

中国农业科学院植物营养与肥料研究 60 年

白由路

(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: 中国农业科学院植物营养与肥料研究经历了 60 年的发展历程。按照研究的重点, 可大致可分为四个阶段, 第一阶段为 1980 年之前的单一肥料肥效研究阶段, 该阶段主要研究单一养分的肥料效应, 为我国化学肥料工业发展提供了依据; 第二个阶段是 1980 年至 1990 年, 该阶段主要研究了氮磷钾营养元素的配合肥效与主要配合方式, 为我国复合肥料的引进和发展提供了理论基础; 第三阶段是 1990 年至 2000 年, 该阶段主要进行平衡施肥技术研究, 同时研究了中微量元素的肥料效应; 2000 年以后是第四阶段, 该阶段可称为养分综合管理阶段, 该阶段重点研究了精准施肥技术、测土配方施肥支撑技术、施肥与环境、新型肥料及节肥增效关键技术等, 这些研究为保证我国粮食安全作出了重大贡献。

关键词: 化学肥料; 施肥技术; 肥料效应; 精准施肥; 新型肥料; 节肥增效

History of plant nutrition and fertilizer research in China

BAI You-lu

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/
Key Laboratory of Plant nutrition, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*)

Abstract: The researches of plant nutrition and fertilizer have gone through 60 years' development, with fruitful achievements since the foundation of Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. The researches could be divided into four periods, according to the research focus. Before 1980 was the period of mono-nutrient effects. During that period, the effects of N, P and K fertilizers were tested individually, which laid a foundation for the fertilizer industry in China. From 1980 to 1990, it came into the second period, when the combined application of N, P and K fertilizers and the combining ways had been concerned in most researches. The achievements provided important support for the importing and introducing of compound fertilizers in China. From 1990 to 2000 belonged to the third period, when was characterized by balanced fertilization researches, and the effects of micronutrients in the main crops as well. Since 2000, the researches come into the forth or present period, which could be named comprehensive nutrient managements. The typical researches include precession agriculture, soil testing and nutrient recommendation, fertilization and environmental safety, new type fertilizers and the key techniques for value-added fertilizers. All the researches played important roles for guarantee of the grain supply safety of China.

Key words: chemical fertilizer; fertilizer application technique; nutrient efficiency; precise fertilization; new type fertilizer; fertilizer saving and value-addition

2017 年 8 月 27 日是中国农业科学院土壤肥料研究所 (2003 年 4 月更名为中国农业科学院农业资源与农业区划研究所) 建所 60 周年。60 年来, 该研究所围绕我国农业发展需求, 依据我国农田养分特征和经济基础, 组织开展了具有时代特征、涵盖所有肥

料产品类型、施用技术以及肥料安全方面的研究。作为植物营养与施肥技术的国家级专业研究所, 其取得的研究成果为保证我国粮食安全作出了巨大贡献, 也代表着我国植物营养与肥料研究的高端水平。在 60 年后的今天, 回顾中国农业科学院植物营

收稿日期: 2017-11-01 接受日期: 2017-11-15

作者简介: 白由路 (1961—), 男, 河南温县人, 博士, 研究员, 长期从事植物营养与施肥技术研究。E-mail: baiyoulu@caas.cn

养与肥料研究艰辛的历程与取得的成就, 追寻老一辈科学家对植物营养与肥料研究的足迹, 传承老一辈科学家的奉献精神, 将我国植物营养与肥料事业在新的时代推向新的高度。

纵观 60 年, 中国农业科学院植物营养与肥料研究大致分为四个阶段: 单一营养元素的肥效阶段; 两种或两种以上化肥、化肥与有机肥组合营养阶段; 兼顾中、微量元素的平衡施肥阶段; 经济效益和生态可持续发展的养分综合管理研究阶段。

1 单一肥效研究阶段 (1957~1980)

中国农业科学院土壤肥料研究所成立之初 (1957 年 8 月), 中国农业科学院召开了全国肥料试验工作会议, 同年 11 月, 农业部发文建立全国化学肥料试验网 (以下简称化肥网), 化肥网由中国农业科学院土壤肥料研究所具体负责组织, 各省 (市、自治区) 农业院所都基本上参加了这项工作^[1]。在此期间, 先后组织了三次全国或区域性化肥协作试验。1958~1962 年, 组织了全国氮磷钾化肥肥效试验, 70 年代组织了氮肥深施技术试验和南方氮肥钾肥肥效协作试验^[2]。可以认为, 20 世纪 80 年代之前, 全国的肥料试验基本上都是围绕化学肥料开展的。

50 年代末, 化肥网的试验结果基本上肯定了氮肥的肥效, 氮肥在我国各种土壤和作物上施用一般都能增产, 同时也明确了不同氮肥品种适宜的土壤条件以及主要作物的需肥规律和适宜的氮肥施用时期^[3], 氮肥施用得到迅速推广。氮肥的推广极大地推进了我国氮肥的生产, 我国氮肥从 1957 年的 13 万 t, 发展到了 1980 年的 934.2 万 t, 氮肥品种也由单一的硫酸铵, 发展到了碳酸氢铵、氨水、氯化铵和尿素等^[4]。此时期主要作物的产量得以大幅度提高。

60 年代开始, 全国化肥网在磷肥特别是低浓度磷肥施用技术和效果方面的研究取得了很大成就。在此期间, 由于氮肥的大量施用和作物产量的提高, 一些地区土壤缺磷开始显现。首先是在我国南方的一些低产稻田发现了单施氮肥稻苗容易“坐秋”。所谓“坐秋”是指南方水田, 特别是低产田土壤经过一冬脱水变为冬干田后, 翌年水稻插秧后长期不返青, 稻根变黑腐烂, 不长新根, 秧苗枯萎, 叶片发黄, 分蘖很少, 呈“半死不活”状态, 生长停滞达 20~40 天之久, 水稻成熟期极不一致, 产量锐减, 一般减产 30%~50%。试验表明, 用过磷酸钙 900 kg/hm² 作基肥撒施, 每亩可增加稻谷 137.8 kg, 增产 115%。1963 年, 湖南省在 400 万亩

的冬干田上推广施用磷肥, 增产粮食约 1.8 亿 kg^[5]。同时, 研究得出土壤速效磷 (Olsen 法) 含量 < 5 mg/kg 为缺磷, 施磷肥增产显著; 5~10 mg/kg 为中度缺磷, 配合施用氮肥也有增产效果; > 10 mg/kg, 施磷一般不增产或增产不显著^[1]。并研究了北方石灰性土壤施磷指标为: 土壤速效磷 (Olsen 法, P₂O₅) 含量 < 10 mg/kg, 施磷极为有效; 10~20 mg/kg 一般有效; > 20 mg/kg 一般无效^[6]。

70 年代以后, 全国化肥网在磷矿粉的施肥技术上也进行了深入研究, 明确磷矿粉的效果首先与磷矿粉中枸溶性磷的含量有关, 枸溶性磷含量低的磷矿粉直接施用当季效果不明显; 其次与土壤酸碱度有关, 土壤 pH 值越低, 磷矿粉的效果越好, 石灰性土壤上施磷矿粉的肥效不稳定; 最后是与作物的吸磷能力有关, 肥田萝卜、荞麦、油菜、豌豆的吸磷能力强, 施用磷矿粉的效果较好, 紫云英、花生、大豆次之, 小麦、水稻、谷子的吸磷能力较弱, 不适宜施用磷矿粉^[7]。

70 年代中期后, 化肥网试验结果明确了我国南方钾肥在 16 种作物上不仅有增产效果, 还可以增加作物的抗病、抗逆能力, 提高作物品质。明确了南方各省主要土壤钾素含量和钾肥肥效的关系, 指出土壤速效钾 < 40 mg/kg 时, 属于极度缺钾水平, 施用钾肥在水稻上的增产效果极显著; 当土壤速效钾为 40~80 mg/kg 时, 属于缺钾水平, 施用钾肥可增产 10%~20% 以上; 当土壤速效钾在 80~120 mg/kg 时, 属于中等水平, 施用钾肥有一定肥效, 可增产 10% 左右; 当土壤速效钾 > 120 mg/kg 时, 土壤属于不缺钾水平, 施用钾肥一般不增产^[1]。同时在北方也针对不同作物和土壤速效钾含量, 研究了钾肥的肥效与土壤速效钾的关系^[8]。

20 世纪 80 年代之前, 我国化肥工业基础十分薄弱, 为了保证我国粮食安全, 除合理施用化学肥料外, 中国农业科学院对其他肥料也进行了广泛的研究, 先后进行了麦田绿肥翻压研究^[10], 北方玉米田豌豆翻压的应用及其对产量的影响研究^[11-12]等, 同时对农区绿肥饲料兼用也有较深入的研究^[13]。由于化肥较少, 微生物肥料研究与应用也较多, 特别是对根瘤菌的研究与推广^[14]、5406 放线菌的研究与应用^[15-18]等, 以及其他微生物肥料也都有研究^[19]。该时期也进行了沼气^[20]、堆肥^[21]及土壤肥料养分测试技术的研究^[22]。

对肥料的研究和应用极大地推动了我国的化肥生产。至 1980 年, 我国化肥施用量由 1957 年的 37.3 万 t 增加到了 1269.4 万 t, 1957 年仅有氮肥生

产, 到 1980 年氮肥施用量达到 934.2 万 t、磷肥施用量达到 273.3 万 t, 钾肥用量 34.6 万 t。由于该时期对复合肥研究较少, 至 1980 年, 我国复合肥用量仅 27.2 万 t^[23], 有机肥料所提供的养分占比由 80% 以上下降至 50%^[24]。

2 组合肥效研究阶段 (1980~1990)

进入 20 世纪 80 年代以后, 中国农业科学院进行全国规模的氮、磷、钾肥料效应试验, 明确了不同地区的肥料适宜用量和养分比例^[1]。70 年代以后, 由于我国化肥生产和进口数量的增加, 一些地区表现出氮、磷、钾肥比例失衡, 肥效下降, 为此, 中国农业科学院在 1981~1983 年有组织地完成了 5000 多个试验点的氮、磷、钾用量和比例试验, 结果表明每公斤氮增产稻谷 9.1 kg、玉米 13.4 kg、棉花 (皮棉) 1.2 kg、小麦 10 kg、油菜籽 4 kg。同时, 明确水稻的适宜用量为 183 kg/hm², 氮、磷、钾的适宜比例为 1 : 0.34 : 0.35。并对我国化肥使用情况进行了区域划分, 把全国划分为 8 个一级区、31 个二级区^[25], 为指导我国化学肥料的合理施用提供了重要依据。该期的研究也为我国复合肥料的引进和生产奠定了基础, 推动了我国复合肥料的生产和引进^[26-27], 我国复合肥用量从 1980 年的 27.2 万 t 增加到了 1990 年的 341.6 万 t^[23]。

在这个时期, 中国农业科学院对豆科牧草根瘤菌的选育和应用也取得很大进展, 选育出了沙打旺、三叶草、红豆草等 27 种根瘤菌菌种, 研究了接种剂的生产工艺及种子丸衣化接种技术, 一些有价值的根瘤菌已投入商品化菌剂生产, 并在飞播牧草中得到应用, 增产效果显著, 累计接种面积达 30 万 hm²^[28]。

3 平衡施肥研究阶段 (1990~2000)

进入 20 世纪 90 年代后, 我国化肥用量逐渐增大, 养分不平衡现象发生。部分地区化肥用量过高, 出现了养分报酬递减现象, 平衡施肥迫在眉睫^[29]。1989 年, 中国农业科学院引进了高效测试土壤养分的分析设备与方法^[30], 全面分析土壤中的氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、铜、锰、锌、硼等 11 种营养元素。中国农业科学院土壤肥料研究所利用该设备在全国范围内进行了 13000 个土壤样品的测试, 得出 92.1% 的土壤铵态氮含量低于临界值, 42.7%、61.3%、64.8% 土壤的速效磷、钾、锌含量低于临界值^[31]。1995 年至 1996 年, 该方法列入农业部丰收计划推广项目, 两年累计推广应用 44.45 万亩, 新增纯收入

3266.05 万元^[32]。

在中、微量元素研究方面, 中国农业科学院的研究涵盖了钙、镁、硫、硅、锌、锰、硼、钼等元素, 施用技术包括了微量元素之间配合、微量元素与大量元素配合, 以及微量元素与中量元素、有益元素配合的多项研究^[33-39]。研究了硝酸钙对花生生长和钙吸收的影响, 指出硝酸钙作为钙元素的来源, 可显著提高花生产量和品质, 增加花生各部位特别是荚果的含钙量, 显著增加花生叶片中水溶性钙组分, 促进花生对钙的均衡吸收和分配^[33]。研究了小麦氮、磷与锌的配合施用问题, 指出氮与锌配合施肥效果均优于单施氮和单施锌, 磷与锌配合施肥优于单施磷和单施锌^[34]。同时, 在营养液培养时, 当锌浓度达到 26.2 mg/L, 盆栽和大田施锌量达到 750 kg/亩时也不会产生锌中毒, 所以, 在石灰性土壤上植物锌中毒较为困难^[38]。也研究了大剂量锰对小麦生长的影响, 与锌不同的是当小麦缺锰时, 施锰肥的效果良好, 但当土壤锰含量过高时, 小麦就会锰中毒, 在潮土中如果施锰大于 250 mg/kg 土, 会影响小麦生长^[39]。

1990 年, 针对我国含氯化肥增多的情况, 中国农业科学院探讨了我国适宜施用含氯化肥的地区、土壤和作物以及安全高效施用技术, 将 33 种作物按耐氯临界浓度划分为强耐氯作物 (> 600 mg/kg)、中等耐氯作物 (300~600 mg/kg) 和弱耐氯作物 (< 300 mg/kg)^[40]。

该时期中国农业科学院还研究了作物施肥模型和计算机技术在施肥上的应用等, 应用田间试验数据, 建立了小麦、玉米、水稻的施肥模型, 并利用当时的 PC 机建立了土壤肥料试验和农业统计程序包^[41], 利用计算机建立了区域小麦、玉米、棉花施肥咨询系统^[42], 为以后计算机在植物营养与肥料中的应用奠定了基础。

同时, 在这个时期, 中国农业科学院也注意到了施肥与环境的问题, 指出北方一些地区由于农田氮肥的大量施用引起的地下水、饮用水硝酸盐污染问题十分严重, 并提出了加强氮肥合理施用、提高群众环境意识和国家应考虑制定有关法规等建议^[43]。

4 养分综合管理阶段 (2000 年以后)

2000 年以后, 植物营养与肥料学科的研究逐渐复杂化, 一方面要适应国际先进科学技术对植物营养与肥料学科的影响, 另一方面要满足日益增长的人口对粮食的需求, 同时生态环境和食品安全也越

来越受到重视,所以,2000年以后的植物营养与肥料研究进入了多元化阶段,纵观中国农业科学院在植物营养与肥料方面的研究,可分为五个方面。

4.1 精准施肥

随着信息技术的发展,中国农业科学院从1999年开始进行精准施肥技术研究^[44],先后在北京郊区和上海长江农场进行了大量精准施肥技术研究,该研究包含三部分内容,一是土壤养分空间变异与土壤施肥精准管理,主要是根据我国农业发展高度分散的实际情况,开展了农田土壤养分变异与施肥研究^[45],基于分区的土壤养分管理模型^[46]、精准施肥技术^[47],探讨了我国农业高度分散与高度集约化条件下的精准施肥技术体系^[48],研制了变量施肥机械等^[49],这些研究对我国在精准施肥方面的技术贮备有重要意义。

4.2 测土配方施肥技术支撑

2005年,我国开始了大规模的测土配方施肥工作^[50],中国农业科学院作为有重要技术支撑的科研机构,进行了大量的基于我国实际的测土配方施肥研究,这方面主要包括高效土壤测试技术的应用和施肥技术研究^[51]。同时开展了基于光谱诊断技术的研究,包括基于高光谱的土壤有机质含量预测^[52],植物体内养分含量的高光谱响应^[53]。在施肥模型方面,深入研究了基于作物产量和农学效率的推荐施肥模型^[54],该模型还做成了计算机软件得到了广泛的应用。

4.3 施肥与环境

20世纪70年代以后,施肥所引发的环境问题已被人们所关注^[55]。中国农业科学院在20世纪末也深入研究了施肥与环境及食品安全问题^[43],研究认为,北京地区冬小麦夏玉米轮作粮田浅层地下水硝态氮平均含量为18.02 mg/L,超标率为55.4%,43个保护地菜田浅层地下水样本平均含量为72.42 mg/L,超标率达100%。北京市平原农区地下水中的硝态氮主要来源于地表淋溶,过量施用氮肥是地下水硝态氮污染的主要原因^[56]。通过对山东地下水硝态氮的分析表明,地下水硝态氮含量较高的区域主要分布在农业较发达的种植区^[57]。同时,中国农业科学院在防控肥料污染方面也做了大量的工作,研究表明,在镉污染土壤上,施用不同的磷酸盐对土壤镉的有效性影响不同,磷酸二氢铵可使污染褐土有效态镉含量降低2.4%~13.4%^[58]。在中低剂量的Cd污染条件下,外源添加Zn 0.05 mg/L是降低水稻Cd吸收迁移及增加水稻产量的有效方法^[59]。

4.4 新型肥料

为了保障粮食安全和生态安全、提高肥料效益、减少肥料损失,近年来,人们把希望寄托在新型肥料上,目前,将新型肥料分为缓/控释肥料、生物肥料、商品有机肥料、水溶性肥料和功能性肥料等^[60]。中国农业科学院研究了纳米级材料胶结包膜型缓/控释肥料对提高氮素利用率和减少硝态氮淋溶损失的影响,采用不同的纳米级材料可提高小麦对氮素的利用率2.20~23.38个百分点,提高玉米对氮素的利用率1.01~21.36个百分点^[61]。在早稻上控释掺混尿素的氮肥利用率较常规分次施肥提高7.61个百分点^[62]。使用不同的肥料添加剂对肥效有很大影响,在低磷条件下添加腐植酸和海藻酸小麦产量较普通磷酸一铵增产9.74%~33.54%,高磷条件下增产26.81%~30.65%,磷肥表观利用率提高6.13~10.19个百分点^[63]。采用¹⁵N标记方法研究不同尿素添加物对肥效的影响,结果表明,尿素中添加海藻酸、腐植酸和谷氨酸可分别提高小麦产量7.12%、13.63%和3.65%,氮肥表观利用率分别提高7.64、9.52和2.19个百分点^[64]。

4.5 节肥增效技术

2007年以来,中国农业科学院承担了国家“973”项目“肥料减施增效与农田可持续利用基础研究”,全面深入研究了肥际微域养分转化与调控、根际养分转化与调控、作物吸收转运与养分高效利用、有机无机肥料协同效应与机理、环境要素影响养分利用的机制与调控、农田养分时空变异特征与调控、不同区域养分循环特征与驱动机制、典型区域节肥增效途径与模式等^[65],为集约化农田减施化肥20%~30%提供了理论基础与技术支撑。

60多年来,中国农业科学院土壤肥料研究团队虽然经历多次重大调整,但是,植物营养与肥料的研究一刻也没有停止,即使在艰苦的条件下,仍然坚持植物营养与肥料的试验与研究。目前我国化肥用量已突破6000万t,保证粮食安全的同时,也给环境造成了巨大的压力,特别是由于肥料的不合理施用,造成了土壤质量退化、农产品品质下降、环境污染等一系列问题,针对这些问题,中国农业科学院植物营养与肥料团队将一如既往、不忘初心、牢记使命,为创造一个环境优良、富足粮丰的美丽家园再上新的征程。

参 考 文 献:

[1] 林葆,李家康.我国化肥的肥效及其提高的途径—全国化肥试验网

- 的主要结果[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 273-279.
- Lin B, Li J K. Fertilizer efficiency and measures to raise fertilizer efficiency in China—Main achievements of China national network on chemical fertilizer experiments (CNNCFE)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(3): 273-279.
- [2] 林葆, 李家康, 林继雄, 吴祖坤. 全国化肥试验网协作研究三十二年[J]. 土壤肥料, 1989, (5): 7-11.
- Lin B, Li J K, Lin J X, Wu Z K. Thirty-two years of national chemical fertilizer trial net co-operation[J]. *Soils and Fertilizers*, 1989, (5): 7-11.
- [3] 中国农科院土肥所化肥网组. 我国氮磷钾化肥的肥效演变和提高增产效益的主要途径[J]. 土壤肥料, 1986, (1): 1-9.
- Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Science. Variation of NPK chemical fertilizers efficiency and the main methods to increase yield benefit[J]. *Soils and Fertilizers*, 1986, (1): 1-9.
- [4] 郭金如, 林葆. 我国化肥问题探讨[J]. 土壤通报, 1983, (2): 25-27.
- Guo J R, Lin B. Chemical fertilizer issues in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1983, (2): 25-27.
- [5] 江朝余. 鸭屎泥田的驯服[J]. 大众科学, 1964, (6): 201-203.
- Jiang C Y. Reclamation of Yashini paddy soil[J]. *Popular Science*, 1964, (6): 201-203.
- [6] 张乃凤, 肖国壮, 金维续. 北京地区石灰性土壤有效磷分析方法的探讨[J]. 耕作与肥料, 1965, (4): 43-46.
- Zhang N F, Xiao G Z, Jin W X. Discussion on determination method of available phosphorus in calcareous soil of Beijing area[J]. *Tillage and Fertilizer*, 1965, (4): 43-46.
- [7] 山东省土肥所. 磷矿粉肥的肥效试验[J]. 土壤肥料, 1975, (5): 21-27.
- Soil and Fertilizer Institute of Shandong Province. Fertilizer effect trial of rock phosphate powder[J]. *Soils and Fertilizers*, 1975, (5): 21-27.
- [8] 中国农科院土壤肥料研究所. 钾肥的肥效和土壤速效钾含量的关系[J]. 土壤肥料, 1978, (3): 18-21.
- Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Science. Relationship between fertilizer effect of potash and readily available potassium content in soil[J]. *Soils and Fertilizers*, 1978, (3): 18-21.
- [9] 高恩元. 我国化肥工业的回顾与展望[J]. 化工管理, 2008, (8): 7-10.
- Gao E Y. Review and prospect of chemical industry in China[J]. *Chemical Industry Management*, 2008, (8): 7-10.
- [10] 谭超夏, 陈裕盛, 黄少贤. 麦田压绿肥的研究和应用[J]. 中国农业科学, 1958, (4): 193-196.
- Tan C X, Chen Y S, Huang S X. Research and application of green manure return in wheat field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1958, (4): 193-196.
- [11] 焦彬, 梁德印. “极早熟豌豆”在春季的前茬利用[J]. 耕作与肥料, 1964, (3): 25-27.
- Jiao B, Liang D Y. Using of extremely early maturity pea in the first crop of spring[J]. *Tillage and Fertilizer*, 1964, (3): 25-27.
- [12] 林葆, 王涌清, 李廷轩. 栽培“早熟豌豆”在河北中部形成了一种新的两年四熟制[J]. 耕作与肥料, 1966, (1): 31-33.
- Lin B, Wang Y Q, Li T X. A new cropping system of four crop harvest in two years was formed by the cultivation of early maturity pea in central Hebei Province[J]. *Tillage and Fertilizer*, 1966, (1): 31-33.
- [13] 焦彬. 农家绿肥饲料兼用作物—箭筈豌豆[J]. 作物杂志, 1985, (1): 34-35.
- Jiao B. Common vetch—A crop used as both green manure and feed in farming area[J]. *Crops*, 1985, (1): 34-35.
- [14] 板野新夫, 胡济生. 种植大豆需要根瘤菌接种吗?[J]. 农业科学通讯, 1957, (11): 635-636.
- Ino Shino, Hu J S. Is legume inoculation necessary in soybean cropping?[J]. *Bulletin of Agricultural Science*, 1957, (11): 635-636.
- [15] 尹莘耘, 荀培琪, 林声远, 等. 5406 抗菌菌肥料作物机制的研究. I. 5406 号抗菌菌生产刺激物质的分析研究[J]. 微生物学报, 1965, 11(2): 259-269.
- Yin S Y, Xun P Q, Lin S Y, *et al.* Studies on the mechanisms of antagonistic fertilizer ‘5406’ I. Isolation of the stimulating substance[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 1965, 11(2): 259-269.
- [16] 尹莘耘, 荀培琪, 林声远, 等. 5406 抗菌菌肥料作用机制的研究. II. 产生抗菌物质的分析研究[J]. 微生物学报, 1965, 11(2): 270-274.
- Yin S Y, Xun P Q, Lin S Y, *et al.* Studies on the mechanisms of antagonistic fertilizer ‘5406’ II. Analysis of the antibiotic substances[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 1965, 11(2): 270-274.
- [17] 尹莘耘, 张均康, 荀培琪. 5406 抗菌菌肥料作用机制的研究. III. 抗菌菌在不同土类中的适应性及其转化氮、磷元素的分析[J]. 微生物学报, 1965, 11(2): 275-280.
- Yin S Y, Zhang J K, Xun P Q. Studies on the mechanisms of antagonistic fertilizer ‘5406’ III. Analysis of the adaptability of antagonist “5406” in different types of soils and the conversion of nitrogen and phosphorus[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 1965, 11(2): 275-280.
- [18] 尹莘耘, 张均康, 荀培琪. 5406 抗菌菌肥料作用机制的研究. IV. 抗菌菌在土壤中和作物根围活动情况的研究[J]. 微生物学报, 1965, 11(2): 281-287.
- Yin S Y, Zhang J K, Xun P Q. Studies on the mechanisms of antagonistic fertilizer ‘5406’ IV. The activity of antagonist in soil and around crop root[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 1965, 11(2): 281-287.
- [19] 陈子英. 关于细菌肥料生产和使用的意见[J]. 农业科学通讯, 1959, (22): 780-781.
- Chen Z Y. Suggestions about the production and application of bacteria fertilizers[J]. *Bulletin of Agricultural Science*, 1959, (22): 780-781.
- [20] 刘守初. 生物能—沼气的利用[J]. 中国农业科学, 1958, (6): 780-781.
- Liu S C. Application of biological energy—Methane gas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1958, (6): 780-781.
- [21] 中国农业科学院土壤肥料研究所肥料室. 夏季积青肥[J]. 中国农业科学, 1959, (13): 458, 444.
- Fertilizer Division, Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Science. Green fertilizer collecting in summer season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1959, (13): 458, 444.
- [22] 蔡良. 农家肥料中全氮分析方法的改进[J]. 土壤通报, 1964, (4): 55-56.
- Cai L. Improvement of analytical method of total nitrogen in farm manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1964, (4): 55-56.

- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴1981[M]. 北京: 中国统计出版社, 1981.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 1981[M]. Beijing: China Statistics Press, 1981.
- [24] 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): 924-932.
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): 924-932.
- [25] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Science. Regional planning of chemical fertilizer in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.
- [26] 林葆, 李家康. 发展高浓复合肥料, 把我化肥的产、销、用提高到一个新水平[J]. 土壤与肥料, 1987, (4): 6-8.
Lin B, Li J K. Develop high content compound fertilizers, raise to a new level of production, selling and application of chemical fertilizers in China[J]. Soils and Fertilizers, 1987, (4): 6-8.
- [27] 李家康. 复合肥料施用技术[J]. 农业科技通讯, 1984, (2): 26-28.
Li J K. Application technology of compound fertilizers[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 1984, (2): 26-28.
- [28] 宁国赞, 李元芳, 刘惠琴, 等. 我国豆科牧草根瘤菌选育及应用研究进展[J]. 中国草地, 1989, (3): 68-73.
Ning G Z, Li Y F, Liu H Q, *et al.* Progress in selection and application of rhizobium of leguminous grass[J]. Grassland of China, 1989, (3): 68-73.
- [29] 林葆, 金继运, 李家康. 必须十分重视用好肥料[J]. 磷肥与复肥, 1997, (3): 1-4.
Lin B, Jin J Y, Li J K. Fertilizers should be applied properly[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 1997, (3): 1-4.
- [30] 金继运, 自由路, 杨俐苹. 高效土壤养分测试技术与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Jin J Y, Bai Y L, Yang L P. Technology and equipment of efficient soil nutrient testing [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006.
- [31] 杨俐苹, 金继运, 自由路, 黄绍文. 土壤养分综合评价法和平衡施肥技术及其产业化[J]. 磷肥与复肥, 2001, 16(4): 61-63.
Yang L P, Jin J Y, Bai Y L, Huang S W. Comprehensive evaluation of soil nutrients balanced fertilization technique and its industrialization[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2001, 16(4): 61-63.
- [32] 金继运. 土壤养分综合系统评价与平衡施肥技术[J]. 农业科技通讯, 1997, (9): 27.
Jin J Y. Evaluation of soil nutrients balanced fertilization technique and balanced fertilization[J]. Agricultural Science and Technology Bulletin, 1997, (9): 27.
- [33] 周卫, 林葆, 朱海舟. 硝酸钙对花生生长和钙吸收的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(5): 225-227.
Zhou W, Lin B, Zhu H Z. Effect of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ on the growth and Ca absorption of peanut[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(5): 225-227.
- [34] 杨清, 刘新保, 褚天铎, 等. 小麦氮、磷与锌配合施肥的研究[J]. 中国农业科学, 1995, 28(1): 15-24.
Yang Q, Liu X B, Chu T D, *et al.* A study of coordinate application of N, P and Zn fertilizers on wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1995, 28(1): 15-24.
- [35] 李春花, 刘新保, 褚天铎, 杨清. 高产玉米硅锌锰营养及效应研究[J]. 土壤肥料, 1999, (5): 15-17, 44.
Li C H, Liu X B, Chu T D, Yang Q. Effect of applying Si, Zn and Mn on the nutrition and yield of high-yield maize[J]. Soil and Fertilizer, 1999, (5): 15-17, 44.
- [36] 李春花, 张淑香, Goldbach H E. 不同施硼量对油菜叶片中不同形态硼含量的影响[J]. 土壤肥料, 2004, (4): 5-8.
Li C H, Zhang S X, Goldbach H E. Effect of boron rates on content of different forms of boron in rape leaf[J]. Soil and Fertilizer, 2004, (4): 5-8.
- [37] 李春花, 杨清, 褚天铎, 刘新保. 石灰性土壤钙硼钼配合施用对菜豆生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, (3): 90-94.
Li C H, Yang Q, Chu T D, Liu X B. Effect of Ca, B and Mo combined use on bean growth on calcareous soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, (3): 90-94.
- [38] 康玉林, 黄新江, 刘更另. 玉米锌中毒的可能性研究[J]. 中国农业科学, 1992, 25(1): 58-67.
Kang Y L, Huang X J, Liu G L. A study on possible zinc phytotoxicity to corn growth [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1992, 25(1): 58-67.
- [39] 杨清. 大剂量锰对小麦生长的影响[J]. 农业环境保护, 1994, 13(2): 55-57.
Yang Q. Effect of high dosage of manganese on wheat[J]. Agricultural Environmental Protection, 1994, 13(2): 55-57.
- [40] 李家康, 林葆. 含氯化肥科学施用和机理研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学, 2007, 40(S1): 233-243.
Li J K, Lin B. Review and prospects of scientific application of chlorine containing fertilizers and their mechanisms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(S1): 233-243.
- [41] 张宁, 金继运. 小麦、玉米、水稻施肥模型的建立[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 79-84.
Zhang N, Jin J Y. Modeling of fertilizer application on wheat, maize and rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(1): 79-84.
- [42] 李小平, 胡文林. 《土壤肥料试验和农业统计程序包》的设计、研制及其应用[J]. 计算机农业应用, 1991, (1): 30-36.
Li X P, Hu W L. Design, development and application of 《Software package for soil and fertilizer experiment》[J]. Computer and Agriculture, 1991, (1): 30-36.
- [43] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Investigation of nitrate pollution in ground water due to fertilization in agriculture in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(2): 80-87.
- [44] 金继运, 自由路. 精准农业与土壤养分管理[M]. 北京: 中国大地出版社, 2001.
Jin J Y, Bai Y L. Precision agriculture and soil nutrient management[M]. Beijing: China Land Press, 2001.
- [45] 自由路, 金继运, 杨俐苹, 何萍. 农田土壤养分变异与施肥推荐[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 129-133.
Bai Y L, Jin J Y, Yang L P, He P. Variability of soil nutrients and fertilizer recommendation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,

- 2001, 7(2): 129–133.
- [46] 白由路, 金继运, 杨俐苹, 梁鸣早. 基于GIS的土壤养分分区管理模型研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(1): 1–4.
- Bai Y L, Jin J Y, Yang L P, Liang M Z. Research on the subarea management model of soil nutrients by GIS[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(1): 1–4.
- [47] 杨俐苹, 姜城, 金继运, 张峰民. 棉田土壤养分精准管理初探[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 67–72.
- Yang L P, Jiang C, Jin J Y, Zhang F M. Study on site-specific nutrient management in cotton field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 67–72.
- [48] 白由路, 金继运. 发展上海市精准农业几种模式探讨[J]. 农业网络信息, 2004, (4): 12–15.
- Bai Y L, Jin J Y. Several modes of precision agriculture developmental in Shanghai[J]. *Agricultural Network Information*, 2004, (4): 12–15.
- [49] 王秀, 孟志军, 白由路. 机械化变量施肥技术在我国的应用初探[A]. 中国数字农业与农村信息化学术研究研讨会论文集[C]. 2006. 405–411.
- Wang X, Meng Z J, Bai Y L. Primary practice of variable mechanical fertilization in China[A]. *Proceedings of Symposium of National Digital Agriculture and Rural Information*[C]. 2006. 405–411.
- [50] 白由路. 我国农业中的测土配方施肥[J]. 土壤肥料, 2006, (2): 3–7.
- Bai Y L. Soil testing and fertilizer recommendation in Chinese agriculture[J]. *Soils and Fertilizers*, 2006, (2): 3–7.
- [51] 白由路, 杨俐苹, 金继运. 基于高效土壤养分测试技术的测土配方施肥理论与实践[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007.
- Bai Y L, Yang L P, Jin J Y. Theory and practice of soil testing and fertilizer recommendation based on efficient soil nutrient test technique[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2007.
- [52] 卢艳丽, 白由路, 杨俐苹, 王红娟. 基于高光谱的土壤有机质含量预测模型的建立与评价[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1989–1995.
- Lu Y L, Bai Y L, Yang L P, Wang H J. Prediction and validation of soil organic matter content based on hyperspectrum[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1989–1995.
- [53] Wang L, Bai Y L. Nutrients change and spectral response of spring corn leaf for varying amounts of potassium fertilization[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(5): 641–647.
- [54] 何萍, 金继运, Pampolino M F, Johnston A M. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499–505.
- He P, Jin J Y, Pampolino M F, Johnston A M. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 499–505.
- [55] Land L S. Chesapeake Bay nutrient pollution: Contribution from the land application of sewage sludge in Virginia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, (64): 2305–2308.
- [56] 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 effecting factors in rural area of Beijing plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 405–413.
- [57] 刘兴权, 许晶玉, 江丽华, 黄健熙. 山东省种植区地下水硝酸盐污染空间变异及分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1172–1179.
- Liu X Q, Xu J Y, Jiang L H, Huang J X. Spatial variability and distribution pattern of groundwater nitrate pollution in farming regions of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(6): 1172–1179.
- [58] 陈苗苗, 徐明岗, 周世伟, 等. 不同磷酸盐对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 255–262.
- Chen M M, Xu M G, Zhou S W, *et al.* Effect of different phosphate on bio-availability of cadmium in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(2): 255–262.
- [59] 曲荣辉, 张曦, 李合莲, 马义兵. 不同锌水平对低剂量镉在水稻中迁移能力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 517–523.
- Qu R J, Zhang X, Li H L, Ma Y B. Effects of zinc level on low dose cadmium transport in rice plant[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 517–523.
- [60] 赵秉强, 等. 新型肥料[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Zhao B Q, *et al.* New fertilizers[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [61] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料的特性及对作物氮素利用率与氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 779–785.
- Xiao Q, Zhang F D, Wang Y J, *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated with nano-materials on nitrogen recovery and loss of crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 779–785.
- [62] 刘秀梅, 冯兆滨, 侯红乾, 等. 包膜控释掺混尿素对双季稻生长及氮素利用率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1737–1743.
- Liu X M, Feng Z B, Hou H Q, *et al.* Effects of the controlled-release compound urea on the growth of rice and utilizing rate of nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(9): 1737–1743.
- [63] 李志坚, 林治安, 赵秉强, 等. 增效磷肥对冬小麦产量和磷素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1329–1336.
- Li Z J, Lin Z A, Zhao B Q, *et al.* Effects of value-added phosphate fertilizers on yield and phosphorous utilization of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1329–1336.
- [64] 袁亮, 赵秉强, 林治安, 等. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 620–628.
- Yuan L, Zhao B Q, Lin Z A, *et al.* Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 620–628.
- [65] 何萍, 金继运, 等. 集约化农田节肥增效理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- He P, Jin J Y, *et al.* Theory and practice of fertilizer saving and efficiency increasing [M]. Beijing: Science Press, 2012.