



主要农田生态系统氮素行为与 氮肥高效利用的基础研究

朱兆良 张福锁 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

主要农田生态系统氮素行为与 氮肥高效利用的基础研究

朱兆良 张福锁 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以我国粮食主产区太湖地区水稻-小麦轮作区、华北平原小麦-玉米轮作区的水稻、小麦和玉米为研究对象,重点阐述了农田氮素来源、转化及迁移规律,作物高效吸收利用氮素基因型差异及生理遗传机制,农田及区域水平上的作物高效施氮技术等。书中的数据是基于同一区域进行的土壤学、植物营养学、农学和分子生物学的协同研究结果,具有综合性、系统性和应用性。本书不仅有助于相关研究领域的读者全面认识农田氮素高效利用的原理,也可供农业技术推广相关人员提供提高氮肥利用率的具体解决途径。

本书可供农学、土壤科学、植物营养学、生态与环境科学相关的研究人员使用,也可供氮肥生产及农业技术推广人员,农业及环境部门的决策、管理人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究/朱兆良等著.
—北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-027519-6

I. 主… II. 朱… III. ①土壤氮素-研究②氮肥-使用-研究
IV. ①S153.6②S143.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 084296 号

责任编辑:韩学哲 沈晓晶 / 责任校对:桂伟利
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

信浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年5月第一次印刷 印张:25 3/4 插页:4

印数:1—4 000 字数:592 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

氮肥既是农业增产必不可少的农业化学品,又是环境污染物的主要来源之一。因此,提高氮肥利用率、降低氮肥损失、充分发挥其增产效果、降低环境风险,既是保障粮食安全的迫切需求,也是保护环境的必然选择。如何实现农学效应与环境效应相协调,是一个涉及众多学科的全球性的重大科学命题,同时也是世界各国作物高产与资源高效所面临的技术难题。

这一命题对我国来说更具特殊性和挑战性。为了保证粮食安全和农产品的充分供应,必须通过包括增施氮肥在内的各种技术途径,以尽可能提高单位面积作物的产量。自20世纪70年代以来,我国化肥氮(包括氮肥和复合肥中的氮)的年使用量快速增加,对我国农业发展发挥了不可替代的作用。但是,由于单位面积氮肥施用量远高于世界平均水平,加之施用技术和方法不合理,氮肥的当季利用率偏低而损失率偏高,环境污染问题日益严重,东部一些高产地区高量施氮肥尤为突出。不仅如此,问题的严重性还在于,今后随着人口的持续增长和耕地的不断减少,为了保障粮食安全和农产品的供应,必须在有限的耕地上增加投入,以提高单位面积作物产量,而这又必将对环境产生更大的压力。因此,在这种高度集约化条件下,如何充分发挥氮肥的增产效果并保护好环境,协调好作物高产与环境保护的关系,是我们面临的不同于一些人少地多的发达国家的严峻挑战。

在围绕这一命题进行的多学科研究中,农田生态系统的氮素循环及其农学效应和环境效应的评价是一项基础性的研究工作。因此,国家自然科学基金委员会于2003年春启动了题为“主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究”的重大项目,拟定的科学目标是,“进一步阐明我国主要农田生态系统中土壤氮素转化和迁移规律、损失途径及生态、环境效应,基本明确作物高效利用氮肥的生理机制和遗传学基础,并提出调控作物氮肥高效利用的原理和方法”。该项目由朱兆良院士和张福锁教授共同主持,组织中国科学院南京土壤研究所、中国农业大学、南京农业大学、中国科学院遗传与发育生物学研究所、中国科学院生态环境中心等的研究人员组成项目组,选择太湖地区水稻-小麦轮作系统和华北平原冬小麦-玉米轮作系统,从土壤学、植物营养学和遗传学等多个领域开展综合性基础研究。通过5年的共同努力,取得了可喜的进展。本书就是在这些研究成果的基础上,由课题组主要成员撰写而成的。

具体分工如下:

- | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 第1章 | 朱兆良 | 张福锁 | 米国华 | 巨晓棠 | 施卫明 | 陈新平 | 沈其荣 | 邢光熹 |
| | 张绍林 | 童依平 | | | | | | |
| 第2章 | 邢光熹 | 谢迎新 | 熊正琴 | 颜晓元 | 施书莲 | 赵旭 | 朱兆良 | |
| 第3章 | 巨晓棠 | 刘学军 | 张丽娟 | | | | | |
| 第4章 | 张亚丽 | 沈其荣 | 郭世伟 | 徐阳春 | 黄启为 | 段英华 | | |
| 第5章 | 施卫明 | 李素梅 | 赵学强 | | | | | |

第6章 童依平 苏俊英 李 滨 李振声

第7章 米国华 陈范骏 李春俭 张福锁

第8章 张绍林 尹 斌 于东升 林德喜 范晓晖 史学正

第9章 陈新平 赵荣芳 崔振岭 张福锁

第10章 徐绍辉

第11章 胡克林

本书的内容虽然只涉及我国两个主要农业高产生态区，但是我们希望书中所提出的一些观点和思路具有更为广泛的科学意义和参考价值。在本书的写作过程中，我们力求数据可靠、分析透彻、论证全面、观点客观，但疏漏和不足之处在所难免，望读者批评指正。

我们真诚感谢国家自然科学基金委员会的资助。感谢项目专家组成员李振声院士、吴平教授、张维理研究员的指导。感谢为本书的研究成果做出贡献的所有研究人员和技术支撑人员。感谢科学出版社对本书出版的大力支持。

朱兆良 张福锁

2009年10月

目 录

前言

第 1 章 总论	1
1.1 主要农田生态系统的氮素循环及环境效应	2
1.1.1 三种典型作物氮肥去向与用量的关系	2
1.1.2 不同农田生态系统化学氮肥的农学和环境效应	3
1.1.3 环境来源氮已成为农田生态系统和水体氮输入的重要组成部分	5
1.1.4 华北地区旱作农田系统土壤累积 NO_3^- 的成因、生物有效性及潜在的环境风险	7
1.2 作物高效利用氮肥的根系生物学及生理机制	9
1.2.1 氮高效基因型的田间筛选	9
1.2.2 氮高效作物的根系生物学特性	10
1.2.3 氮高效作物的生理特征	11
1.2.4 水稻增硝营养的响应机制	12
1.2.5 氮高效品种的农学评价	13
1.3 作物高效利用氮肥的遗传学机制	14
1.3.1 不同水稻和小麦品种间氮效率存在显著差异	14
1.3.2 高效吸收氮素是氮高效水稻和小麦品种的重要基础	14
1.3.3 小麦高效吸收氮素的根系生物学特征及遗传基础	14
1.3.4 水稻高效吸收氮素的根系生物学特征及遗传基础	15
1.3.5 水稻“增硝促铵”吸收的分子基础	16
1.4 作物高产与环境保护相协调的氮肥总量控制	17
1.4.1 协调作物高产与环境保护的氮肥总量控制	18
1.4.2 高产与环境保护相协调的氮肥推荐点的测试技术	20
1.4.3 总量控制与点的测试相结合的氮肥推荐的经济效益与环境效益评价	21
1.4.4 基于 GIS 技术的区域氮肥优化管理	22
1.4.5 氮高效品种的农学与环境效应评价	24
1.4.6 结论与创新	26
1.4.7 展望	26
1.5 土壤-作物体系中氮素迁移的模型	27
1.6 结论	27
参考文献	27
第 2 章 水稻-小麦轮作体系中土壤氮素循环、氮素的化学行为和生态环境效应	29
2.1 引言	29
2.2 太湖地区水稻-小麦农田化肥氮去向的定量评价及农学和环境效应	30

2.2.1	水稻-小麦两季化肥氮去向的定量评价	30
2.2.2	水稻-小麦农田化肥氮的农学和环境效应	35
2.3	太湖地区稻田生态系统氮循环对环境影响的某些评论	36
2.3.1	水稻田和小麦田地下饱和层土壤的反硝化	37
2.3.2	稻田土壤对污染河水中氮、磷的转化和固持	40
2.4	环境来源氮在稻田氮平衡中的贡献及对水环境的影响	41
2.4.1	大气干湿沉降氮对水稻、小麦营养的贡献	41
2.4.2	本区河水的氮素污染状况以及用作灌溉时对水稻氮营养的贡献	42
2.4.3	河湖水面积接收到的大气干湿沉降氮量	42
2.4.4	大气干湿沉降氮中 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 值和 $\delta^{15}\text{NH}_4^+$ 值的时间变化及指示意义	43
2.5	太湖地区地表水体氮负荷计算及污染源分析	47
2.5.1	常熟地区农村人和畜禽排泄物的处理和利用状况调查	47
2.5.2	常熟市规模化畜禽养殖场排泄物的处理和利用	48
2.5.3	苏州地区畜禽排泄物的处理和利用	48
2.5.4	太湖地区河湖水体氮、磷污染源分析	49
2.5.5	减缓太湖地区水体氮、磷负荷的对策	50
2.6	需要进一步研究的科学问题	51
2.6.1	化学肥料氮进入农田后的形态转化及淋出液中可溶性有机氮的起源、形态区分和分配	51
2.6.2	氮肥-土壤-植物-大气间 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 交换的定量评价	51
参考文献		52
第3章 华北平原小麦-玉米轮作体系中的氮素循环及环境效应		55
3.1	引言	55
3.1.1	华北平原小麦-玉米轮作体系的氮素管理现状及环境效应	55
3.1.2	华北平原小麦-玉米轮作体系氮素循环研究进展	56
3.2	小麦-玉米轮作不同施氮水平下氮肥的农学效应和环境效应	57
3.2.1	化肥氮去向的定量评价	57
3.2.2	氮肥的农学效应、环境效应及对土壤氮肥力的影响	63
3.2.3	氮肥的损失途径	66
3.2.4	华北平原小麦-玉米轮作传统水肥管理条件下的氮肥去向	67
3.3	现有土壤供氮水平条件下小麦-玉米轮作体系对氮肥环境承受力的分析	69
3.3.1	氮肥环境承受力	69
3.3.2	氮肥的后续农学和环境效应	72
3.4	土壤剖面累积硝态氮的产生、移动及生物有效性	73
3.4.1	累积硝态氮的产生	73
3.4.2	土壤剖面累积硝态氮的移动与淋洗	77
3.4.3	土壤剖面不同部位累积硝态氮的作物有效性	79
3.5	华北平原大气氮素沉降和灌溉水带入的氮在农田氮素平衡中的贡献	84
3.5.1	华北平原大气湿沉降带入的氮素及其时空变异	84

3.5.2	华北平原大气干沉降带入的氮素及其时空变异	87
3.5.3	华北平原大气沉降带入的氮素总量及其植物有效性	94
3.5.4	华北平原灌溉水带入的氮素	99
3.5.5	华北平原干湿沉降和灌溉水带入的氮在农田氮素平衡中的贡献	99
3.6	协调生产与环境目标的氮素管理技术途径	100
	参考文献	101
第4章	水稻高效利用氮素的生理机制	107
4.1	引言	107
4.1.1	我国水稻生产状况	107
4.1.2	我国水稻氮肥施用的问题	112
4.2	水稻氮素吸收累积特征与氮素利用	113
4.2.1	水稻氮高效基因型的筛选	113
4.2.2	水稻一生的氮素需求特征	117
4.3	水稻根系氮素高效吸收特征	119
4.3.1	水稻氮素高效吸收与水稻根系生物学特性	119
4.3.2	水稻对铵态氮、硝态氮的吸收特征	123
4.4	水稻氮素高效利用特征	128
4.4.1	水稻氮素同化酶与氮素高效利用的关系	128
4.4.2	水稻中后期植株体内氨挥发特征及其与水稻氮素同化酶活性的关系	132
4.5	水稻增硝营养机制	135
4.5.1	水稻硝态氮营养的生态意义	135
4.5.2	水稻根际硝化特征	136
4.5.3	利用数学模型研究水稻根际土壤硝化特征	139
4.5.4	水稻增硝营养的生理与分子机制	141
4.5.5	水稻增硝作用与水稻氮素高效利用的关系	144
	参考文献	145
第5章	水稻氮高效的遗传基础	153
5.1	水稻氮高效品种的筛选	153
5.1.1	氮高效水稻品种的大田筛选	153
5.1.2	苗期不同氮效率品种实验室水培筛选	170
5.2	水稻苗期高效吸氮的分子生理学基础	177
5.2.1	不同氮效率品种苗期吸氮效率差异的生理基础	177
5.2.2	水稻苗期编码铵态氮吸收代谢基因家族表达特征的定量分析	181
5.3	增硝营养对水稻根系生长和铵吸收的影响及其分子基础	189
5.3.1	增硝营养对水稻根系生长的影响	190
5.3.2	不同铵硝比营养对水稻氮相关基因表达的影响	193
5.3.3	水稻“硝促铵吸收”分子基础初探	194
5.4	氮高效的分子生物学调控	196
	参考文献	198

第 6 章 小麦高效利用氮素的生理与遗传机制	204
6.1 小麦品种间氮素吸收和利用效率差异	204
6.1.1 氮效率的定义	204
6.1.2 小麦品种间氮素吸收、利用效率的差异	205
6.2 氮素吸收、利用效率与产量性状的相关性	207
6.3 栽培不同氮效率小麦品种后土壤硝态氮残留的差异	208
6.4 小麦高效吸收氮素的生理机制	211
6.4.1 小麦品种(系)间根系发育的差异	211
6.4.2 根系发育与吸氮量的相关分析	214
6.4.3 吸收动力学与氮素吸收的关系	215
6.5 影响利用效率的因素分析	216
6.6 调控小麦吸氮量及其相关性状的 QTL 定位	216
6.6.1 “早选 10 号×鲁麦 14” DH 群体的 QTL 定位	216
6.6.2 “小偃 54×京 411” RIL 群体的 QTL 定位	225
6.7 调控小麦氮素利用效率(Gute)及其相关性状的 QTL 定位	228
参考文献	232
第 7 章 玉米高效利用氮素的生理与遗传机制	234
7.1 玉米对氮素的吸收利用规律	234
7.1.1 生长后期吸氮对氮素吸收的影响	234
7.1.2 地上部库容对氮素吸收的影响	235
7.2 玉米的氮效率及其基因型差异	236
7.2.1 玉米的氮效率	236
7.2.2 玉米氮效率的基因型差异	237
7.3 玉米高效利用氮素的生理机制	238
7.3.1 氮的吸收速率	238
7.3.2 氮素对玉米根生长发育的调节	240
7.3.3 氮素的利用效率	243
7.3.4 玉米体内的氮素循环	245
7.3.5 氮高效品种的生物学术特征	247
7.4 玉米高效利用氮素的遗传机制	248
7.4.1 玉米氮效率和根系性状的配合力及杂种优势分析	248
7.4.2 氮胁迫条件下玉米根系相关基因的 QTL 定位	253
7.5 问题与展望	258
7.5.1 高产品种、氮高效品种及氮高效品种的筛选指标	258
7.5.2 氮高效基因与氮高效分子育种	259
参考文献	260
第 8 章 水稻-小麦轮作系统中优化施氮及提高氮肥利用率的原理与方法	264
8.1 水稻-小麦轮作系统中作物的需氮特征	264
8.2 水稻-小麦轮作系统中氮肥的损失与对策	267

8.2.1	水稻季氮肥的损失与控制对策	267
8.2.2	小麦季氮肥的损失与控制对策	271
8.3	水稻-小麦轮作系统中水稻季氮肥的农学效应、经济效应与环境效应	275
8.3.1	水稻-小麦轮作下水稻季土壤供氮量和氮肥用量	275
8.3.2	水稻-小麦轮作下水稻的氮肥增产效果及氮肥表观利用率	276
8.3.3	水稻季 ¹⁵ N 试验中氮素的去向与平衡	279
8.3.4	水稻季氮肥用量与环境	280
8.3.5	水稻高产与环境保护相协调的区域氮肥总量控制	281
8.3.6	结论	285
8.4	GIS 技术在区域性水稻-小麦轮作系统优化施氮中的应用	285
8.4.1	试验区概况	286
8.4.2	区域水稻-小麦轮作系统土壤氮素及相关特性空间预测	286
8.4.3	区域水稻-小麦轮作系统优化施氮量的空间预测	288
8.4.4	区域水稻-小麦轮作系统优化施氮量的效益评估	291
8.5	创新点	294
	参考文献	294
第 9 章	小麦-玉米轮作系统中优化施氮和提高氮肥利用率的原理和方法	296
9.1	小麦-玉米轮作系统氮肥管理的问题分析	296
9.1.1	华北平原小麦-玉米轮作系统的施肥现状	296
9.1.2	华北平原小麦-玉米轮作系统氮肥利用率和环境效应	297
9.1.3	华北平原小麦-玉米轮作体系氮素循环与氮素平衡	299
9.2	农田尺度上小麦-玉米轮作系统优化施氮和提高氮肥利用率的原理和方法	307
9.2.1	“以根层养分调控为核心”的氮素实时监控技术原理	307
9.2.2	“以根层养分调控为核心”的氮素实时监控技术的建立	307
9.2.3	“以根层养分调控为核心”的氮素实时监控技术的定位试验验证与应用	308
9.2.4	进一步提高氮肥效率的途径	312
9.3	小麦-玉米轮作系统的区域氮肥管理	314
9.3.1	小麦-玉米轮作系统氮肥施用的区域总量控制	314
9.3.2	基于 GIS 技术的区域氮肥管理	318
9.4	进一步提高小麦-玉米轮作系统的生产力和氮效率	327
9.4.1	高产和氮高效基因型小麦和玉米品种的农学与环境效应	327
9.4.2	同步提高作物产量与氮效率	331
	参考文献	333
第 10 章	水稻-小麦轮作系统中的氮素循环模拟研究	339
10.1	理论基础	339
10.2	模型开发	353
10.2.1	基本结构	353
10.2.2	模型的输入输出界面	354

10.2.3 模型参数	354
10.3 模型验证	360
10.3.1 氨挥发	360
10.3.2 NO_3^- -N 渗漏	362
10.3.3 N_2O 的排放	363
10.3.4 作物地上部分吸氮量	363
10.3.5 生物量与作物产量	365
10.4 模型应用与评价	367
10.4.1 土壤氮素平衡	367
10.4.2 产量效益评价	368
10.4.3 经济效益评价	368
10.4.4 环境效益评价	369
参考文献	371
第 11 章 小麦-玉米轮作体系中的氮素循环模拟研究	374
11.1 土壤-作物系统中氮素模型研究现状综述	374
11.2 作物生长与土壤水氮运移联合模型的建立	379
11.2.1 联合模型总体框架	380
11.2.2 土壤水热氮运移模块	380
11.2.3 作物生长发育模块	382
11.2.4 作物生长与土壤水热氮运移的耦合	386
11.3 联合模型在小麦-玉米轮作体系中的应用	387
11.3.1 田间试验	387
11.3.2 模型参数	388
11.3.3 模型验证	390
11.3.4 模型应用	394
11.3.5 结论	396
参考文献	397

彩图

第1章 总 论

提高氮肥增产效果和利用率、减少农田氮系损失及其对环境的压力，既是一个全球性研究课题，又是我国农业可持续发展的严峻挑战。施肥是增产和保障粮食安全必不可少的措施，而化肥生产造成的资源和环境压力以及化肥损失造成的环境风险，使得粮食、资源和环境的矛盾极其尖锐。如何在保证作物高产的前提下保护环境成了国内外的重大研究问题。

围绕提高氮肥增产效果和利用率、减少农田中氮肥的损失问题，国内外已经进行了长期的、多方面的研究。其中主要包括：①农田化肥氮的去向的定量评价及影响因素，并在此基础上发展出氮肥有效施用的原则和技术；②作物高效利用氮素的机制，为挖掘作物高效利用氮素的生物学潜力提供依据。

定量化农田化肥氮的去向是研究其农学效应和环境效应的基础。在这一方面，国内外虽然已进行了长期、大量的研究，但是这些研究大多仅限于对作物回收、土壤中残留氮和氮总损失的评价，有些研究虽然也涉及了不同损失途径的原位定量研究，但多是针对个别损失途径（如氮挥发或 N_2O 排放等）；而且有关农田化肥氮的去向以及通过不同损失途径的迁移通量与施氮量关系的研究很少，因而难以较全面地同时定量评价化肥氮的农学效应和环境效应，更难以扩展到区域尺度。因此需要进行点的完善和整合，并建立模型，扩展到区域。

在应用研究方面，有关氮肥的合理施用原理和技术的研究已经取得了不少进展。例如，尽量避免土壤中矿质氮的过量存在、充分利用和提高作物根系的竞争性吸收能力，以及进行某些转化迁移过程的控制等是主要的技术原则。相应的措施有：①适宜施氮量的推荐；②氮肥深施；③减少生长前期的施用量、重点施于旺盛生长期；④水肥综合管理；⑤硝化抑制剂、脲酶抑制剂和水面分子膜等的应用；⑥农田养分综合管理等。其中，关键和难点是确定适宜施氮量。

利用作物对土壤中矿质氮的竞争吸收，以降低其浓度，从而削弱与损失有关的氮素转化和迁移各个过程的强度，是提高氮肥利用率、减轻其环境压力的重要途径之一。在这一方面，除了上述有关各点外，氮高效品种の利用问题是一个值得探索的新途径。在过去二十多年中，国内外对植物氮素吸收和利用的生理学、遗传学和分子生物学基础等已经进行了较多的研究，明确了作物氮素营养效率存在明显的基因型差异，克隆了很多与氮素吸收和利用有关的基因，但对它们与作物的氮高效吸收利用的内在联系尚缺乏深入研究；对于氮高效品种在协调高产与环保中的作用有多大？体现在哪些方面？也缺乏明确的认识。

为此，在国家自然科学基金重大项目“主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究”的支持下，本项目组围绕“进一步阐明我国主要农田生态系统中土壤氮素转化和迁移规律、损失途径及生态、环境效应，基本明确作物高效利用氮肥的生理机制和遗传学基础，并提出调控作物氮肥高效利用的原理和方法”这一科学目标，以华北地区小麦—

玉米轮作系统和太湖地区水稻-小麦轮作系统为主要对象,开展了多学科的综合基础性基础研究。主要研究内容是:①农田生态系统中土壤氮素循环、氮素的化学行为和环境效应;②农田生态系统中作物(小麦、玉米、水稻)高效利用氮肥的根系生物学及生理机制;③农田生态系统中作物(小麦、玉米、水稻)高效吸收、利用氮肥的遗传研究;④农田生态系统中优化施氮和提高氮肥利用率的原理和方法。预期目标是:①对这两个地区的农田中化肥氮的去向及农学效应和环境效应进行尽可能全面的定量评价;②探明适合我国农村实际的宏观控制与点的测试相结合的最佳施氮量的推荐原理和方法,并与GIS技术相结合,建立区域尺度的优化施氮技术体系;③在筛选小麦、玉米和水稻氮高效品种的基础上,深入分析作物高效吸收利用氮素的根系生物学特性及生理遗传机制,初步评价氮高效品种在协调高产与环境保护中的作用。通过5年的研究,取得了许多新的认识。

1.1 主要农田生态系统的氮素循环及环境效应

地处长江三角洲的太湖流域和黄河下游的华北平原是中国20世纪80年代以来人口增长、工农业发展最快的地区。化肥氮的大量投入、集约化养殖业的迅速发展和化石燃料消耗的快速增长极大地扰乱了自然界的氮素循环,引起了严重的地表水富营养化、地下水硝酸盐污染、酸雨及土壤酸化、温室气体排放和大气污染等生态环境问题,进而影响了人体健康和生态系统的正常功能。

虽然过去对水稻-小麦轮作和小麦-玉米轮作系统氮素循环及土壤氮素的化学行为已有不少研究,但大都比较分散,缺乏系统性,很难从不同尺度上对这些结果进行整合。“主要农田生态系统中土壤氮素循环、化学行为和生态环境效应”子课题的主要任务是定点原位观测两个轮作体系进入农田化肥的氮去向及非肥料源氮(大气干湿沉降氮、灌溉水带入氮、非生物固氮)的数量,特别是确定主要损失途径。同时定量评价其农学和环境效应,并进行模型整合,为两个代表性农田系统氮肥的优化管理提供理论基础。

1.1.1 三种典型作物氮肥去向与用量的关系

两个生态区分别用 ^{15}N 示踪法研究了氮肥利用率、残留率(肥料氮在0~100 cm根区土壤的残留)和总损失(气态或渗漏出100 cm以下)与氮肥用量的关系(图1-1)。由图1-1可以看出,随施氮量的增加,三种作物氮肥利用率均下降;水稻、玉米的损失率迅速增加,小麦的损失率保持在20%左右;水稻、玉米的残留率减少,小麦的残留率有增加的趋势。总的来看,稻田氮肥利用率低、损失率高,旱地利用率高、损失少;华北玉米季氮素损失量随施氮量的增加远高于小麦季。水稻、玉米种植投入的氮肥更容易损失,不容易在土壤中残留,而小麦种植体系则相反。这可能是由水稻、玉米生长季雨热同期、氮肥更容易发生气态或淋溶损失造成的。

对损失途径的田间原位观察结果表明(图1-2),随施氮量的增加,太湖水稻季 N_2O 和 NO_3^- 淋洗量增加很少, NH_3 挥发增加很快(是活性氮的主要部分);太湖小麦季 N_2O 排放微弱增加, NH_3 挥发缓慢增加, NO_3^- 淋洗量增加很快(是活性氮增加的主要部分),这主要归因于两种作物种植季的生态环境条件差异。华北小麦季随施氮量的增加, NH_3 挥发显著增加, N_2O 排放呈先增加后平缓的趋势,土壤残留硝态氮(反映淋洗潜势)在

施氮量超过 150 kgN/hm² 时, 呈直线上升趋势。华北玉米季随施氮量的增加, NH₃ 挥发显著增加, N₂O 排放也呈显著增加趋势, 土壤残留硝态氮在施氮量超过 120 kgN/hm² 时, 呈直线上升趋势, 这种差异也主要归因于两种作物种植季的生态环境条件。

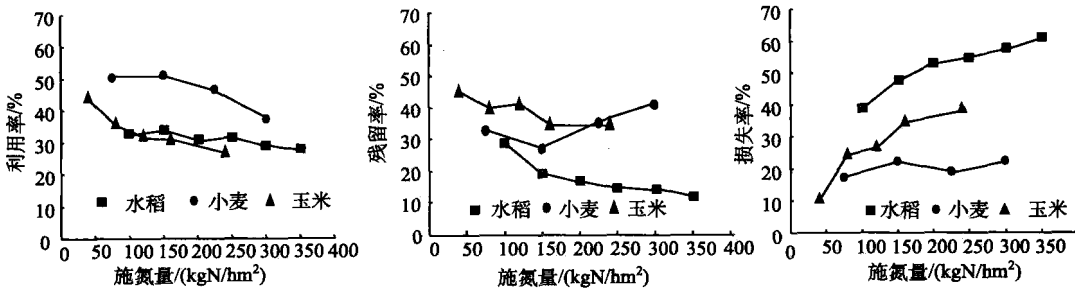


图 1-1 农田中氮肥去向与施氮量的关系

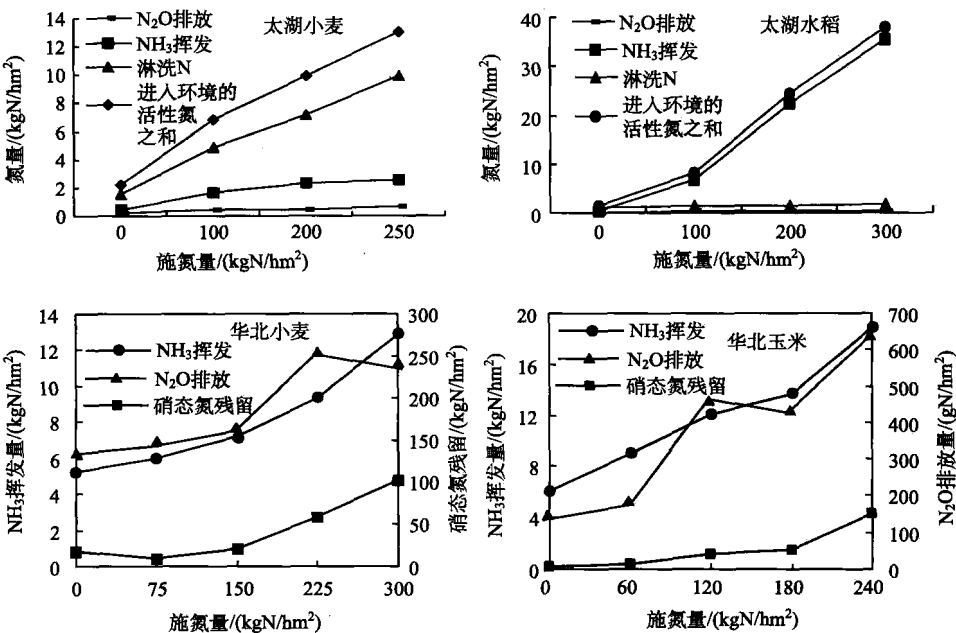


图 1-2 施氮量对 NH₃ 挥发、N₂O 排放和 NO₃⁻ 淋洗或残留的影响

1.1.2 不同农田生态系统化学氮肥的农学和环境效应

分别在两个生态区的同一试验地点对进入水稻-小麦农田或小麦-玉米农田的单位化肥氮的各种去向和损失途径进行了评价, 并在同一代表性田块闭合了单位化肥氮归宿。由于太湖流域和华北平原的气候、土壤和农作制度不同, 水稻-小麦轮作稻田和小麦-玉米轮作旱作农田, 进入环境的活性氮存在很大差异。就两个生态区农民传统施肥量和施肥方法比较 (图 1-3), 华北平原是石灰性土壤, NH₃ 挥发成为化学氮肥主要的损失途

径，占施氮量的 23%，远高于太湖水稻-小麦农田。太湖水稻-小麦农田的水稻生长季 NH_3 挥发也只占施氮量的 12%，小麦生长季只占施氮量的 3%。华北平原地区由于土壤水分和有机质含量低，反硝化损失很低，只占施氮量的 1.4%，而太湖地区水稻生长季表观反硝化损失可占施氮量的 25%，小麦季也可达 17%。然而，南方水稻生长季 NO_3^- 的淋洗损失量只占施氮的 0.3%，小麦生长季也只占施氮量的 3.4%，而华北平原区 NO_3^- 淋洗损失可占施氮量的 18%。研究发现，硝态氮的残留与淋洗是华北平原小麦-玉米轮作传统水肥管理条件下氮肥损失的重要途径，改变了过去认为北方旱地淋洗损失很少的传统观念。硝态氮淋洗主要发生在大量灌水和强降雨条件下，其他时期主要以硝态氮的形式在剖面中累积。优化施氮 (N_{mm} 测试) 可以显著减少淋洗损失份额，但不能减少 NH_3 挥发损失的份额 (图 1-3)。在南方的水稻-小麦轮作体系中，由于水稻生长季和小麦生长季水分管理各不相同及土壤氧化还原条件的不同，水稻季 NH_3 挥发和反硝化损失率均高于小麦生长季，而氮的淋洗损失则低于小麦季。由于水稻季气态损失高于小麦季，稻田淹水期土壤氮矿化量高于小麦季，水稻生长季利用了较多的土壤氮，致使水稻季土壤残留氮也低于小麦季 (图 1-3)。

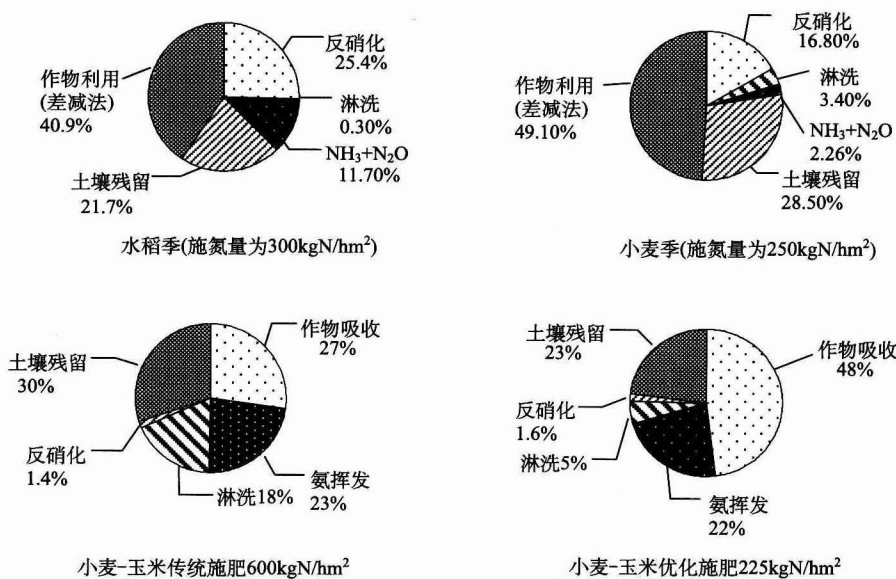


图 1-3 两个轮作体系中化肥氮的不同去向占施氮量的百分比

目前，两个不同农田生态系统定位观测点所在的区域，一年两季作物化学氮肥施用量普遍超过 550 kgN/hm²。高化学氮肥的投入，虽然保持了相对较高的产量，但也带来了氮过量引发的环境问题。在氮肥投入、作物高产和环境可承受三者之间寻找一个结合点已是一个紧迫的问题。为此，在两个定位观测点对不同施氮量得到的作物产量和进入环境的氮量进行了对比研究，以期为主要农田系统提出适宜施氮量提供理论依据。

研究发现作物产量并不随施氮量成倍增加而相应增加，而是缓慢增加或不增加 (表 1-1 和表 1-2)。与此相反，进入环境的活性氮量 (NH_3 、 N_2O 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、可溶性有机氮) 增加的倍数远远超过产量增加的倍数，有时也超过了施氮量增加的倍数。这说

明随施氮量超过经济最佳量时,环境代价加重。例如,华北地区小麦-玉米轮作传统施肥的氮肥投入是优化施肥(N_{min} 测试)的4.08倍,产量仅为1.03倍,但进入环境的氮素是优化施氮的6.83倍。优化施氮使土壤氮素处于平衡状态,传统施氮则处于盈余状态。两个区域的定位观测结果表明,太湖流域水稻-小麦生态系统和华北平原小麦-玉米农田生态系统都存在很大的减少化学氮肥用量的空间。可以在既保证相对较高作物产量的同时,又避免了化学氮肥过量施用给大气和水环境带来的严重影响。未来的农业管理措施应该在最大限度地利用畜禽粪便、作物生产残余物(包括秸秆)或其他来源有机物和环境养分、在轮种体系中加入豆科植物、增加农业内部物质循环的同时,用化学氮肥作为补充,减少人类农业生产活动中氮素对环境的影响。

表 1-1 水稻-小麦轮作系统中施氮量对产量和进入环境的氮的影响

作物	施氮情况		产量效应		环境效应	
	施氮量 (kgN/hm ²)	施氮增 加比	产量 (kg/hm ²)	产量增 加比	进入环境的 NH ₃ +淋洗 N+ 反硝化 N/(kgN/hm ²)	进入环境的 氮增加比
水稻	100		5908		8.1	
	200	2.0	7093	1.2	24.3	3.0
	300	1.5	7881	1.1	37.6	1.5
小麦	100		4000		6.3	
	200	2.0	5800	1.5	10.0	1.6
	250	1.3	6000	1.0	13.2	1.3

表 1-2 小麦-玉米轮作化学氮肥的农学效应和环境效应(四个轮作周期八季作物平均)

氮肥推 荐方式	施氮情况		产量效应		环境效应		土壤氮肥力	
	施氮量 (kgN/hm ²)	施氮 增加 比	产量 (kg/hm ²)	产量 增加 比	进入环境的 NH ₃ +淋洗 N+反硝化 N (kgN/hm ²)	进入环 境的氮 增加比	土壤氮素 总平衡 (kgN/hm ²)	试验开始小麦 播前 0~90 cm (90~180 cm) 试验结束 玉米收获后 0~90 cm (90~180 cm) 硝态氮 硝态氮
推荐施氮	147		10 442		37.4		平衡	61 (47) 39 (78)
传统施氮	600	4.08	10 793	1.03	255.6	6.83	盈余	87 (57) 372 (622)

1.1.3 环境来源氮已成为农田生态系统和水体氮输入的重要组成部分

1. 环境来源氮成为农田氮平衡重要的输入项

以往在计算农田氮平衡时,虽然未考虑干沉降氮,但已把雨水(湿沉降氮)和灌溉水带入的氮列入了农田氮平衡输入项,当时这两部分氮所占的份额很小(朱兆良,1990)。然而,在人为活动的强烈影响下,大气干湿沉降氮和稻田灌溉水带入的氮的数量已是今非昔比,考虑到这两部分氮主要来自大气和水体,本书称之为“环境来源氮”。

据多年多点观测,从20世纪80年代到21世纪初,太湖流域大气干湿沉降氮从15 kgN/hm²增加到33 kgN/hm²,灌溉水输入氮从15 kgN/hm²增加到56 kgN/hm²,两部

分氮都在显著增加；华北大气干湿沉降氮从 22 kgN/hm² 增加到 88 kgN/hm²，灌溉水输入氮从 8 kgN/hm² 增加到 11 kgN/hm²，大气干湿沉降氮显著增加。太湖地区水稻生长季河水灌溉带入的氮达 56 kgN/hm²，加上大气干湿沉降氮 33 kgN/hm²，进入农田的环境来源氮达 89 kgN/hm²（图 1-4）。华北地区大气干湿沉降氮已达 88 kgN/hm²，加上灌溉水来源氮 11 kgN/hm²，进入农田的环境来源氮达 99 kgN/hm²（图 1-4）。带入农田的环境来源氮的形态主要是无机氮和可溶性有机氮，它们与化学肥料氮一样都能直接或经转化后可被作物利用。这不仅降低了化学氮肥的利用率，也相对地增加了进入大气和水环境氮的数量，造成恶性循环，而且对如何计算土壤氮的矿化量和农田（特别是稻田）的自生固氮量带来了困难和挑战。

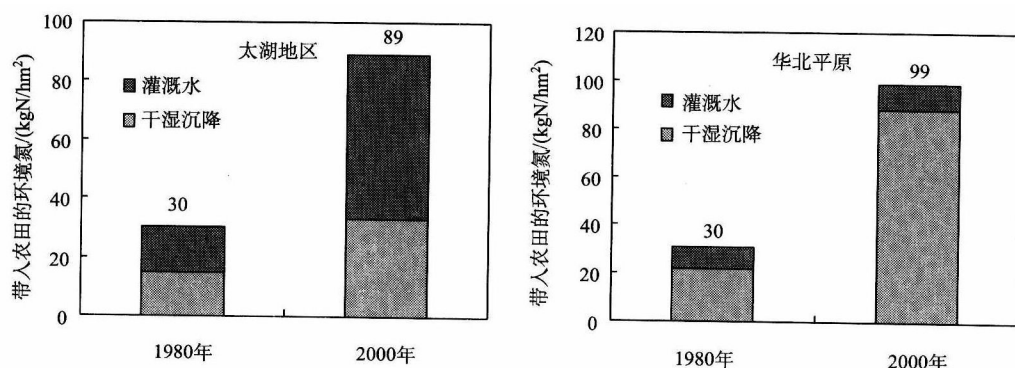


图 1-4 太湖地区和华北平原大气干湿沉降和灌溉水输入农田的氮素数量

2. 大气干湿沉降氮已成为重要的水体氮污染源

自 20 世纪 80 年代后期以来，农村人和畜禽排泄物已不再用作肥料，而是直接排入水体，成为河湖水体最主要的氮污染源。大气干湿沉降氮则成为仅次于人和畜禽排泄氮的水体氮污染源。为了反映现实的水体氮污染源，本书暂将太湖地区河湖氮、磷污染源分为三类：城市源、农村源和大气源。

城市源包括城市生活污水、造纸、染料、印染、制革、化工、食品加工厂等排放的高浓度氮、磷废水和城市地表径流。农村源包括农村人和畜禽排泄物及生活垃圾和生活污水中的氮、磷及随农田径流移出的氮、磷，以及随农田淋洗移出的氮和水产养殖投入的饵料等。大气源主要包括大气干湿沉降氮的主要组成（铵态氮和硝态氮）。铵态氮主要来自人和动物排泄物和施入农田的化肥氮中的 NH_3 挥发到大气后，随降水和降尘降到地表和水面。硝态氮主要来自工业、交通运输业、农业等部门化石燃料燃烧形成的氮氧化物 (NO_x)，其次为动物排泄物。另外，农田化肥氮转化过程中形成的 NO_x 排放到大气，也随降水和降尘沉降到地表和水面。

太湖地区这三类污染源到底输入了多少氮和磷到河湖水体？因为未能掌握太湖地区城市按行业分类的确切废水处理数据，对于城市源中的工业废水排放到流域水体的氮和磷未作计算。城市生活污水中最主要的构成即城市居民排泄物氮一并计入了农村源人排泄物氮。通过调查、定点观测和利用各地区的基本统计资料，计算所得农村源和大气源对苏州地区水体氮污染的数量及其相对负荷表明（表 1-3），除工业废水带入的氮未计