

章明奎 著

● 农业系统中

氮磷的最佳管理实践

中国农业出版社

55

农业系统中

章明奎 著

氮磷的最佳管理实践



中国农业出版社

前言

化肥和农药过量施用导致的污染,因其污染源广泛分散、没有明确位置,而被称为农业非点源(面源)污染。在一些发达国家,农业非点源污染已经成为水环境污染的主要来源,我国也正在向这一状况快速发展。据估算,目前我国水体污染物中来自工业污染、生活污染和农业非点源污染的大约各占1/3。非点源污染是目前中国农村环境质量下降的主要原因,它对生态系统功能、人类健康和经济发展产生了严重的影响,是湖泊、池塘、河流和浅海水域生态系统富营养化,导致水藻生长过盛、水体缺氧、水生生物死亡的主要元凶。研究已表明,不合理施用和管理化肥、农药和畜禽粪肥是导致农业非点源污染的主要原因。随着工业污染源排放的控制,工业和城市生活污水对水质污染的影响将逐渐减小,而由种植业和畜禽养殖业导致的非点源污染对水质污染的“贡献率”将日益凸显。因此,科学管理农业系统中的养分已成为我国农业环境治理的当务之急和水污染治理的重中之重。但目前,我国对农业非点源污染的控制还停留在“点”上,对全面治理农业非点源污染还缺乏有效的方法和手段。

发达国家对非点源污染的研究已有近40年的历史,积累了丰富的经验。早在20世纪70年代,为了有效控制非点源氮、磷素对水生环境的危害,英、美等国相继提出并实行最佳管理实践(BMP)的管理方式。通过近30多年的努力,已有许多BMP措施被农民不同程度地采纳用于控制养分进入环境。30年来,发达国家在农业非点源污染治理上

主要通过源头控制,对农田非点源、禽畜养殖场非点源进行分类控制,发展环境安全的农业生产技术,在各主要水域和水源保护区制定了农业生产技术标准,通过技术和政策的结合,在全流域范围内推行最佳管理措施,削减农业非点源污染排放量。我国属于强度资源约束型国家,土地经营高度集约化及土地利用方式多变的国情,决定了我国农业的可持续发展只能走“内涵式”的发展道路。而要保证农业生产的可持续性、资源利用的可持续性,实施农田养分最佳管理(BMP)是必由之路。我国农业非点源污染的研究刚刚起步,只在局部的区域作过一些工作,目前缺乏系统、可靠的基础资料,在BMP研究和应用方面还相当薄弱。发达国家的BMP基本框架及控制农业非点源污染上采取的技术方法,对我国BMP措施的制订有借鉴作用。

基于以上目的,本书对农业系统中氮磷对非点源污染的影响、氮磷的循环、迁移机理及平衡问题和农业系统中氮磷控制的BMP技术、研究方法等进行了总结。全书共8章,第1章评述了最佳管理实践的内涵、发展历史及应用研究现状;第2章阐述了农业生产对水体富营养化的影响,分析了我国富营养化的现状;第3章总结了农业系统中氮磷的循环和迁移特点及规律;第4章和第5章分别介绍了农田和养殖业系统中氮磷的BMP管理措施;第6章介绍了用湿地技术控制和处理农业系统中氮磷的污染;第7章介绍了农业系统中非点源控制研究中氮磷的观测技术;第8章概述了农业氮磷污染控制的研究模型和信息技术。

本书是编者在多年科研和教学工作的基础上编写而成,部分研究结果得到了浙江省科技厅科技项目(编号2004C33061)的资助。在编写过程中参考了大量文献资料,考虑到篇幅只列出主要文献,特此说明,并向所有作者一并致以衷心的感谢。本书兼具理论性和实践性,可供土壤、环境、农学、生态和农业信息技术等专业的科技工作者及大专院校相关专业的师生参考,希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。本书的出版得到了浙江大学农业部土壤学重点学科的资助。由于本书内容涉及较广,编者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者给予指正。

编 者

2004年12月于杭州

目 录

第1章 可持续农业的最佳管理实践

1.1 最佳管理实践的概念	1
1.2 最佳管理实践的内涵	1
1.3 最佳管理实践的研究与应用历史	2
1.4 最佳管理实践中养分的管理	3
1.4.1 养分平衡	4
1.4.2 养分管理实践	4
1.5 地区性农业水质 / 水量管理的 BMP 实例	7
1.6 我国实施最佳管理实践的必要性	10

第2章 农业生产与水体富营养化

2.1 水体富营养化	11
2.1.1 富营养化的概念和成因	11
2.1.2 非点源与点源污染	13
2.1.3 富营养化的化学指标	15
2.1.4 富营养化的生物学指标	18
2.1.5 水体自净作用	19
2.2 农业生产与富营养化	20

2.2.1 氮磷在生物生产中的作用	20
2.2.2 化肥与富营养化	21
2.2.3 畜牧业与富营养化	24
2.2.4 渔业生产与富营养化	25
2.2.5 其他农事活动与富营养化	28
2.3 水体富营养化及其治理管理现状	30
2.3.1 富营养化现状	30
2.3.2 农业生产对水体富营养化的贡献	33
2.3.3 农田非点源氮磷污染负荷的定量评价	34
2.3.4 非点源污染控制与管理研究现状	36
2.3.5 非点源污染控制研究实例	37

第3章 农业系统中氮磷的循环与迁移

3.1 土壤中氮的循环与迁移	41
3.1.1 农业生态系统中氮素输入	42
3.1.2 氮的转移与转化	42
3.1.3 氮的去向	44
3.1.4 土壤氮素循环模型	49
3.2 土壤中磷的循环与迁移	50
3.2.1 土壤磷的存在形态与有效性	50
3.2.2 磷的转化与积累	53
3.2.3 土壤中磷的迁移与流失	54
3.3 动物对氮磷的利用与排泄	61
3.3.1 饲料中氮磷源及其有效性	61
3.3.2 畜禽排泄物的污染成分	64
3.4 农田氮磷流失	66
3.4.1 氮磷流失与土壤氮磷积累的关系	66
3.4.2 径流中氮磷负荷的计算方法	68
3.4.3 农田氮磷流失特征研究实例	68

第4章 农田氮磷的BMP

4.1 农田氮磷管理的理念	76
4.1.1 农田氮磷管理总体要求	76
4.1.2 农田氮磷管理中的几种错误观点	76

4.1.3	氮磷在管理上的差异	77
4.1.4	源管理与迁移因素管理	78
4.2	农田氮磷流失风险评价	78
4.2.1	农田非点源污染潜在危险性评价	78
4.2.2	农业非点源污染流域单元划分方法	84
4.3	农田氮磷平衡	86
4.3.1	农场和地区规模养分平衡的计算	86
4.3.2	农田养分平衡的现状	87
4.4	氮磷的土壤管理技术	90
4.4.1	农田氮素流失控制	90
4.4.2	农田磷素流失控制	92
4.5	农田氮磷管理的灌溉技术	94
4.5.1	节水灌溉	95
4.5.2	灌溉施肥	97
4.5.3	旱作田和水稻田的水肥管理	98
4.6	农田氮磷管理的施肥技术	99
4.6.1	精确技术在土壤养分管理中的应用	99
4.6.2	平衡施肥与测土施肥	101
4.6.3	膜控技术 (MCR)	102
4.6.4	生态农业政策和其他技术措施	104
4.7	流域综合管理实践	105
4.7.1	农业非点源污染控制的流域综合管理的概念	105
4.7.2	流域规模氮磷联合管理	106
4.7.3	最佳管理措施的制订	107
4.7.4	水土流失防治控制非点源污染	108

第5章 养殖业氮磷的BMP

5.1	减少动物氮磷排泄的饲料技术	111
5.1.1	营养调控	111
5.1.2	植酸酶的应用与作用	115
5.1.3	柠檬酸的应用与作用	119
5.1.4	其他环保型饲料	119
5.2	动物粪肥管理技术	120
5.2.1	封闭式动物生产和粪肥管理	120

5.2.2	土地可施用粪肥的容量	122
5.2.3	农地粪肥施用最佳管理评估程序—粪肥应用风险指数	123
5.2.4	畜禽排泄物的处理	129
5.3	畜禽粪便的生物除臭技术	130
5.3.1	臭气的产生和成分	130
5.3.2	消除臭气的原理与方法	131
5.3.3	生物脱臭法	132
5.3.4	植物型除臭剂	134
5.3.5	除臭型饲料	134
5.4	农业废水中脱氮除磷技术	135
5.4.1	生物除磷	135
5.4.2	生物脱氮	136
5.4.3	化学除磷	137
5.5	畜禽粪便的资源化利用技术	138
5.5.1	资源化利用的方向	138
5.5.2	畜禽养殖废弃物的减量化无害化处理	139
5.5.3	畜禽养殖废弃物资源化综合利用	141
5.5.4	畜禽废物管理系统	143
5.5.5	动物排泄物管理和利用实例	143
5.6	水产养殖中的氮磷管理技术	147
5.6.1	水产养殖氮磷污染负荷	147
5.6.2	降低水产养殖饲料氮磷污染	148
5.6.3	养殖废水回用	150
5.6.4	适度养殖	150
5.6.5	生物性治理措施	151

第6章 农业氮磷湿地处理的BMP

6.1	湿地的类型与功能	154
6.1.1	湿地的类型	154
6.1.2	湿地的功能	155
6.2	构建缓冲带和湿地过滤农业氮磷	156
6.2.1	缓冲带在农业非点源污染中的作用	156
6.2.2	缓冲带类型与功能	157
6.2.3	缓冲带防治农业非点源污染的作用	158

6.2.4 影响缓冲带功能效益的因素·····	161
6.2.5 缓冲带系统的建立·····	161
6.3 人工湿地在农业面源污染控制方面的应用·····	162
6.3.1 国内外研究现状和进展·····	162
6.3.2 人工湿地的类型·····	162
6.3.3 人工湿地营养物的去除机理·····	166
6.3.4 人工湿地对农业非点源污染的去除效果·····	169
6.3.5 影响湿地对营养物质去除的因素·····	170
6.3.6 人工湿地污水处理系统的缺点·····	172
6.4 人工湿地的设计·····	173
6.4.1 人工湿地构造·····	174
6.4.2 人工湿地的工艺·····	175
6.4.3 农村污水生态处理·····	176
6.4.4 基质的选择·····	176
6.4.5 人工湿地污水处理系统的优化·····	177
6.5 生物因素在湿地净化污水中的作用·····	178
6.5.1 植物的作用·····	178
6.5.2 微生物的作用·····	180
6.5.3 酶的作用·····	181
6.5.4 湿地植物的选择·····	182

第7章 农业系统中氮磷的测试观测技术

7.1 土壤养分流失的观测技术·····	185
7.1.1 水样采集与处理技术·····	185
7.1.2 地表径流中磷的形态的分级·····	186
7.2 土壤氮磷的诊断技术·····	187
7.2.1 土壤中植物有效态氮磷的测定·····	187
7.2.2 环境安全的土壤磷素诊断技术·····	192
7.2.3 应用土壤磷素诊断指导施肥·····	200
7.3 水样中氮磷的测试技术·····	202
7.3.1 水样中氮的测试技术·····	202
7.3.2 水样中磷的测试技术·····	203

第8章 氮磷污染控制的研究模型和新技术

8.1 非点源污染的模拟模型	205
8.1.1 发展历程	205
8.1.2 模型类别	206
8.1.3 研究进展	209
8.1.4 模型化方法在非点源污染治理中的应用	210
8.2 USLE 和 RUSLE 模型	211
8.3 EPIC 模型	212
8.4 AGNPS、AnnAGNPS 和 ANSWERS 模型	214
8.4.1 AGNPS 模型	214
8.4.2 AnnAGNPS 模型	215
8.4.3 ANSWERS 模型	215
8.5 其他模型	216
8.5.1 CREAMS 模型	216
8.5.2 ARM 模型	218
8.5.3 HSPF 模型	218
8.5.4 SWRRB 模型	218
8.5.5 SWAT 水文模型	218
8.5.6 WEPP 模型	219
8.5.7 SHE 模型	220
8.6 非点源模型存在问题、发展趋势	221
8.6.1 非点源模型研究存在的问题	221
8.6.2 农业非点源污染模型的发展趋势	222
8.6.3 需要进一步研究的问题	223
8.7 信息技术在农业非点源污染控制中的应用	224
8.7.1 3S 技术在农业非点源污染研究中的应用	224
8.7.2 农业非点源污染管理信息系统	229
主要参考文献	230

第1章 可持续农业的最佳管理实践

1.1 最佳管理实践的概念

最佳管理实践 (Best Management Practices, BMPs) 是一系列农业养分和农药管理措施的总称,它主要是针对非点源污染而提出的农业控制性措施的总称,可包括不同的内容。它是指能科学地展示使农业生产的负影响达到最小的生产系统和管理策略,或定义为获得最大的粮食、纤维生产的农业效益、限制农业生产对环境的不良影响,并在经济上可行的田间操作程序。最佳管理实践是预防和削减非点源污染负荷最有效的实践措施,在控制非点源污染中占有极为重要的地位。美国环境署 (USEPA) 将其定义为:任何能够减少或预防水资源污染的方法、措施或操作程序,包括工程、非工程措施的操作和维护程序。现已提出的最佳管理实践有:少耕法、免耕法、综合病虫害防治、防护林、草地过滤带、家畜粪肥的大田合理施用、人工水塘和湿地等方法 and 措施。

提出 BMP 的背景是近年来农业非点源污染程度和河流、湖泊污染中农业污染物的比重越来越大,但目前尚无单一工程或方法可彻底消除这些影响。而实施 BMP 的目的是:①治理现有的水质/水量问题;②使由土地利用引起的水质/水量问题达到最小;③提高 BMP 的效益;④根据新获得的信息寻求其他 BMP 措施。短期目标是尽可能快地基于现有的最佳知识和信息识别、评价、发展和应用 BMP 以保护水资源;长期目标是进一步提炼和改进并提出科学的 BMP,以加强水质的保护。

1.2 最佳管理实践的内涵

最佳管理实践包括养分管理、耕作管理和景观管理等三个层次,

它们在空间尺度上不同,在效果上互相配合,并围绕最大效率地保证物质循环、减少养分的损失,获得良好的环境中心原则,其中养分管理是BMP的核心。BMP管理的目标是不损害生产者的经济利益,同时又能将农田营养物质对环境的危害降至最低限度的管理措施,内容包括针对区域氮素和磷素养分平衡管理、切断氮和磷源及流失路径的联系以及实现这些目标而实行的经济、教育、科技等具体措施。实用的BMP必须具环境保护性和经济可行性,并以科学和有关信息为依据,必须针对真实存在的问题。通过近三十多年的努力,已有许多改进措施被农民不同程度地采纳用于降低进入环境的养分。

1.3 最佳管理实践的研究与应用历史

英、美等国是最早进行BMP的国家,20世纪70年代起,英、美等国开始实行BMP管理方式,以有效控制非点源氮、磷素对水生环境的危害。1972年美国联邦水污染控制法(FWPCA)首次明确提出控制非点源污染,倡导以土地利用方式合理化为基础的“最优管理实践”(BMPs)。1977年的清洁水法(CWA)进一步强调非点源污染控制的重要性。1987年的水质法案(WQA)则明确要求各州对非点源污染进行系统的识别和管理,并给予资金支持。由于产生氮、磷污染区域必须有氮、磷源和流失途径,当二者同时作用时污染问题就会产生,BMP主要就是针对这些区域的管理措施。

通常氮素养分平衡比磷素更易实现,而且氮、磷在土壤中转化的化学行为不同,因此很容易在实践上将二者分开管理,但好的BMP方案应该是建立在氮磷综合治理基础上的。BMP是针对不同地区土壤、气候等自然条件的多样化的管理措施,只有原则而没有具体量化的指导指标,因此BMP的制订和执行必须为生产者和社会所认可。BMP的执行首先要鼓励生产者自愿参与,然后是要有明确的管理目标,同时还要有具体的计划、规章制度等,最后要与教育、财力、技术等结合。

政府部门在减少水资源非点源污染中常起着非常重要的作用。美国EPA已建立了最低水质标准和实行禽畜养殖场动物废弃物的限排措施,并根据区域特征,实施相应的BMP措施。为协调政府部门,公众社会也可通过多种方式以实施有关措施改进养分管理,包括:①产品的价格调节,教育、技术资助和税收控制;②限制或调节某些常规的生产实践,例如在风险区不施用易淋失性的化肥;③支持发展废弃物处理市场;④投资研究和有关生产实践以减少对环境的危害。政府应该鼓励自愿的方式解决农业水污染问题,为了便于实施,政府部门应该提出相应的措施,并提供一定的经济资助。

研究结果已表明,世界上几个区域实行BMP方法后,流域水质得到了明显的改善。早在20世纪70年代,已有研究调查了实施BMP管理7~10年对减少农业流域磷输出的影响(Sharpley和Rekolainen,1997),这些研究定量了实施BMP管理以后磷损失的变化,并与未经处理的流域(对照区)进行了比较。大量的研究示范也表明,改进的BMP方法常能比传统的方法更有效地控制养分的流失,在许多地区已获得良好的效果。例如,采用传统措施经营的农户可能会基于乐观产量目标确定施肥量,使肥料施用量超过作物的需要量,但实行改进的管理措施可明确有关作物对养分需要的详细信息。又如,尽管土壤测试对改进养分管理很重要,但许多农户认为这会增加额外的费用,但实际上土壤、植物测试可避免过量施肥,减少养分的损失,有助于提高农户的净收益,特别是对常低估前季残留下的养分的农田

进行土壤测试特别有意义。政府在改进养分管理的研究、发展和示范中起着重要的作用。1991—1994年间,美国农业部资助了不同的水分生态区进行示范项目,促进了不同地理环境农业区的农户实行改进养分管理。这些项目均注重关心养分的管理,包括养分监测、农业系统的改进、实行新的农业实践、精确农业。目前,世界上一些发达国家和地区已把控制农业非点源污染作为水质管理的必要组成部分。为了促进农田养分BMP管理在减少水资源非点源污染中的作用,美国政府部门还提供了教育、技术、经费资助,鼓励采取养分BMP管理或其他降低污染的措施。其中通过教育可使民众真正了解非点源污染的危害,因为当农民不知道由作物生产决策不妥引起的田外效应时,或当他们没有因水体污染受罚而花费更高的投入,或选择的生产系统可获得更大的利润、更小的经济风险和更高的养分流失时,也可增加对水体的污染。1996年美国农业部建立了环境质量鼓励方案(EQIP)以取代以往的经费资助方案,更好地针对那些最需要采取有关措施的地区,其中一半直接用于养分的BMP实践。

尽管如此,目前农田养分的BMP研究还仅仅是一个开端,还有许多问题和技术有待于进一步的研究和应用。其中有几个基本的关键性科学问题必须解决,包括环境安全的土壤养分标准、环境安全的肥料施用量的确定、农田养分流失关键源区的界定和有机肥施用量的基准问题。目前,许多国家已制订了农作物土壤养分的丰缺标准,但这些标准都是针对作物生产的,用这些指标和标准还很难去评价养分的环境安全性,特别是随着作物产量的提高,农田养分标准也有所提高,但这些标准的提高势必会引起严重的环境问题。而目前采用的肥料施用量主要是根据作物对养分的需要量、土壤有效养分水平和肥料的利用率进行确定的,这一方法忽视了残留于土壤中的养分长期积累对环境的后果,这对磷素尤为突出。因此基于环境安全,正确使用肥料,使养分的施用既满足农作物正常生长的需要,又使其对环境的负影响最小是控制农田养分流失的必经之路。在治理农田非点源污染时,界定农田养分流失关键源区也是十分重要的,因为治理非点源污染难度和费用均较大,而已有的研究已表明,不同农田对某一流域的地表水污染的贡献可有很大的差异,因此治理非点源污染应该把有限的资金用于关键源区,这是治理非点源污染成功的关键。在这方面,美国农业部曾提出了磷指数系统进行农田磷流失潜力的评价,在应用时各个州还根据各自的特点,作了相应的修改。由于农田养分流失的复杂性,这个评价系统要进行推广应用还存在局限性,特别是应用于像我国水网平原区稻田土壤养分流失潜力评价时还存在较大的局限性。另外,有关有机肥的施用历来都是以氮素为基准确定使用量,但目前的有机肥已明显不同于以往的农家肥,由于添加剂的使用,有机肥中磷/氮比已达到了较高的水平,以氮为基准确定有机肥施用量常常会导致土壤中磷素的富集。而且,现代规模养殖产生的有机物中常含大量易流失的可溶性有机物(高COD、BOD)和可溶性养分,因此如何根据有机肥中养分组成合理施用有机肥已显得十分重要。

此外,为有效地降低养分进入环境而产生的损失,还需要进一步研究以下几个方面的问题:①更好地了解农业生产与水质的关联;②通过农业研究发展科学、经济、完善的管理实践;③提出特别适于鼓励农民实行资源节约实践的政策和方案。

1.4 最佳管理实践中养分的管理

成功地制订和执行有关措施,使非点源氮磷损失达到最小,需要充分了解农业氮磷对水

生植物的潜在影响、不同农业系统和管理措施对氮磷的流失风险的影响和氮磷流失时空变异与不同景观的水文学条件的关系。其中重点是加强养分管理。

1.4.1 养分平衡

只确定总的或某一面积内养分施用量难以对农田养分是否会对环境产生危害作出准确的评估。一个可选择的措施是进行养分质量或残留平衡分析,计算保存在土壤或损失进入环境的残留氮和磷量。养分质量平衡分析可指示养分的输入(如商业化肥、动物粪便、其他废弃物和由前季豆科作物提供的养分数量)与养分输出(收获作物吸收的养分量)的接近程度。正的净养分质量平衡表明有养分残留于土壤或损失进入空气、随径流进入地表水体、淋失进入地下水。但残留的氮本身并不会导致水质问题,例如,温湿土壤条件和干燥空气可使残留氮挥发进入大气或进入水系统前被植物缓冲带吸持。所以尽管残留氮可能较高,但某些地区地表和地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 并不高。负的净平衡表明作物从田间移去的养分超过了施用量,它们的差值主要来自贮存在土壤中的养分或通过降雨获得的养分。长期的负平衡可耗竭土壤养分,破坏土壤生态系统,影响土壤的生产力。

残留平衡可以田块为基础或单位面积进行计算,以便为农户养分管理决策提供依据。基于广泛地理区域计算养分平衡可评估总体养分损失的潜力,并可明确何地养分管理需要改进。某一农田(或单位面积)养分的平衡可按下式计算: $\text{NB}=\text{CF}+\text{L}+\text{NPK}-\text{H}-(\text{PR}-\text{CR})$,式中,NB为养分平衡值;CF为商品化肥中养分数量;L为前茬豆科作物固定的养分;NPK为施用的粪肥中的N、P、K养分;H为收获作物带走的养分;PR为前茬作物残留在土壤中的养分;CR为残留在土壤中的当季作物残体内的养分。根据养分平衡值的大小可把农田养分平衡划分为三类:①高类:养分输入超过养分输出量的 $>25\%$;②中类:养分输入超过养分输出的 $<25\%$;③负类:养分输入小于养分输出。

某一地区土壤养分平衡类型中高和负两类的比例下降而中等类的比例上升表明该区养分管理已得到了改善。如果农户低估了土壤的有效养分或为了获得高产而过量施用氮肥,可出现正的残留平衡。气候条件不利或病虫害严重的年份可导致产量比常年低得多,使作物吸收的养分减少,也可导致高养分的平衡。因此,不同年份之间养分的平衡状况可有明显的变化,长期持久的高养分平衡可增加淋失风险,影响水质,这已经引起广泛的关注。

1.4.2 养分管理实践

有效的养分管理,包括评估养分的需要、养分的施用时间、养分的施用位置,这些措施都有助于减少养分流失至环境而促进长期的持续生产。各种实践的效果受农田条件、农户管理知识和技能、经济因素和天气等的强烈影响。

1.4.2.1 评估养分需要量

采用传统措施经营的农户可能会基于乐观产量目标确定施肥量,但没有说明所有养分的来源。实行改进的管理措施必须明确有关作物对养分需要的详细信息。应用养分平衡方法可较好地评估需要的养分数量。除计算某一田块(或单位面积)养分质量平衡外,还需要分析生长期植物组织中养分状况,监测可能出现氮素的缺乏。土壤氮素的测试可用于管理何时施用肥料和肥料的施用方法。

尽管土壤P、N、K、pH和微量元素的测试对改进养分管理很重要,但许多农户认为这

会增加额外的费用,但实际上土壤、植物测试有助于改进农户的净收益。对于常低估前季残留下的养分的农户进行土壤测试特别有意义,可避免过量施肥,减少氮素的损失,提高农户的收益。其中,对前季干旱的农田在施用粪肥前进行土壤氮素测试的经济效益最为明显。进行土壤氮素测试指导施肥的理想时间是植物需要养分前,因为氮(土壤中主要为 $\text{NO}_3\text{-N}$)可在短时期内下降。但若天气条件限制使农户不能及时地采样测试,农户从土壤测试中的获益也会随之消失。但磷在土壤中相对稳定,因此磷肥可在施肥前任何时间进行测试。1995年美国不同类型农田的土壤测试的比例有较大变化,从22%(冬小麦)至83%(马铃薯),而且不同年份土壤测试率也有较大的变化。1990—1995年期间,大部分土壤的测试(包括氮的测试)以马铃薯田和大豆田为最高。

在作物生长期对植物组织进行测试,也可明确养分缺乏状况,然后通过施用养分进行校正。通过植物组织测试,农户可根据目标产量确定最低的施肥量。另外还可探明和校正由于生长量比常规年份大引起的养分缺乏。1994年,美国约有61%的马铃薯田和12%的棉地进行了植物采样分析。氮素测试是否有助于降低氮肥应用量也取决于所采用的氮素施用量的建议标准。据Schlegel和Havlin(1995)报道,美国许多州采用的氮素施用标准比获得最大效益的施用量要高出30%~60%。如果事先知道粪肥中养分含量可使农户更好地确定其他来源养分的合用量。但1995年,美国进行粪肥的分析比率仅为8%(玉米地和大豆地)~12%(小麦)。豆科作物虽然也可提供氮素,但美国只有约一半的前茬种植豆科作物的农田在确定化肥施用量时考虑了这类作物带入田间的氮的数量。

1.4.2.2 养分施用时间

适时施用氮肥满足作物的生物学需要可使氮素残留和损失减少,而节省氮素的施用量。施用肥料的最佳时间因作物、土壤质地、气候和肥料稳定性而异,例如,中夏季节玉米需氮量最高,在秋季和早春施用氮比在种植作物后施用更易损失至环境中,并需要施用更大量的氮肥以弥补其损失。Meisinger和Randall(1991)研究发现在播种时和播种后分次施用氮肥可减少40%氮的损失,而不影响作物产量。然而,目前在秋天和早春施用化肥仍较为流行,对某些作物,这种现象还有增加的趋势。例如,美国1990—1995年间约三分之二的冬小麦、20%~35%的玉米、大豆、棉花和马铃薯的肥料在播种前的秋天施用。近年来这种现象在马铃薯和冬小麦中还有增加的趋势。另外,大约有35%~57%的大豆、棉花、马铃薯和玉米在播种前施用化肥,只有秋马铃薯在播种后施用肥料的比例有增加的趋势。在播种前的秋季和早春施用肥料而不在生长期施用肥料主要出于经济原因。在春季和作物生长期施肥比秋天施肥需要花费更多的劳力,增加了成本;另外,秋季比春季的肥料价格低也促使农户在秋季而不是在春天或作物生长季节施用化肥。

1.4.2.3 养分的施用位置

据美国农业部对作物系统的调查,肥料面施是通常的施肥方式。肥料面施降低田间操作费用,但面施氮素最易导致氮素损失至环境中。相反,条施包括注入土中和条施于作物行边可以增加作物对养分的吸收,增加氮肥的利用率。氨态氮注入土内可降低淋失挥发,比面施损失减少35%(Chorn和Broder,1991),增产15%(Mengel,1986)。注入土内的施用方法比面施的田间操作费用高,但总的费用(劳力和肥料)比面施低。

精确农业是根据不同位置条件差异而采用不同措施的一种农业活动,是新近发展改进养

分施用时间、数量和位置的新技术。该技术把整个农田划分为若干小区,应用可调节施肥量的施肥机和卫星定位系统,根据各小区条件确定和施用作物实际需要的养分含量。精确农业需要测试土壤、定位和监测产量的仪器、存储数据的计算机和可调节施肥量的施肥机。初步估计额外的田间操作费约每英亩 7~8 美元 (Lowenberg-DeBoer 和 Swinton, 1995)。精确农业可通过以下几方面改进农业收入,具有一定的潜力:(1) 区分农田内通过增加养分应用可增加产量和农户收益并获得比投入更高的收入的区域;(2) 区分通过减少投入将减少费用而不影响产量的区域,降低地表径流、地下排水和淋失等的农业化学物质损失。但精确农业是一个新近发展的信息技术,目前还难以准确评估该技术对产量、肥料利用、农场尺度生产力和环境等的长期影响。

1.4.2.4 化肥产品的选择

不同氮肥在土壤中的化学稳定性有很大的差异,稳定性不同可影响它们对环境危害的程度。硝酸铵在土壤中最不稳定,其次依次为氨水、尿素和其他加入硝化抑制剂的铵态氮。对于具有淋失风险的地区(如砂土),铵态氮肥可减少氮的损失,对于具氨挥发问题的区域(如具干热空气和潮湿土壤),应优先施用 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。氮素稳定剂或抑制剂(尿酶抑制剂和硝化抑制剂)可减缓氮肥从 $\text{NH}_4\text{-N}$ 至 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的转化,有助于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的供应与作物需氮素高峰期的协调。在排水条件较差或渗漏明显、免耕的田块,或在秋季应用氮素、作物需要大量氮素、在施氮时土壤过湿等情况下,应用硝化抑制剂的潜在益处最为明显。若施氮水平在最佳氮肥施用量以下时应用硝化抑制剂可得到最大的益处。硝化抑制剂已在玉米田施用氢氧化铵时广泛应用。然而,近年来的调查表明,当应用硝化抑制剂时,美国玉米生产带的玉米种植户也会施用更多的氮肥。这种实践不仅减弱了应用硝化抑制剂的经济效益,同时也增加了农田氮素的残留和淋失。据调查,1990—1995 年间,农户应用硝化抑制剂的农田比例在 2% (冬小麦)~10% (玉米)。

1.4.2.5 作物选择与管理

农作物与豆科作物轮作可减少氮肥需要。另外,作物轮作可减少昆虫数量,促进植物健康,增加氮素吸收效益。生长早期豆科作物吸收土壤中的残留氮可减少氮素的淋失。然而,尽管有这些益处,作物轮作常比单一作物获得较少的利润。在两季作物之间种植覆盖作物可防止残留氮的形成。种植覆盖作物也能减少侵蚀使养分损失减少。由于种植覆盖作物对农田作物的经济利益是有限的,因此该实践很难被广泛采纳。据 1990—1995 年调查,仅有约 1%~4% 的主要大田作物区采用种植覆盖作物。

1.4.2.6 灌溉管理

改进灌溉实践有助于农户均匀地灌溉作物,控制灌溉水量。土壤灌水量可影响土壤中养分浓度和养分向根区的移动速度,过量的灌溉水可促进氮素淋失,降低土壤养分浓度,降低植物对养分的吸收;同样灌溉过少也会导致作物缺水影响生长,而使作物减产。通过转变重力灌溉为根据作物需水进行喷灌,或采用改进的重力灌溉(例如缩短灌水的流动距离)也可改进灌溉效益。改进灌溉的成本较高,但节水灌溉的经济效益和增产效果也相当明显,可补偿成本费用。

1.4.2.7 粪肥和有机废弃物管理

粪肥对土壤来说是一类良好的有机质,在某些情况下,它也是一种经济的(尽管有限)