植物营养与肥料学报 2017, 23(6): 1480–1493 doi: 10.11674/zwyf.17366
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策

黄绍文，唐继伟，李春花，张怀志，袁 硕
（中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室，北京 100081）

摘要: 本文基于国家大宗蔬菜产业技术体系养分管理岗位团队“十一五”和“十二五”计划对全国蔬菜的试验和调查结果 (共 1227 个农户地块，其中 578 个设施蔬菜地块，649 个露地蔬菜地块)，细致分析了我国蔬菜化肥和有机肥使用本底及施肥中存在的主要问题。分析结果表明，1) 我国蔬菜化肥养分 ($N + P_2O_5 + K_2O$) 用量平均为 1092.0 kg/hm^2，是全国农作物化肥养分用量 (328.5 kg/hm^2) 的 3.3 倍，其中设施和露地蔬菜化肥养分用量平均分别为 1354.5 和 859.5 kg/hm^2，分别是全国农作物化肥养分用量的 4.1 和 2.6 倍。2) 我国蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 中氮、磷和钾各自总用量普遍超量，主要设施蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是各自推荐量的 1.9、5.4 和 1.6 倍，主要露地蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是各自推荐量的 2.7、5.9 和 1.5 倍，区域间蔬菜肥料养分用量不均衡现象突出，蔬菜种类间肥料养分用量差异大。3) 有机肥和基施化肥中的 N、P_2O_5、K_2O 比例不合理，P_2O_5 占比明显过高。设施栽培蔬菜总养分投入、有机肥养分和基施化肥养分 N：P_2O_5：K_2O 分别为 1.00：0.85：0.94、1.00：1.10：0.88 和 1.00：0.95：1.09；露地蔬菜三者比例平均分别为 1.00：0.63：0.56、1.00：1.01：0.84 和 1.00：0.90：0.67。4) 基肥化肥养分用量比例普遍过高，设施和露地蔬菜平均分别达到 45.7% 和 51.0%，其中华北、华东、华中和西南地区设施蔬菜基肥化肥养分比例平均在 45.5%～68.7% 之间，华中地区露地蔬菜基肥化肥养分比例平均高达 63.0%。5) 按合理施肥条件下设施蔬菜有机肥替代化肥 45%、露地蔬菜有机肥替代化肥 35% 的比例估算，主要设施蔬菜化肥养分减施潜力平均在 34.8%～67.1% 之间，主要露地蔬菜化肥养分减施潜力在 41.9%～76.8% 之间。我国主要菜区今后在减少 N、P_2O_5、K_2O 投入总量的同时，应高度重视协调 N、P_2O_5、K_2O 比例以及化肥的基追肥比例，改进磷肥使用策略，并制订化肥精准减量、有机肥替代化肥、施用专用新型化肥、推广水肥一体化技术等技术对策。

关键词: 蔬菜；化肥养分投入；有机肥养分投入；化肥减量潜力；化肥科学施用对策

Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China

HUANG Shao-wen, TANG Ji-wei, LI Chun-hua, ZHANG Huai-zhi, YUAN Shuo
(*Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The vegetable nutrient management team of CARS-23 (China Agriculture Research System) has investigated the fertilization situation in 1227 farmers' vegetable plots, including 578 greenhouse vegetable plots and 649 open field vegetable plots around China. The acquired data were summarized in this paper, and the problems existed were as follows，1) The average amount of nutrient ($N + P_2O_5 + K_2O$) from chemical fertilizers in vegetables production was 1092.0 kg/hm^2, which was 3.3 times as high as that of crops in China (328.5 kg/hm^2). The average chemical nutrient application in greenhouse and open field vegetable were respectively 1354.5 and 859.5 kg/hm^2, which were respectively 4.1 and 2.6 times as high as that of crops in our country. 2) The N, P_2O_5 and K_2O inputs from both the chemical fertilizers and organic manure were all excessive,

收稿日期： 2017–09–21 **接受日期：** 2017–10–24
基金项目： 现代农业产业技术体系建设专项（CARS-23-B02）；国家重点研发计划项目（2016YFD0201000，2016YFD0801006）；山东省重点研发计划项目（2017CXGC0206）；中国农业科学院科技创新工程协同创新任务（CAAS-XTCX2016003）资助。
作者简介： 黄绍文（1964—），男，湖南桃源人，博士，研究员，主要从事蔬菜营养与高效施肥研究工作。
Tel：010-82108662；E-mail：huangshaowen@caas.cn

the N, P_2O_5 and K_2O inputs in the greenhouse vegetables are respectively 1.9, 5.4, 1.6 times of those recommended, and those in the open fields were 2.7, 5.9, 1.5 times. 3) The fertilization was not balance generally in all the surveyed main vegetable production regions. The average ratio of N：P_2O_5：K_2O input in the total nutrients (including chemical fertilizers and organic manures), in organic manures and in basal-applied chemical fertilizers was respectively 1.00：0.85：0.94, 1.00：1.10：0.88, and 1.00：0.95：1.09 in the greenhouses, and 1.00：0.63：0.56, 1.00：1.01：0.84, and 1.00：0.90：0.67 in the open fields. P_2O_5 input was obviously too high in the total nutrient inputs (chemical fertilizers + organic manures), organic manures and basal applied chemical fertilizers. 4) The basal-applied ratio of chemical fertilizer nutrients (N + P_2O_5 + K_2O) was commonly too high in both greenhouse and open field vegetables, with the average ratio of 45.7% and 51.0%, respectively. Thereinto, the average ratio in greenhouse in North, East, Central, and Southwestern ranged from 45.5% to 68.7%, and that was as high as 63.0% in open fields in Central China. 5) For rational fertilization, in which the chemical nutrients were substituted with 45% of organic manure in greenhouse vegetable and 35% in open field vegetable, the average reduction potential of nutrients from chemical fertilizers in main greenhouse vegetables and open field vegetables was respectively 34.8%–67.1% and 41.9%–76.8%. We should pay much more attention on coordinating N：P_2O_5：K_2O ratio and basal-topdressing ratio of chemical fertilizers, and decreasing the P_2O_5 application ratios. In addition, developing countermeasures about the efficient technologies of chemical fertilizer reduction, chemical fertilizers substituted with organic manure, new special-purpose fertilizer application, drip fertigation technology promotion are needed.

Key words: vegetable; chemical fertilizer nutrient input; organic manure nutrient input; potential of chemical fertilizer reduction; scientific countermeasure of chemical fertilizer application

蔬菜是城乡居民生活必不可少的重要农产品。我国是世界上最大的蔬菜生产国和消费国，播种面积和产量均占世界的 40% 以上。2015 年我国蔬菜播种面积约 3.30 亿亩，总产量约 7.69 亿吨，播种面积仅约占农作物总播种面积的 1/8，但产值占种植业总产值的 30% 以上[1]。其中设施蔬菜已达到 5800 多万亩，产值占蔬菜总产值的 50% 以上。蔬菜产业在保障市场供应、增加农民收入、拓展出口贸易等方面发挥了极其重要的作用。

化肥是蔬菜优质高产的物质基础。科学施用化肥的目标是最大限度发挥化肥的正面作用和减少化肥的负面影响。然而，蔬菜尤其是设施蔬菜栽培中化肥过量和不合理施用不仅导致化肥利用率和生产效益低下，还导致土壤有机质含量降低、速效养分 (氮、磷等) 大量富集、次生盐渍化、重金属积累、蔬菜可食部分和地下水硝酸盐超标等一系列较为严重的问题，严重制约着我国蔬菜产业的可持续发展[2–6]。

查明蔬菜化肥使用本底及施肥中存在的主要问题，是蔬菜化肥科学施用的基础。蔬菜肥料使用调查方面已有许多报道。Huang 等[7]对北京市、天津市、河北省和山东省 4 个省市 10 个区市县的肥料使用情况调查表明，设施蔬菜和露地蔬菜的总施肥量 (养分) 分别为粮食作物的 5.2 倍和 2.5 倍；余海英等[8]对山东省寿光市温室蔬菜种植情况的调查显示，有机肥以鸡粪和猪粪为主，56% 的温室全部用高浓度复合肥 (N-P_2O_5-K_2O=15-15-15)，温室栽培每年 N、P_2O_5 和 K_2O 的平均投入量分别达到 4088、3656 和 3438 kg/hm^2，化肥养分用量过大、比例严重失衡；高峻岭等[9]对山东省青岛市设施蔬菜施肥情况进行了调查，从养分平衡角度分析了设施黄瓜和番茄 N、P_2O_5 和 K_2O 过量施用问题；王蓉等[10]调查了江苏省连云港市 500 个温室大棚的施肥情况，认为大多数大棚生产采用高氮、极高磷和高钾施肥模式，养分投入不平衡；冯武焕等[11]对陕西省西安市设施菜地施肥情况调查表明，N、P_2O_5 和 K_2O 用量平均分别达到 868.5～883.5、544.5～684.0 和 496.5～724.5 kg/hm^2，设施蔬菜化肥用量超量。但应该看到，这些调查涉及露地蔬菜很少，对全国主要菜区及主要蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 养分用量及比例、有机肥养分用量及比例、基施与追施化肥养分用量及比例等涉及养分管理对策方面较为系统的调查分析结果鲜见报道。为此，2013～2015 年国家大宗蔬菜产业技术体系开展了全国主要菜区肥料使用本底的调查工作，以对全国蔬菜优势产区化肥、有机肥使用情况有一个比较全面的了解，明确主要菜区及主要蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 养分用量及比例、有机肥养分

用量及比例、基施与追施化肥养分用量及比例、化肥减施潜力等，为制订蔬菜化肥减施增效技术对策提供依据，对推动蔬菜优质高效生产和实现到2020 年化肥零增长具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 肥料使用情况调查

调查范围包括 7 个区域 (北方 3 个区域为东北、华北、西北，南方 4 个区域为西南、华中、华南和华东地区)23 个省 (直辖市、自治区) 132 县 (市)。调查对象为设施 (温室、大棚) 和露地菜田 2 种栽培方式。选择典型设施和露地菜区，根据茬口、蔬菜种类等，采用预先制订的调查表，逐户实地通过问答调查 2013～2015 年设施和露地蔬菜化肥、有机肥使用情况 (种类、基肥/追肥数量、养分含量、基肥/追肥方法、追肥时间和次数，以及蔬菜产量等)；仔细查询农户所用化学肥料包装袋，记录不同肥料养分含量；采集部分有机肥样品，测定其氮、磷和钾含量。设施蔬菜主要为番茄、黄瓜、辣椒、茄子、芹菜等，露地蔬菜主要为辣椒、白菜、大白菜、甘蓝、番茄、黄瓜、萝卜、茄子、四季豆等。从全国主要设施和露地菜区共调查 1227 个农户地块，其中设施蔬菜 578 个农户地块，露地蔬菜 649 个农户地块 (表 1，表 2)。选择的每个县 (市) 都是设施或露地蔬菜优势产区，从每个县 (市) 选择的蔬菜基地都是典型设施或露地蔬菜基地，从每个典型蔬菜基地选择典型农户地块开展蔬菜施肥现状调查，每个农户地块均具有较好代表性。按不同栽培方式下主要蔬菜种类统计，设施番茄、黄瓜、辣椒和茄子的施肥调查样本数目分别为 171、154、68 和 37 个地块，露地辣椒、白菜、大白菜和甘蓝的施肥调查样本数目分别为 88、63、45 和 32 个地块 (样本数目小于 30 个的蔬菜不作统计)；按不同区域不同栽培方式蔬菜统计，自东北区、华北区、华东区、华中区和西南区采集的设施蔬菜施肥调查样本数目分别为 90、316、49、53 和 41 个地块，自华北区、华南区、华中区和西南区采集的露地蔬菜施肥调查样本数目分别为 97、81、302 和 103 个地块 (样本数目小于 30 个的区域不作统计)。

1.2 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 统计软件进行数据分析。

1) 养分推荐量计算采用近些年黄绍文等[12]研制的基于土壤养分系统管理理念的蔬菜施肥量简便快速推荐方法，养分推荐量 = 养分吸收量 × 校正系数，其中养分吸收量 = 目标产量 × 单位产量养分吸收量。不同土壤肥力水平下养分吸收量的校正系数的确定是该方法的核心，依据蔬菜养分循环特征参数确定不同土壤肥力水平下养分吸收量的校正系数，水肥一体化下中肥力水平土壤的 N、P_2O_5 和 K_2O 吸收量校正系数分别为 1.35、1.0 和 1.0。水肥一体化条件下中等肥力水平土壤的氮、磷、钾推荐量按如下模型进行估算：氮推荐量 = 氮吸收量 × 1.35；P_2O_5 推荐量 = P_2O_5 吸收量 × 1.0；K_2O 推荐量 = K_2O 吸收量 × 1.0。优化灌溉 (如基于灌溉减量的膜下沟灌) 下氮磷钾推荐量按滴灌条件氮磷钾推荐量增加 15% 估算；表 3 中养分推荐量指优化灌溉下氮磷钾推荐量。主要蔬菜单位产量 (1 t 产品) 养分吸收量数据 (表 3) 为国家大宗蔬菜体系土壤肥料团队 2009～2016 年多点肥料试验结果，番茄、黄瓜、辣椒、茄子、大白菜、甘蓝等主要蔬菜单位产量养分吸收量统计的样本数目分别为 151、136、54、30、70 和 48。菜田土壤中等肥力水平标准参见文献[4]。

2) 养分施用量超出倍数 = (养分施用量/养分推荐量) – 1。

3) 有机肥养分比例 = (有机肥养分用量/养分总用量) × 100%，其中养分总用量 = 有机肥养分用量 + 化肥养分用量。

4) 基肥养分比例 = (基施养分用量/养分总用量) × 100%，其中养分总用量 = 基施养分用量 + 追肥养分用量。

5) 基施化肥养分比例 = (基施化肥养分用量/化肥养分总量) × 100%，其中化肥养分总量 = 基施化肥养分用量 + 追施化肥养分用量。

6) 化肥养分推荐量按上述 1) 中养分推荐量和合理施肥条件下设施蔬菜有机肥替代化肥 45% (化肥养分用量比例为 55%)、露地蔬菜有机肥替代化肥 35% (化肥养分用量比例为 65%) 的比例估算，其中上述 1) 中养分推荐量 = 化肥养分用量 + 有机肥养分用量。

7) 化肥养分减施潜力 = [(化肥养分推荐量 – 化肥养分施用量)/化肥养分施用量] × 100%。

2 结果与分析

2.1 我国蔬菜施肥现状

2.1.1 蔬菜肥料养分投入情况

2.1.1.1 蔬菜化肥养分用量情况 从表 1 和表 2 可以

表 1　主要蔬菜肥料使用情况 (kg/hm²)

Table 1　Average fertilizer input in main vegetables

栽培方式 Land use pattern	蔬菜种类 Vegetable type	样本数 Sample No.	化肥养分用量 Nutrients from chemical fertilizers			有机肥养分用量 Nutrients from organic manure			养分总量 Total		
			N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
设施栽培 Greenhouse cultivation	番茄 Tomato	171	514.5 ± 511.5	381.0 ± 369.0	570.0 ± 624.0	366.0 ± 360.0	414.0 ± 406.5	310.5 ± 316.5	880.5 ± 610.5	795.0 ± 558.0	879.0 ± 739.5
	黄瓜 Cucumber	154	684.0 ± 1590.0	504.0 ± 1119.0	751.5 ± 2166.0	438.0 ± 501.0	451.5 ± 538.5	406.5 ± 516.0	1122.0 ± 1654.5	954.0 ± 1242.0	1158.0 ± 2226.0
	辣椒 Pepper	68	384.0 ± 217.5	270.0 ± 169.5	354.0 ± 235.5	214.5 ± 234.0	243.0 ± 354.0	186.0 ± 223.5	598.5 ± 358.5	513.0 ± 409.5	540.0 ± 387.0
	茄子 Eggplant	37	504.0 ± 468.0	274.5 ± 178.5	339.0 ± 184.5	300.0 ± 222.0	367.5 ± 390.0	253.5 ± 214.5	802.5 ± 601.5	643.5 ± 412.5	592.5 ± 268.5
	平均 Mean	578	505.5 ± 898.5	349.5 ± 633.0	498.0 ± 1192.5	309.0 ± 370.5	339.0 ± 421.5	271.5 ± 357.0	816.0 ± 979.5	690.0 ± 780.0	769.5 ± 1269.0
露地栽培 Field cultivation	辣椒 Pepper	88	430.5 ± 244.5	274.5 ± 159.0	273.0 ± 171.0	96.0 ± 106.5	105.0 ± 124.5	81.0 ± 93.0	528.0 ± 247.5	379.5 ± 186.0	354.0 ± 199.5
	白菜 Pakchoi	63	607.5 ± 459.0	184.5 ± 139.5	145.5 ± 109.5	136.5 ± 132.0	136.5 ± 150.0	142.5 ± 174.0	744.0 ± 460.5	321.0 ± 163.5	289.5 ± 190.5
	大白菜 Chinese Cabbage	45	424.5 ± 204.0	199.5 ± 105.0	163.5 ± 141.0	180.0 ± 304.5	142.5 ± 195.0	171.0 ± 267.0	604.5 ± 337.5	343.5 ± 237.0	334.5 ± 280.5
	甘蓝 Cabbage	32	352.5 ± 121.5	151.5 ± 75.0	156.0 ± 99.0	118.5 ± 153.0	103.5 ± 117.0	100.5 ± 132.0	472.5 ± 187.5	255.0 ± 147.0	256.5 ± 157.5
	总平均 Mean	649	433.5 ± 322.5	219.0 ± 162.0	207.0 ± 171.0	135.0 ± 180.0	138.0 ± 205.5	114.0 ± 165.0	570.0 ± 348.0	357.0 ± 265.5	321.0 ± 235.5

注（Note）：样本数目小于 30 的不作统计 Data with sample size below 30 was not calculated.

表 2　主要菜区蔬菜化肥、有机肥养分投入量 (kg/hm²)

Table 2　Average fertilizer application amounts in main vegetable production regions

栽培方式 Land use pattern	主要菜区 Main vegetable production region	蔬菜产量 Vegetable yield (t/hm²)	样本数 Sample No.	化肥养分用量 Nutrients from chemical fertilizer			有机肥养分用量 Nutrients from organic manure			养分总量 Total		
				N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
设施栽培 Greenhouse cultivation	东北 Northeast China	136.5 ± 55.0	90	292.5 ± 184.5	240.0 ± 166.5	303.0 ± 208.5	259.5 ± 225.0	307.5 ± 325.5	187.5 ± 184.5	552.0 ± 283.5	547.5 ± 381.0	490.5 ± 312.0
	华北 North China	130.5 ± 79.7	316	576.0 ± 1177.5	397.5 ± 829.5	633.0 ± 1588.5	366.0 ± 432.0	388.5 ± 433.5	333.0 ± 418.5	942.0 ± 1252.5	786.0 ± 954.0	966.0 ± 1663.5
	华东 East China	120.3 ± 67.9	49	709.5 ± 352.5	445.5 ± 249.0	507.0 ± 214.5	298.5 ± 301.5	397.5 ± 523.5	237.0 ± 276.0	1008.0 ± 540.0	843.0 ± 513.0	745.5 ± 306.0
	华中 Central China	77.7 ± 40.1	53	270.0 ± 94.5	183.0 ± 88.5	207.0 ± 103.5	150.0 ± 187.5	90.0 ± 150.0	91.5 ± 129.0	420.0 ± 211.5	271.5 ± 181.5	298.5 ± 163.5
	西南 Southwest China	73.0 ± 41.7	41	445.5 ± 381.0	207.0 ± 114.0	342.0 ± 219.0	180.0 ± 339.0	261.0 ± 526.5	171.0 ± 340.5	625.5 ± 474.0	469.5 ± 529.5	513.0 ± 361.5
	总平均 Mean	118.3 ± 72.1	578	505.5 ± 898.5	349.5 ± 633.0	498.0 ± 1192.5	309.0 ± 370.5	339.0 ± 421.5	271.5 ± 357.0	816.0 ± 979.5	690.0 ± 780.0	769.5 ± 1269.0
露地栽培 Field cultivation	华北 North China	59.1 ± 24.6	97	420.0 ± 220.5	166.5 ± 130.5	171.0 ± 166.5	195.0 ± 291.0	144.0 ± 178.5	201.0 ± 271.5	615.0 ± 366.0	310.5 ± 249.0	372.0 ± 322.5
	华南 South China	47.1 ± 22.8	81	403.5 ± 225.0	328.5 ± 226.5	349.5 ± 247.5	117.0 ± 88.5	153.0 ± 141.0	112.5 ± 88.5	520.5 ± 240.0	481.5 ± 255.0	462.0 ± 261.0
	华中 Central China	50.7 ± 27.6	302	468.0 ± 391.5	223.5 ± 153.0	193.5 ± 150.0	99.0 ± 130.5	70.5 ± 115.5	61.5 ± 85.5	567.0 ± 378.0	294.0 ± 175.5	255.0 ± 169.5
	西南 Southwest China	64.2 ± 33.4	103	385.5 ± 211.5	151.5 ± 93.0	186.0 ± 118.5	153.0 ± 181.5	225.0 ± 282.0	150.0 ± 184.5	538.5 ± 270.0	376.5 ± 300.0	336.0 ± 217.5
	总平均 Mean	56.2 ± 34.2	649	433.5 ± 322.5	219.0 ± 162.0	207.0 ± 171.0	135.0 ± 180.0	138.0 ± 205.5	114.0 ± 165.0	570.0 ± 348.0	357.0 ± 265.5	321.0 ± 235.5

注（Note）：样本数目小于 30 个的区域不作统计 Data with sample size below 30 was not calculated.

看出，我国蔬菜化肥养分 ($N + P_2O_5 + K_2O$) 用量平均 1092.0 kg/hm² ($n = 1227$)，是全国农作物化肥养分平均用量 (328.5 kg/hm²) 的 3.3 倍，其中设施蔬菜化肥养分用量平均 1354.5 kg/hm² ($n = 578$)，是全国农作物化肥养分用量的 4.1 倍；露地蔬菜化肥养分用量平均 859.5 kg/hm² ($n = 649$)，是全国农作物化肥养分用量的 2.6 倍。

华北和华东地区设施蔬菜化肥养分用量 (平均分别为 1606.5 和 1662.0 kg/hm²) 显著高于东北、华中和西南地区 (平均分别为 835.5、660.0 和 994.5 kg/hm²)，华南和华中地区露地蔬菜化肥养分用量 (平均分别为 1081.5 和 885.0 kg/hm²) 显著高于华北和西南地区 (平均分别为 757.5 和 723.0 kg/hm²)。

设施黄瓜化肥养分用量 (平均 1939.5 kg/hm²) > 设施番茄 (平均 1465.5 kg/hm²) > 设施辣椒和茄子 (平均分别为 1008.0 和 1117.5 kg/hm²)，露地辣椒和白菜化肥养分用量 (平均分别为 978.0 和 937.5 kg/hm²) 显著高于露地大白菜和甘蓝 (平均分别为 787.5 和 660.0 kg/hm²)。

2.1.1.2 蔬菜有机肥养分用量情况 从表 1、表 2 可以看到，我国设施蔬菜有机肥养分用量总体上大幅高于露地蔬菜，区域间、蔬菜种类间有机肥养分用量不均衡现象突出。蔬菜有机肥养分 ($N + P_2O_5 + K_2O$) 用量平均 639.0 kg/hm² ($n = 1227$)，其中设施蔬菜有机肥养分用量平均 921.0 kg/hm² ($n = 578$)，露地蔬菜有机肥养分用量平均 387.0 kg/hm² ($n = 649$)。

华北和华东地区设施蔬菜有机肥养分用量 (平均分别为 1087.5 和 933.0 kg/hm²) > 东北和西南地区 (平均分别为 754.5 和 612.0 kg/hm²) > 华中地区 (平均 331.5 kg/hm²)，华北和西南地区露地蔬菜有机肥养分用量 (平均分别为 540.0 和 528.0 kg/hm²) > 华南地区 (平均 382.5 kg/hm²) > 华中地区 (平均 231.0 kg/hm²)。

设施黄瓜有机肥养分用量 (平均 1296.0 kg/hm²) > 设施番茄 (平均 1090.5 kg/hm²) > 设施茄子 (平均 921.0 kg/hm²) > 设施辣椒 (平均 643.5 kg/hm²)，露地白菜和大白菜有机肥养分用量 (平均分别为 415.5 和 493.5 kg/hm²) 显著高于露地辣椒和甘蓝 (平均分别为 282.0 和 322.5 kg/hm²)。

2.1.1.3 蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 养分总用量情况 由表 1 和表 3 可以看出，我国蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 氮、磷和钾各自总用量普遍超量，磷施用比例远超推荐比例，其中设施蔬菜肥料养分用量明显高于露地蔬菜。蔬菜肥料养分 (化肥和有机肥的 $N + P_2O_5 + K_2O$) 总用量平均 1731.0 kg/hm² ($n = 1227$)，其中设施蔬菜肥料养分总用量平均 2275.5 kg/hm² ($n = 578$)，较露地蔬菜 (平均 1246.5 kg/hm²，$n = 649$) 高 82.6%。主要蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别为 718.5、525.0 和 550.5 kg/hm²，分别超出其推荐量的 0.4～2.6、3.1～10.0 和 0.0～1.4 倍，平均分别超出其推荐量的 1.3、4.7 和 0.5 倍，其中主要设施蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别为 850.5、726.0 和 792.0 kg/hm²，较露地蔬菜 (平均分别为 588.0、325.5 和 309.0 kg/hm²) 分别高 44.9%、1.2 倍和 1.6 倍；主要设施蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是其推荐量的 1.9、5.4 和 1.6 倍，主要露地蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是其推荐量的 2.7、5.9 和 1.5 倍。

区域间蔬菜肥料养分用量差异大 (表 2)。华北和华东地区设施蔬菜肥料养分总用量 (平均分别为 2694.0 和 2596.5 kg/hm²) > 东北和西南地区 (平均分别为 1590.0 和 1608.0 kg/hm²) > 华中地区 (平均 990.0 kg/hm²)，华南地区露地蔬菜肥料养分总用量 (平均 1464.0 kg/hm²) > 华北和西南地区 (平均分别为 1297.5 和 1251.0 kg/hm²) > 华中地区 (平均 1116.0 kg/hm²)。

蔬菜种类间肥料养分用量差异也大 (表 1)。设施黄瓜肥料养分总用量 (平均 3234.0 kg/hm²) > 设施番茄 (平均 2554.5 kg/hm²) > 设施辣椒和茄子 (平均分别为 1651.5 和 2038.5 kg/hm²)，露地辣椒、白菜和大白菜肥料养分总用量 (平均分别为 1261.5、1354.5 和 1282.5 kg/hm²) 明显高于露地甘蓝 (平均 984.0 kg/hm²)。

2.1.2 蔬菜养分投入比例

2.1.2.1 设施蔬菜氮、磷、钾的施用比例 蔬菜要求钾多磷少，一般 $N : P_2O_5 : K_2O$ 的吸收比例为 1 : 0.3～0.5 : 1.0～1.9。由表 4 和表 5 可以看出，设施蔬菜施用的养分总量、有机肥和基施化肥中的 P_2O_5 占比明显过高，三者 $N : P_2O_5 : K_2O$ 的施用比例平均分别为 1.00 : 0.85 : 0.94、1.00 : 1.10 : 0.88 和 1.00 : 0.95 : 1.09，施用的 P_2O_5 占比远超蔬菜对磷的需求；追施化肥中的 P_2O_5 比例较为合适，$N : P_2O_5 : K_2O$ 的施用比例平均为 1.00 : 0.52 : 0.91。

主要设施菜区施用的养分总量、有机肥和基施化肥中 P_2O_5 比例普遍过高 (平均分别在 0.65～0.99、0.60～1.45 和 0.60～1.21 之间)，基施化肥中 P_2O_5 比例应大幅降低，东北、华北和华东地区追施化肥中 P_2O_5 比例 (0.47～0.68) 还可适当降低；华东、华中和西南地区施用的养分总量中 K_2O 比例偏低，追施化

表 3　主要蔬菜 1000 kg 经济产量养分吸收量、养分实际施用量与推荐施用量比值

Table 3　Nutrient uptake per 1000 kg economic yield and ratio of practical application and recommendation of nutrient in main vegetables

蔬菜种类 Vegetable type	产量 Yield (t/hm²)	1000 kg 经济产量养分吸收量 (kg) 1000 kg yield nutrient uptake			施用量/推荐量 Application/recommendation		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
设施栽培 Greenhouse cultivation							
番茄Tomato	135.0 ± 58.9	2.27	1.00	4.37	1.9	5.1	1.3
黄瓜 Cucumber	149.5 ± 77.0	2.15	1.10	2.75	2.2	5.0	2.4
辣椒 Pepper	83.5 ± 61.8	2.32	0.74	3.60	2.0	7.2	1.6
茄子 Egg plant	127.2 ± 79.7	3.00	1.00	4.00	1.4	4.4	1.0
露地栽培 Field cultivation							
辣椒 Pepper	40.5 ± 19.1	2.32	0.74	3.60	3.6	11.0	2.1
白菜 Pakchoi	70.8 ± 61.6	2.07	0.97	2.91	3.3	4.1	1.2
大白菜 Chinese cabbage	74.0 ± 24.5	2.07	0.97	2.91	2.5	4.2	1.4
甘蓝 Cabbage	68.4 ± 24.2	3.01	0.78	2.66	1.5	4.2	1.2

注（Note）：1) 主要蔬菜单位产量 (1 t 产品) 养分吸收量数据为国家大宗蔬菜体系土壤肥料团队 2009～2016 年多点肥料试验结果，番茄、黄瓜、辣椒、茄子、大白菜、甘蓝等主要蔬菜单位产量养分吸收量统计的样本数目分别为 151、136、54、30、70 和 48 Information about nutrient uptake amount per unit yield (1000 kg production) derived from a large number of studies of fertilization experiments for vegetable soil and fertilizer team of CARS-25 (China Agriculture Research System) during the period 2009 ~ 2016; numbers of statistical samples about nutrient uptake amount per unit yield were respectively 151, 136, 54, 30, 70 and 48 for tomato, cucumber, pepper, eggplant, Chinese cabbage, and cabbage. 2) 滴灌条件下氮磷钾推荐量按如下模型进行估算：中等肥力土壤条件下，氮推荐量 = 氮吸收量 × 1.35，P_2O_5 推荐量 = P_2O_5 吸收量 × 1.0，K_2O 推荐量 = K_2O 吸收量 × 1.0；优化灌溉 (如基于灌溉减量的膜下沟灌) 下氮磷钾推荐量按滴灌条件氮磷钾推荐量增加15%估算；本表中养分推荐量指优化灌溉下氮磷钾推荐量 Recommended amount of nitrogen, phosphorus and potassium in medium fertility soils under the condition of drip irrigation was estimated by the models as follows: recommended N amount = N uptake amount × 1.35, recommended P_2O_5 amount = P_2O_5 uptake amount × 1.0, recommended K_2O amount = K_2O uptake amount × 1.0; recommended amount of nitrogen, phosphorus and potassium under the condition of optimized furrow irrigation was estimated by the recommended amount mentioned above × 1.15; recommended nutrient amount in the table indicated the recommended amount of nitrogen, phosphorus and potassium under the condition of optimized furrow irrigation.

肥中 K_2O 比例 (0.50～0.68) 可适当增加。

主要设施蔬菜施用的养分总量、有机肥和基施化肥中 P_2O_5 比例普遍过高 (平均分别在 0.80～0.90、1.03～1.23 和 0.88～1.12 之间)，基施化肥中 P_2O_5 比例应大幅降低，追施化肥中 P_2O_5 比例 (0.40～0.63) 还可适当降低；设施茄子施用的养分总量中 K_2O 比例 (0.74) 偏低，追施化肥中 K_2O 比例 (0.60) 可适当增加。

2.1.2.2　露地蔬菜氮、磷、钾的施用比例　由表 4 和表 5 还可以看出，露地蔬菜施用的养分总量、有机肥和基施化肥中的 P_2O_5 占比偏高或过高，K_2O 占比过低或偏低，三者 N：P_2O_5：K_2O 的施用比例平均分别为 1.00：0.63：0.56、1.00：1.01：0.84 和 1.00：0.90：0.67；追肥化肥中的 P_2O_5 比例总体上较为合适，K_2O 比例总体上过低，N：P_2O_5：K_2O 的施用比例平均为 1.00：0.25：0.35。

主要露地菜区施用的养分总量、有机肥和基施化肥中 P_2O_5 比例过高或偏高 (平均分别在 0.51～0.93、0.70～1.47 和 0.70～1.13 之间)，华南地区基施化肥 (1.13) 和追施化肥 (0.65) 及西南地区基施化肥 (0.70) 中 P_2O_5 比例应大幅降低，华北和华中地区基施化肥中 P_2O_5 比例还可适当降低；华北、华中和西南地区施用的养分总量中 K_2O 比例明显偏低，追施化肥中 K_2O 比例 (0.20～0.35) 应大幅增加。

辣椒施用的养分总量中 P_2O_5 比例过高，主要露地蔬菜施用的有机肥和基施化肥中 P_2O_5 比例普遍过高 (平均分别在 0.79～1.09 和 0.69～1.08 之间)，辣椒基施化肥中 P_2O_5 比例应大幅降低，白菜、大白菜和甘蓝基施化肥中 P_2O_5 比例 (0.69～0.84) 还可适当降低；主要露地蔬菜施用的养分总量中 K_2O 比例 (0.39～0.67) 明显偏低，追施化肥中 K_2O 比例 (0.10～0.47) 应大幅增加。

2.1.3　蔬菜有机肥养分施用比例　由表 6 和表 7 可见，设施蔬菜有机肥养分比例明显高于露地蔬菜。

表 4 不同区域蔬菜氮、磷、钾施用比例 (N：P_2O_5：K_2O)

Table 4 Ratio of N, P_2O_5, K_2O input in main vegetable production regions

主要菜区 Main vegetable production region	肥料总量 Total input	有机肥养分 Organic manure nutrient input	基施化肥 Basal applied chemical nutrient	追施化肥 Top-dressing chemical nutrient
露地栽培 Field cultivation				
华北 North China (97)	1.00：0.51：0.60	1.00：0.74：1.02	1.00：0.85：0.70	1.00：0.25：0.31
华南 South Chinan (81)	1.00：0.93：0.89	1.00：1.32：0.97	1.00：1.13：0.78	1.00：0.65：0.91
华中 Central China (302)	1.00：0.52：0.45	1.00：0.70：0.61	1.00：0.88：0.66	1.00：0.12：0.20
西南 Southwest China (103)	1.00：0.70：0.62	1.00：1.47：0.98	1.00：0.70：0.78	1.00：0.26：0.35
平均 Mean (649)	1.00：0.63：0.56	1.00：1.01：0.84	1.00：0.90：0.67	1.00：0.25：0.35
设施栽培 Greenhouse cultivation				
东北 Northeast China (90)	1.00：0.99：0.89	1.00：1.19：0.72	1.00：1.21：1.00	1.00：0.68：1.05
华北 North China (316)	1.00：0.83：1.03	1.00：1.06：0.91	1.00：0.94：1.21	1.00：0.52：1.02
华东 East China (49)	1.00：0.84：0.74	1.00：1.33：0.79	1.00：0.86：0.77	1.00：0.47：0.68
华中 Central china (53)	1.00：0.65：0.71	1.00：0.60：0.61	1.00：1.03：0.99	1.00：0.31：0.53
西南 Southwest China (41)	1.00：0.75：0.82	1.00：1.45：0.95	1.00：0.60：0.94	1.00：0.26：0.50
平均 Mean (578)	1.00：0.85：0.94	1.00：1.10：0.88	1.00：0.95：1.09	1.00：0.52：0.91

注（Note）：括号内为样本数，样本数目小于 30 个的区域不作统计 The sample numbers were shown in the brackets and data with sample size below 30 was not calculated.

表 5 主要蔬菜氮、磷、钾施用比例 (N：P_2O_5：K_2O)

Table 5 Ratio of N, P_2O_5, K_2O input in main vegetables

蔬菜种类 Vegetable type	肥料总量 Total input	有机肥养分 Organic manure nutrient input	基施化肥 Basal applied chemical nutrient	追施化肥 Top-dressing chemical nutrient
露地栽培 Field cultivation				
辣椒 Pepper (88)	1.00：0.72：0.67	1.00：1.09：0.83	1.00：1.08：0.87	1.00：0.34：0.47
白菜 Pakchoi (63)	1.00：0.43：0.39	1.00：1.00：1.05	1.00：0.69：0.48	1.00：0.08：0.10
大白菜 Chinese cabbage (45)	1.00：0.57：0.55	1.00：0.79：0.95	1.00：0.84：0.58	1.00：0.16：0.23
甘蓝 Cabbage (32)	1.00：0.54：0.54	1.00：0.87：0.84	1.00：0.80：0.78	1.00：0.18：0.22
平均 Mean (649)	1.00：0.63：0.56	1.00：1.01：0.84	1.00：0.90：0.67	1.00：0.25：0.35
设施栽培 Greenhouse cultivation				
番茄 Tomato (171)	1.00：0.90：1.00	1.00：1.13：0.85	1.00：1.12：1.28	1.00：0.51：1.00
黄瓜 Cucumber (154)	1.00：0.85：1.03	1.00：1.03：0.93	1.00：0.89：1.17	1.00：0.63：1.05
辣椒 Pepper (68)	1.00：0.86：0.90	1.00：1.13：0.87	1.00：0.89：0.81	1.00：0.55：1.02
茄子 Eggplant (37)	1.00：0.80：0.74	1.00：1.23：0.85	1.00：0.88：0.84	1.00：0.40：0.60
平均 Mean (578)	1.00：0.85：0.94	1.00：1.10：0.88	1.00：0.95：1.09	1.00：0.52：0.91

注（Note）：括号内为样本数，样本数目小于 30 的不作统计 The sample numbers were shown in the brackets and data with sample size below 30 was not calculated.

蔬菜有机肥养分用量占养分总用量 (化肥 + 有机肥) 的适宜比例一般为 40%～50%。东北和华北地区设施蔬菜有机肥养分比例总体上较为适宜，平均分别占各自养分总用量的 39.9% 和 38.9%，而华东、华中和西南地区有机肥养分比例明显偏低，平均在 25.2%～29.2% 之间；西南地区露地蔬菜有机肥养分

比例总体上较为适宜，平均占养分总用量的 36.3%，而华北、华南和华中地区露地蔬菜有机肥养分比例普遍偏低，平均在 21.4%～27.7% 之间。

设施番茄、黄瓜和茄子有机肥养分比例总体上较为适宜，平均分别占各自养分总用量的 40.6%、38.3% 和 42.7%，而设施辣椒有机肥养分比例偏低，平均为 30.6%；主要露地蔬菜 (辣椒、白菜、大白菜、甘蓝) 有机肥养分比例普遍偏低，平均在 20.5%～28.9% 之间。

2.1.4 蔬菜基肥养分施用比例　区域间、蔬菜种类间基肥养分比例差异较大 (表 6、表 7)。蔬菜基肥养分用量占养分总用量 (基肥 + 追肥) 的适宜比例一般为 50%～60%。东北、华北、华东地区设施蔬菜基肥养分比例较为适宜 (平均在 49.9%～63.0%之间)，华中和西南地区基肥养分比例明显偏高 (平均分别为 75.1% 和 71.7%)；华北、华南和西南地区露地蔬菜基肥养分比例较为适宜 (平均在 50.0%～59.4% 之间)，华中地区基肥养分比例偏高 (平均 67.8%)。

设施黄瓜基肥养分比例总体上较为适宜 (平均 55.5%)，设施番茄、辣椒和茄子基肥养分比例偏高 (平均在 65.1%～65.6% 之间)；露地辣椒和白菜基肥养分比例总体上较为适宜 (平均分别为 62.8% 和 60.0%)，露地大白菜和甘蓝基肥养分比例偏高 (平均分别为 72.5% 和 66.5%)。

2.1.5 蔬菜基施化肥养分比例　表 8、表 9 表明，蔬菜基施化肥养分比例普遍过高。设施和露地蔬菜适宜的基施化肥养分用量占化肥 (基肥 + 追肥) 养分总量的比例分别为 15%～20% 和 20%～30%。东北地区设施蔬菜基施化肥养分比例偏高 (平均 28.8%)，而华北、华东、华中和西南基施化肥养分比例普遍过高 (平均在 45.5%～68.7% 之间)；华北、华南和西南地区露地蔬菜基施化肥养分比例偏高 (平均在 35.4%～39.7% 之间)，而华中地区基施化肥养分比例过高 (平均 63.0%)。

主要设施蔬菜 (番茄、黄瓜、辣椒和茄子) 基施化肥养分比例明显偏高，平均在 36.9%～47.5% 之间；主要露地蔬菜 (辣椒、白菜、大白菜和甘蓝) 基施化肥养分比例普遍过高，平均在 51.7%～59.7% 之间。

2.2　我国蔬菜化肥养分减施潜力估算

按合理施肥条件下设施蔬菜有机肥替代化肥 45%、露地蔬菜有机肥替代化肥 35% 的比例和氮磷钾推荐量 (化肥养分 + 有机肥养分)，估算化肥养分

表 6　不同区域蔬菜有机肥养分和基施养分在总养分投入中的比例 (%)

Table 6　Proportion of N, P_2O_5, K_2O from organic manure and basal-dressed nutrients in the respective total input in main vegetable production regions

主要菜区 Region	有机肥养分 Organic manure nutrient				基施养分 Basal-dressed nutrient			
	N	P_2O_5	K_2O	总比例 Total proportion	N	P_2O_5	K_2O	总比例 Total proportion
露地栽培 Field cultivation								
华北 North China (92～97)	22.3 ± 24.6	35.3 ± 33.8	38.8 ± 36.8	27.7 ± 27.9	44.5 ± 25.0	82.8 ± 27.0	76.7 ± 32.8	59.4 ± 23.9
华南 South China (81)	24.2 ± 17.5	32.1 ± 23.9	26.9 ± 20.2	26.9 ± 18.7	45.6 ± 20.0	59.3 ± 22.8	47.2 ± 22.5	50.0 ± 19.8
华中 Central China (292～301)	21.5 ± 27.3	22.2 ± 29.4	32.6 ± 36.3	21.4 ± 27.5	58.8 ± 26.5	85.2 ± 23.4	80.3 ± 25.1	67.8 ± 24.0
西南 Southwest China (102～103)	27.4 ± 19.2	50.1 ± 28.2	41.1 ± 25.6	36.3 ± 20.9	47.6 ± 27.3	66.8 ± 31.3	65.0 ± 29.7	57.3 ± 26.4
平均 Mean (633～648)	24.0 ± 25.1	31.7 ± 31.4	35.2 ± 33.5	26.9 ± 26.7	53.3 ± 26.3	77.9 ± 27.3	72.6 ± 29.3	62.6 ± 24.7
设施栽培 Greenhouse cultivation								
东北 Northeast China (90)	41.6 ± 31.0	46.8 ± 34.9	37.0 ± 31.7	39.9 ± 29.3	50.0 ± 32.0	59.9 ± 36.8	46.8 ± 32.8	49.9 ± 31.2
华北 North China (308～314)	38.2 ± 25.6	47.1 ± 29.4	35.9 ± 26.1	38.9 ± 25.6	59.2 ± 26.2	74.6 ± 26.1	59.5 ± 26.9	62.4 ± 25.6
华东 East China (49)	26.6 ± 19.7	35.0 ± 30.5	26.6 ± 24.4	29.1 ± 23.5	61.2 ± 19.6	70.7 ± 18.5	59.2 ± 19.0	63.0 ± 17.6
华中 Central china (53)	26.0 ± 26.8	27.7 ± 31.9	24.3 ± 28.0	25.2 ± 27.0	68.7 ± 20.0	86.8 ± 17.3	79.5 ± 22.9	75.1 ± 18.0
西南 Southwest China (41)	26.4 ± 23.7	36.5 ± 29.1	27.0 ± 23.1	29.2 ± 24.2	69.2 ± 27.0	76.6 ± 24.4	72.1 ± 23.3	71.7 ± 24.3
平均 Mean (570～576)	35.7 ± 26.3	43.0 ± 30.8	34.4 ± 27.4	36.4 ± 26.3	59.1 ± 26.6	72.9 ± 27.2	60.6 ± 27.8	62.3 ± 25.7

注（Note）：括号内为样本数，样本数目小于 30 个的区域不作统计 The sample numbers were shown in the brackets and data with sample size below 30 was not calculated.

表 7 主要蔬菜有机肥养分和基施养分在总养分投入中的比例 (%)

Table 7 Proportion of N, P_2O_5, K_2O from organic manure and basal-dressed nutrients in the total input in main vegetables

蔬菜种类 Vegetable type	有机肥养分 Organic manure nutrient				基施养分 Basal-dressed nutrient			
	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total
露地栽培 Field cultivation								
辣椒 Pepper (88)	19.2 ± 19.7	23.5 ± 25.0	24.3 ± 27.4	20.5 ± 20.7	52.7 ± 21.9	76.9 ± 22.7	69.9 ± 25.5	62.8 ± 19.8
白菜 Pakchoi (63)	21.9 ± 22.3	38.8 ± 34.1	48.2 ± 37.0	28.9 ± 26.1	47.5 ± 20.9	81.3 ± 27.3	79.9 ± 28.4	60.0 ± 21.6
大白菜 Chinese cabbage (44～45)	23.1 ± 25.5	30.7 ± 30.2	40.1 ± 35.2	28.9 ± 28.2	58.5 ± 24.8	90.8 ± 15.2	84.7 ± 21.2	72.5 ± 19.5
甘蓝 Cabbage (32)	20.6 ± 20.4	34.7 ± 33.7	35.7 ± 34.8	26.2 ± 23.9	53.5 ± 25.7	84.0 ± 23.7	81.1 ± 26.8	66.5 ± 21.4
平均 Mean (633～648)	24.0 ± 25.1	31.7 ± 31.4	35.2 ± 33.5	26.9 ± 26.7	53.3 ± 26.3	77.9 ± 27.3	72.6 ± 29.3	62.6 ± 24.7
设施栽培 Greenhouse cultivation								
番茄 Tomato (171)	41.6 ± 27.2	46.6 ± 30.7	35.7 ± 26.5	40.6 ± 26.7	63.1 ± 24.8	75.4 ± 24.8	60.8 ± 25.7	65.6 ± 23.8
黄瓜 Cucumber (151～154)	38.0 ± 26.4	44.4 ± 29.9	36.3 ± 27.8	38.3 ± 26.1	53.0 ± 25.9	65.3 ± 28.6	53.8 ± 29.6	55.5 ± 26.3
辣椒 Pepper (68)	29.9 ± 20.9	35.3 ± 27.3	28.9 ± 21.7	30.6 ± 22.0	62.7 ± 22.3	77.2 ± 24.2	60.1 ± 23.4	65.1 ± 21.5
茄子 Eggplant (37)	41.0 ± 20.7	49.7 ± 26.2	40.5 ± 22.8	42.7 ± 20.6	62.7 ± 17.3	73.4 ± 16.5	62.9 ± 16.2	65.1 ± 14.0
平均 Mean (570～576)	35.7 ± 26.3	43.0 ± 30.8	34.4 ± 27.2	36.4 ± 26.3	59.1 ± 26.6	72.9 ± 27.2	60.6 ± 27.8	62.3 ± 25.7

注（Note）：括号内为样本数；样本数目小于 30 个的不作统计 The sample numbers were shown in the brackets and data with sample size below 30 was not calculated.

表 8 不同区域蔬菜基施化肥养分量及其占化肥养分总量比例

Table 8 Basal applied chemical nutrient amounts and their ratios in total chemical nutrient input in main vegetable production regions

主要菜区 Region	基施量 Basal-dressing amount (kg/hm^2)				占比 Proportion (%)			
	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total
露地栽培 Field cultivation								
华北 North China (97)	105.0 ± 97.5	88.5 ± 64.5	73.5 ± 54.0	267.0 ± 162.0	25.1	53.6	42.8	35.4
华南 South Chinan (81)	135.0 ± 127.5	153.0 ± 141.0	106.5 ± 105.0	394.5 ± 331.5	33.5	46.6	30.3	36.4
华中 Central China (302)	220.5 ± 151.5	193.5 ± 133.5	144.0 ± 103.5	558.0 ± 336.0	47.0	86.5	74.5	63.0
西南 Southwest China (103)	115.5 ± 112.5	81.0 ± 64.5	90.0 ± 78.0	286.5 ± 216.0	30.1	53.2	48.6	39.7
平均 Mean (649)	171.0 ± 141.0	153.0 ± 129.0	115.5 ± 94.5	438.0 ± 315.0	39.3	69.9	55.7	51.0
设施栽培 Greenhouse cultivation								
东北 Northeast China (90)	75.0 ± 99.0	91.5 ± 120.0	75.0 ± 103.5	241.5 ± 277.5	25.6	38.0	24.6	28.8
华北 North China (316)	235.5 ± 1060.5	220.5 ± 718.5	285.0 ± 1429.5	741.0 ± 3189.0	40.9	55.4	45.1	46.1
华东 East China (49)	288.0 ± 223.5	247.5 ± 240.0	220.5 ± 202.5	756.0 ± 640.5	40.6	55.7	43.4	45.5
华中 Central china (53)	138.0 ± 75.0	142.5 ± 76.5	136.5 ± 75.0	417.0 ± 223.5	51.1	77.9	66.1	63.3
西南 Southwest China (41)	268.5 ± 210.0	162.0 ± 90.0	253.5 ± 208.5	684.0 ± 468.0	60.4	77.8	74.0	68.7
平均 Mean (578)	202.5 ± 793.5	192.0 ± 543.0	222.0 ± 1063.5	618.0 ± 2379.0	40.1	55.1	44.6	45.7

注（Note）：括号内为样本数；样本数目小于 30 个的区域不作统计 The sample numbers were shown in the brackets and data with sample size below 30 was not calculated.

推荐量。表 10 显示，主要蔬菜化肥养分减施潜力均较大，主要设施蔬菜 (番茄、黄瓜、辣椒、茄子) 化肥养分减施潜力平均在 34.8%～67.1% 之间，其中设施番茄、黄瓜和辣椒化肥减施潜力在 50% 以上；主

表 9　主要蔬菜基施化肥养分量及其占化肥养分总量比例

Table 9　Basal applied chemical nutrient amounts and their ratios in total chemical nutrient input in main vegetables

蔬菜种类 Vegetable type	基施量 Basal-dressing amount (kg/hm²)				占比 Proportion (%)			
	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total
露地栽培 Field cultivation								
辣椒 Pepper (88)	172.5 ± 114.0	186.0 ± 109.5	150.0 ± 91.5	508.5 ± 261.0	39.9	67.9	55.1	52.0
白菜 Pakchoi (63)	223.5 ± 180.0	154.5 ± 141.0	108.0 ± 91.5	486.0 ± 354.0	36.7	83.4	73.8	51.7
大白菜 Chinese cabbage (45)	195.0 ± 145.5	163.5 ± 73.5	112.5 ± 72.0	469.5 ± 232.5	45.8	81.9	68.4	59.7
甘蓝 Cabbage (32)	141.0 ± 112.5	112.5 ± 66.0	109.5 ± 91.5	363.0 ± 241.5	39.7	74.4	70.5	55.0
平均 Mean (649)	171.0 ± 141.0	153.0 ± 129.0	115.5 ± 94.5	438.0 ± 315.0	39.3	69.9	55.7	51.0
设施栽培 Greenhouse cultivation								
番茄 Tomato (171)	192.0 ± 213.0	214.5 ± 223.5	246.0 ± 385.5	652.5 ± 708.0	37.2	56.5	43.2	44.5
黄瓜 Cucumber (154)	277.5 ± 1506.0	247.5 ± 1008.0	324.0 ± 2011.5	849.0 ± 4515.0	40.6	49.3	43.1	43.8
辣椒 Pepper (68)	177.0 ± 114.0	157.5 ± 102.0	142.5 ± 97.5	478.5 ± 264.0	46.3	58.5	40.5	47.5
茄子 Eggplant (37)	151.5 ± 124.5	133.5 ± 100.5	127.5 ± 90.0	412.5 ± 295.5	30.1	48.4	37.7	36.9
平均 Mean (578)	202.5 ± 793.5	192.0 ± 543.0	222.0 ± 1063.5	618.0 ± 2379.0	40.1	55.1	44.6	45.7

注（Note）：括号内为样本数；样本数目小于 30 个的区域不作统计 The sample numbers were shown in the brackets and data with sample size below 30 was not calculated.

表 10　主要蔬菜化肥养分推荐量及减施潜力估算

Table 10　Recommendation amount and reduction potential of chemical fertilizer nutrients in main vegetables

蔬菜种类 Vegetable type	推荐量 Recommended amount (kg/hm²)				减施潜力 Reduction potential (%)			
	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total	N	P_2O_5	K_2O	总量 Total
露地栽培 Field cultivation								
辣椒 Pepper	94.5	22.5	109.5	226.5	–78.0	–91.8	–60.0	–76.8
白菜 Pakchoi	148.5	51.0	154.5	352.5	–75.7	–72.2	5.8	–62.3
大白菜 Chinese cabbage	154.5	54.0	160.5	369.0	–63.6	–73.1	–1.6	–53.1
甘蓝 Cabbage	208.5	40.5	136.5	384.0	–41.0	–73.7	–12.8	–41.9
设施栽培 Greenhouse cultivation								
番茄 Tomato	261.0	85.5	373.5	720.0	–49.2	–77.6	–34.6	–50.9
黄瓜 Cucumber	274.5	103.5	259.5	639.0	–59.9	–79.4	–65.4	–67.1
辣椒 Pepper	165.0	39.0	190.5	394.5	–56.9	–85.5	–46.3	–60.8
茄子 Eggplant	325.5	81.0	322.5	727.5	–35.3	–70.7	–5.1	–34.8

注（Note）：1) 依据 表 3 中蔬菜产量与单位产量养分吸收量数据及表注中养分推荐量模型与相关参数，计算优化灌溉条件下氮磷钾推荐量 Recommended amount of nitrogen, phosphorus and potassium under the condition of optimized furrow irrigation was calculated by information about vegetable yield, and nutrient uptake amount per unit yield in Table 3, and the model of recommended nutrient amount and related parameters in note of Table 3. 2) 化肥养分减施潜力 = [(化肥养分推荐量 – 化肥养分施用量)/化肥养分施用量] × 100%，化肥养分施用量见表1 Reduction potential of nutrients from chemical fertilizers = [(Recommended amount of nutrients from chemical fertilizers-application amount of nutrients from chemical fertilizers)/application amount of nutrients from chemical fertilizers] × 100%; application amount of nutrients from chemical fertilizers was shown in Table 1.

要露地蔬菜化肥养分减施潜力在 41.9%～76.8% 之间，其中露地辣椒、白菜和大白菜化肥养分减施潜力在 50% 以上。

2.3　我国蔬菜化肥科学施用对策

蔬菜尤其是设施蔬菜肥料过量和不合理施用不仅导致肥料利用率和生产效益低下，还导致土壤质

量退化、地下水硝酸盐超标、氧化亚氮排放和氨挥发引起的大气污染等一系列较为严重的问题，设施和露地菜田土壤质量退化主要表现如下[4–6]：1) 设施菜田　土壤 pH 值降低，北方设施菜田土壤酸碱度中性化明显，主要菜区设施土壤 pH 值 (平均 7.2) 显著低于露地土壤 (平均 7.7)，现今设施管理措施致土壤向酸化趋势发展；土壤次生盐渍化的比例较大，土壤盐分总量在 2～5 g/kg 的比例达到 38.2%，> 5 g/kg 的比例占 4.7%；土壤有机质含量普遍处于中低水平，土壤有机质含量低于 20 g/kg 的土样数占总土样数的 34.1%，仅 12.1% 的菜田达到肥沃菜田土壤有机质含量 40～50 g/kg 的标准；土壤硝态氮和速效磷大量积累，对生态环境构成了严重威胁，49% 和 32% 的土壤样品的硝态氮含量分别在 100 mg/kg 以上和 150 mg/kg 以上，土壤速效磷含量超过 100 mg/kg 和 150 mg/kg 的土壤样品分别占 66% 和 47%；土壤重金属 Cu、Zn 和 Cd 呈逐渐积累的趋势，采样区设施菜田土壤 Cd 总体上处于污染警戒级状况。2) 露地菜田　全国露地菜田土壤有机质含量普遍处于中低水平，土壤有机质含量低于 20 g/kg 的土样数占总土样数的 40.0%；全国露地菜田土壤速效氮、磷和钾含量高低并存，土壤 NO_3^--N、速效磷 (P) 和速效钾 (K) 含量处于低水平的比例分别占 65.5%、46.0% 和 58.1%，居于高水平的比例分别占 15.1%、22.5% 和 22.5%，硝态氮和速效磷高量积累对生态环境构成威胁；全国露地菜田土壤缺锌比例较大，占 43.5%；土壤重金属 Cd 的二级超标率达到 20%。

鉴于蔬菜尤其是设施蔬菜化肥使用与土壤质量方面的突出问题，蔬菜化肥施用技术必须加以改进，亟待建立蔬菜肥水科学管理技术体系。从化肥减量、协调化肥养分比例、调整化肥基追比例、优化肥水管理方法等方面进行改进，制订如下几方面技术对策：1) 化肥精准减量，协调养分比例，实现精准平衡施肥。主要技术是基于土壤改良的蔬菜化肥减量与大中微量元素平衡调控技术，重点协调好五个平衡：一是养分投入与产出的平衡；二是各种养分比例的平衡 (针对土壤养分不平衡加剧、蔬菜生理病害增多等问题，需重视 Ca、B、Zn、Fe 等的施用)；三是有机无机肥料养分的平衡；四是施肥时期养分平衡 (基追肥比例与数量平衡)；五是施肥与耕层土壤养分空间分布的平衡，实现蔬菜养分供应与吸收的同步调控。针对土壤次生盐渍化、酸化等主要障碍因子，筛选、优化土壤改良剂、肥料增效剂等应用技术。通过技术优化研究，探明化肥减量与土壤肥力水平关系、连续多年减施化肥对产量、土壤肥力的影响，确定不同生态区域和主要蔬菜最佳养分用量指标。2) 有机肥替代化肥，培肥土壤，减施化肥。土壤基础地力是实现作物产量潜力的关键因子。适于区域养分资源特点的有机肥/有机物料与化肥优化配施 (或高碳有机肥与化肥优化配施)，能稳定提升土壤功能，加速养分循环利用，减施化肥，协调土壤养分与能量 (碳) 之间的平衡，提高土壤有机质，以保持菜田土壤高效生产和持续利用。通过技术优化研究，探明连续多年有机肥替代化肥对蔬菜产量与土壤质量及微生物特性的影响，筛选、提出适于区域养分资源特点的有机肥替代化肥的适宜模式和比例。3) 施用专用新型化肥，优化养分配比和功能，减施传统化肥。根据菜田土壤肥力状况、蔬菜品种、种植茬口等，推广应用适合蔬菜生长特点和养分需求的专用新型化肥。蔬菜专用肥/水溶性肥料养分配比更趋合理，对调节土壤磷素、促进土壤养分均衡供应、提高肥料利用率、增产改质具有重大作用。蔬菜缓控释肥可延缓肥效期，调控养分供应强度和数量，减少追肥次数。增效复混肥提高肥效，改善土壤结构，保持土壤健康，增产改质。通过技术优化研究，筛选、研发适合设施蔬菜生长特点和养分需求的专用新型化肥及其高效施用技术。4) 推广水肥一体化技术，节水节肥，克服土壤盐化。采用水肥一体化技术是近根施肥的唯一手段，因此，水肥一体化技术是未来农业中具有广阔前景的新技术。蔬菜尤其是设施蔬菜最具潜力发展水肥一体化技术，该技术能按蔬菜生长各阶段对养分的需求和土壤养分的供应状况，将融为一体的水肥适时、定量、均匀、准确地输送到蔬菜根部土壤，具有节工、节水、节肥、节药、高产、高效、优质、环保等优点。通过技术优化研究，探明蔬菜水肥协同对蔬菜产量与生理病害、土壤肥力与盐分的影响，以及不同生育阶段水肥弹性供应与需求阈值；筛选、提出适于区域和作物特点以及生产实际需求的以平衡水肥调控为核心的水肥一体化技术。

3 讨论

3.1 蔬菜养分用量、比例和基、追施化肥养分比例

本调查表明，我国蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 中 N、P_2O_5 和 K_2O 用量均大幅超出各自推荐量，主要设施蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是各自推荐量的 1.9、5.4 和 1.6 倍，主要露地蔬菜 N、

P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是各自推荐量的 2.7、5.9 和 1.5 倍，生产实践中应高度重视化肥减施问题。

一些研究表明，设施黄瓜 N：P_2O_5：K_2O 吸收比例为 1：0.48～0.75：1.43～1.56[13−15]，设施番茄 N：P_2O_5：K_2O 吸收比例为 1：0.20～0.33：1.14～1.67[10, 16−17]。蔬菜对矿质元素营养的吸收比例主要与其本身特性有关，但一定程度上也受到环境条件的影响。综合文献及笔者团队多年研究结果，设施蔬菜 N：P_2O_5：K_2O 吸收适宜比例一般为 1：0.3～0.5：1.0～1.9[18]。本调查表明，蔬菜施用的肥料 (有机肥 + 化肥) 总量、有机肥和基施化肥的 N：P_2O_5：K_2O 比例均不合理，P_2O_5 占比过高，设施蔬菜 N、P_2O_5、K_2O 的各自总用量比例平均为 1.00：0.85：0.94，有机肥 N、P_2O_5、K_2O 的用量比例平均为 1.00：1.10：0.88，基施化肥 N、P_2O_5、K_2O 的用量比例平均为 1.00：0.95：1.09；露地蔬菜 N、P_2O_5、K_2O 的各自总用量比例平均为 1.00：0.63：0.56，有机肥 N、P_2O_5、K_2O 的用量比例平均为 1.00：1.01：0.84，基施化肥 N、P_2O_5、K_2O 的用量比例平均为 1.00：0.90：0.67。遵循最小养分律，科学施肥应做到营养平衡，使各种营养因子同时满足作物生长要求，生产实践中，减少养分总量的同时，应考虑按照 N、P_2O_5 和 K_2O 推荐比例进行养分用量调整。

设施和露地蔬菜适宜的基施化肥养分用量 (N + P_2O_5 + K_2O) 占化肥 (基肥+追肥) 养分总量的比例分别为 15%～20% 和 20%～30%[12]。本调查表明，蔬菜基施化肥养分比例普遍过高，设施和露地蔬菜平均分别达到 45.7% 和 51.0%。因此，生产实践中，化肥运筹时，为提高化肥利用率，应重视调整化肥基追比例。

3.2　有机肥和无机肥投入比例

在氮素总投入量一定的情况下，曹树钦等[19]研究表明，有机无机肥料养分配比为 5：5 时，可以达到既培肥土壤又能使当季增产效果最好的双重目的；赵明等[20]以及赵征宇等[21]研究显示，有机无机肥料氮素配比为 6：4 时番茄产量最高；黄绍文等[12]在河北省石家庄和天津市西青区基地开展的八年有机肥替代化肥模式定位试验得出，设施蔬菜化肥氮、有机肥氮 (畜禽有机肥 + 秸秆) 的适宜比例为 5(化肥)：5(其中，有机肥、秸秆各占 2.5) 产量最高，且能够显著提升土壤有机质含量。总体而言，蔬菜有机肥养分用量占养分总用量 (化肥 + 有机肥) 的适宜比例一般为 40%～50%。本调查表明，设施蔬菜有机肥养分比例明显高于露地蔬菜，主要设施蔬菜有机肥养分比例总体上较为适宜，在 30.6%～42.7% 之间，平均 36.4%；主要露地蔬菜有机肥养分比例普遍偏低，在 20.5%～28.9% 之间，平均 26.9%。对于设施蔬菜，通过减施化肥和精准平衡施肥，可适当提高有机肥养分比例；对于露地蔬菜，通过增加有机肥用量和合理减施化肥，提高有机肥养分比例。特别需要指出的是，无论是设施菜田，还是露地菜田，均应增加秸秆或高碳有机肥比例，减少化学肥料用量。

3.3　磷素管理对策

磷是作物生长的必需元素，是植物体内核酸、磷脂、核苷酸、酶的组成部分，参与和促成植物体内物质转化，能增强细胞原生质的持水能力，提高植物抗逆性和适应环境的能力。磷素过量与不合理施用不仅导致磷利用率和生产效益不高，还导致土壤速效磷大量富集等问题[4]，土壤中过量积累的磷素还易导致作物 Zn 和 Fe 元素缺乏，并增加土壤可溶性有机质的淋失等[22−24]。本调查表明，在氮、磷和钾三种大量元素中，超标倍数最多的是磷，主要蔬菜 P_2O_5 施用总量 (化肥 + 有机肥) 平均超出其推荐量的 4.7 倍，其中设施和露地蔬菜 P_2O_5 施用总量平均分别超出各自推荐量的 4.4 和 4.9 倍；调查还表明，主要蔬菜有机肥 P_2O_5 投入量已普遍超出 P_2O_5 推荐总量 (化肥 + 有机肥)，平均超出 1.4 倍，其中设施和露地蔬菜有机肥 P_2O_5 施用总量平均分别超出各自 P_2O_5 推荐总量的 1.7 和 1.0 倍。鉴于有机肥作为基肥施用，而其中的 P_2O_5 含量已超过推荐量，设施和露地蔬菜基施化肥应以低磷型化肥品种 (复合肥、混配肥) 为主，追肥应以低磷甚至无磷的冲施肥、滴灌肥等为主。

4　小结与建议

1) 我国蔬菜化肥养分 (N + P_2O_5 + K_2O) 用量平均为 1092.0 kg/hm^2，是全国农作物化肥养分用量 (328.5 kg/hm^2) 的 3.3 倍，其中设施和露地蔬菜化肥养分用量平均分别为 1354.5 和 859.5 kg/hm^2，分别是全国农作物化肥养分用量的 4.1 和 2.6 倍；蔬菜有机肥养分 (N + P_2O_5 + K_2O) 用量平均 639.0 kg/hm^2，其中设施和露地蔬菜有机肥养分用量平均分别为 921.0 和 387.0 kg/hm^2；蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 养分 (N + P_2O_5 + K_2O) 总用量平均 1731.0 kg/hm^2，其中设施和露地蔬菜肥料养分总用量平均分别为 2275.5 和 1246.5

kg/hm²；区域间、蔬菜种类间化肥养分用量、有机肥养分用量、肥料 (化肥 + 有机肥) 养分总用量的差异均相当明显。

2) 我国蔬菜肥料 (化肥 + 有机肥) 中 N、P_2O_5 和 K_2O 各自总投入严重超量。主要设施蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是各自推荐量的 1.9、5.4 和 1.6 倍，主要露地蔬菜 N、P_2O_5 和 K_2O 施用总量平均分别是各自推荐量的 2.7、5.9 和 1.5 倍，应高度重视化肥减施问题。按合理施肥条件下设施蔬菜有机肥替代化肥 45%、露地蔬菜有机肥替代化肥 35% 的比例估算，主要设施蔬菜化肥养分减施潜力平均在 34.8%～67.1% 之间，主要露地蔬菜化肥养分减施潜力在 41.9%～76.8% 之间。

3) 肥料养分总量、有机肥和基肥化肥的 N、P_2O_5、K_2O 比例不合理，P_2O_5 占比过高。设施蔬菜养分总量 N、P_2O_5、K_2O 施用比例平均为 1.00∶0.85∶0.94，有机肥养分比例为 1.00∶1.10∶0.88，基施化肥养分比例为 1.00∶0.95∶1.09；露地蔬菜 N、P_2O_5、K_2O 三者的施用比例平均分别为 1.00∶0.63∶0.56、1.00∶1.01∶0.84 和 1.00∶0.90∶0.67。

4) 追施化肥的磷施用比例总体上较为合理，设施和露地蔬菜的磷比例平均分别为 0.52 和 0.25；露地蔬菜追施化肥的钾的施用比例总体上过低，平均为 0.35。为此，蔬菜施肥中，在减少化肥用量的同时，应高度重视协调 N、P_2O_5、K_2O 比例，尽量选用低磷化肥品种。考虑到有机肥中磷比例过高且较难调控等问题，对于设施蔬菜，基施化肥磷比例可大幅度降低，追施化肥中的磷素比例还可适当降低，研制和筛选适合设施蔬菜养分需求的基肥用低磷型化肥品种 (复合肥、混配肥)，以及追肥用低磷型冲施肥、滴灌肥；对于露地蔬菜，基施化肥磷比例可较大幅度降低，追施化肥中的钾素比例总体上应大幅增加，研制和筛选适合露地蔬菜养分需求的基肥用低磷型化肥品种 (复合肥、混配肥)，以及追肥用低磷高钾型化肥品种 (复合肥、混配肥，冲施肥、滴灌肥)。

5) 蔬菜有机肥养分用量占养分总用量 (化肥养分+有机肥养分) 的适宜比例一般为 40%～50%。设施蔬菜有机肥养分比例明显高于露地蔬菜，主要设施蔬菜有机肥养分比例总体上较为适宜，在 30.6%～42.7% 之间，平均 36.4%；主要露地蔬菜有机肥养分比例普遍偏低，在 20.5%～28.9% 之间，平均 26.9%。

6) 化肥基施比例普遍过高，设施和露地蔬菜平均分别达到 45.7% 和 51.0%，明显高于基肥化肥养分用量占化肥养分总量的适宜比例 (设施蔬菜 15%～20%，露地蔬菜 20%～30%)，应重视调整化肥基追比例问题。

鉴于蔬菜尤其是设施蔬菜化肥使用与土壤质量方面的突出问题，蔬菜化肥施用技术必须加以改进，亟待建立蔬菜肥水科学管理技术体系。从化肥减量、协调化肥养分比例、调整化肥基追比例、优化肥水管理方法等方面进行改进，并制订化肥精准减量、有机肥替代化肥、施用专用新型化肥、推广水肥一体化技术等技术对策。

致谢：蔬菜施肥调查由国家大宗蔬菜产业技术体系各综合试验站站长负责，其他岗位专家参与并给予了指导，在此一并感谢。

参 考 文 献：

[1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 [M]. 中国农业出版社, 2016.
China Agricultural yearbook Editing Committee. China agriculture yearbook[M]. China Agriculture Press, 2016.

[2] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contaminations in south-eastern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83: 73–84.

[3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al*. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010.

[4] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养肥料学报, 2011, 17(4): 906–918.
Huang S W, Wang Y J, Jin J Y, *et al*. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 906–918.

[5] 黄绍文, 高伟, 唐继伟, 等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 965–977.
Huang S W, Gao W, Tang J W, *et al*. Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer , 2016, 22(4): 965–977.

[6] 黄绍文,唐继伟,李春花. 不同栽培方式菜田耕层土壤重金属状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 708–719.
Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals in vegetable soils under different patterns of land use[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer , 2016, 22(3): 708–719.

[7] Huang S W, Jin J Y. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 139: 317–327.

[8] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514–522.
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3):

514–522.

[9] 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*. Status of fertilizer application and soil nutrients in greenhouse vegetables in Qingdao City[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2011, (3): 68–72.

[10] 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. Analysis on the fertilization and soil nutrient status of facilities vegetables in Lianyungang City[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 204–208, 231.

[11] 冯武焕, 吕爽, 王虎, 等. 西安市菜田化肥农药施用现状调查与分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(31): 143–146.
Feng W F, Lü S, Wang H, *et al*. Investigation and analysis of application status of fertilizer and pesticide in vegetable field of Xi'an[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(31): 143–146.

[12] 黄绍文, 唐继伟, 张怀志, 等. 基于发育阶段的设施黄瓜水肥一体化技术[J]. 中国果菜, 2017, 37(5): 82–84.
Huang S W, Tang J W, Zhang H Z, *et al*. Drip fertigation technology of greenhouse cucumber based on management strategy at different growth stages[J]. China Fruit Vegetable, 2017, 37(5): 82–84.

[13] 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, 9(3): 61–67.
Zhang Y C, Li Q Y, Zhai C X, *et al*. Analysis and evaluation on status of fertilizer application in greenhouse vegetable in Hebei province[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2005, 9(3): 61–67.

[14] 刘军, 曹之富, 黄延楠, 等. 日光温室黄瓜冬春茬栽培氮磷钾吸收特性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 2109–2113.
Liu J, Cao Z F, Huang Y N, *et al*. Nutrient uptake properties of cucumber in long-season cultivation in solar greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 2109–2113.

[15] 诸海涛, 李建勇, 朱恩, 等. 水肥一体化条件下设施黄瓜的氮磷钾吸收分配规律研究[J]. 上海农业学报, 2017, 33(1): 74–78.
Zhu H T, Li J Y, Zhu E, *et al*. Study on the uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of cucumber in protected cultivation of integral control of water and fertilization[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2017, 33(1): 74–78.

[16] 肖纪珍, 任凤兰, 热沙来提. 番茄对氮磷钾的吸收规律及肥料施用效应[J]. 新疆农业科学, 1990, (3): 114–116.
Xiao J Z, Ren F L, Re S L T. Uptake of nitrogen, phosphorus and potassium of tomato, and response of fertilizer application[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1990, (3): 114–116.

[17] 董洁. 不同施肥处理对大棚番茄养分吸收影响的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2009.
Dong J. Study on the effect of different fertilizer treatments on nutrient uptake of tomato in plastics greenhouse [D]. Xian: MS Thesis of Northwest A&F University, 2009.

[18] 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.

[19] 曹树钦, 叶丽娟, 陈伦寿. 土壤肥力监测与培肥[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(1): 61–66.
Cao S Q, Ye L J, Chen L S. Monitoring and improvement of soil fertility[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(1): 61–66.

[20] 赵明, 蔡葵, 王文娇, 等. 有机肥化肥配施对番茄产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2009, 41(12): 90–93.
Zhao M, Cai K, Wang W J, *et al*. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of tomato[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, 41(12): 90–93.

[21] 赵征宇, 孙永红, 赵明, 等. 有机无机肥配施对土壤氮素转化和番茄产量品质的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(1): 208–212.
Zhang Z Y, Sun Y H, Zhao M, *et al*. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on soil nitrogen transformation, yield and quality of tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali Sinica, 2013, 28(1): 208–212.

[22] 王兴仁,张福锁,张卫峰,等. 肥料与施肥手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013. 24–51.
Wang X R, Zhang F S, Zhang W F, *et al*. Fertilizers and fertilization manual [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. 24–51.

[23] Zhang M K, He Z L, Calvert D V, *et al*. Accumulation and partitioning of phosphorus and heavy metals in a sandy soil under long-term vegetable crop production[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A , 2003, 38: 1981–1995.

[24] Zhang Y C, Li R N, Wang L Y, *et al*. Threshold of soil Olsen-P in greenhouses for tomatoes and cucumbers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41: 2383–2402.