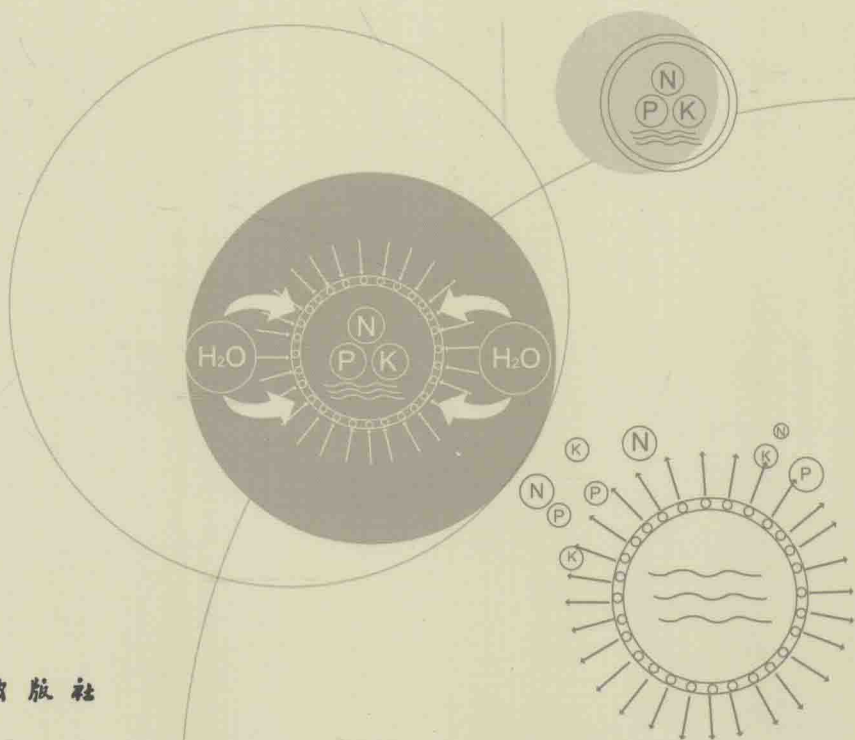


Slow / Controlled Release Fertilizers

缓/控释肥料

第1章 化肥概论；第2章 缓/控释肥料的研究与发展；第3章 缓/控释肥料制备原理与工艺；第4章 缓/控释肥料养分释放机理与预测；第5章 缓/控释肥料的评价；第6章 缓/控释肥料的应用；第7章 缓/控释肥料推荐施肥方案；第8章 缓/控释技术在农业其他领域的应用；第9章 缓/控释肥料发展前景与趋势。

胡树文 主编



化学工业出版社

缓/控释肥料

Slow / Controlled Release Fertilizers

胡树文 主编



化学工业出版社

·北京·

缓/控释肥料是一类重要的新型肥料,通过对肥料养分释放速度的调控,能够缓解常规速溶肥料利用率低、流失严重、污染环境等问题。本书在回顾和总结缓/控释肥料发展历程的基础上,对目前国内外现有的缓/控释肥料的生产制备原理和工艺、养分释放机理与预测、性能评价方法、应用效果进行了系统阐述,并给出了推荐施肥方案。同时,对缓释技术在农业其他领域的拓展延伸做了简介。

本书是在中国农业大学新型肥料课题组的研究工作基础上,广泛参考国内外相关研究成果撰写而成的,既突出学术研究成果,也强调应用实践,可供各地农业院校及农业科研机构从事肥料研究的农业及化工科技人员、从事新型肥料生产和研发的企业技术人员、从事肥料推广应用的农资经营人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

缓/控释肥料/胡树文主编. —北京:化学工业出版社, 2014.9

ISBN 978-7-122-21131-6

I. ①缓… II. ①胡… III. ①长效肥料-研究 IV. ①TQ449

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 142559 号

责任编辑:傅聪智

文字编辑:孙凤英

责任校对:王 静

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张17½ 字数362千字 2014年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:80.00 元

版权所有 违者必究

编写人员名单

主 编 胡树文

编写人员 胡树文 陶树明 邱小云 高子登 张 笑

陈 超 申 锋 汪 玉 金可默 李秋水

庞 龙 王 彬 吕连启

缓/控释肥料是采用一定方法和手段延缓肥料养分在环境中的释放速率的一系列新型肥料的总称。缓/控释肥料通过对肥料养分释放速率的调控,能够缓解常规速溶肥料利用率低、流失严重、污染环境等问题,并成为有望突破当前速溶性肥料肥效和作物产量瓶颈的新型高科技肥料产品。自20世纪中叶诞生至今,缓/控释肥料经历了一个多元化的发展过程,出现了化学合成型有机氮、稳定性氮肥、低溶解性无机复合物和包膜(裹)缓/控释肥等主要品种,具有不同的养分释放特性,实现了肥料养分释放和作物营养需求一致,满足了粮食作物、经济作物、草坪、园艺和林木等各类农艺要求。2013年我国中央一号文件中提出:“启动高效缓释肥料使用补助试点”的意见,开始引导我国缓/控释肥料普及应用。更为廉价、精确和专门化的缓/控释肥料产品定能成为未来肥料产品的主要品种。

全书共分为九章:第1章,化肥概论;第2章,缓/控释肥料的研究与发展;第3章,缓/控释肥料制备原理与工艺;第4章,缓/控释肥料养分释放机理与预测;第5章,缓/控释肥料的评价;第6章,缓/控释肥料的应用;第7章,缓/控释肥料推荐施肥方案;第8章,缓/控释技术在农业其他领域的应用;第9章,缓/控释肥料发展前景与趋势。

本书是在中国农业大学新型肥料研发课题组的研究工作基础上,广泛参考国内外相关研究成果撰写而成的。笔者在对常规速溶肥料应用中存在的问题和缓/控释肥料的发展历程进行回顾和总结的基础上,对目前国内外已有的缓/控释肥料的生产制备原理和工艺、养分释放机理与预测、性能评价方法进行了概述;介绍了缓/控释肥料的应用效果和应用参考方案,对缓释技术在农业其他领域的拓展延伸进行了简介。谨希望能为读者提供帮助和参考。

本书由胡树文任主编,张笑编写第1章,陶树明、高子登编写第2章,高子登编写第3章,邱小云编写第4章,陈超编写第5章,申锋、金可默编写第6章,李秋水、申锋、庞龙编写第7章,汪玉、邱小云编写第8章,王彬、吕连启编写第9章,由胡玉峰完成校稿工作。

在本书编写过程中,得到了中国驻联合国粮农机构全权公使夏敬源研究员、中国科学院沈阳生态研究所武志杰研究员的大力帮助,也得到了中国农业大学资源与环境学院、中国氮肥工业协会及化学工业出版社的支持,在此一并表示感谢。鉴于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

胡树文

2014年5月

第1章 化肥概论**1**

1.1 化肥起源	1
1.1.1 化肥的理论基础	1
1.1.2 化肥工业建立	2
1.1.3 中国化肥工业	3
1.2 化肥对作物生长的作用	5
1.2.1 氮肥	5
1.2.2 磷肥	9
1.2.3 钾肥	13
1.3 化肥的副作用	16
1.3.1 化肥对作物生长的副作用	17
1.3.2 过量施肥对土壤的污染	18
1.3.3 过量施肥对大气污染	19
1.3.4 过量施肥对水体污染	20
参考文献	22

第2章 缓/控释肥料的研究与发展**24**

2.1 影响肥料农业使用效率的因素	24
2.1.1 经济方面	24
2.1.2 作物生理方面	27
2.2 缓/控释肥料农业应用的潜力	29
2.2.1 提高农业效益	29
2.2.2 降低环境污染	35
2.3 缓/控释肥料的定义与分类	37
2.3.1 定义	37
2.3.2 分类	38
2.4 缓/控释肥料研究应用现状	39
2.4.1 研究现状	39
2.4.2 生产与消费情况	48
2.4.3 应用范围	49
参考文献	50

3.1 低溶解性有机氮化合物	55
3.1.1 脲醛缩合物	56
3.1.2 其他有机氮化合物	62
3.2 稳定性氮肥	63
3.2.1 脲酶抑制剂	64
3.2.2 硝化抑制剂	66
3.2.3 稳定性氮肥生产工艺	67
3.3 物理包被肥料	72
3.3.1 硫包衣尿素	74
3.3.2 有机高分子包膜肥料	84
3.3.3 无机包裹肥料	95
3.4 基质型缓释肥料	96
3.5 低溶解性无机肥料	97
参考文献	99

4.1 肥料养分损失途径	104
4.2 降低肥料养分损失的策略	105
4.2.1 农艺措施	105
4.2.2 开发新型肥料	106
4.3 缓/控释肥料养分控释机理	106
4.3.1 有机氮化合物	106
4.3.2 稳定性氮肥	107
4.3.3 物理包膜肥料	107
4.4 养分释放的预测	111
4.4.1 养分释放模拟预测的意义	111
4.4.2 养分释放的数学模型	112
4.5 养分释放模型的新进展	122
4.5.1 MT 模型	122
4.5.2 数学模型的计算机模拟	124

4.5.3 人工神经网络模型	132
参考文献	134

第5章 缓/控释肥料的评价

138

5.1 性能评价	138
5.1.1 静水（或溶液）溶出率法	138
5.1.2 土壤溶出率法	143
5.1.3 电超滤法	145
5.1.4 同位素示踪法	146
5.1.5 性能评价存在的问题	146
5.2 环境效益评价	147
5.2.1 化肥的使用现状	147
5.2.2 氮素在土壤中的行为及其影响因素	149
5.2.3 减少温室气体排放	160
5.2.4 减轻对土壤结构的破坏	162
5.3 缓/控释肥的农业效益评价	163
5.3.1 促进作物生长	163
5.3.2 提高作物产量，改善作物品质	165
参考文献	168

第6章 缓/控释肥料的应用

173

6.1 缓/控释肥料在玉米上的应用	174
6.1.1 缓/控释尿素施用于玉米	174
6.1.2 缓/控释复合肥在玉米上的应用	177
6.1.3 缓/控释碳酸氢铵施用于玉米	179
6.1.4 其他缓/控释肥料施用于玉米	180
6.2 缓/控释肥料在水稻上的应用	180
6.2.1 缓/控释尿素施用于水稻	181
6.2.2 缓释复合肥施用于水稻	182
6.2.3 缓释碳酸氢铵施用于水稻	185
6.2.4 其他种类缓/控释肥在水稻上的应用	187
6.3 缓/控释肥料在小麦上的应用	188

6.3.1 缓/控释尿素施用于小麦	188
6.3.2 缓释复合肥施用于小麦	191
6.3.3 缓释碳酸氢铵施用于小麦	191
6.3.4 涂层尿素在小麦上的应用	192
6.3.5 其他缓/控释肥料在小麦上的应用	192
6.4 缓/控释肥在棉花上的应用	193
6.4.1 复合缓释尿素在棉花上的应用	193
6.4.2 棉花专用缓释肥	194
6.4.3 涂层尿素在棉花上的应用	195
6.4.4 肥隆应用于棉花	196
6.5 缓/控释肥料在大豆上的应用	196
6.6 缓/控释肥料在油菜上的应用	199
6.7 缓/控释肥在花生上的应用	201
6.8 缓/控释肥料在蔬菜上的应用	203
6.8.1 缓/控释肥在青椒上的应用	203
6.8.2 缓/控释肥在黄瓜上的应用	205
6.8.3 缓/控释肥在番茄上的应用	207
6.8.4 缓/控释肥在马铃薯上的应用	209
6.9 缓/控释肥料在果树上的应用	210
6.9.1 缓/控释肥对果品品质的影响	211
6.9.2 缓/控释肥对果品产量的影响	212
6.10 缓/控释肥料在草坪上的应用	214
参考文献	215

第7章 缓/控释肥料推荐施肥方案

218

7.1 粮食作物缓/控释肥料施用方案	218
7.1.1 玉米施肥指南	218
7.1.2 冬小麦施肥指南	219
7.1.3 水稻施肥指南	220
7.2 蔬菜缓/控释肥料施用方案	221
7.2.1 叶菜类蔬菜缓/控释肥施用方案	222
7.2.2 茄果类蔬菜缓/控释肥施用方案	224

7.2.3 瓜菜类蔬菜缓/控释肥施用方案	225
7.2.4 根菜类蔬菜缓/控释肥施用方案	226
7.3 水果缓/控释肥施肥方案	227
7.3.1 苹果缓/控释肥施肥指南	227
7.3.2 葡萄缓/控释肥施肥方案	229
7.4 其他主要经济作物缓/控释肥施肥方案	230
7.4.1 棉花缓/控释肥施肥方案	230
7.4.2 油菜缓/控释肥施肥方案	231
7.4.3 甜菜缓/控释肥施肥方案	232
7.4.4 烟草缓/控释肥施肥方案	232
7.4.5 茶树缓/控释肥施肥方案	233
7.5 草坪缓/控释肥施肥方案	235
7.5.1 不同类型草坪草对氮素的需求情况	235
7.5.2 草坪推荐施肥技术	236
7.5.3 草坪施肥方法	237
参考文献	237

第8章 缓/控释技术在农业其他领域的应用

239

8.1 缓/控释农药	239
8.1.1 农药缓释剂的特点	240
8.1.2 农药缓释剂的分类	240
8.1.3 实例	245
8.2 药肥缓释剂	247
8.2.1 概述	247
8.2.2 药肥的配制	247
8.2.3 药肥的缓/控释技术	249
8.2.4 药肥的实际应用效果	250
8.3 保水剂	251
8.3.1 概述	251
8.3.2 保水剂的特性和作用机理	253
8.3.3 保水剂类型	253
8.3.4 保水剂在农业上的应用原理	254
8.3.5 保水剂在农业生产中的应用与效果	256

8.3.6 保水剂应用中存在的问题及应用前景	258
8.4 农业其他领域的缓释剂	259
8.4.1 缓释剂在畜牧业的应用	259
8.4.2 缓释剂在渔业中的应用	260
8.4.3 蔬果保鲜缓释剂	260
8.5 结语	261
参考文献	261

第9章 缓/控释肥料发展前景与趋势

266

9.1 缓释肥料的发展前景	261
9.2 缓释肥料存在的问题及对策分析	266
9.3 缓/控释肥料发展趋势	268
参考文献	269

第1章

化肥概论

1.1 化肥起源

1.1.1 化肥的理论基础

化肥的施用是人类耕种历史上的一次重大飞跃，因对粮食产量的提升起到巨大作用，化肥被称为“粮食的粮食”。目前为止，化肥的施用仍是最快捷、最有效的粮食增产措施。据联合国粮农组织（FAO）估计，化肥的施用可提高作物单产 55%~57%，提高总产 30%~31%。在种、肥、药、械等众多粮食增产要素中，化肥的作用达到 40%~50%，已经成为最重要的农业生产资料之一。全世界范围内的农事生产都无法离开化肥，化肥在保证粮食安全、提高土壤肥力等方面都具有重大贡献。我国土地面积占世界 7%，却有全世界 21% 的人口居住，解决 13 亿人口的粮食问题，化肥的施用对保证粮食产量、满足日益增长人口的温饱需求等起到至关重要的作用。

肥料施用的历史可以追溯到几千年以前，如我国宋朝陈敷的《农书》、明朝徐光启的《农政全书》等著作都有提及，但主要为有机肥料的施用。施用有机肥的方式可以有效地保证土地的可持续耕种，随世代种植作物土地肥力不会出现大幅下降，是一种环保施肥方式。目前，由于农业带来的环境污染问题日益突出，有机肥料已经重新在农业生产中被提倡。然而，就增产效果而言，起初的有机肥料对粮食产物的增产效果还处于较低的水平。18 世纪中叶的西欧，工业革命爆发驱动大量人口涌入城市，同时人口数量急剧增加，粮食供应出现短缺，为大幅提高粮食生产量，一大批科学家开始对植物生理学及植物营养来源进行科学研究，推动了化肥研究的开展。

1840 年，德国化学家李比希在其所著的《化学在农业及生理学上的应用》中，

推翻了当时流行的“腐殖质”(认为植物所需的碳元素不是来自空气中的二氧化碳,而是来自腐殖质)和“生活力”(认为植物可借自身特有的生活力制造植物灰分的成分)学说,确立了植物生长所需的无机营养元素来源于土壤的观点,引起植物营养界的一场革命,奠定了矿质营养学说的地位。植物矿质营养理论的建立,成为了化肥研发以及化肥工业建立最重要的理论基础。

植物矿质营养的规律是施肥的理论基础。目前,通过高温烘烤植物,分析其灰分,可以得知所有植物所需的矿质元素。将植物在 105°C 下烘干称重,可测得蒸发水分占植物组织的 $10\%\sim 95\%$,而干物质占 $5\%\sim 90\%$,干物质包括有机物和无机物。将在 105°C 下烘干的植物材料在 600°C 下烘烤,干物质中绝大多数有机物的碳、氢、氧、氮等元素以二氧化碳、水、分子态氮和硫氧化物的形式挥发出来,其重量占总干物质的 $90\%\sim 95\%$;剩余的不能挥发的灰白色残渣成为植物灰分(ash),其总重量占干物质中的 $5\%\sim 10\%$ 。灰分中的物质为各种矿质的氧化物、硫酸盐、磷酸盐等,构成植物灰分的元素称为植物灰分元素(ash element),由于它们直接或间接地来自于土壤矿质,所以又称为矿质元素(mineral element)。知道植物所需的营养元素的种类和数量,就可以有针对性地施肥,以增加产量。

1.1.2 化肥工业建立

对植物所需营养元素的探索研究以及矿质元素学说的建立为化肥的研究奠定了理论基础,在19世纪中后期,磷肥与钾肥生产先后建立并得到发展,到20世纪初合成氨的生产得到奠定。以此为基础,化肥工业飞速发展,化肥产品种类多样、产量提升、肥效增加,在全世界范围内,对于保证粮食安全、增加粮食产量、提升农作物品质、推动农业发展起到重要作用。

1842年英国乡绅L. B. 劳斯发现用硫酸处理磷矿石产生的过磷酸钙对农作物有速效增产作用,申请了磷肥专利,成为世界上第一种化学肥料。同年,劳斯与另一位英国科学家J. H. 吉尔伯特建立了著名的罗森斯特实验站,通过大规模的土壤肥力田间实验证明,用腐烂的动植物制造的肥料是土壤中氮元素的重要来源,他们还把动物骨头粉碎成骨粉,以硫酸处理,制成过磷酸钾,并证实这也是一种极为重要的肥料,反驳了李比希不需要动植物肥料的观点。

1845年,李比希从理论转向实践,开始从事化肥研究。受到英国农业化学家T. 韦的启发,他把制作肥料的不溶性钾盐改为水溶性钾盐,在应用中取得很好的效果,于1850年成功发明钾肥。1876年,英国职员D. G. 托马斯为钢铁厂发明了生铁除磷工艺,可使铁中的磷杂质变为复合磷酸盐而得到清除。两年后,托马斯发现这种磷酸盐网渣经粉碎后是一种很好的磷肥,它被称为“托马斯磷肥”。1850年前后,劳斯与吉尔伯特在罗森斯特实验站的研究实验中,曾用提取煤气时所产生的氨制成硫酸铵,发明出最早的氮肥,但这种化肥迟迟未能投入生产和使用。在很长时间里,氮肥的化工生产远远落后于磷肥、钾肥。1898年,德国化学家弗兰克和

卡罗研制出了碳酸铵,但他们没有注意到这种新化合物的用途。直到1901年,才由弗兰克的儿子发现了它的新用途,使之成为一种新的氮肥。1906年,意大利首先建立了大规模的碳酸铵化肥厂。而最早发明的氮肥——硫酸铵1919年才开始投产。1904—1908年,德国物理化学家哈伯成功地以电解水产生的氢与大气中的氮混合,通过高温、高压,在催化剂的作用下,合成了氨。1909年,哈伯与C. 博施合作创立了哈伯-博施氨合成法,解决了合成氨大规模生产的技术问题。1912年,哈伯与博施完成了合成氨的生产工艺流程。1913年,世界上第一个大规模合成氨工厂在德国投产。由于哈伯对合成氨的发明与工业化生产以及对世界范围内急需解决的氮肥问题做出了重大贡献,因此获得了1918年度诺贝尔化学奖。早在1828年,德国著名化学家维勒就在世界上首次合成人工尿素,但是,那时人们并没有认识到尿素作为一种人工氮肥的作用,当时合成尿素的重要意义在于维勒最先打破了有机化合物与无机化合物的界限,首次用人工方法制取了原先认为只有在活的有机体里才能产生的有机化合物。直到1920年,德国才用氨基甲酸铵大量生产尿素,然而,这时的尿素并没有作为氮肥使用,而是用作制造炸药等的原料。后来美国杜邦公司开始生产尿素,并于1935年作为化肥投放市场。

1935年后,化肥的施用改变了世界农业历史。据1981年联合国粮农组织(FAO)提供的数字,1921年化肥施用量为380万吨,1951年达到1499万吨,而至1981年,达到11610万吨。在1960—1995年间,全球氮肥施用量增长了7倍,Tilman等预计至2050年将继续增长3倍。化肥的大量施用,对农产品增产起到了推动作用,使世界粮食产量达到了前所未有的高度,解决了人口急剧增长带来的粮食问题。

1.1.3 中国化肥工业

20世纪初,化肥进入中国,中国农业生产开始步入新的纪元。虽然相较于西方,我国的化肥工业落后了50余年,但自改革开放以来,我国化肥工业飞速发展,目前无论是化肥的生产或是消费总量都成为了世界第一,在国际市场中占据重要地位。

1905年中国开始引进化肥,至1949年新中国成立前,只有两个小规模氮肥厂,两个副产硫酸铵厂,当时唯一的化肥产品——硫酸铵产量约为0.6万吨。总体来说这一时期我国化肥的使用停留在极少量水平。新中国成立后,为促进农业发展,化肥工业得到飞速发展。尤其自1960年起,在氮肥生产上采用了大中小厂并举方针,即同时发展以生产碳酸氢铵为主的年产合成氨0.3万~0.5万吨的小型厂、年产5万~7.5万吨合成氨的中型厂以及引进并自行设计建立的生产尿素为主的年产30万吨的合成氨大型厂。到1983年,全国氮肥生产量已经达到1109.4万吨,30年间增长了220倍。磷肥生产是1953年开始的,仅是生产普通过磷酸钙的小型厂,至1956年产量为1.4万吨。之后,采用酸法与热法生产并举,1983年磷肥产量达

266.6 万吨。由于资源所限,当时钾肥生产量仅为 2.9 万吨。此外,微量元素锌、硼、钼等肥料也有生产。

随着不断从国外引进先进的化肥生产技术和生产设备,我国化肥产业规模不断扩大,尤其是步入 20 世纪 90 年代以来,我国政府开始淘汰化肥落后产能,对化肥企业进行重组改造和节能技术的改造,使得化肥产量不断攀升。发展至今,我国已经成为世界第一化肥生产大国。据统计,我国化肥工业总产值约占化学工业总产值的 20%,是国民经济的重要产业部门。图 1-1 为近年来我国化肥的产量数据。

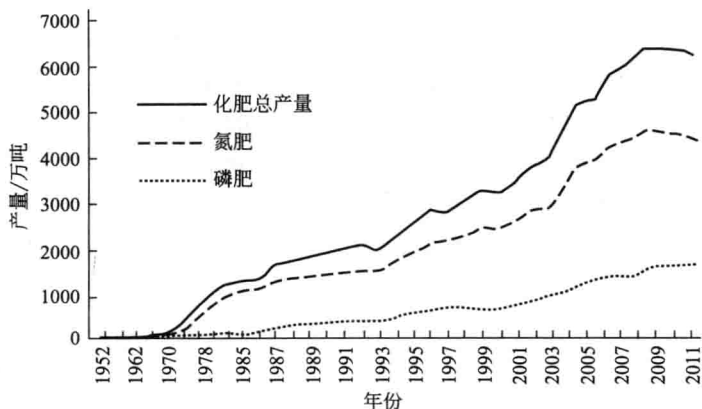


图 1-1 1952—2011 年中国化肥产量 (根据中国国家统计局年鉴数据整理得出)

由图 1-1 可看出,我国化肥产量自 1952 年以来处于持续增长状态。氮肥产量占据化肥总产量的三分之二以上,氮肥的迅猛发展保证了我国化肥产业的增长幅度。近两年,化肥总生产量以及氮肥产量有所降低,其主要原因为我国的化肥生产量已达到较高水平,带来化肥市场产能过剩。加之近年来国家加大了环保核查力度以及安全生产监管,企业必须处理其带来的“三废”,引起化肥生产成本增加,因而近年来化肥产量颇有低迷之势。尽管化肥生产总量有降低趋势,磷肥的生产量却一直处于稳步上升的阶段,除去 2008 年金融危机带来的负增长外,其他年份都处于正增长,平均年增长率在 9% 以上,2010 年已达到 20.2%,成为世界上磷肥产业发展最快的国家之一。由于资源的约束和对进口的依赖性,进口钾肥对于中国钾肥市场具有一定的垄断性。世界现已探明的可开采的钾盐工业储量约为 200 亿吨氯化钾,其中加拿大和俄罗斯的钾肥资源储量总和超过世界总储量的 50% 以上,资源量占世界总量的 80%。我国是一个缺乏钾盐的国家,在发现罗布泊钾盐矿床以前,中国钾资源保有储量 4.57 亿吨,仅占世界储量的 2.6%。全国共有可经济利用的矿床 13 个,保有储量仅 1.64 亿吨(氯化钾)。国产钾肥满足率仅占 15% 左右,每年需进口钾肥 400 万吨以上,钾肥供给不足与耕地普遍缺钾之间的矛盾十分突出。随着一批钾盐新建项目的投产和固体钾盐矿床利用技术的突破,长期困扰中国的钾肥短缺问题有望得到缓解。到 2020 年,若规划项目全部投产,钾肥自给率有望达到 50% 以上。

几十年来,中国化肥产业的发展历经坎坷,化肥生产企业的数量不断增多,产品不断多样化,为推动中国农业的可持续发展,提高人民的生活水平和全面建设小康社会做出了不可磨灭的贡献。虽然我国化肥产业在此发展阶段有了快速稳步的发展,但限于我国化肥产业起步晚、底子薄,化肥工业长期依赖政策扶持,整体竞争力不强,粗放型发展仍占据主导地位。我国化肥产业仍有很长的路要走,需要我们进一步探索和研究。

1.2 化肥对作物生长的作用

目前在植物体内发现的元素有 70 多种,其中已经确定对植物生长发育必不可少的营养元素,即植物的必需元素有 17 种,根据其在植物体内的含量,一般将其分为大量元素和微量元素。植物的大量元素包括碳 (C)、氢 (H)、氧 (O)、氮 (N)、磷 (P)、钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg)、硫 (S) 9 种。其中,碳 (C)、氢 (H)、氧 (O) 大部分来自于大气和水,大部分植物所必需的矿质元素来源于土壤的供给。其中植物需求量最大的三种元素为氮 (N)、磷 (P)、钾 (K),随着作物耕种,其在土壤中的含量大幅减少。化肥领域中,将氮、磷、钾称为“肥料三要素”,氮肥、磷肥和钾肥是最重要的化肥产品。

1.2.1 氮肥

氮肥是农业生产中需要量最大的化肥品种,它对提高作物产量,改善农产品品质具有重要作用。美国科学家 Hoelt 认为,如果立即停止使用氮肥,全世界农作物将会减产 40%~50%。据联合国粮农组织统计,1961—1999 年世界氮肥用量(以纯氮计)从 $11.6 \times 10^6 \text{ t}$ 增加到 $85.5 \times 10^6 \text{ t}$,提高了 7.4 倍。2012 年我国氮肥产量达到 4294 万吨,占我国化肥总产量三分之二以上,氮肥产量决定着我国整体化肥产业的发展。我国氮肥的消耗也十分巨大。据统计,1980 年我国氮肥使用量仅为 934.2 万吨,而至 2012 年氮肥消费量达到 5400 万吨。目前我国氮肥消费量已占全世界消费量的 30% 左右,我国是世界上最大的氮肥生产和消费国。

1.2.1.1 氮肥的分类

19 世纪以前,农业上所需氮肥的来源主要来自有机物的副产品,如粪类、种子饼及绿肥,来源十分有限。1905 年德国人哈伯 (Fritz Haber) 在 20~50MPa 的高压和 500℃ 的高温下,以铁作催化剂,发明了合成氨,将空气中丰富的氮固定下来成为可利用资源,解决了氮肥稀缺的问题。哈伯本人因此获得了 1918 年度诺贝尔化学奖。其基本反应式如下:



反应中, 氮气来源于大气, 氢气来源于水或燃料(煤、石油或是天然气)。广泛的原料来源使得氨大量合成。合成的氨可以直接作氮肥施用, 也可用作其他各类氮肥的合成原料。

以合成氨为原料的各种氮肥, 根据氨基团分类, 化学氮肥可以分为三种类型: 铵态氮肥、硝态氮肥、酰胺态氮肥。

(1) 铵态氮肥

凡氮肥中的氮以 NH_4^+ 或是 NH_3 形态存在的均属铵态氮肥。根据肥料中氮肥铵(氨)的稳定程度不同又可分为挥发性氮肥与稳定性氮肥。前者有液氨、氨水和碳酸氢铵, 后者有硫酸铵和氯化铵等。铵态氮肥一般具有下列共性。

① 铵态氮肥易溶于水, 肥效快, 作物可直接吸收利用。

② 氮肥中 NH_4^+ 带有正电荷, 可与带有负电荷的土壤胶体发生吸附, 从而被固定不易流失。

③ 铵态氮肥中 NH_3 自身易挥发, 当遇到碱性土壤环境, NH_4^+ 铵态氮被还原为 NH_3 , 挥发加速。

④ 当土壤环境通气条件良好, 铵态氮肥可通过硝化作用成为硝态氮肥, 硝态氮肥水溶性佳, 易造成氮肥的淋失, 造成地下水地表水污染。

(2) 硝态氮肥

凡肥料中的氮素以硝酸根 (NO_3^-) 形态存在的均属于硝态氮肥。包括硝酸铵、硝酸钙和硝酸钠等。硝酸铵兼具硝态氮肥和铵态氮肥的特性, 一般来说列于硝态氮肥。这类氮肥具有下列共性。

① 水溶性佳, 溶解度大, 肥效快。

② 容易受热分解, 放出氧气, 使体积增加, 因而硝态氮肥易燃易爆, 在储存过程中易发生危险。

③ 硝态氮肥具有吸湿性, 容易结块。当空气相对湿度较大, 大量吸水后肥料变成液态, 造成使用困难。

④ 硝酸根带负电荷, 不能被土壤胶体吸附, 易流失, 降低使用效率。因而在多雨季节或是水田地一般不施用硝态氮肥, 或是浅施以利于作物根系吸收。

⑤ 除随水流失途径, 由于硝酸根在土壤中发生反硝化作用, 被还原为气态氮氧化物, 引起气态损失。

(3) 酰胺态氮肥

最重要的酰胺态氮肥是尿素, 作为一种有机态氮肥, 尿素中氮以酰胺 ($\text{CO}-\text{NH}_2$) 形式存在。因其含氮量高、物理性状好和无副成分等优点, 尿素成为世界上使用最广泛的氮肥品种。在我国, 尿素生产和消费量仅次于碳铵, 由于尿素的独特优势, 在未来将成为我国主要的氮肥品种。尿素具有下列共性。

① 尿素水溶性佳, 植物吸收好。

② 常温干燥条件下不发生分解反应, 物理性状良好, 呈白色晶体或颗粒。但