

天津市设施菜地施肥现状及减施潜力和对策

石生伟¹, 刘 衍¹, 郭利娜¹, 任天婧², 李 彤¹, 刘 云¹, 段碧华¹, 李玉娥^{2*}

(1 农业农村部华北都市农业重点实验室/北京农学院, 北京 102206;

2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】设施菜地存在施肥量过大、肥料利用率低、环境污染等问题。通过对天津市设施菜地施肥现状调查, 明确设施菜地施肥现状和存在问题, 为制定科学合理的施肥方案提供依据。【方法】本研究对天津市193个设施蔬菜地块施肥现状展开调查, 明确设施菜地施肥特征, 估算肥料总养分和化肥养分减施潜力。

【结果】天津市日光温室平均养分施用总量为 N 775.6 kg/hm²、P₂O₅ 715.5 kg/hm² 和 K₂O 524.9 kg/hm², 显著大于塑料大棚对应养分平均施用总量 N 670.9 kg/hm²、P₂O₅ 584.5 kg/hm² 和 K₂O 425.3 kg/hm² ($P < 0.05$)。有机肥是设施菜地养分的主要来源, 对日光温室和塑料大棚 N、P₂O₅ 和 K₂O 各自施用总量的贡献均超过 50%。日光温室和塑料大棚中, 化肥对磷 (P₂O₅) 施用量的贡献分别为 44.2% 和 48.8%。从养分施用方法看, N、P₂O₅ 和 K₂O 基施比例日光温室分别为 79.4%、80.2% 和 73.5%, 塑料大棚分别为 70.2%、78.2% 和 67.4%, P₂O₅ 基施比例大于 N 和 K₂O。日光温室和塑料大棚平均养分施用比例 (N : P₂O₅ : K₂O) 分别为 1.00 : 0.92 : 0.69 和 1.00 : 0.87 : 0.63。相比推荐施肥量, 天津市设施蔬菜 N 和 P₂O₅ 普遍施用过量, 甘蓝和白菜 K₂O 投入不足。设施菜地总养分 (N + P₂O₅ + K₂O) 减施潜力在 31.5%~65.0%, 化肥养分减施潜力在 22.4%~66.6%。【结论】天津市设施菜地养分以基施为主, 其中化肥基施比例偏高, 追肥养分比例过低, 养分总量过量施用现象普遍。设施菜地基施化肥和追肥中 P₂O₅ 比例偏高, 养分结构不合理。主要设施蔬菜中, 茄子、番茄和芹菜的 N 和 P₂O₅ 施用总量远超过各自推荐施肥量, 化肥养分减施潜力较大, 是设施蔬菜肥料减施关注的重点。

关键词: 设施蔬菜; 养分来源; 氮磷钾比例; 施肥方式; 减肥潜力

Fertilization status-quo in greenhouse vegetable production in Tianjin and the potential and countermeasures of fertilizer reduction

SHI Sheng-wei¹, LIU Kan¹, GUO Li-na¹, REN Tian-jing², LI Tong¹, LIU Yun¹, DUAN Bi-hua¹, LI Yu-E^{2*}

[1 Key Laboratory of Urban Agriculture (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China/Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China]

Abstract: 【Objectives】 Low fertilizer utilization efficiency and environmental pollution, caused by excessive fertilization, are common in greenhouse vegetable production. We investigated the current fertilizer application rates in greenhouse vegetable fields in Tianjin, to provide some scientific and reasonable proposals for the efficient and environmental friendly fertilization. 【Methods】 We investigated the fertilizer application information in 193 greenhouse vegetable fields in Tianjin, and summarized the main nutrient sources, input rates and ways, and at last predicted the reducing potential of both total and chemical nutrient input in greenhouse vegetable fields. 【Results】 The average amounts of N, P₂O₅ and K₂O input were 775.6 kg/hm², 715.5 kg/hm² and 524.9 kg/hm² in solar greenhouses, respectively, which were significantly higher than those in plastic greenhouse (670.9 kg/hm², 584.5 kg/hm² and 425.3 kg/hm²). Of the total N, P₂O₅ and K₂O input, more than half were from organic manures in both solar and plastic greenhouses. Chemical fertilizers contributed 44.2% of total P₂O₅ input

收稿日期: 2019-09-10 接受日期: 2020-03-01

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0208-02); 北京市教委一般项目 (SQKM201810020004); 北京市教委重点项目 (KZ201910020024)。

联系方式: 石生伟 E-mail: weiweishi848@gmail.com; * 通信作者 李玉娥 E-mail: yueli@ami.ac.cn

in solar greenhouses and 48.8% in plastic greenhouse, respectively. Basal application was the main fertilization method in greenhouse vegetables, which accounted for 79.4% of total N, 80.2% of total P_2O_5 and 73.5% of total K_2O input in solar greenhouses, and 70.2% of total N, 78.2% of total P_2O_5 and 67.4% of total K_2O input in plastic greenhouses, respectively. The average ratios of N, P_2O_5 and K_2O were 1 : 0.92 : 0.69 in solar greenhouses and 1 : 0.87 : 0.63 in plastic greenhouses, respectively. Comparing with the recommended nutrient rate in vegetables, both current N and P_2O_5 inputs were excessive for most vegetables, but K_2O input was insufficient in pakchoi and cabbages. The relative potential reduction was 31.5%–65.0% for the total nutrients input (N + P_2O_5 + K_2O), and is 22.4%–66.6% for the total chemical nutrients input in greenhouse vegetable fields in Tianjin.

【Conclusions】 Basal application is the main nutrient fertilization method in Tianjin. The total nutrient input are excessive in most greenhouse vegetable fields, especially those of N and P_2O_5 in Tianjin, comparing with the recommended nutrient rate. The most concerned vegetables with excessive N and P_2O_5 inputs are eggplants, tomatoes and celery. Therefore, the fertilizer reduction in greenhouse vegetable fields should focus on eggplants, tomatoes and celery in Tianjin.

Key words: greenhouse vegetable; nutrient source; nitrogen-phosphorus-potassium application ratio; fertilizer application method; potential of fertilizer reduction

设施菜地属于一类资源高投入-高产出的特殊农田。相比露天菜地,设施菜地可以克服自然季节变化对生产的限制,对保障城乡居民蔬菜消费、实现农民增收和农业增效具有重要的作用^[1]。相比大田作物种植,设施蔬菜生产收益相对较高,复种指数高,需要大量的养分投入以满足蔬菜生长^[2-3]。科学合理施肥是设施蔬菜优质高效生产关注的重要内容之一。施肥不足会极大限制蔬菜的产量;而过度施肥超过了蔬菜吸收需求,降低肥料利用率和蔬菜品质,增加设施蔬菜生产成本,影响蔬菜产业经济效益^[4]。根据调查,天津市设施菜地平均氮肥施用量为 1034.0 kg/hm²^[5](以纯 N 计,下同),北京市设施菜地平均氮肥施用量为 1143.0 kg/hm²^[6],山东和河北省设施菜地氮肥施用量则高达 1200.0~4500.0 kg/hm²^[7-8],均远超过推荐氮肥用量。设施蔬菜具有频繁和过量灌水的特点^[9-10]。过量施氮和灌溉超过了设施作物生长需求,造成土壤硝态氮随灌溉水淋溶到地下水,引起地下水硝态氮含量超标^[11-12]。Ren 等^[13]对山东寿光设施菜地监测发现,大部分氮肥并未被作物吸收,而以气态或淋溶途径损失。

我国设施菜地养分投入总量和化肥养分量普遍过高^[2],带来严重的农业面源污染问题^[14]。黄绍文等^[2]研究发现,我国主要设施蔬菜 N、 P_2O_5 和 K_2O 平均施用量分别是各自推荐量的 1.9、5.4 和 1.6 倍。由于设施内气温持续偏高、湿度大,土壤有机质和氮素分解反应较快,温室气体与氨排放等养分损失比大田剧烈^[15-17],成为引起大气污染的重要诱因之一^[18]。此外,设施菜地土壤长期处于高集约化和高肥料投入的生产状态,导致了土壤次生盐渍化、硝酸

盐积累和酸化等诸多问题^[19-21],严重制约了设施蔬菜的优质高效生产。在设施蔬菜栽培面积增加和实施“化肥零增长”的背景下,我国设施蔬菜产业发展要兼顾安全优质高效生产和控制养分投入总量。因此,构建设施蔬菜科学合理的施肥技术体系,对于设施蔬菜产业减肥增效与绿色可持续发展具有重要的意义。

明确设施菜地的施肥现状,是构建科学合理的施肥技术体系和估算化肥减施潜力的基础。受自然环境(气候和土壤)、种植习惯和经济发展水平的影响,设施菜地施肥特征具有明显的地域性和时效性^[2,5-8]。天津市属于京津冀地区重要的设施蔬菜供应区,设施蔬菜产业发展迅速^[22-23],具有研究环渤海湾地区设施蔬菜施肥特征的代表性。以往关于天津市设施菜地施肥状况的调查研究^[5,14,24],存在覆盖范围小、调查样本量少、年代较旧和信息不全面等缺点,难以准确体现近期天津市设施蔬菜施肥主要特征和估算养分减施潜力。鉴于此,本研究开展了天津市设施菜地施肥现状调查,旨在明确设施菜地施肥现状特征,厘清设施菜地施肥方面存在的问题,估算主要蔬菜肥料总养分和化肥养分的减施潜力,为制定科学合理的肥料减施增效方案提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查方法

调查时间为 2018 年 2 月至 11 月份。预先制订设施蔬菜施肥调查表。调查表内容包括蔬菜种类、播种茬数、定植-拉秧日期、设施类型、面积、底肥-

追肥类型、数量和施用方式以及产量。通过与种植户和种植企业直接访谈形式, 获取施肥信息。为了保证调查信息的代表性和真实性, 访谈对象限定于位于大面积种植设施蔬菜乡镇内多年从事设施种植的农户或者企业园区负责施肥管理的技术人员。对于自然条件和种植模式相似的区域, 尽可能走访不同层次经营者, 避免同一区域内相同施肥情况过分集中对调查结果的干扰。每个调研地点需要记录化肥包装袋上养分含量或从当地农资市场获得肥料养分含量, 同时采集部分有机肥样品, 测定氮、磷和钾含量。

天津市设施蔬菜类型主要分为连栋温室、日光温室和塑料大棚^[22-23]。由于前者数量较少(2%), 调查对象主要集中在日光温室和塑料大棚。通过调研, 获取天津市 193 个种植设施蔬菜地块施肥状况的有效数据, 共计 466 茬蔬菜。调研地块分布在天津市 8 个行政区, 其中武清区 52 块、西青区 39 块、宁河区 36 块、蓟州区 20 块、滨海新区 19 块、静海区 12 块、宝坻区 8 块、北辰区 7 块。不同行政区调查地块分布和设施蔬菜种植面积分布大体一致。设施蔬菜品种主要为番茄、黄瓜、辣椒、茄子、豆角、芹菜、叶菜、甘蓝和一些特种蔬菜等, 基本涵盖了天津市所有设施蔬菜类型。

1.2 数据处理

调查数据中蔬菜种类繁多, 依据农业生物学分类法对蔬菜种类进行分类^[25], 主要分为白菜类、豆类、甘蓝类、根茎类、瓜类、茄果类、叶菜和其他(未包括在以上蔬菜种类以内的特种蔬菜, 如茴香、秋葵等)。由于不同区域有机肥养分含量变异很大, 本研究采用了以往相关畜禽粪便有机肥养分含量监测数据^[26-27], 对有机肥中养分投入量进行计算, 分别折合为 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分单位投入量(kg/hm²)。

参照以往研究^[6], 对基施肥料类型划分为不施肥、仅施化肥、仅施有机肥、有机肥+纯氮肥和有机肥+复合肥; 对于有机肥类型, 划分为鸡粪、牛粪、羊粪、猪粪、饼肥和其他类型。对基施化肥类型划分为磷酸二铵、尿素、复混肥、硫酸钾和其他。对追施化肥类型划分为不追肥、尿素、复合肥、专用冲施肥、硫酸钾和其他。

1.3 养分减施潜力计算方法

参照以往相关研究^[2-3, 24, 27], 选取中等土壤肥力水平下最高产量肥料投入量为推荐施肥量。依据该原则, 分别收集到主要设施蔬菜(包括白菜、番茄、甘蓝、黄瓜、茄子、芹菜和菠菜)推荐施肥量, 估算不同养分(N、P₂O₅ 和 K₂O)的绝对减施潜力和相对减施

潜力。

绝对减施潜力(kg/hm²) = 现状施肥量(kg/hm²) - 推荐施肥量(kg/hm²)

相对减施潜力(%) = [现状施肥量(kg/hm²) - 推荐施肥量(kg/hm²)] / 现状施肥量(kg/hm²) × 100

采用 SPSS 软件中单因素方差分析($\alpha = 0.05$)检验不同设施类型和蔬菜类型间养分投入量的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 设施菜地施肥种类特征

天津市设施菜地基施肥料类型主要为有机肥配施复合肥(42.49%)和仅施化肥(38.63%), 仅施有机肥(9.01%)。施用纯氮肥(尿素和硫酸铵等)的比例很低(图 1)。有机肥种类主要有鸡粪(39.08%)、猪粪(24.14%)和牛粪(14.18%), 三者占有有机肥种类的 77.40%(图 1)。化肥基施主要采用复合肥(51.12%), 其次为磷酸二铵(33.18%), 施用尿素的比例仅占 5.83%, 而追肥主要采用专用冲施肥(33.54%)、复合肥(19.92%)和尿素(18.24%), 单一追施硫酸钾的比例仅为 2.73%(图 1)。

2.2 设施菜地不同种类蔬菜的氮磷钾施用量特征

不同设施类型和蔬菜种类养分施用量存在显著差异, 其中日光温室 N、P₂O₅ 和 K₂O 各自平均施用总量显著大于塑料大棚对应养分平均施用总量($P < 0.05$, 图 2)。日光温室中茄果类蔬菜 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均施用总量分别为 1055.6、1077.1 和 814.4 kg/hm², 显著大于除特种蔬菜外的其他蔬菜种类($P < 0.05$, 图 2)。虽然特种蔬菜(其他)N 和 K₂O 施用总量较大, 但由于不同调查地块间变异性较大而使其施肥量未显著大于其他蔬菜种类($P > 0.05$)。剩余蔬菜总养分(N + P₂O₅ + K₂O)投入量的次序为: 叶菜类 > 瓜类 > 白菜类 > 豆类 > 根茎类 > 甘蓝类。天津市日光温室 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均施用总量分别为 775.6、715.5 和 524.9 kg/hm²(图 2)。

塑料大棚以茄果类蔬菜养分施用量最大, 三种养分(N、P₂O₅、K₂O)平均施用量分别为 922.2、867.2、632.3 kg/hm², 其次为瓜类蔬菜(757.5、669.6、539.8 kg/hm²)、甘蓝类(750.7、570.6、288.2 kg/hm²)、叶菜类蔬菜(686.7、518.9、316.2 kg/hm²)和根茎类蔬菜(626.2、577.7、423.4 kg/hm²)。塑料大棚中豆类和白菜类蔬菜养分施用总量较低, 约为根茎类蔬菜的一半。天津市塑料大棚 N、P₂O₅ 和

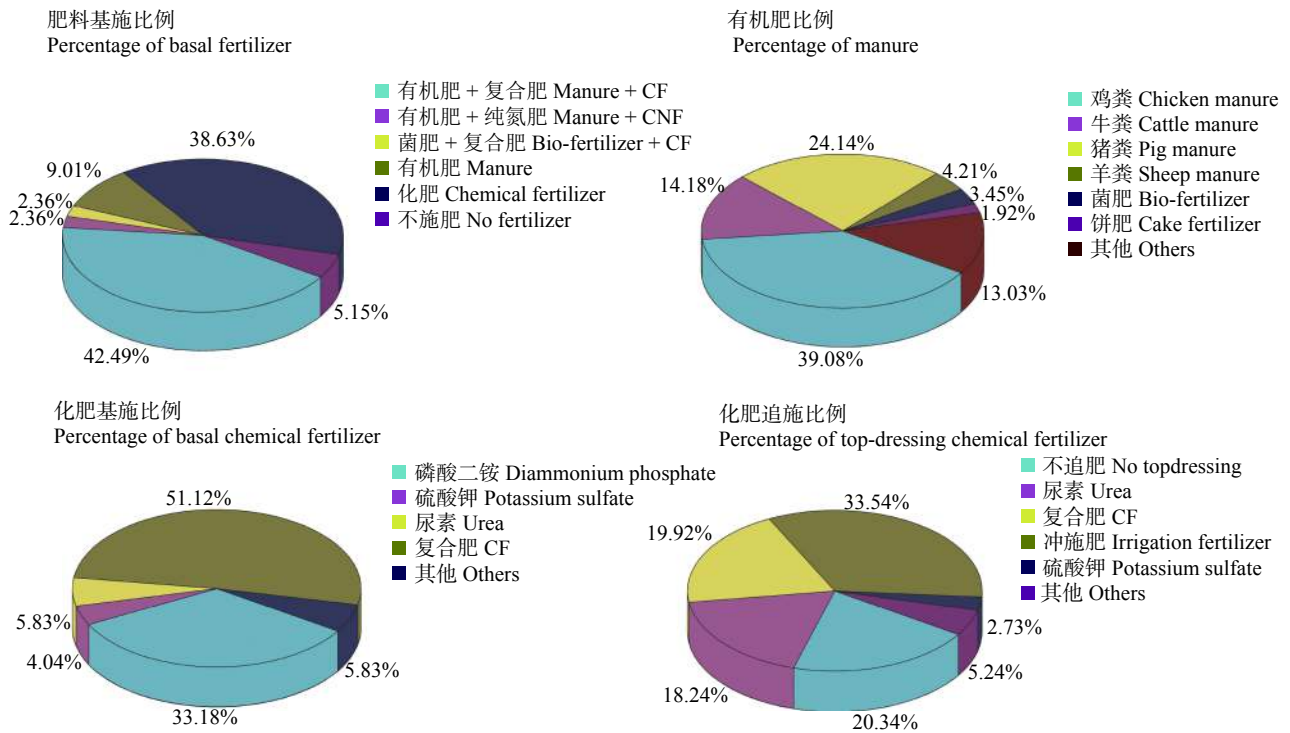


图 1 天津市设施菜地肥料施用比例与肥料类型

Fig. 1 Ratio and types of fertilizer application in greenhouse vegetable fields in Tianjin

[注 (Note): CF—Compound fertilizer; CNF—Chemical N fertilizer.]

K_2O 平均施用总量分别为 670.9、584.5 和 425.3 kg/hm^2 (图 2)。

2.3 不同种类设施蔬菜菜地的氮磷钾来源比例

不同蔬菜种类菜地养分来源差异较大(表 1、表 2)。有机肥是日光温室中 N 和 P_2O_5 的主要来源, 其中茄果类、叶菜类、白菜类和根茎类蔬菜有机肥氮施用量分别为 N 660.1、369.8、332.8 和 182.5 kg/hm^2 (表 1), 占各自氮施用量的一半以上(表 2)。甘蓝类蔬菜有机肥氮施用量为 N 174.8 kg/hm^2 , 占氮施用量总量的 37.2%。甘蓝类、豆类和瓜类蔬菜追施化肥氮投入量占氮施用量总量的比例分别为 47.8%、38.4% 和 30.4%, 其他蔬菜种类追施化肥氮施用量较低(表 2)。有机肥、基施化肥和追施化肥对日光温室氮施用量总量的贡献分别为 57.6%、16.5% 和 25.9%。塑料大棚氮肥来源与日光温室相似, 其中根茎类、茄果类和瓜类蔬菜氮肥主要来自有机肥, 而甘蓝类和豆类蔬菜则依靠化肥。有机肥、基施化肥和追施化肥对塑料大棚氮施用量总量的贡献分别为 54.1%、16.1% 和 29.8%(表 2)。

有机肥是日光温室中磷肥的主要来源, 其中茄果类、叶菜类和白菜类蔬菜有机肥 P_2O_5 投入量分别占各自 P_2O_5 施用总量的 58.9%、55.3% 和 50.8%。根

茎类、瓜类和豆类蔬菜化肥对 P_2O_5 施用总量的贡献超过 50%(表 2)。有机肥、基施化肥和追施化肥对日光温室 P_2O_5 施用总量的贡献分别为 55.8%、24.4% 和 19.7%, 对塑料大棚 P_2O_5 施用总量的贡献分别为 51.2%、27.0% 和 21.8%(表 2)。有机肥、基施化肥和追施化肥对日光温室 K_2O 施用总量的贡献分别为 59.0%、18.3% 和 22.7%(表 1 和表 2)。甘蓝类、白菜类和叶菜类蔬菜钾肥主要来源于有机肥, 而豆类、瓜类和茄果类蔬菜钾肥主要来源于化肥。塑料大棚中钾肥来源与日光温室相似。

不同调查区设施蔬菜 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用总量存在极显著差异 ($P < 0.01$)。滨海新区和宝坻区设施菜地氮施用量分别为 N 1106.7 和 997.9 kg/hm^2 , 大于其他地区 ($P < 0.05$, 图 3)。不同种植区设施菜地氮肥来源差异较大, 其中西青区、蓟州区和静海区氮肥主要来源于有机肥 (> 60%), 北辰区氮肥主要来源于追施化肥 (57.9%)。宝坻区和滨海新区设施菜地 P_2O_5 施用总量分别为 1199.2 和 1104.2 kg/hm^2 , 大于其他区(图 3, $P < 0.05$)。北辰区、宝坻区和静海区设施菜地磷肥主要来源于化肥, 而其他地区主要依靠有机肥。有机肥是所有地区钾肥的主要来源, 其中宝坻区设施菜地 K_2O 施用总量最大(图 3)。滨海新

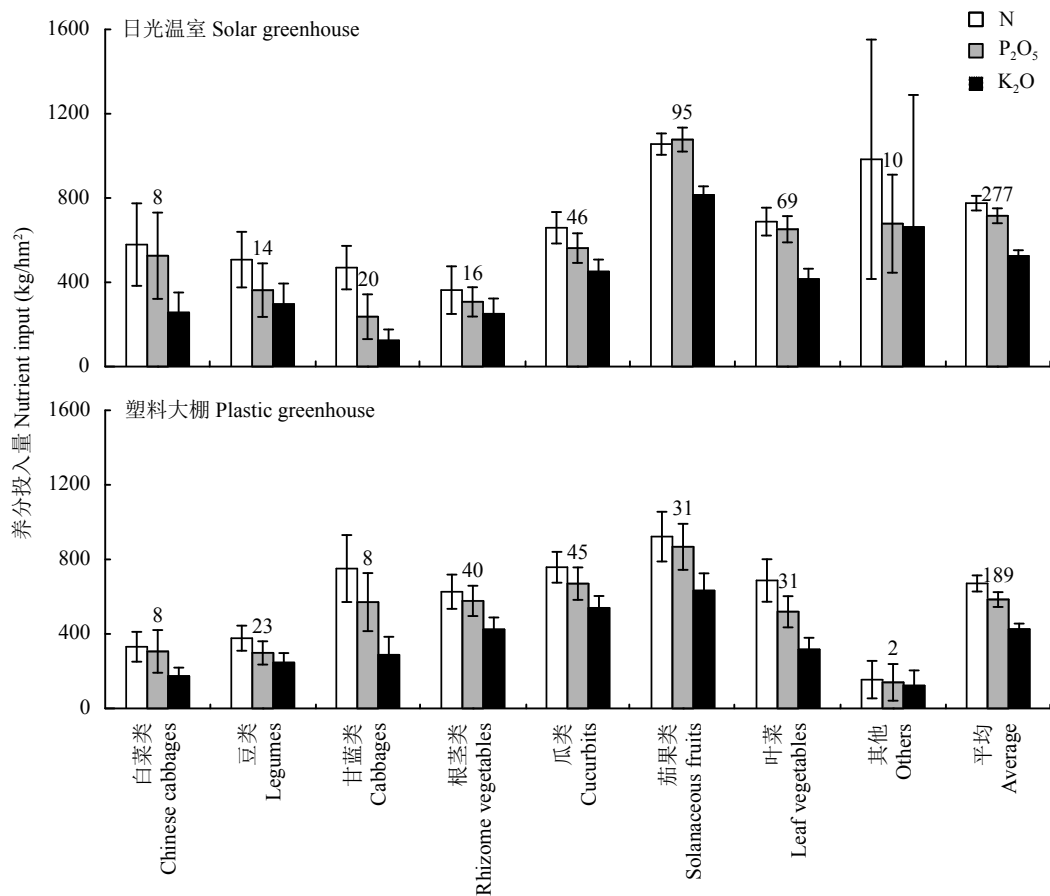


图 2 天津市设施菜地总氮、磷、钾养分投入量

Fig. 2 Average rates of total nitrogen, phosphorus and potassium in greenhouse vegetable fields in Tianjin

[注 (Note): 图柱上方数字为各自样本量 The numbers above the bars are sample number.]

区和宝坻区设施蔬菜总养分投入量 ($N + P_2O_5 + K_2O$) 最大 ($> 2800.0 \text{ kg/hm}^2$, 图 3)。宝坻区和北辰区设施蔬菜总养分主要来源于化肥 ($> 50\%$), 其他地区主要依靠有机肥。

2.4 设施菜地化肥养分施用特征

不同蔬菜种类和种植地区化肥养分施用差异较大。日光温室中化肥 N 和 K_2O 主要采用追肥形式 (追施养分比例 $> 60\%$), P_2O_5 主要采用基肥形式 (表 3)。根茎类蔬菜化肥养分基施比例较大。除特种蔬菜外, 塑料大棚化肥养分施用和日光温室相似, 其中化肥 N 和 K_2O 主要采用追肥形式 (追施养分比例 $> 60\%$, 表 3)。静海区设施菜基施化肥养分比例较高, 其他地区则主要依靠追肥 (表 4)。不同蔬菜种类追肥次数差异很大, 其中瓜类蔬菜追肥超过 5 次, 白菜类蔬菜追肥 1~2 次 (图 4)。

2.5 设施菜地养分施用比例 ($N : P_2O_5 : K_2O$)

设施蔬菜养分施用比例 ($N : P_2O_5 : K_2O$) 差异较大 (表 5)。日光温室有机肥、基施化肥和追施化肥

中 $N : P_2O_5 : K_2O$ 分别为 $1.00 : 0.89 : 0.67$ 、 $1.00 : 1.18 : 0.68$ 和 $1.00 : 0.70 : 0.69$, 总养分中 $N : P_2O_5 : K_2O$ 为 $1.00 : 0.92 : 0.69$ 。日光温室甘蓝类和白菜类蔬菜 K_2O 比例最低, 而茄果类蔬菜和瓜类蔬菜 K_2O 比例高于其他蔬菜。塑料大棚有机肥、基施化肥和追施化肥的 $N : P_2O_5 : K_2O$ 分别为 $1.00 : 0.82 : 0.60$ 、 $1.00 : 1.48 : 0.65$ 和 $1.00 : 0.63 : 0.69$, 总养分中 $N : P_2O_5 : K_2O$ 为 $1.00 : 0.87 : 0.63$ (表 5)。

不同地区基施有机肥养分施用比例差异较小, 基施化肥和追肥养分施用比例差异较大 (表 6)。滨海新区基施化肥和宝坻区追施化肥中 P_2O_5 比例最高。整体肥料养分中宝坻区 P_2O_5 比例最高而北辰区 K_2O 比例最低, 表明宝坻区磷肥投入过量严重, 而北辰区钾肥投入不足。

2.6 天津市设施菜地肥料减施潜力估算

选取以往设施蔬菜推荐施肥量为参照, 对天津市 7 种主要设施蔬菜总养分和化肥养分减施潜力进

表 1 天津市设施菜地肥料养分施用量 (kg/hm^2)
Table 1 Averaged application rates of fertilizers in greenhouse vegetable fields in Tianjin

蔬菜种类 Vegetable type	有机肥 Manure			基施化肥量 Basal chemical fertilizer			追施化肥量 Top-dressing chemical fertilizer		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
日光温室 Solar greenhouse									
白菜类 Chinese cabbages	332.8 ± 164.3	267.3 ± 139.4	177.7 ± 87.1	110.2 ± 29.9	222.2 ± 81.3	42.2 ± 23.5	135.8 ± 67.4	36.4 ± 24.3	36.4 ± 24.3
豆类 Legumes	229.8 ± 106.2	172.6 ± 91.4	137.0 ± 65.9	82.8 ± 28.8	90.0 ± 35.5	59.2 ± 29.6	195.0 ± 39.4	99.9 ± 36.7	99.9 ± 36.7
甘蓝类 Cabbages	174.8 ± 94.8	115.8 ± 70.8	88.3 ± 50.5	70.4 ± 26.8	61.5 ± 37.9	7.5 ± 7.5	224.3 ± 41.1	59.4 ± 33.2	28.1 ± 14.6
根茎类 Rhizome vegetables	182.5 ± 114.0	111.8 ± 66.2	106.3 ± 66.5	97.5 ± 24.2	133.2 ± 41.3	82.3 ± 25.7	82.7 ± 27.5	62.0 ± 21.8	62.0 ± 21.8
瓜类 Cucurbits	326.6 ± 58.8	260.9 ± 45.4	198.7 ± 35.3	132.0 ± 31.4	164.8 ± 37.5	107.4 ± 30.6	200.2 ± 27.0	136.5 ± 21.4	144.7 ± 21.5
茄果类 Solanaceous fruits	660.1 ± 43.8	634.8 ± 48.8	458.7 ± 31.3	147.2 ± 9.2	196.7 ± 19.6	107.4 ± 8.8	248.3 ± 22.2	245.2 ± 20.9	248.4 ± 20.9
叶菜类 Leaf vegetables	369.8 ± 52.7	360.4 ± 51.7	265.1 ± 41.3	138.6 ± 12.7	212.4 ± 29.2	82.5 ± 11.3	179.3 ± 28.8	76.1 ± 15.0	67.4 ± 12.9
其他 Others	796.0 ± 318.3	536.4 ± 200.5	521.2 ± 182.7	102.0 ± 26.6	95.0 ± 24.7	95.0 ± 24.7	96.0 ± 34.2	46.7 ± 31.7	46.7 ± 31.7
平均 Mean	446.6 ± 29.2	399.5 ± 27.3	297.8 ± 19.9	128.3 ± 7.6	174.4 ± 12.8	87.8 ± 7.1	200.6 ± 12.5	141.2 ± 10.6	139.2 ± 10.3
塑料大棚 Plastic greenhouse									
白菜类 Chinese cabbages	114.8 ± 75.9	104.1 ± 68.5	77.1 ± 50.6	112.8 ± 26.5	177.3 ± 66.3	72.3 ± 26.0	103.2 ± 46.0	24.5 ± 13.6	24.5 ± 13.6
豆类 Legumes	158.8 ± 53.9	140.4 ± 50.0	104.0 ± 37.6	60.7 ± 13.0	64.0 ± 18.0	48.4 ± 12.2	157.5 ± 46.2	93.5 ± 23.4	93.5 ± 23.4
甘蓝类 Cabbages	304.9 ± 120.5	281.5 ± 110.7	199.4 ± 77.5	126.7 ± 30.4	231.6 ± 89.0	31.3 ± 21.9	319.2 ± 84.6	57.5 ± 49.5	57.5 ± 49.5
根茎类 Rhizome vegetables	437.4 ± 85.7	379.4 ± 75.4	251.8 ± 49.3	97.3 ± 14.0	128.2 ± 21.2	76.6 ± 13.4	91.5 ± 24.5	69.4 ± 20.5	95.5 ± 31.7
瓜类 Cucurbits	379.3 ± 64.4	334.0 ± 57.1	249.9 ± 42.2	96.6 ± 14.3	109.5 ± 25.6	64.1 ± 11.9	281.7 ± 41.9	218.0 ± 45.9	225.9 ± 38.7
茄果类 Solanaceous fruits	525.3 ± 108.4	397.0 ± 92.0	299.1 ± 59.0	141.8 ± 14.5	229.1 ± 41.2	79.2 ± 14.0	255.1 ± 45.6	229.5 ± 50.2	254.0 ± 57.4
叶菜类 Leaf vegetables	339.3 ± 88.9	242.2 ± 58.3	193.5 ± 51.1	137.9 ± 15.2	227.0 ± 38.8	73.1 ± 15.5	209.5 ± 40.7	49.7 ± 15.7	49.7 ± 15.7
其他 Others	58.0 ± 76.9	72.5 ± 72.5	54.9 ± 54.9	92.0 ± 38.8	67.5 ± 34.4	67.5 ± 34.4	0.0	0.0	0.0
平均 Mean	363.0 ± 34.9	299.2 ± 29.2	218.8 ± 20.6	108.2 ± 6.4	158.0 ± 13.6	67.8 ± 5.7	199.7 ± 17.4	127.8 ± 15.9	138.7 ± 16.4

表 2 天津市设施菜地有机肥和化肥养分投入比例及基、追肥养分占总养分投入的比例 (%)

Table 2 The proportion of manure and chemical fertilizer nutrient input, and the proportion of basal and top-dressing nutrients in total nutrient inputs in vegetable greenhouse fields in Tianjin

蔬菜种类 Vegetable type	有机肥养分 Manure nutrient			化肥养分 Chemical fertilizer nutrient			基肥养分 Basal applied nutrient			追肥养分 Top-dressing nutrient		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
日光温室 Solar greenhouse												
白菜类 Chinese cabbages	57.5	50.8	69.3	42.5	49.2	30.7	76.5	93.1	85.8	23.5	6.9	14.2
豆类 Legumes	45.3	47.6	46.3	54.7	52.4	53.7	61.6	72.4	66.3	38.4	27.6	33.7
甘蓝类 Cabbages	37.2	48.9	71.3	62.8	51.1	28.7	52.2	74.8	77.3	47.8	25.2	22.7
根茎类 Rhizome vegetables	50.3	36.4	42.4	49.7	63.6	57.6	77.2	79.8	75.3	22.8	20.2	24.7
瓜类 Cucurbits	49.6	46.4	44.1	50.4	53.6	55.9	69.6	75.7	67.9	30.4	24.3	32.1
茄果类 Solanaceous fruits	62.5	58.9	56.3	37.5	41.1	43.7	76.5	77.2	69.5	23.5	22.8	30.5
叶菜类 Leaf vegetables	53.8	55.3	63.9	46.2	44.7	36.1	73.9	88.3	83.8	26.1	11.7	16.2
其他 Others	80.1	79.1	78.6	19.9	20.9	21.4	90.3	93.1	93.0	9.7	6.9	7.0
平均 Mean	57.6	55.8	59.0	42.4	44.2	41.0	72.2	80.2	77.4	27.8	19.7	22.6
塑料大棚 Plastic greenhouse												
白菜类 Chinese cabbages	34.7	34.0	44.3	65.3	66.0	55.7	68.8	92.0	85.9	31.2	8.0	14.1
豆类 Legumes	42.1	47.1	42.3	57.9	52.9	57.7	58.2	68.6	62.0	41.8	31.4	38.0
甘蓝类 Cabbages	40.6	49.3	69.2	59.4	50.7	30.8	57.5	89.9	80.0	42.5	10.1	20.0
根茎类 Rhizome vegetables	69.8	65.7	59.4	30.2	34.3	40.6	85.4	87.9	77.5	14.6	12.1	22.5
瓜类 Cucurbits	50.1	49.9	46.3	49.9	50.1	53.7	62.8	67.4	58.1	37.2	32.6	41.9
茄果类 Solanaceous fruits	57.0	45.8	47.3	43.0	54.2	52.7	72.3	73.5	59.8	27.7	26.5	40.2
叶菜类 Leaf vegetables	49.4	46.7	61.2	50.6	53.3	38.8	69.5	90.4	84.3	30.5	9.6	15.7
其他 Others	38.7	51.8	44.9	61.3	48.2	55.1	100.0	100	100.0	0.0	0.0	0.0
平均 Mean	54.1	51.2	51.4	45.9	48.8	48.6	70.2	78.2	67.4	29.8	21.8	32.6

行估算(表 7)。结果表明, 相比推荐值, 设施蔬菜 N、P₂O₅ 和总养分均施用过量, 其中 N 和 P₂O₅ 施用总量分别是各自推荐值的 1.3~3.4 倍和 2.3~6.8 倍, 化肥 N 和 P₂O₅ 施用量分别是各自推荐值的 1.1~3.1 倍和 1.7~6.1 倍, K₂O 施用过量现象仅存在于少数设施蔬菜中(茄子、芹菜和番茄)。天津设施菜地总养分(N + P₂O₅ + K₂O)施用量是推荐值的 1.4~3.9 倍, 化肥总养分施用量是推荐值的 1.1~3.9 倍。

不同蔬菜种类减施潜力存在差异, 其中茄子氮肥减施潜力最大, 氮施用总量的绝对减施潜力为 N 654.4~877.0 kg/hm², 平均相对减施潜力为 61.5%; 化肥氮施用量的绝对减施潜力为 N 403.6~496.6 kg/hm², 平均相对减施潜力为 61.7%(图 5、表 7)。番茄氮施用总量和化肥氮施用量的平均相对减施潜

力分别为 56.8% 和 30.2%。芹菜、甘蓝、黄瓜、菠菜和白菜化肥氮施用量的平均相对减施潜力依次为 46.9%、37.0%、34.3%、25.9% 和 20.8%(表 7)。

设施蔬菜磷肥均过量施用。P₂O₅ 施用总量的绝对减施潜力为 183.7~887.9 kg/hm², 平均相对减施潜力在 66.8%~84.8%。化肥 P₂O₅ 施用量的绝对减施潜力为 71.4~380.4 kg/hm², 平均相对减施潜力在 59.1%~82.9%(图 5、表 7)。茄子和番茄磷肥减施潜力较大, 其中 P₂O₅ 施用总量的绝对减施潜力超过 500 kg/hm², 化肥 P₂O₅ 施用量的绝对减施潜力超过 350 kg/hm², 平均相对减施潜力高达 80% 左右。

不同蔬菜品种钾肥减施潜力存在很大差异, 其中甘蓝 K₂O 施用总量和化肥 K₂O 施用量均低于推荐值, 菠菜 K₂O 施用总量和化肥 K₂O 施用量在两个推荐值范围之内, 白菜化肥 K₂O 施用量低于推荐值,

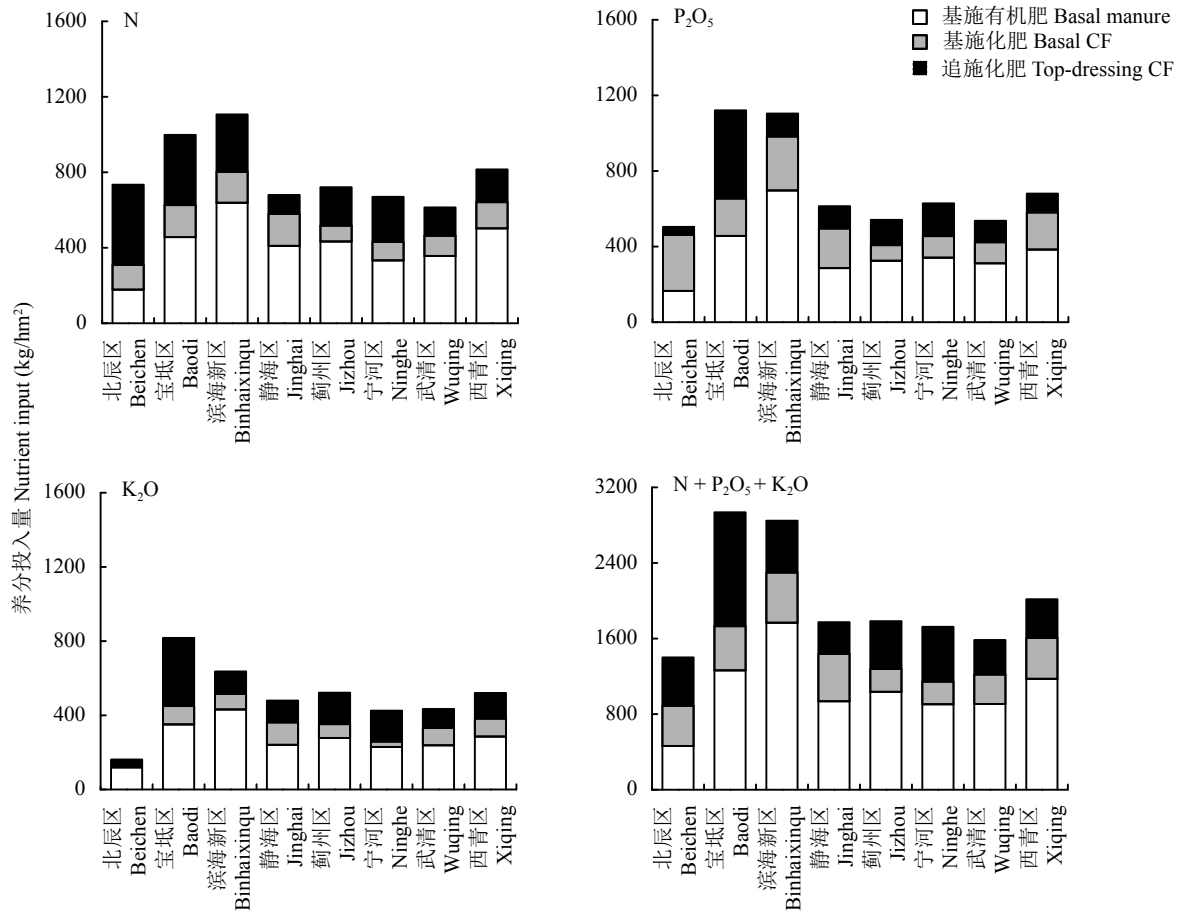


图3 天津市不同地区设施菜地肥料养分投入量

Fig. 3 Average rates of fertilizer application in greenhouse vegetable fields at different districts of Tianjin

[注 (Note) : CF—Compound fertilizer.]

茄子和芹菜 K_2O 施用总量均大于推荐施肥量(图5、表7)。茄子和芹菜 K_2O 施用总量的平均相对减施潜力分别为48.0%和38.0%。甘蓝和白菜化肥 K_2O 投入不足,需要在现有的基础上分别增施196.8%和82.2%。不同设施蔬菜中芹菜、茄子和番茄的化肥养分减施潜力较大(图5)。相比推荐施肥量,设施菜地总养分($N + P_2O_5 + K_2O$)减施潜力在31.5%~65.0%,化肥养分减施潜力在22.4%~66.6%。

3 讨论

3.1 天津市设施菜地施肥存在的主要问题

天津市设施蔬菜存在过量施肥问题,与我国其他地区设施菜地过量施肥的现象既具有相似性也具有差异性。以设施黄瓜的3种养分(N 、 P_2O_5 、 K_2O)施用量为例,全国设施黄瓜 N 、 P_2O_5 、 K_2O 平均施用量为1122.0、954.0、1158.0 kg/hm^2 ^[2],山东寿光地区为2146.0、1431.0、2075.0 kg/hm^2 ^[28],青岛市为

1841.5、864.0、1978.7 kg/hm^2 ^[29],连云港市为1612.0、2330.0、672.0 kg/hm^2 ^[30],北京市为1494.0、1017.0、1239.0 kg/hm^2 ^[28],河北省为1269.0、1609.5、610.5 kg/hm^2 ^[21],陕西省为914.0、698.0、623.0 kg/hm^2 ^[31],天津市为763.7、685.1、493.9 kg/hm^2 (本研究),均超过了目前设施黄瓜的推荐施肥量。通过比较2018年不同地区设施黄瓜的平均产量、净利润和肥料成本^[32](表8),发现天津设施黄瓜平均产量和肥料成本不仅低于周围地区,而且低于全国平均水平。不同地区设施黄瓜总养分施用量(调研数据)亦具有以上对应关系。进一步研究发现,调研的施肥量与年鉴统计的肥料成本具有极显著的正相关关系(表8),说明调研施肥数据是可靠的,能够客观地反映设施蔬菜施肥的地域性差异。

设施菜地养分投入量随时间而变化。以10年来天津市设施黄瓜氮肥施用量为例,已有调研数据表明,2008—2010年氮施用总量为 N 1356.0 kg/hm^2 ^[5],2011年氮施用总量为 N 1296.2 kg/hm^2 ^[14],2016年氮

表 3 天津市不同类型设施蔬菜基施化肥养分及其占化肥总养分投入量的比例

Table 3 Rates of basal chemical fertilizer nutrients and their proportions in the total nutrient inputs of fertilizer for different types of greenhouse vegetables in Tianjin

蔬菜种类 Vegetable type	养分率 Nutrient rate (kg/hm ²)				比例 Proportion (%)			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量 Total	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量 Total
日光温室 Solar greenhouse								
白菜类 Chinese cabbages	110.2 ± 29.9	222.2 ± 81.3	42.2 ± 23.5	374.6 ± 107.5	44.8	85.9	53.7	64.2
豆类 Legumes	82.8 ± 28.8	90.0 ± 35.5	59.2 ± 29.6	232.0 ± 86.3	29.8	47.4	37.2	37.0
甘蓝类 Cabbages	70.4 ± 26.8	61.5 ± 37.9	7.5 ± 7.5	139.4 ± 56.3	23.9	50.9	21.1	30.9
根茎类 Rhizome vegetables	97.5 ± 24.2	133.2 ± 41.3	82.3 ± 25.7	313.1 ± 77.4	54.1	68.2	57.0	60.2
瓜类 Cucurbits	132.0 ± 31.4	165.0 ± 37.5	107.4 ± 30.6	404.4 ± 93.0	39.7	54.7	42.6	45.7
茄果类 Solanaceous fruits	138.6 ± 12.7	215.1 ± 29.3	82.5 ± 11.3	436.3 ± 42.3	37.2	44.5	30.2	57.5
叶菜类 Leaf vegetables	147.2 ± 9.2	197.0 ± 19.6	107.4 ± 8.8	451.6 ± 28.5	43.6	73.6	55.0	37.8
其他 Others	102.3 ± 26.6	95.0 ± 24.7	95.0 ± 24.7	292.2 ± 76.0	51.5	67.1	67.1	62.1
平均 Mean	128.3 ± 7.6	174.7 ± 12.8	87.8 ± 7.1	390.9 ± 23.1	39.0	55.3	38.7	44.8
塑料大棚 Plastic greenhouse								
白菜类 Chinese cabbages	112.8 ± 26.5	177.3 ± 66.3	72.3 ± 26.0	362.5 ± 91.0	52.2	87.9	74.7	70.4
豆类 Legumes	60.7 ± 13.0	64.0 ± 18.0	48.4 ± 12.2	173.1 ± 38.5	27.8	40.6	34.1	33.4
甘蓝类 Cabbages	126.7 ± 30.4	231.6 ± 89.0	31.3 ± 21.9	389.5 ± 113.0	28.4	80.1	35.2	47.3
根茎类 Rhizome vegetables	97.3 ± 14.0	128.2 ± 21.2	76.6 ± 13.4	302.2 ± 41.3	51.6	64.9	44.5	54.1
瓜类 Cucurbits	96.6 ± 14.3	117.5 ± 25.6	64.1 ± 11.9	278.2 ± 42.3	25.5	33.4	22.1	27.2
茄果类 Solanaceous fruits	137.9 ± 15.2	227.0 ± 38.3	73.1 ± 15.5	438.0 ± 52.4	35.7	50.0	23.8	58.6
叶菜类 Leaf vegetables	141.5 ± 14.5	240.7 ± 41.2	79.2 ± 12.0	461.7 ± 52.0	39.7	82.0	59.5	38.5
其他 Others	77.5 ± 38.8	67.5 ± 34.3	67.5 ± 34.4	212.5 ± 106.8	100.0	100.0	100.0	100.0
平均 Mean	108.2 ± 6.4	128.0 ± 13.6	67.8 ± 5.7	334.0 ± 20.5	35.1	55.3	32.8	41.6

表 4 天津市不同区域设施菜地基施化肥养分及其占化肥总养分投入量的比例

Table 4 Rates of basal chemical fertilizer nutrients and their proportions in the total nutrient inputs of fertilizer in greenhouse vegetable fields at different regions in Tianjin

种植区域 District	养分率 Nutrient rate (kg/hm ²)				比例 Proportion (%)			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量 Total	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量 Total
北辰区 Beichen	130.1 ± 17.5	347.1 ± 46.7	0.0	477.3 ± 61.2	23.4	87.3	0.0	48.3
宝坻区 Baodi	169.7 ± 29.3	277.1 ± 77.2	99.1 ± 24.0	545.8 ± 102.6	31.3	29.9	21.3	31.2
滨海新区 Binhaxinqu	163.1 ± 17.7	285.7 ± 41.8	82.9 ± 18.4	531.8 ± 59.3	34.8	70.2	40.6	49.2
静海区 Jinghai	169.6 ± 22.0	210.0 ± 35.4	121.5 ± 23.0	501.1 ± 67.6	62.8	64.1	50.9	59.9
蓟州区 Jizhou	84.2 ± 10.4	82.6 ± 12.9	74.9 ± 10.5	241.6 ± 30.9	29.3	38.2	30.7	32.3
宁河区 Ninghe	97.5 ± 11.8	157.9 ± 24.8	29.3 ± 6.6	284.7 ± 35.2	29.0	39.6	15.0	32.6
武清区 Wuqing	107.0 ± 6.6	123.2 ± 11.4	94.0 ± 6.5	324.1 ± 20.7	41.6	49.7	48.1	47.1
西青区 Xiqing	138.6 ± 17.5	196.3 ± 25.8	96.6 ± 16.6	431.5 ± 52.4	44.5	66.4	41.2	51.2

施用总量为 N 880.5 kg/hm²[24], 2018 年氮施用总量为 N 763.7 kg/hm² (本研究)。4 个时间段内的调查对象

都位于天津市主要蔬菜产区, 调查样本量较大, 结果具有可比性。据此, 我们推断近 10 年来天津市设

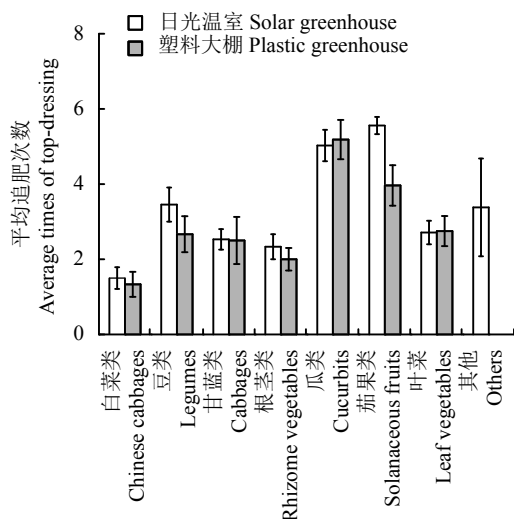


图4 天津市设施菜地平均追肥次数

Fig. 4 Averaged top-dressing times in greenhouse vegetable fields in Tianjin

施菜地施肥量存在降低的趋势。这可能与肥料成本的上升、测土配方施肥和新型水溶肥的推广应用有关。尽管如此, 2018年天津设施黄瓜氮施用总量和化肥氮施用量分别是各自推荐值的1.5~2.0倍和1.4~1.6倍, P_2O_5 施用总量和化肥 P_2O_5 施用量分别是各自推荐值的3.6~4.2倍和3.6倍, 化肥养分总量是推荐值的1.7~2.5倍。因此, 目前天津市设施菜地氮、磷肥施用存在一定程度的减施空间。

养分投入比例和追肥运筹存在问题。蔬菜有机肥养分用量占养分总用量(有机肥+化肥)的适宜比例一般为40%~50%^[2]。天津市日光温室和塑料大棚中有机肥氮施用量占总氮施用量的比例分别为57.6%和54.1%, 其中日光温室茄果类蔬菜和塑料大棚根茎类蔬菜有机肥养分比例较高, 其他蔬菜有机肥养分比例总体上较为适宜(表2)。与10年前调查结果(58.9%)相比^[5], 2018年天津市有机肥养分用量占养分总用量的比例(55.6%)稍有降低。说明种植户延续

表5 天津市不同类型设施蔬菜氮、磷、钾施用比例(N:P₂O₅:K₂O)Table 5 Average input ratios of N:P₂O₅:K₂O of different types of greenhouse vegetables in Tianjin

蔬菜类型 Vegetable type	有机养分比例 Ratio of manure nutrients	基施化肥养分比例 Ratio of basal applied chemical nutrients	追施化肥养分比例 Ratio of top-dressing chemical nutrients	养分总比例 Total nutrient input ratio
日光温室 Solar greenhouse				
白菜类 Chinese cabbages	1.00 : 0.80 : 0.53	1.00 : 2.01 : 0.38	1.00 : 0.26 : 0.26	1.00 : 0.91 : 0.44
豆类 Legumes	1.00 : 0.75 : 0.60	1.00 : 1.08 : 0.71	1.00 : 0.51 : 0.51	1.00 : 0.71 : 0.58
甘蓝类 Cabbages	1.00 : 0.66 : 0.51	1.00 : 0.87 : 0.10	1.00 : 0.26 : 0.12	1.00 : 0.50 : 0.26
根茎类 Rhizome vegetables	1.00 : 0.61 : 0.58	1.00 : 1.36 : 0.84	1.00 : 0.74 : 0.74	1.00 : 0.85 : 0.69
瓜类 Cucurbits	1.00 : 0.80 : 0.61	1.00 : 1.24 : 0.81	1.00 : 0.68 : 0.72	1.00 : 0.85 : 0.68
茄果类 Solanaceous fruits	1.00 : 0.96 : 0.69	1.00 : 1.33 : 0.72	1.00 : 0.98 : 1.00	1.00 : 1.00 : 0.77
叶菜类 Leaf vegetables	1.00 : 0.97 : 0.72	1.00 : 1.53 : 0.59	1.00 : 0.42 : 0.37	1.00 : 0.95 : 0.60
其他 Others	1.00 : 0.59 : 0.57	1.00 : 0.93 : 0.93	1.00 : 0.95 : 0.95	1.00 : 0.62 : 0.61
平均 Mean	1.00 : 0.89 : 0.67	1.00 : 1.18 : 0.68	1.00 : 0.70 : 0.69	1.00 : 0.92 : 0.69
塑料大棚 Plastic greenhouse				
白菜类 Chinese cabbages	1.00 : 0.91 : 0.67	1.00 : 1.57 : 0.64	1.00 : 0.23 : 0.23	1.00 : 0.92 : 0.53
豆类 Legumes	1.00 : 0.88 : 0.65	1.00 : 1.05 : 0.79	1.00 : 0.59 : 0.59	1.00 : 0.79 : 0.65
甘蓝类 Cabbages	1.00 : 0.92 : 0.65	1.00 : 1.82 : 0.24	1.00 : 0.18 : 0.18	1.00 : 0.76 : 0.38
根茎类 Rhizome vegetables	1.00 : 0.87 : 0.58	1.00 : 1.31 : 0.78	1.00 : 0.75 : 1.04	1.00 : 0.92 : 0.67
瓜类 Cucurbits	1.00 : 0.88 : 0.65	1.00 : 1.13 : 0.66	1.00 : 0.77 : 0.80	1.00 : 0.88 : 0.71
茄果类 Solanaceous fruits	1.00 : 0.76 : 0.66	1.00 : 1.61 : 0.55	1.00 : 0.89 : 0.99	1.00 : 0.94 : 0.69
叶菜类 Leaf vegetables	1.00 : 0.71 : 0.57	1.00 : 1.64 : 0.52	1.00 : 0.23 : 0.23	1.00 : 0.76 : 0.46
其他 Others	1.00 : 0.94 : 0.71	1.00 : 0.87 : 0.87		1.00 : 0.91 : 0.79
平均 Mean	1.00 : 0.82 : 0.60	1.00 : 1.48 : 0.65	1.00 : 0.63 : 0.69	1.00 : 0.87 : 0.63

表 6 天津市不同地区设施蔬菜氮、磷、钾施用比例 (N : P₂O₅ : K₂O)Table 6 Average input ratios of N : P₂O₅ : K₂O in greenhouse vegetable fields at different districts in Tianjin

种植区域 District	有机肥养分比例 Ratio of manure nutrients	基施化肥养分比例 Ratio of basal applied chemical nutrients	追施化肥养分比例 Ratio of top-dressing chemical nutrients	养分总比例 Total nutrient input ratio
北辰区 Beichen	1.00 : 0.93 : 0.67	1.00 : 2.66 : 0	1.00 : 0.10 : 0.10	1.00 : 0.76 : 0.22
宝坻区 Baodi	1.00 : 1.00 : 0.77	1.00 : 1.41 : 0.70	1.00 : 1.25 : 0.98	1.00 : 1.20 : 0.82
滨海新区 BinhaiXinqu	1.00 : 1.09 : 0.68	1.00 : 1.75 : 0.51	1.00 : 0.40 : 0.40	1.00 : 1.00 : 0.57
静海区 Jinghai	1.00 : 0.70 : 0.59	1.00 : 1.23 : 0.71	1.00 : 1.17 : 1.17	1.00 : 0.90 : 0.71
蓟州区 Jizhou	1.00 : 0.75 : 0.64	1.00 : 1.06 : 0.96	1.00 : 0.65 : 0.83	1.00 : 0.75 : 0.72
宁河区 Ninghe	1.00 : 1.03 : 0.69	1.00 : 1.61 : 0.41	1.00 : 0.72 : 0.69	1.00 : 1.00 : 0.63
武清区 Wuqing	1.00 : 0.87 : 0.67	1.00 : 1.12 : 0.94	1.00 : 0.75 : 0.67	1.00 : 0.89 : 0.71
西青区 Xiqing	1.00 : 0.76 : 0.57	1.00 : 1.41 : 0.69	1.00 : 0.57 : 0.79	1.00 : 0.83 : 0.64

了大量施用有机肥作为基肥的传统施肥方式。

蔬菜基肥养分用量占养分总用量的适宜比例一般为 50%~60%^[2]。天津市日光温室和塑料大棚基肥养分用量占养分总用量的比例分别为 77.7% 和 71.9% (表 2), 表明设施蔬菜基肥养分比例明显偏高, 需要降低基肥养分比例。设施蔬菜适宜的基施化肥养分用量占化肥养分总量的适宜比例为 15%~20%^[2]。天津市日光温室和塑料大棚的基施化肥养分比例分别为 44.8% 和 41.6%。天津设施蔬菜基施化肥养分比例普遍偏高而追肥养分比例过低 (表 3), 同时追肥次数偏少 (图 4), 说明种植户对设施蔬菜追肥运筹的掌控能力不足, 需要优化基施和追施养分投入比例。

设施蔬菜具有钾多磷少的需肥特点。一般吸收比例 N : P₂O₅ : K₂O 为 1.0 : 0.3~0.5 : 1.0~1.9^[2, 27]。天津市日光温室和塑料大棚总养分中 N : P₂O₅ : K₂O 分别为 1.00 : 0.92 : 0.69 和 1.00 : 0.87 : 0.63, 这表明氮、磷比例偏高而钾肥比例过低, 养分比例不协调^[2-3]。从菜地养分施用结构来看, 由于种植户偏向于采用富含磷肥的化肥 (如磷酸二铵和其他三元复合肥) 作为底肥和追肥 (图 1), 造成基施化肥和追肥的 P₂O₅ 比例偏高 (表 5、表 6)。天津市设施菜地 N 和 P₂O₅ 的施用量远大于推荐施肥量。土壤监测资料也表明, 天津设施菜地土壤氮、磷富集严重^[20]。因此, 天津市设施蔬菜需要合理调整养分比例协调供应, 特别要降低底肥和追肥的 P₂O₅ 施用量。

3.2 天津市设施菜地科学施肥对策

1) 避免养分投入过量。天津市设施蔬菜 N 和 P₂O₅ 总量和化肥施用量普遍过高, 而 K₂O 施用过量现象仅存在于茄子和番茄等茄果类蔬菜。由于茄果类蔬菜经济效益较好, 种植户具有更强的意愿购买

富钾复合肥或硫酸钾作为基肥或追肥。白菜和甘蓝的经济效益相对偏低, 钾肥投入不足。因此, 天津设施蔬菜肥料减量增效方案应该针对氮、磷肥过量投入, 尤其重点关注茄果类蔬菜和芹菜。

2) 注重养分比例协调供应。目前设施菜地有机肥 P₂O₅ 施用量能够满足大部分蔬菜磷肥吸收的需要。但种植户普遍采用高磷高钾的复合肥作为底肥和追肥, 导致磷肥施用过量, 氮磷钾养分比例不协调。建议根据不同蔬菜养分需求, 开发和推广适用于设施蔬菜基施和追施的低磷高钾肥料和富含有益微生物的菌肥^[2], 注重补充中微量元素, 提高蔬菜肥料利用率^[33]。

3) 重视有机肥施用标准和环境安全。目前设施蔬菜种植户倾向于采用鸡粪和猪粪为主要的有机肥, 而完全腐熟的商品有机肥和秸秆堆制的有机肥施用比例很低 (图 1)。持续多年过量施用畜禽粪肥引起土壤盐分和重金属离子的积累, 导致土壤质量退化^[7, 19]。建议对种植多年的设施菜地推广低盐而高有机质的秸秆有机肥, 及时改良土壤理化性质^[34], 避免因粪肥过量施用导致土壤质量退化。

4) 构建合理的追肥运筹方案。合理的追肥运筹方案应该基于蔬菜不同生育阶段的水、肥需求规律, 遵循养分供需平衡的原则, 分阶段进行合理追肥^[35-37]。天津市设施蔬菜基施养分比例偏高而追肥养分比例过低, 反映出施肥运筹方案和施肥技术存在不足。黄绍文等^[35-36]研发了适用于滴管技术的果菜专用肥, 并提出设施蔬菜水肥一体化精准管理技术, 能够实现设施蔬菜生产全程精准施肥。根据实地调查, 天津设施蔬菜灌溉主要采用管灌、沟灌和畦灌

表 7 天津市主要设施蔬菜养分推荐量和减施潜力估算
Table 7 Recommended rates and reduction potentials of nutrients in main greenhouse vegetable fields in Tianjin

蔬菜类型 Vegetable type	当前用量 Current application rate (kg/hm ²)				推荐量 Recommended rate (kg/hm ²)				减施潜力 Reduction potential (%) [#]							
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量 Total	N	P ₂ O ₅		K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量 Total			
						A	B	A	B					A	B	
养分总量 Total nutrient																
白菜 Pakchoi	454.8	415.9	215.1	1085.8	270.0	337.7	92.7	146.9	280.9	250.8	643.6	735.4	33.2	71.2	23.6	36.5
番茄 Tomato	1028.0	1043.4	780.4	2851.8	474.5	413.7	155.5	161.0	679.1	284.7	1309.1	859.4	56.8	84.8	38.2	62.0
甘蓝 Cabbage	549.9	332.1	171.8	1053.8	379.1	367.7	73.6	146.9	248.2	228.3	700.9	742.9	32.1	66.8	-38.7	31.5
黄瓜 Cucumber	763.7	685.1	493.9	1942.7	499.1	376.2	188.2	161.0	471.8	235.8	1159.1	773.0	42.7	74.5	28.0	50.3
茄子 Eggplant	1246.0	940.7	819.5	3006.2	591.8	368.7	147.3	138.5	586.4	269.7	1325.5	776.9	61.5	84.8	48.0	65.0
芹菜 Celery	876.7	771.5	542.2	2190.4	435.7*	337.7	171.3*	131.9	473.3*	198.3	1080.3	667.9	55.9	80.4	38.0	60.1
菠菜 Spinach	371.3	265.9	189.1	826.3	214.2*	230.4	59.1*	82.2	192.2*	141.5	465.5	454.1	40.1	73.4	12.0	44.4
化肥养分 Chemical fertilizer nutrient																
白菜 Pakchoi	231.0	230.2	87.7	548.9	148.5	217.5	51.0	97.5	154.5	165.0	354.0	480.0	20.8	67.7	-82.2	24.0
番茄 Tomato	386.0	454.4	351.6	1192.0	261.0	277.5	85.5	105.0	373.5	187.5	720.0	570.0	30.2	79.0	20.2	45.9
甘蓝 Cabbage	338.0	168.9	50.8	557.7	208.5	217.5	40.5	97.5	136.5	165.0	385.5	480.0	37.0	59.1	-196.8	22.4
黄瓜 Cucumber	391.8	375.9	262.4	1030.1	274.5	240.0	103.5	105.0	259.5	150.0	637.5	495.0	34.3	72.3	22.0	45.0
茄子 Eggplant	729.1	455.1	455.1	1639.3	325.5	232.5	81.0	75.0	322.5	172.5	729.0	480.0	61.7	82.9	45.6	63.1
芹菜 Celery	430.7	345.8	223.1	999.6	239.6*	217.5	94.2*	82.5	260.3*	112.5	256.0	412.5	46.9	74.5	16.5	66.6
菠菜 Spinach	247.1	177.7	123.3	548.1	148.5*	217.5	51.0*	52.5	154.5*	97.5	354.0	367.5	25.9	70.9	-2.2	34.2

注 (Note) : A—国家大宗蔬菜产业技术体系土壤肥料团队推荐量^[2], 其中, 带 * 号为该团队天津市设施菜地推荐施肥量^[24] The recommended fertilizer rates by the Vegetable Nutrient Management Team of China Agriculture Research System^[2], those with * are recommendation for Tianjin^[24]; B—北京市土肥站中等肥力菜田推荐施肥量^[27] The recommended fertilizer rates by Beijing Soil and Fertilizer Technology Extension Station for medium soil fertility vegetable fields in Beijing^[27]; #—根据 A 和 B 计算各自养分相对减施潜力的算术平均值 Arithmetic mean of relative reduction potential according to the A and B values.

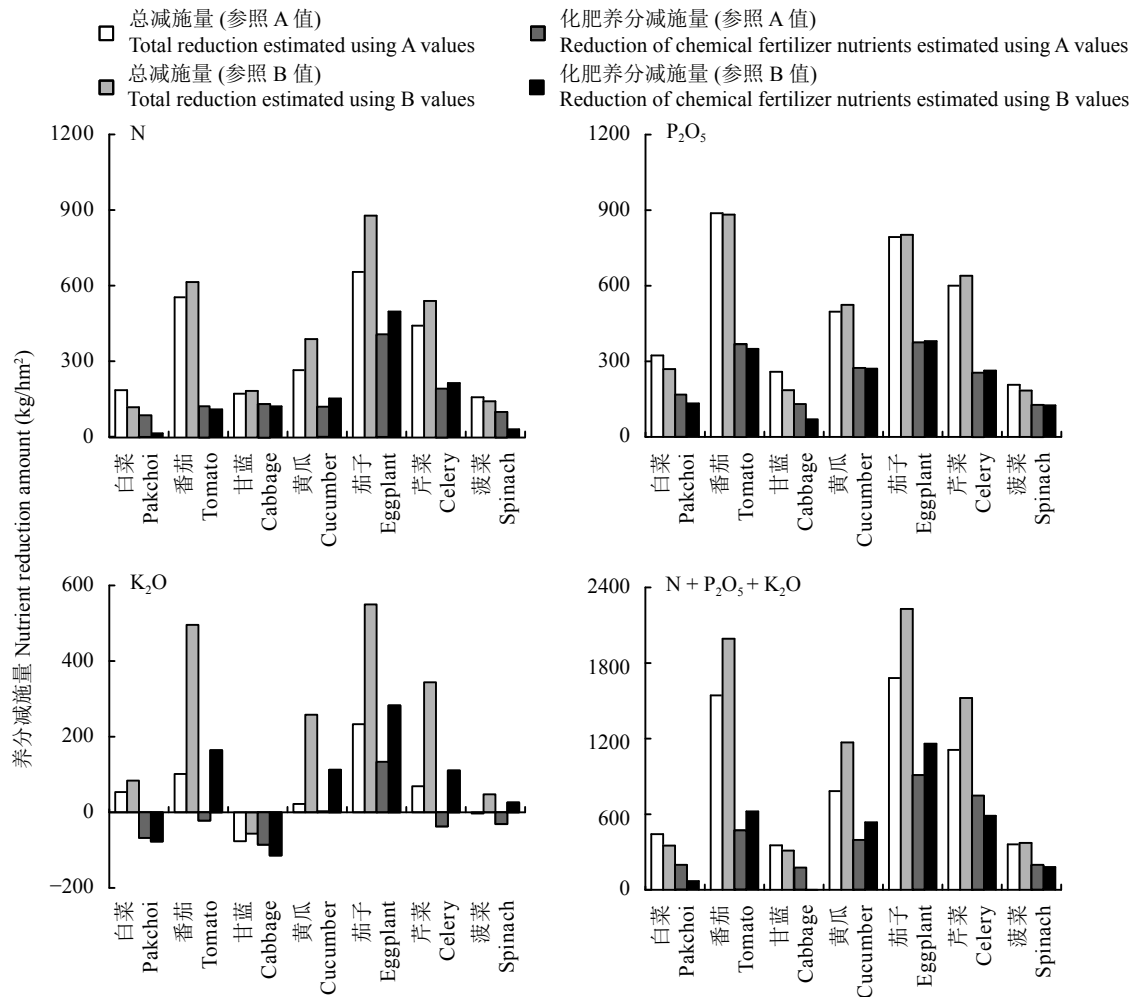


图5 天津市主要设施蔬菜总养分和化肥养分减施量估算

Fig. 5 Estimated reduction of total and chemical nutrient inputs in main greenhouse vegetables in Tianjin

[注 (Note): A 值为国家大宗蔬菜产业技术体系土壤肥料团队推荐结果^[2,24] A values are the recommended nutrient amounts by the Vegetable Nutrient Management Team of China Agriculture Research System^[2,24]; B 值为北京市土肥站中等肥力条件菜田推荐施肥量^[27] (表 7) B values are the recommended nutrient amounts by Beijing Soil and Fertilizer Technology Extension Station for middle fertility vegetable fields in Beijing^[27] (Table 7).]

表 8 不同地区设施黄瓜平均总养分投入量、肥料成本、产量和净利润

Table 8 Averaged total nutrients input, fertilizer cost, yield and net profit of cucumber in greenhouse vegetable fields

省份 Province	总养分投入量 (kg/hm ²) ^[28-31] Total nutrient input	肥料成本 (yuan/hm ²) ^[32] Fertilizer cost	产量 (kg/hm ²) ^[32] Yield	净利润 (yuan/hm ²) ^[32] Net profit
北京 Beijing	3750.0	8157.0	86760.0	105075.0
河北 Hebei	3493.0	11800.5	112860.0	104370.0
山东 Shandong	5146.0	14068.5	113370.0	87975.0
陕西 Shaanxi	2235.0	4806.0	74850.0	163035.0
天津 Tianjian	1941.0	2823.0	72795.0	89355.0
全国平均 National average	3234.0	9904.5	85260.0	89580.0

(> 80%), 而采用水肥一体化的滴管技术仅存在于规模化经营模式的种植企业或示范基地。普通种植农户在购置和维护水肥一体化设备上存在困难, 导致

先进的减肥增效技术覆盖面较低。因此, 天津市需要加强设施蔬菜水肥一体化技术推广, 按照科学合理的追肥运筹方案进行精准施肥。

4 结论

1) 天津市日光温室 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用总量分别为 775.6、715.5 和 524.9 kg/hm²，显著大于塑料大棚对应养分施用总量 670.9、584.5 和 425.3 kg/hm²。设施菜地养分主要来源于有机肥 (> 50%)，茄果类蔬菜养分施用量最大。

2) 设施蔬菜养分施用以基肥为主，其中化肥基施比例偏高，追肥养分比例过低。天津市需要加强设施蔬菜水肥一体化技术推广，降低养分基施比例，提高追施比例。

3) 日光温室和塑料大棚肥料总养分中 N : P₂O₅ : K₂O 分别为 1.00 : 0.92 : 0.69 和 1.00 : 0.87 : 0.63，其中基施化肥和追施化肥中 P₂O₅ 比例偏高，而 K₂O 比例相对不足，养分投入比例不合理，施肥结构亟待调整。

4) 设施菜地 N 和 P₂O₅ 施用总量分别是各自推荐值的 1.3~3.4 倍和 2.3~6.8 倍，化肥 N 和 P₂O₅ 施用量分别是各自推荐值的 1.1~3.1 倍和 1.7~6.1 倍，化肥总养分施用量是推荐值的 1.1~3.9 倍。设施蔬菜中芹菜、茄子和番茄的化肥养分减施潜力较大，是肥料减施关注的重点。

致谢：对参与设施蔬菜施肥数据调研的北京农学院卓秀琼、张仕奇、张晓男、刘梦、武岳洋、章子含、白云轩等同学表示感谢！

参考文献：

- [1] 张真和. 我国设施蔬菜发展中的问题与对策[J]. 中国蔬菜, 2009, (1): 1-3.
Zhang Z H. Problems and countermeasures in development of greenhouse vegetables of China[J]. China Vegetable, 2009, (1): 1-3.
- [2] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493.
Huang S W, Tang J W, Li C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [3] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
Zhang F S, Chen X P, Chen Q. Fertilization guidelines for Chinese main crops[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [4] 董畔, 张成军, 彭正萍, 等. 京郊设施黄瓜氮素施用量的优化运筹研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1628-1635.
Dong P, Zhang C J, Peng Z P, et al. Nitrogen fertilizer optimization strategy for greenhouse cucumber production in Beijing suburbs[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(6): 1628-1635.
- [5] 郑育锁. 天津市设施蔬菜灌溉施肥情况调查[J]. 中国农技推广, 2012, 28(7): 44-46, 50.
Zheng Y S. Investigation of fertilization and irrigation status in greenhouse fields in Tianjin[J]. China Agricultural Technology Extension, 2012, 28(7): 44-46, 50.
- [6] 梁金凤, 贾小红, 金强, 等. 北京市设施蔬菜施肥状况变化分析[J]. 中国蔬菜, 2013, (19): 18-22.
Liang J F, Jia X H, Jin Q, et al. A analysis of changes in fertilization in greenhouse vegetables in Beijing[J]. China Vegetable, 2013, (19): 18-22.
- [7] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.
Liu Z H, Jiang L H, Zhang W J, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 296-303.
- [8] 张彦才, 李巧云, 翟彩霞, 等. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价[J]. 河北农业科学, 2005, (3): 61-67.
Zhang Y C, Li Q Y, Zhai C X, et al. The condition and appraisal of the vegetable apply fertilizer in greenhouse in Hebei Province[J]. Journal of Hebei Agricultural Science, 2005, (3): 61-67.
- [9] 王丽英, 赵小翠, 曲明山, 等. 京郊设施果类蔬菜土肥水管理现状及技术需求[J]. 华北农学报, 2012, 27(增刊): 298-303.
Wang L Y, Zhao X C, Qu M S, et al. The status and technique requirement of soil fertilization and irrigation for fruit vegetable in greenhouse[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(Suppl.): 298-303.
- [10] 姜玲玲, 赵同科, 杜连凤, 等. 设施菜地氮淋溶研究方法评价[J]. 北方园艺, 2018, 422(23): 156-163.
Jiang L L, Zhao T K, Du L F, et al. Evaluation of research methods for nitrogen leaching from greenhouse vegetable fields[J]. North Horticulture, 2018, 422(23): 156-163.
- [11] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 405-413.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405-413.
- [12] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 设施菜地土壤养分演变规律及对地下水威胁的研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 293-298.
Liu Z H, Jiang L H, Zhang W J, et al. Changes of soil nutrients in vegetable-greenhouse and its pollution to underground water[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 293-298.
- [13] Ren T, Christie P, Wang J, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(1): 25-33.
- [14] 新楠, 卢树昌, 王小波, 等. 天津市设施菜田氮投入状况评价与面源污染风险分析[J]. 河南农业科学, 2013, 42(6): 68-72.
Xin N, Lu S C, Wang X B, et al. Evaluation and analysis on nitrogen input status and non-point source pollution risk of greenhouse vegetable in Tianjin[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(6): 68-72.
- [15] 陈海燕, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地 N₂O 排放规律及影响因素研究[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (5): 5-10.
Chen H Y, Li H, Wang L G, et al. Characteristics and influencing factors on nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2012, (5): 5-10.
- [16] 杨岩, 孙钦平, 李吉进, 等. 不同水肥处理对设施菜地 N₂O 排放的

- 影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 430–436.
- Yang Y, Sun Q P, Li J J, *et al.* Effects of different fertilizer and irrigation levels on N₂O emission from greenhouse vegetable lands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 430–436.
- [17] 习斌, 张继宗, 左强, 等. 保护地菜田土壤氨挥发损失及影响因素研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 327–333.
- Xi B, Zhang J Z, Zuo Q, *et al.* Study on the losing of ammonia volatilization and its influencing factors on the protected vegetable fields' soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 327–333.
- [18] 孙猛, 徐媛, 刘茂辉, 等. 天津市农田氮肥施用氨排放量估算及分布特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(10): 1364–1370.
- Sun M, Xu Y, Liu M H, *et al.* Emission and distribution characteristics of ammonia from nitrogen application in farmland of Tianjin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(10): 1364–1370.
- [19] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 843–850.
- Zhang T L, Li Z P, Wang X X. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 843–850.
- [20] 程文娟, 潘洁, 吕雄杰, 等. 天津市设施蔬菜土壤硝态氮状况研究[J]. *天津农业科学*, 2012, 18(2): 91–94.
- Cheng W J, Pan J, Lü X J, *et al.* Current soil NO₃-N status of greenhouse vegetable cultivation in Tianjin[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2012, 18(2): 91–94.
- [21] 赵秋, 宁晓光, 郑鹤龄, 等. 天津宁河区设施土壤盐分特性调查[J]. *天津农业科学*, 2010, 16(5): 15–17.
- Zhao Q, Ning X G, Zheng H L, *et al.* Study on salinity change of greenhouse soil in Ninghe area[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2010, 16(5): 15–17.
- [22] 沈高峰, 刘慧芹. 天津设施蔬菜产业现状·问题以及对策[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(31): 200–201, 204.
- Shen G F, Liu H Q. Current situation, problem and countermeasure of protected vegetable industry in Tianjin[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2018, 46(31): 200–201, 204.
- [23] 王静, 曾玉珍. 天津蔬菜产业发展现状与发展对策分析[J]. *天津农业科学*, 2018, 24(10): 13–16.
- Wang J, Zen Y Z. Problem and development countermeasure of protected vegetable industry in Tianjin[J]. *Journal of Tianjin Agricultural Science*, 2018, 24(10): 13–16.
- [24] 张怀志, 唐继伟, 袁硕, 等. 津冀设施蔬菜施肥调查分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (2): 54–60.
- Zhang H Z, Tang J W, Yuan S, *et al.* Investigation and analysis of greenhouse vegetable fertilization in Tianjin and Hebei Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (2): 54–60.
- [25] 张振贤. 蔬菜栽培学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- Zhang Z X. Vegetable cultivation[M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2003.
- [26] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 179–184.
- Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179–184.
- [27] 赵永志. 蔬菜测土配方施肥技术理论与实践[M]. 北京: 中国农业科
- 学技术出版社, 2009.
- Zhao Y Z. Theory and practice on soil testing and fertilizer recommendation in vegetable fields[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2009.
- [28] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2016.
- Guo J H. Inputs of irrigation water, fertilizers, pesticides and life cycle assessment of environment impacts from typical greenhouse vegetable production systems in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2016.
- [29] 高峻岭, 宋朝玉, 黄绍文, 等. 青岛市设施蔬菜施肥现状与土壤养分状况[J]. *山东农业科学*, 2011, (3): 68–72.
- Gao J L, Song C Y, Huang S W, *et al.* The current situation of fertilization and soil fertility in vegetable fields in Qingdao[J]. *Journal of Shandong Agricultural Science*, 2011, (3): 68–72.
- [30] 王蓉, 王礼焦, 孙潇潇. 连云港市设施蔬菜施肥与土壤养分状况分析[J]. *山西农业科学*, 2016, 44(2): 204–208, 231.
- Wang R, Wang L J, Sun X X. The current situation of fertilization and soil fertility in vegetable fields in Lianyungang[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2016, 44(2): 204–208, 231.
- [31] 李茹, 胡凡, 李水利, 等. 陕西省设施蔬菜施肥现状评价[J]. *现代农业科技*, 2018, (16): 53–55, 59.
- Li R, Hu F, Li S L, *et al.* Assessment of current situation of fertilization in vegetable fields in Shaanxi[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, (16): 53–55, 59.
- [32] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编(2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Department of Price of National Development and Reform Commission. National agricultural production cost and revenue information summary(2018)[M]. Beijing: China Statistic Press, 2019.
- [33] 付丽军, 张爱敏, 王向东, 周国顺. 生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (3): 1–5.
- Fu L J, Zhang A M, Wang X D, *et al.* Advances on application of bio organic fertilizer for restoring facility vegetable soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (3): 1–5.
- [34] 李尚科, 沈根祥, 郭春霞, 等. 有机肥及秸秆对设施菜田次生盐渍化土壤修复效果研究[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(2): 60–62, 73.
- Li S K, Shen G X, Guo C X, *et al.* Effect of manure and straw on secondary salinity soil of greenhouse[J]. *Journal of Guangdong Agricultural Science*, 2012, 39(2): 60–62, 73.
- [35] 黄绍文, 唐继伟, 张怀志, 等. 设施蔬菜生产全程精准施肥解决方案的制订与实施[J]. *中国蔬菜*, 2017, (7): 5–8.
- Huang S W, Tang J W, Zhang H Z, *et al.* Development and implementation of accurate fertilization solution for the whole process of vegetable production[J]. *China Vegetables*, 2017, (7): 5–8.
- [36] 黄绍文, 唐继伟, 殷学云, 等. 日光温室有机基质栽培黄瓜水肥一体化技术方案[J]. *中国蔬菜*, 2017, (8): 94–96.
- Huang S W, Tang J W, Yin X Y, *et al.* Drip fertigation technology of greenhouse cucumber based on management strategy at different growth stages[J]. *China Vegetables*, 2017, (8): 94–96.
- [37] 黄绍文, 唐继伟, 张怀志, 等. 基于发育阶段设施果菜滴灌专用肥的研制及应用[J]. *中国果菜*, 2017, 37(7): 34–36, 40.
- Huang S W, Tang J W, Zhang H Z, *et al.* The development and application of drip irrigation special-purpose fertilizer based on management strategy at different growth stages in greenhouse fruit vegetable production[J]. *China Fruit Vegetable*, 2017, 37(7): 34–36, 40.