茄产量, 改善番茄品质, 且有机无机配施施用的年限越长, 效果越明显, 设施栽培的效果好于露天。有机无机配施可以增加土壤有机质含量, 延缓土壤 pH 的下降, 这是体现有机无机配施效果的重要原因。有机肥商业化处理是提高有机肥效果的重要措施。

关键词: 有机无机配施; 番茄; 产量; 品质; Meta 分析

Meta-analysis of combinative application of organic and inorganic fertilizers on effect of yield and qualities of tomato

JIANG Ling-ling^{1,2}, LIU Jing², ZHAO Tong-ke^{2*}, DU Lian-feng²

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

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

Abstract: 【Objectives】 With the advancement and implementation of the action of organic fertilizers partial substitution of fertilizers, scientists have carried out a large number of relevant experiments in China. This study integrated the scattered results, quantitatively analyzed the comprehensive effect of combinative application of organic and inorganic fertilizers on the yield and quality of tomato, to provide references for the further development of the action in China. 【Methods】 The data were obtained from China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Web of Science, Science Direct and VIP literature database. Using keywords of

收稿日期: 2018-05-09 接受日期: 2018-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0801001) 资助。

联系方式: 姜玲玲 E-mail: jllhan@163.com; * 通信作者 赵同科 E-mail: tkzhao@126.com

“tomato” and “yield”, 32 papers that met the meta-analysis standard were selected. The data of combinative application of organic and inorganic fertilizers and single fertilizer treatment in the literature were extracted. The effective data of tomato yield, Vc, soluble sugar and nitrate content were 98, 39, 33 and 21 groups, respectively. Using single fertilizer treatment as control, the reaction ratio was selected as the effect value, and the Meta-analysis method was used to analyze the effects of combinative application of organic and inorganic fertilizers (COI) on tomato yield and qualities, and to analyze the factors affecting yield effect, including years and farmlands, soil organic and pH and field management practices. **【 Results 】** The fail-safe factors of tomato yield and quality effect data processed by meta-analysis was greater than $5n+10$ (n is the number of the sample), therefore, the result was highly reliable. Except for tomato soluble sugar concentration database, the funnel plots of other databases that used for meta-analysis were symmetric ($P>0.05$) and there was no publication bias. Compared with single chemical fertilizer controls, COI significantly increased tomato yield by 7.1% (5.13%–9.07%); significantly increased Vc and soluble sugar content by 21.2% (10.3%–33.3%) and 14.3% (3.7%–15.6%), respectively; significantly reduced the nitrate content by 19.4% (27.9%–9.7%). The results of classification analysis of yield showed that the year and farmland region had significant effects on tomato yield response, and the longer the COI conducted, the higher the yield increase rate in the tested areas, except in Northeast farmland, where the yield increase was not significant. Tomato yield increase was significantly and positive correlated with soil organic matter content ($R^2=0.9288$), but significantly and negatively correlated with soil pH value ($R^2=0.7230$). In regarding to field management practices, the yield increasing rate of tomato inside greenhouse was higher than open-field; modern commercial organic fertilizers produced higher yield than traditional organic fertilizer did. The tomato yield increase effect was significant at all levels of planting density and inorganic fertilizer application rate, and the higher yield (10.7%) was obtained by controlling the application rate of inorganic nitrogen fertilizer within $N\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$. **【 Conclusions 】** Compared with single-fertilizer, combinative application of organic and inorganic fertilizers can significantly improve tomato yield and improve tomato qualities, and the longer the application period of organic and inorganic application, the more obvious the effect, and the effect of greenhouse cultivation is better than in open field. Organic and inorganic application can increase the soil organic matter content and delay the decline of soil pH, which is an important reason for the combinative application of organic and inorganic fertilizers effect. Commercialized procession of organic materials is an effective way to improve the effect of organic fertilizer.

Key words: combinative application of organic and inorganic fertilizers; tomato; yield; quality; meta-analysis

2016 年我国蔬菜播种面积占总农业种植面积的 13.4%^[1], 蔬菜消费量达 1.38 亿吨, 蔬菜需求呈增加趋势^[2]。在需求量增加和经济利益的驱动下, 菜农为追求高产量, 过量施用化肥, 造成土壤和地下水污染及蔬菜风味和品质下降。随着生活水平的提高, 人们越来越关注蔬菜品质与食用安全等问题。番茄中含有丰富的营养价值, 是人们生活必需消费品, 番茄中的 Vc 是人体所需维生素 C 的优质来源。番茄可溶性糖含量可以影响番茄风味^[3]。番茄中过量的硝酸盐含量威胁到人体健康安全。有机无机配施与单施化肥相比, 番茄产量增加 7.3%~13.6%, 果实的 Vc、可溶性糖含量提高, 硝酸盐含量降低^[4]。赵明等^[5]研究表明, 有机无机配比为 3:2 时, 番茄产量比纯施用化肥增加 12.3%。王建忠等^[6]的研究结果表

明, 单施化肥处理番茄产量显著高于有机无机配施处理, 且番茄硝酸盐含量低于有机无机配施处理 (结果不显著), 与上面的研究结果不一致。另外, 这些各自独立的研究很难量化的体现有机无机配施方式对番茄产量和品质的综合效应。

Meta-analysis 方法是一种定量综合研究结果的统计方法, 能够将若干独立研究的统计结果进行综合分析^[7]。Meta 分析是对具有相同研究目的且相互独立的多个研究的结果进行定量合并, 分析研究差异特征, 综合评价研究结果的统计方法^[8]。赵爱琴等^[9]运用 Meta-analysis 方法定量分析地膜覆盖对马铃薯的产量效应。Xu 等^[10]运用 Meta-analysis 方法对我国玉米产量进行整合分析, 结果表明优化施肥处理的产量比农民传统施肥处理高 $700\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。李昊等^[11]

采用 Meta 分析方法定量分析覆盖地膜对棉花的增产效应。目前国内还没有对番茄产量和品质效应方面的 Meta 分析报道, 因此, 本研究使用 Meta 分析方法对结果不一致的番茄产量和品质效应进行定量综合分析。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于中国知网和维普中文文献数据库以及 Web of Science 和 Science Direct 外文文献数据库, 以“番茄”和“产量”为主要关键词进行文献检索。根据 Meta-analysis 方法中数据整合的要求和本研究的目的, 基于以下 5 个标准对检索文献进行筛选: 1) 研究区域位于中国范围内; 2) 同一研究中必须包含有机无机配施处理和单施化肥对照处理; 3) 文中须列出 2 种处理的产量或品质均值及标准差(或标准误), 或者列出 2 种处理每个重复的产量、品质数据(重复至少 2 次), 再或者有机无机配施处理和单施化肥处理分别至少有两个处理的产量数据; 4) 番茄品质指标数据需要有均值、样本量和标准差(或者标准误), 单位统一为 Vc (mg/100 g)、可溶性糖含量(%) 和硝酸盐含量 (mg/kg); 5) 试验地点、耕作方式、有机肥种类、有机肥施用量、种植密度等基本信息要清晰。

基于以上标准, 共筛选出 32 篇文献^[4-6,12-40], 从中分别获得番茄产量、Vc、硝酸盐和可溶性糖含量数据 98、39、33 和 21 组。汇总数据的时间跨度为 2004—2017 年, 地理跨度包含了我国 16 个省市及自治区。

1.2 数据提取

在 Meta-analysis 分析方法中, 试验处理和对照处理的标准偏差及重复次数是非常重要的参数, 用来计算研究内方差, 从而反映各研究结果的重要程度, 并赋予各研究以权重。若原文献明确列出样本量、均值(产量和品质)及标准偏差, 则直接提取数据; 若文献中没有直接提供标准偏差, 但列出各处理的多个重复试验数据时, 则可以在 Excel 中通过函数计算得出均值和标准差; 若文献中既没有提供标准偏差也没有列出各重复的数据, 但文献中包含了多年试验数据或多个有机无机施肥处理时, 可将每年(每季)产量数据或者每个处理看作试验重复, 在 Excel 中进行标准偏差的计算和作图。另外, 若文献中只有以上数据的图表, 则使用 Engauge Digitizer 软件进行数据提取。

1.3 效应值计算

在 Excel 中分别建立番茄产量、品质指标的数据库, 将提取的数据分别保存。基于本论文研究的目的, 选择反应比^[41-42](response ratio) 作为效应量, 反应比计算公式:

$$R = \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}$$

其中, \bar{X}_1 是有机无机配施处理番茄产量的均值; \bar{X}_2 是单施化肥处理的番茄产量的均值。其对数反应比(log ratio of means) 为:

$$\ln(R) = \ln\left(\frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}\right) = \ln(\bar{X}_1) - \ln(\bar{X}_2)$$

对数反应比的方差计算公式:

$$v_{\ln(R)} = \frac{S_1^2}{n_1 \bar{X}_1} + \frac{S_2^2}{n_2 \bar{X}_2}$$

其中, S_1 和 S_2 分别表示有机无机配施处理和单施化肥对照的标准偏差; n_1 和 n_2 分别表示有机无机配施处理和单施化肥对照的样本数量。以上数据处理过程在 R 软件的 metafor 程序包中完成。

为了便于对结果的解释, 利用程序包中的 exp 函数将计算结果转化为 R (反应比), 再根据下面公式计算增长率 Z (或者负增长率):

$$Z = (R - 1) \times 100\%$$

依据转化数据结果进行分析和讨论。

1.4 模型选择

同一研究中不同施肥模式会对番茄的产量及品质产生一定差异, 同时, 不同研究间的田间管理实践、土壤质地、气候条件、种植年份、番茄品种、肥料种类等因素的差异, 研究之间存在很大的变异, 因此选择随机效应模型进行计算综合效应值。随机效应模型不仅考虑了研究内的变异, 而且也考虑了研究间的变异。

1.5 数据分析

如果效应值的 95% 置信区间不包含 0, 则说明有机无机配施与单施化肥之间的总体效应具有统计显著性。如果效应值的 95% 置信区间包含 0, 则说明有机无机配施对番茄产量和品质的效应不显著。

漏斗图可以直观的评估整个数据库中显著结果的发表偏倚, 其广泛地应用于 Meta-analysis 的发表性偏倚检验^[11,43]。如果不存在发表性偏倚, 漏斗图类似于倒置的对称漏斗; 如果存在发表性偏倚, 则漏斗图将呈现出不对称的漏斗^[44]。Rosenthal's 失安全系数 (fail-safe number, Nfs) 可以用来检验整个数据

库的发表性偏倚, 如果 $Nfs > 5n + 10$, 其中 n 是样本量, 则认为结果是可信的^[45]。

2 结果与分析

2.1 番茄产量和品质的综合效应和发表偏倚性检验

采用随机效应模型对番茄产量和品质的平均效应值进行计算, 由图 1 可以看出, 与单施化肥相比, 有机无机配施番茄产量和品质的综合效应值的 95% 置信区间均不包含 0, 所以综合效应均显著。番茄产量的 $\ln(R)$ 计算结果为 0.0684(0.05~0.0868), 有机无机配施显著增加了番茄产量 ($Q_i = 4982.83, df = 97, P < 0.0001$); 通过增(负)长率公式转换, 得到番茄产量的增产率为 7.1% (5.13%~9.07%)。番茄果实 Vc 含量的 $\ln(R)$ 计算结果为 0.1925(0.0976~0.2874), 说明有机无机配施显著增加了番茄果实的 Vc 含量 ($Q_i = 7990.4627, df = 38, P < 0.0001$), 增加率为 21.2% (10.25%~33.3%)。番茄果实可溶性糖含量的 $\ln(R)$ 计算结果为 0.1339 (0.0366~0.2311), 说明有机无机配施显著增加了番茄果实的可溶性糖含量 ($Q_i = 270.8213, df = 20, P < 0.0001$), 增加率为 14.3% (3.73%~26%)。番茄果实硝酸盐含量的 $\ln(R)$ 计算结果为 -0.215 (-0.3276~-0.1025), 说明有机无机配施显著降低了番茄果实的硝酸盐含量 ($Q_i = 8984.1225, df = 32, P < 0.0001$), 降低率为 19.4% (9.74%~17.93%)。

番茄产量、Vc、硝酸盐和可溶性糖含量效应的漏斗图对称性检验结果 P 值分别为 0.3395、0.0949、0.2604 和 0.0008, 其中番茄产量、Vc、硝酸盐含量的 $P > 0.05$, 说明漏斗图对称, 不存在发表性偏倚;

番茄可溶性糖含量的 $P < 0.05$, 漏斗图不对称。通过失安全系数 (Nfs) 计算可知, Nfs 值分别为 33870、5133、32743 和 253, 均大于 $5n + 10$ (n 表示样本量), 说明平均效应值结果可靠。

2.2 番茄产量的时间和区域效应

将番茄产量的 98 组数据按照年份和我国农田区域^[46]分类, 分别分析随着时间和农田区域的变化, 有机无机配施对番茄产量效应的影响 (图 2)。年份对番茄产量效应的统计结果表明时间对番茄产量效应影响显著 ($Q_M = 33.7275, df = 10, P = 0.0002$)。由图 2a 可以看出, 2007、2010、2011、2013 和 2016 年的综合效应值均大于 0, 但 95% 置信区间包括 0, 表明这五个年份对番茄产量是正效应, 但增产效应不显著;

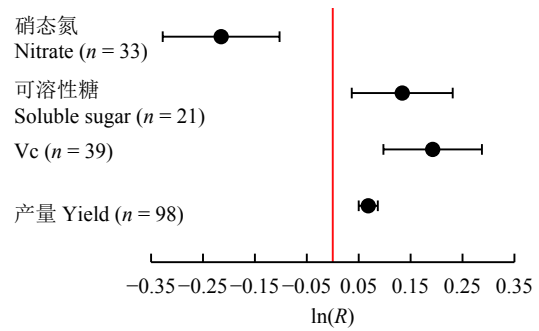


图 1 番茄产量和品质综合效应图

Fig. 1 Comprehensive effect of tomato yield and qualities

[注 (Note): 红线表示 $\ln(R) = 0$, 若效应值的 95% 置信区间不包含 0, 则表示效应显著; 若效应值的 95% 置信区间包含 0, 则表示效应不显著 The red line indicates $\ln(R) = 0$. If the 95% confidence interval of the effect value does not contain 0, the effect is significant; if the 95% confidence interval of the effect value contains 0, the effect is not significant.]

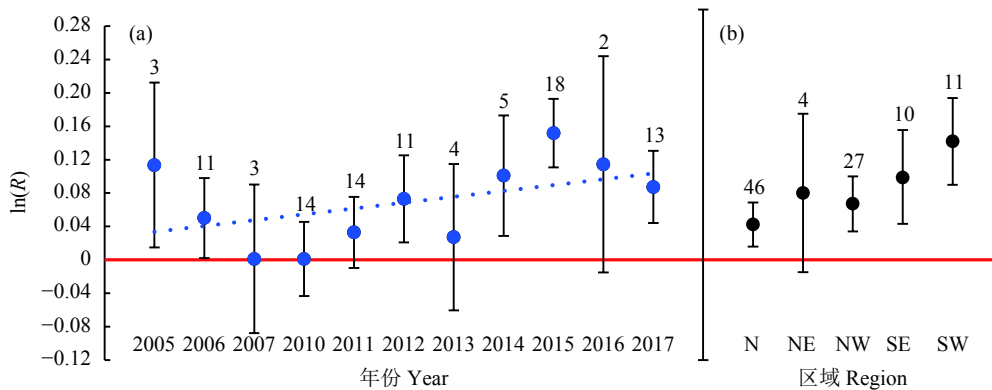


图 2 番茄产量年份和区域效应分析

Fig. 2 Tomato yield response to different years and regions

[注 (Note): 红线表示效应值 $\ln(R) = 0$, 蓝色虚线表示趋势线, 线上数字为样本量 The red line indicates the effect value $\ln(R) = 0$, the blue dotted line indicates the trend line, and the digitals above error lines were the sample number; N—华北农田区 North China farmland area; NE—东北农田区 Northeast farmland area; NW—西北农田区 Northwest farmland area; SE—东南农田区 Southeast farmland area; SW—西南农田区 Southwest farmland area.]

蓝色趋势线说明随着时间的变化, 有机无机配施对番茄的增产效应呈增加趋势。

农田区域对番茄产量效应的影响显著 ($Q_M = 12.6296$, $df = 4$, $P = 0.0132$)。从图 2b 中可以看出, 东北农田区番茄产量效应值综合效应值大于 0 (正效应), 但 95% 置信区间包含 0, 其增产效应不显著; 其他农田区域番茄产量效应值的 95% 置信区间均不包括 0, 说明在华北、西北、东南和西南农田区, 有机无机配施对番茄增产效应显著, 且西南农田区番茄产量效应值最高, 增产率达到 15.3% (9.4%~21.4%)。

2.3 土壤有机质和 pH 对番茄产量效应分析

土壤有机质和 pH 是影响作物产量的重要因素。以土壤有机质为解释变量共收集 72 组数据, 根据土壤有机质含量划分为三个水平 (图 3), 效应值计算结果表明当土壤有机质小于 10 g/kg 时, 有机无机配施对番茄的增产效应不显著, 但综合效应值为正效应; 当土壤有机质大于 10 g/kg 时, 番茄增产效应显著。随着土壤有机质含量的增加, 番茄增产效应呈上升趋势, 且增产率逐渐增加。

以土壤 pH 值为解释变量共收集数据 77 组, 将土壤 pH 值划分为四个水平。由效应值计算结果 (图 3) 可以看出, 随着土壤 pH 值的升高, 番茄增产效应呈降低趋势, 增产率逐渐减低。在 $pH < 6$ 的土壤上进行有机无机配施, 番茄的增产率 (10.7%) 最高, 因此有机肥的施入对酸性土壤上番茄的增产效应更敏感。因此, 有机无机配施是改善目前土壤酸化问题的有效措施。

2.4 田间管理实践对番茄产量效应的影响

对种植方式和有机肥种类因素进行分类分析, 种植方式分为设施和露地种植两类 (图 4)。统计结果表明, 设施和露地对番茄的增产效应影响不显著 ($Q_M = 0.0376$, $df = 1$, $P = 0.8462$)。因此可以说明, 这两种种植方式对产量效应的 95% 置信区间都不包含 0, 与单施化肥相比, 有机无机配施方法在设施和露地栽培方式下均能显著提高番茄产量, 且设施番茄增产率 (7.2%) 高于露地 (6.8%)。

将有机肥分为传统有机肥 (TO) 和现代商品有机肥 (MO) 两类。其统计结果表明, 传统有机肥和现代商品有机肥对番茄的增产效应影响不显著 ($Q_M = 0.0306$, $df = 1$, $P = 0.8612$), 且现代商品有机肥的增产率 (7.3%) 大于传统有机肥 (6.9%)。

在粮食作物中增密是提高作物产量的重要措施之一, 因此本研究在番茄产量数据库中以种植密度为

解释变量汇总 54 组数据, 分为 \leq 和 > 40000 plant/hm² 两个水平。统计结果表明, 种植密度的综合效应值及其两个水平的番茄的增产效应均达到显著水平, 种植密度高低不影响有机无机配施对番茄的增产效应。

有机无机配施处理中无机氮肥的施用量分为三个水平。在无机氮肥 (折合纯 N) 施用量 < 200 kg/hm² 时, 番茄产量效应值最高, 番茄增产率为 10.7% (14.3%~7.2%), 其他两个水平均低于综合效应值, 该结果也进一步说明无机肥施用量, 其增产效率降低。

3 讨论

与单施化肥相比, 有机无机配施对我国番茄产量和品质的综合效应显著, 番茄产量、Vc 含量和可溶性糖含量分别增加了 7.1%、21.2% 和 14.3%, 硝酸盐含量降低了 19.4% (图 1), 因此有机无机配施可以提高番茄产量, 改善品质。吴彤冬等^[47]研究结果表明, 有机无机配施与单施化肥相比番茄产量和 Vc 含量的增加不显著。这也说明单个研究受区域气候条件、时间、土壤质地、施肥种类、施肥量、田间管理措施等因素的影响较大, 不能反映区域或者国家尺度的综合情况, 所以本研究采用 Meta 分析方法将我国番茄的有机无机配施独立试验结果进行整合, 定量综合评价有机无机配施的效果, 为今后的相关研究提供参考, 这也是本研究的意义所在。

时间和农田区域因素对番茄产量效应影响显著 ($P < 0.05$)。随着时间的推移, 有机无机配施对番茄的增产效应呈增加趋势 (图 2a), 这可能是由于对有机无机配施研究的不断深入和优化, 有机肥无机配施比例的不断调整, 以及新型有机肥料的研发等工作的推进, 使得番茄的增产效应不断提高。农田区域上, 东北农田区的番茄增产效应不显著 (图 2b), 一方面可能与样本量太少有关; 另外一方面可能是由于东北地区耕层土壤有机质和养分含量背景值较高, 且中高产区占东北区域总耕地面积的 88%^[48], 因此, 有机无机配施对番茄的增产效应不显著。

土壤有机质含量是表征土壤肥力的重要参数之一, 且与作物产量呈正相关关系^[49]。本研究结果显示, 土壤有机质含量与番茄增产率呈正相关关系 ($R^2 = 0.9288$)。当土壤有机质小于 10 g/kg 时, 有机无机配施对番茄的增产效应不显著 (图 3), 可能是由于有机肥料中有效养分释放有滞后效应^[50], 加之蔬菜生长期短, 因此当季施入的有机肥还没有完全发挥作用, 导致在土壤低有机质情况下的番茄增产效应不显著。

土壤 pH 是调节自然环境中微生物群落结构和物

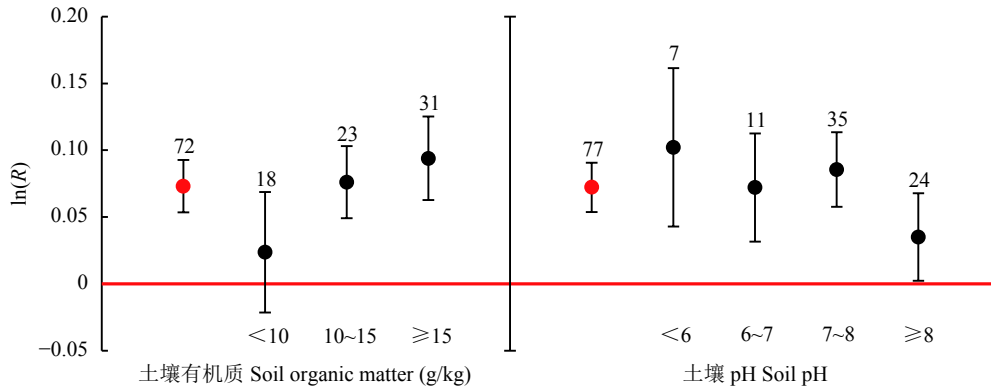


图3 土壤有机质和 pH 对番茄产量效应分析

Fig. 3 Effect of soil organic and pH on tomato yield response

[注 (Note) : 红线表示效应值 $\ln(R) = 0$ The red line indicates the effect value $\ln(R) = 0$; 误差线上方数字为样本数 Digital above the error lines are sample number; 红点代表有机质或 pH 综合效应值 The red pot represents the general effect of organic matter or pH.]

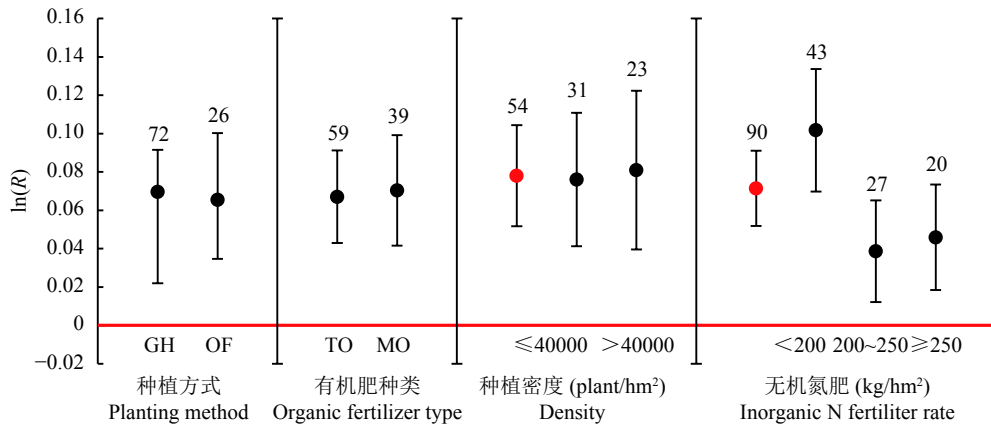


图4 田间管理实践对番茄产量效应分析

Fig. 4 Effect of field management practices on tomato yield response

[注 (Note) : 红线表示效应值 $\ln(R) = 0$ The red line indicates the effect value $\ln(R) = 0$; 误差线上方数字为样本数 Digital above the error lines were sample number; 红点代表种植密度或无机肥施用量综合效应值 The red pot represent the general effect of plant density or inorganic fertilizers rate. GH—设施种植 Greenhouse; OF—露地种植 Open-field; TO—传统有机肥 Traditional organic fertilizer; MO—现代商品有机肥 Modern commodity organic fertilizer.]

质间化学转化过程的关键因素之一^[51]。本研究结果表明土壤 pH 值与番茄增产率呈负相关关系 ($R^2 = 0.723$); 当土壤 pH 值 > 8 时产量效应值最低, 且低于综合效应值 (图 3)。适量有机肥的施用可以提高酸性土壤的 pH 值, 增加氨氧化细菌 (AOB) 数量^[52-53], 有效调控氨的硝化反应, 促进氮的转化和利用^[54], 因此有机无机配施在酸性土壤上增产率高; 在较高的 pH 值情况下, 氮素之间的化学动态平衡 $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ 趋于向 NH_3 方向移动^[55-56], NH_3 挥发损失的氮素可能是引起增产率不高的原因。

栽培方式和有机肥种类因素对番茄产量效应均不显著 ($P > 0.05$)。但将变量分类分析之后发现, 设施栽培下番茄增产率大于露地; 现代商品有机肥增产率大于传统有机肥。设施栽培方式人为的创造出

适宜蔬菜生长的气象环境, 更利于番茄的生长, 有研究报道设施番茄产量是露地番茄产量的 1.45 倍^[57]。现代商品有机肥是将固体有机废弃物经过微生物高温发酵后的产物, 还可以添加某种特定功能微生物菌剂 (拮抗微生物、解磷微生物、低温促生微生物等) 的新型商品有机肥, 其养分含量和功能优于传统有机肥^[58]。

种植密度高低不影响有机无机配施对番茄的增产效应, 均达到显著水平。无机氮肥的施用量的三个水平的增产效应也达到显著水平, 但从图 4 可以看出无机氮肥施用量在低于 200 kg/hm^2 时增产率最大 (10.7%), 远高于另外两个水平, 因此无机氮肥施用量控制在 200 kg/hm^2 以内即可得到较高的增产率, 或者适当的增加有机肥替代率来降低无机肥的投入。

有机肥与无机肥配比的不同会对作物产量有一定影响, 欧杨虹等^[59]的研究结果表明, 与单施化肥相比, 配施比例为 1:1 时水稻产量显著降低, 而配施比例为 1:3 时水稻产量略高, 但没有达到显著水平。有研究得出有机无机配施比例为 3:2 时, 番茄产量和品质最佳^[5]。还有有研究表明有机无机配施比例为 1:1 时, 番茄产量较高和品质较好^[60]。鉴于目前数据的局限性, 对于配施比例没有进行具体分析。

虽然关于番茄产量和品质的文献不少, 但由于 Meta 分析的文献筛选标准严格, 文献中必须包含实验组与对照组的样本量、平均值及标准差数据, 因此可用来进行 Meta 分析的文献数量非常有限。另外, 其他番茄品质指标因数据太少没有纳入本研究, 比如糖酸比、有机酸、还原糖和可溶性固形物等。Meta 分析中纳入的研究越多, 则平均效应值 95% 的置信区间范围越小, 从而减低数据的发表性偏倚^[45]。

各研究的样本量对效应值的计算有一定影响, 标准差与样本量的倒数成正比, 即样本量越小, 标准差越大^[45]。番茄可溶性糖漏斗图不对称, 效应值随着样本量的增加而增加。导致漏斗图不对称的原因有机会、样本量、效应值的选择、异质性、测量精度等, 但不一定是发表偏倚性的影响^[61-62]。在其他研究中也出现类似结果, 但这并不影响结论的有效性^[63-64]。

随着我国蔬菜种植模式集约化程度的提高, 有机无机配施对保障农业的可持续发展意义越来越重大。蔬菜种植中过量施用无机肥导致菜地土壤酸化^[44]、次生盐渍化^[65-66]、板结、菜田地下水硝酸盐超标率近 50%^[67]等。有机无机配施的施肥方式不仅可以提高氮肥利用率^[68-69]、土壤肥力^[70], 同时减少氨挥发^[71]、土体 NO_3^- -N 累积^[72]和氮淋溶损失^[73-74]。综上所述, 有机无机配施保证了番茄的高产和优质, 降低过量化肥施用对环境的负效应, 是农业可持续发展的重要保障措施之一。

4 结论

1) 采用 Meta 分析处理的数据结果可靠度高, 失安全系数均大于 $5n + 10$ 。除了番茄可溶性糖含量数据, 其他用于 Meta 分析的数据的漏斗图对称性检验结果 $P > 0.05$, 不存在发表性偏倚。

2) 与单施化肥相比, 有机无机配施可以显著增加番茄产量, 且增产率为 7.1% (5.1%~9.1%); 时间和区域因素对番茄产量效应影响显著, 且随着时间的推移, 有机无机配施对番茄的增产效应呈增加趋

势; 除了东北农田区, 其他农田区域番茄增产效应显著。

3) 与单施化肥相比, 有机无机配施处理可以显著改善番茄品质, 其中番茄 Vc 和可溶性糖含量增长率分别为 21.2%(10.3%~33.3%) 和 14.3%(3.7%~15.6%); 番茄硝酸盐含量降低了 19.4% (27.9%~9.7%)。

4) 土壤有机质含量与番茄增产率呈正相关关系 ($R^2 = 0.9288$); 土壤 pH 值与番茄增产率呈负相关关系 ($R^2 = 0.7230$), 且有机无机配施在 pH < 6 的土壤上增产率 (10.8%) 最高。

5) 在田间管理措施上, 不同栽培方式和有机肥种类的有机无机配施处理的番茄均能达到显著增产的效果, 且两因素对番茄增产效应影响不显著; 设施栽培番茄增产率高于露地; 现代商品有机肥增产率高于传统有机肥。种植密度和无机肥施用量的各水平的番茄增产效应显著, 无机氮肥施用量控制在 200 kg/hm² 以内即可以得到较高的增产率 (10.7%)。

致谢: 感谢中国科学院生态环境研究中心的张霜副研究员对本研究数据处理和数据解析的指导。

参 考 文 献:

- [1] 国家统计局. 中国农村统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2017. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China rural statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2017. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[J]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [3] 霍建勇, 刘静, 冯辉, 王玉刚. 番茄果实风味品质研究进展[J]. 中国蔬菜, 2005, 1(2): 34-36. Huo J Y, Liu J, Feng H, Wang Y G. Research Progress of Tomato Fruit Flavor Quality[J]. China Vegetables, 2005, 1(2): 34-36.
- [4] 韩晓玲, 张乃文, 贾敬芬. 生物有机无机复混肥对番茄产量、品质及土壤的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2005, (3): 51-53. Han X L, Zhang N W, Jia J F. Effects of biological organic-inorganic compound fertilizer on yield, quality of tomato and soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2005, (3): 51-53.
- [5] 赵明, 蔡葵, 孙永红, 等. 不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1072-1078. Zhao M, Cai K, Sun Y H, et al. Influence of organic and chemical fertilizers on tomato yield, quality, and the content of available heavy metals in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(6): 1072-1078.
- [6] 王建忠. 平菇菌糠生物有机肥在保护地番茄上的应用效果[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(9): 1762-1765. Wang J Z. Application effect of bio-organic fertilizer made by pleurotus ostreatus residue on tomato in protected field[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(9): 1762-1765.
- [7] Bender D J, Contreras T A, Fahrig L. Habitat loss and population

- decline: A meta-analysis of the patch size effect[J]. *Ecology*, 1998, 79 (2): 517-533.
- [8] Ellenberg S S. Meta-analysis: the quantitative approach to research review[J]. *Seminars in Oncology*, 1988, 15(5): 472.
- [9] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于Meta-analysis的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 1-7.
Zhao A Q, Wei X J, Zhu M. Meta-analysis on impact of plastic film on potato yield in China[J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 1-7.
- [10] Xu X P, Liu X Y, He P, *et al.* Yield gap, indigenous nutrient supply and nutrient use efficiency for maize in China[J]. *Plos One*, 2015, 10(10): e0140767.
- [11] 李昊, 李世平, 南灵, 等. 中国棉花地膜覆盖产量效应的Meta分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 228-235.
Li H, Li S P, Nan L, *et al.* Meta-analysis of effect of plastic film mulching on cotton yield in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 228-235.
- [12] 岳凤丽. “生物有机肥”在番茄上的肥效试验报告[J]. *河南农业*, 2014, (5): 20-20.
Yue F L. Fertilization test report of "bio-organic fertilizer" on tomato[J]. *Henan Agriculture*, 2014, (5): 20-20.
- [13] 肖元, 陈雅欢. 金霸王有机肥在番茄上的肥效试验[J]. *农村科技*, 2015, (6): 29-30.
Xiao Y, Chen Y H. Fertilizer effect test of Jinbashi organic fertilizer on tomato[J]. *Rural Science & Technology*, 2015, (6): 29-30.
- [14] 胡瑞民, 李广成, 杨进平, 等. 露地番茄腐植酸肥不同用量试验研究[J]. *宁夏农林科技*, 2011, 52(12): 41-41.
Hu R M, Li G C, Yang J P, *et al.* Experimental study on different dosages of humic acid fertilizer in open field's tomato[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2011, 52(12): 41-41.
- [15] 刘立杰, 崔强, 高玉丽, 等. 施用沼肥对番茄生产的影响研究[J]. *农业科技通讯*, 2015, (1): 74-75.
Liu L J, Cui Q, Gao Y L, *et al.* Study on the effect of applying biogas fertilizer on tomato production[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015, (1): 74-75.
- [16] 赵伟伟, 黎兰献, 程鹏飞, 等. 夏秋设施土壤栽培番茄配方施肥技术研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, (17): 4454-4456.
Zhao W W, Li L X, Cheng P F, *et al.* Studies on soil testing and formulated fertilization for tomato facility soil cultivation in summer-autumn[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, (17): 4454-4456.
- [17] 李松龄. 有机-无机肥料配施对番茄产量及品质的影响[J]. *北方园艺*, 2066, (3): 3-4.
Li S L. Effects of Combined application of organic-inorganic fertilizers on yield and quality of tomato[J]. *Northern Horticulture*, 2066, (3): 3-4.
- [18] 周博, 袁秀平, 雷琼. 有机肥对新建日光温室番茄产量及土壤养分质量分数的影响[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(6): 155-161.
Zhou B, Yuan X P, Lei Q. Effect of organic manure on tomatoes yield and soil nutrient in new sunlight greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(6): 155-161.
- [19] 岳学文, 潘志贤, 李建查, 等. 有机肥添加对反季番茄地上生物量分配的影响[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(7): 6-9.
Yue X W, Pan Z X, Li J C, *et al.* Effects of different organic fertilizer on aboveground biomass allocation of tomato in the off-season[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37(7): 6-9.
- [20] 周黎明, 毛永强, 唐慧. 有机无机复合(混)肥在加工番茄上的应用[J]. *农村科技*, 2006, (8): 26-26.
Zhou L M, Mao Y Q, Tang H. Application of organic-inorganic composite (mixed) fertilizer in processing tomato[J]. *Rural Science & Technology*, 2006, (8): 26-26.
- [21] 宫国辉, 孙凯, 姜淑兰, 等. 沼肥与化肥配施对辣椒和番茄生长发育及品质的影响[J]. *东北农业科学*, 2017, (2): 34-38.
Gong G H, Sun K, Jiang S L, *et al.* Effect of combinatory application of biogas manure and chemical fertilizer on the growth and development of pepper and tomato[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2017, (2): 34-38.
- [22] 高慧, 葛晓光. 不同肥料配施对设施番茄干物质分配及产量品质的影响[J]. *北方园艺*, 2005, (1): 38-40.
Gao H, Ge X G. Effects of different fertilizers on dry matter distribution, yield and quality of tomato in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2005, (1): 38-40.
- [23] 郭全忠, 常权记, 黄长虹, 等. 发酵猪粪对设施番茄产量、品质和土壤质量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2011, 39(5): 196-198.
Guo Q Z, Chang Q J, Huang C H, *et al.* Effect of fermented pig manure on yield, quality and soil quality of tomato in greenhouse[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(5): 196-198.
- [24] 沙海宁, 孙权, 周明, 等. 不同物料及配比对设施土壤与番茄产量、品质的影响[J]. *长江蔬菜*, 2010, (16): 54-58.
Sha H N, Sun Q, Zhou M, *et al.* Effects of different materials and their mixtures on growth and yield of tomato and soil in greenhouse[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2010, (16): 54-58.
- [25] 迟燕平. 设施番茄有机肥施用效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2004.
Chi Y P. The effect of manure on greenhouse tomato[D]. Changchun: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2004.
- [26] 李大伟. 生物炭基肥对番茄和辣椒产量、品质和氮素农学利用率的影响[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2015.
Li D W. Effect of biochar fertilizer on the yield, fruit quality and agronomic N use efficiency of tomato and pepper[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2015.
- [27] 王丽英, 张彦才, 赵梅素, 等. 以氮磷推荐有机肥对温室番茄干物质、产量和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2013, 28(3): 121-126.
Wang L Y, Zhang Y C, Zhao M S, *et al.* Effect of manure recommendation based N or P on dry matter yield and fruit quality of greenhouse tomato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(3): 121-126.
- [28] 席天元, 刘庆华, 雷逢进, 等. 有机肥液态施入对番茄产量和品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2014, 42(7): 697-700.
Xi T Y, Liu Q H, Lei F J, *et al.* Impact of organic fertilizer drip fertigation to tomato yield and quality[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(7): 697-700.
- [29] 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): 547.
Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of tomato and soil nitrate leaching loss under greenhouse condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 547.
- [30] 李瑞霞, 陈巍, 蔡枫, 等. 贵州木霉NJAU4742生物有机肥对番茄种植的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(3): 464-472.
Li R X, Chen W, Cai F, *et al.* Effects of *Trichoderma*-enriched

- biofertilizer on tomato plant growth and fruit quality[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(3): 464–472.
- [31] 万群, 阳淑, 熊丙全. 有机肥和化肥不同配比对番茄产量、品质及土壤养分和微生物的影响[J]. *安徽农业科学*, 2015, 14(14): 158–161.
- Wan Q, Yang S, Xiong B Q. Effects of different ratio of organic fertilizer and chemical fertilizer on tomato yield, quality and soil nutrient and microorganism[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 14(14): 158–161.
- [32] 李吉进, 邹国元, 宋东涛, 等. 有机肥和化肥对番茄产量和品质的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1330–1332.
- Li J J, Zhou G Y, Song D T, *et al.* Influence of compost and chemical fertilizers on tomato yield and quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1330–1332.
- [33] 何翠, 刘晓宇, 侯伟娜, 等. 无机肥配施有机肥对黄淮地区越冬茬番茄产量和品质的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2013, 47(6): 677–682.
- He C, Liu X Y, Hou W N, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on the yield and quality of overwintering tomato in the Huang huai area in China[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2013, 47(6): 677–682.
- [34] 居立海, 徐广辉, 高风云, 等. 有机无机复混肥料在番茄上的使用效果研究[J]. *长江蔬菜*, 2013, (8): 48–50.
- Ju L H, Xu G H, Gao F Y, *et al.* Effects of applying organic-inorganic compound fertilizer on tomato[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2013, (8): 48–50.
- [35] 于跃, 郭宁, 闫实, 等. 不同用量有机肥对土壤性质及番茄生长的影响[J]. *中国农技推广*, 2015, 31(11): 36–38.
- Yu Y Y, Guo N, Yan S, *et al.* Effects of different applied organic fertilizers on soil properties and tomato growth[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2015, 31(11): 36–38.
- [36] 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): 2059–2058.
- Zhang E P, Tan F L, Wang Y, *et al.* Effects of npk fertilizers and organic manure on nutritional quality, yield of tomato and soil enzyme activities[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(10): 2059–2058.
- [37] 张财源, 张亚平, 肖艳, 等. 生物有机肥在番茄上的应用效果研究[J]. *中国果菜*, 2017, (12): 38–41.
- Zhang C Y, Zhang Y P, Xiao Y, *et al.* Study on the application effect of Bio-organic fertilizer on tomato[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2017, (12): 38–41.
- [38] Zhang Z Q, Wang X B, Li C H, *et al.* Effects of straw addition on increased greenhouse vegetable yield and reduced antibiotic residue in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(7): 1423–1433.
- [39] Rong Q L, Ruo-Nan L I, Huang S W, *et al.* Soil microbial characteristics and yield response to partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(6): 1432–1444.
- [40] Lu H J, Ye Z Q, Zhang X L, *et al.* Growth and yield responses of crops and macronutrient balance influenced by commercial organic manure used as a partial substitute for chemical fertilizers in an intensive vegetable cropping system[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2011, 36(9–11).
- [41] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, *et al.* (李国春, 吴勉华, 余小金译). *Meta 分析导论*[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 23–24.
- Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, *et al.* (Translated by Li C G, Wu M H, Yu X J). *Introduction to meta-analysis*[M]. Beijing: Science Press, 2013. 23–24.
- [42] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150–1156.
- [43] Ferreira V, Koricheva J, Duarte S, *et al.* Effects of anthropogenic heavy metal contamination on litter decomposition in streams: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 210: 261–270.
- [44] Adu M O, Yawson D O, Armah F A, *et al.* Meta-analysis of crop yields of full, deficit, and partial root-zone drying irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 79–90.
- [45] Koricheva J, Gurevitch J, Mengersen K. *Handbook of meta-analysis in ecology and evolution*[M]. London: Princeton University Press, 2013.
- [46] 田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究—基于长期试验点的Meta分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 433–440.
- Tian K, Zhao Y C, Xing Z, *et al.* A Meta-analysis of long-term experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 433–440.
- [47] 吴彤东, 沈明星, 陆长婴, 等. 有机无机肥配施比例对大棚番茄产量及品质的影响[J]. *上海农业科技*, 2006, (2): 86–87.
- Wu T D, Shen M X, Lu Z Y, *et al.* Effect of the ratio of organic and inorganic fertilizers on the yield and quality of tomato in greenhouse[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2006, (2): 86–87.
- [48] 曹野. 东北地区耕地质量等级评价与现状分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2017.
- Cao Y. *Cultivated land quality evaluation and present situation analysis in northeast China*[D]. Shenyang: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2017.
- [49] 康瑞昌, 李铮. 土壤有机质与施有机肥对产量的影响[J]. *山西农业科学*, 1995, (3): 31–34.
- Kang R C, Li Z. Effect of soil organic matter and manure fertilization on crop yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 1995, (3): 31–34.
- [50] 赵长盛, 胡承孝, 黄魏. 华中地区两种典型菜地土壤中氮素的矿化特征研究[J]. *土壤*, 2013, 45(1): 41–45.
- Zhao C S, Hu C X, Huang W, *et al.* Study on nitrogen mineralization of two typical vegetable soils in central China[J]. *Soils*, 2013, 45(1): 41–45.
- [51] Ai C, Liang G, Sun J, *et al.* Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57(3): 30–42.
- [52] Wang Y, Tang C, Wu J, *et al.* Impact of organic matter addition on pH change of paddy soils[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2013, 13(1): 12–23.
- [53] 王欣丽, 朱飞, 姚静, 等. 长期施肥对酸性土壤氨氧化微生物群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(02): 375–382.
- Wang X L, Zhu F, Yao J, *et al.* Effect of long-term fertilization on community of ammonia oxidizers in acidic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(02): 375–382.
- [54] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 徐阳春. 配施有机肥提高化肥氮利用效率

- 的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282–288.
- Zhu C H, Dong C X, Shen Q R, Xu Y C. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 282–288.
- [55] Laegreid M, Bockman O C, Kaarstad O. Agriculture, fertilizers and the environment[M]. New York: CABI Publishing in association with Norsk Hydro ASA, 1999.
- [56] 朱兆良, 邢光熹. 氮循环[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- Zhu Z L, Xing G X. Nitrogen cycle[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [57] 石会娟, 王哲. 河北省露地及设施西红柿生产收益研究[J]. *农村经济与科技*, 2016, 27(16): 37–38.
- Shi H J, Wang Z. Study on the income of tomato production in open land and facilities in Hebei Province[J]. *Rural Economy and Technology*, 2016, 27(16): 37–38.
- [58] 杨兴明, 徐阳春, 黄启为, 等. 有机(类)肥料与农业可持续发展和生态环境保护[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 925–932.
- Yang X M, Xu Y C, Huang Q W, *et al.* Organic-like fertilizers and its relation to sustainable development of agriculture and protection of eco-environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 925–932.
- [59] 欧杨虹, 徐阳春, 沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2009, 25(1): 106–111.
- Ou Y H, Xu Y C, Shen Q R. Effect of combined use of organic and inorganic nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2009, 25(1): 106–111.
- [60] 宋雅欣, 马茂亭, 安志装, 赵同科. 有机无机肥料配施对大棚辣椒与番茄产量及品质的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(2): 211–216.
- Song Y X, Ma M T, An Z Z, Zhao T K. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on the yield and quality of pepper and tomato in greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(2): 211–216.
- [61] Schwarzer G, Antes G, Schumacher M. Inflation of type I error rate in two statistical tests for the detection of publication bias in meta-analyses with binary outcomes[J]. *Statistics in Medicine*, 2002, 21(17): 2465–2477.
- [62] 康德英, 洪旗, 刘关键, 王家良. Meta分析中发表性偏倚的识别与处理[J]. *中国循证医学杂志*, 2003, 3(1): 45–49.
- Kang D Y, Hong Q, Liu G J, Wang J L. Investigating and dealing with publication bias in meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Evidence-Based Medicine*, 2003, 3(1): 45–49.
- [63] Zvereva E L, Kozlov M V, Bartomeus I. Effects of herbivory on leaf life span in woody plants: a meta - analysis[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(4): 873–881.
- [64] 谭福雷. 长期定位施肥对设施番茄土壤理化性质、微生物、产量及品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2016.
- Tan F L. Effect of long-term located fertilization on soil physicochemical properties, micro-organism and yield and quality of Tomato[D]. Shenyang: Shenyang: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, , 2016.
- [65] 杜连凤, 刘文科, 刘建玲. 河北省蔬菜大棚土壤盐分状况及其影响因素[J]. *中国土壤与肥料*, 2005, (3): 17–19.
- Du L F, Liu W K, Liu J L. Salt status of greenhouse soil and their influencing factors in Hebei Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2005, (3): 17–19.
- [66] 李涛, 于蕾, 吴越, 等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 100–110.
- Li T, Yu L, Wu Y, *et al.* Secondary salinization of greenhouse vegetable soils and its affecting factors in Shandong Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 100–110.
- [67] 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 Agriculturae Sinica*, 2009, 42(8): 2837–2843.
- [68] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥料对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 97–106.
- Luo J, Jiang X F, Meng L, *et al.* Effects of chemical fertilizer and different composts on growth of oilseed rape and soil nitrogen supply[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 97–106.
- [69] 刘益仁, 李想, 郁洁, 等. 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, Li X, Yu J, *et al.* 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.
- [70] 娄庭, 龙怀玉, 杨丽娟, 等. 在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (2): 11–15.
- Lou T, Long H Y, Yang L J, *et al.* The effect of fertilizer ratio and rate on soil quality and crop yields in the farmland of excessive use of nitrogenous fertilizers[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, (2): 11–15.
- [71] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 51–56.
- Li J M, Xu M G, Qin D Z, *et al.* Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 51–56.
- [72] 杨学云, 张树兰, 刘杏兰. 有机-无机肥配施增产效应及土壤剖面NO₃⁻-N累积定位研究[J]. *西北农业学报*, 1998, (2): 63–66.
- Yang X Y, Zhang S L, Liu X L. Effect of combined application of organic manure and fertilizers on crop yield and accumulation of NO₃⁻-N in soil profile[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1998, (2): 63–66.
- [73] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326–335.
- Xi B, Zhai L M, Liu S, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 326–335.
- [74] 高伟, 李明悦, 高宝岩, 李伟. 有机无机肥料配合施用对设施黄瓜产量、氮素累积及硝酸盐淋溶的影响[J]. *华北农学报*, 2015, 30(4): 188–193.
- Gao W, Li M Y, Gao B Y, Li W. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and nitrate accumulation of cucumber and nitrate leaching under greenhouse condition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(4): 188–193.