

崔玉亭 主编 李 季 靳乐山 副主编

化肥

与生态环境保护



化学工业出版社



152165
X592
004
化学用品与生态环境保护丛书

化肥与生态环境保护

崔玉亭 主编

李 季 靳乐山 副主编

化学工业出版社

·北 京·

FA88 / 2P05

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化肥与生态环境保护/崔玉亭主编. —北京: 化学工业出版社, 1999 (2001.4 重印)

ISBN 7-5025-2705-2

I. 化… I. 崔… II. 肥料污染-污染防治 N.X592

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 63838 号

农用化学品与生态环境保护丛书

化肥与生态环境保护

崔玉亭 主编

李 季 靳乐山 副主编

责任编辑: 孙绥中 张 荣

责任校对: 洪雅妹

封面设计: 蒋艳军

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

http: //www. cip. press. cn

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 8 1/2 字数 223 千字

2000 年 1 月第 1 版 2001 年 4 月北京第 3 次印刷

印 数: 5001—7500

ISBN 7-5025-2705-2/TQ · 1186

定 价: 15.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

人口、资源、环境是当今人类社会面临的重大社会问题。在未来的30年内，我国人口估计可能达到16亿。随着人口的增加、耕地的减少和人们生活消费水平的提高，对粮食和其他农副产品的需求也会愈来愈大。因此，科学合理施用化肥、农药、塑料农膜等农用化学品是保证粮食增产和粮食品质的措施。

随着化肥、农药、塑料农膜等农用化学品施用量的增加，如果不注意科学合理施用，不但降低其使用效率，增加产品成本，而且将造成严重的环境污染和生态破坏。长期过量使用化肥、农药和塑料农膜将导致土壤板结、地力下降、水体污染和富营养化，破坏自然生态系统的结构和功能，最终危害人体健康，影响人类生存。

目前我国农村化肥、农药和塑料农膜面源污染日益严重，已引起全社会的广泛关注。为保证我国农业的可持续发展，不仅要科学合理地施用化肥、农药、塑料农膜等农用化学品，还要大力开发、研究清洁生产新工艺，研制高效、低毒、低残留的农药品种，推广利用生物肥料、生物农药、降解农膜及其他综合治理技术和措施。希望《农用化学品与生态环境保护丛书》的问世，能够为环保和农业战线的各级管理干部和广大科技人员提供理论和实践方面的指导。

解松年

一九九九年九月二十三日

前 言

2030 年是我国人口的高峰期, 届时将达到 16 亿。随着人口增长、耕地减少和消费水平的提高, 我国食物安全问题将面临更加严峻的挑战。中国如何养活、养好这 16 亿人, 其根本出路就在于通过科技进步大力提高单产, 增加总产。其中, 合理增施化肥就是解决这一问题的关键措施之一。

联合国粮农组织调查的结果认为, 在发展中国家施肥可提高粮食作物单产 35%~57%。我国化肥试验网在不同种植区布置的 52 个长期肥料定位试验点的试验结果表明, 化肥对粮食产量的贡献率, 全国平均为 40.8%; 有机无机相结合, 肥料的贡献率提高到 45.2%。具体到每个区域, 旱作两熟区化肥的贡献率为 46%~60%, 水旱两熟区为 35%~52%, 双季稻区和旱作一熟区为 30%~35%; 具体到每个作物, 小麦为 60%, 玉米为 46%, 水稻为 32%~35%。

今后, 通过增施化肥和提高化肥利用率来增加我国粮食产量仍有着巨大的潜力。据全国化肥试验网多年试验表明, 在每亩播种面积施用 13~22kg 化肥(纯量养分)的条件下, 每千克化肥平均增产粮食 8~9kg。若今后 10 年期间我国化肥的投入年均增加 1000kt, 10 年后每亩播种面积的化肥用量将上升为 19.1kg(按 1995 年播种面积计算), 此时的施肥水平仍处在每亩 13~22kg 之间。在其他生产条件变化不大和保持现有化肥利用率的情况下, 每公斤化肥增产粮食仍可保持 8~9kg。如果将每年所增加化肥中的 65%~75% 用在粮食作物上, 预测在今后 10 年内每年平均可增产粮食 500~6000kt。如果通过工艺措施和农艺措施使化肥利用率由 30% 提高到 35%, 则相当于增施化肥 1797kt(以 1995 年化肥施用量为基础)。仍以其中的 65%~75% 用于粮食生产, 相当于增施化肥 1168~1348kt, 以每吨化肥增产粮食 8~9t 计, 则可增产粮食 9000~10000kt。

尽管化肥在粮食增产中有着不可替代的作用，但由于化肥使用量逐年增加，且无机化现象愈来愈普遍，致使化肥利用率有所下降，环境污染越来越重，尤其在集约高产地区或农村经济发达地区更加明显。如 1996 年沿海几个经济发达省份的亩均化肥用量达 50kg（纯量），是边远地区的近 6 倍之多，这种状况大大降低了氮肥利用率。根据中国科学院地理研究所对 1980 年以来全国化肥田间试验结果的统计表明，我国氮素化肥的平均利用率为 35%。作物没有吸收利用的氮素一部分贮存于土壤中被土壤吸附，一部分以气态形式损失，造成大气污染。另一部分氮素或通过地表径流、农田排水进入地表水体，和水中的累计磷一起造成水体富营养化，或以硝态氮的形式进入地下水，造成硝酸盐污染等。

近几十年，国内外的许多研究结果表明，地面水和地下水中硝态氮浓度的增加，都与农田氮肥施用量的增加有密切关系。

高量的化肥施用还会带来对农产品的污染，因而影响人体健康。目前，许多地方食用蔬菜中硝酸盐严重超标，这与蔬菜地过量施用氮肥密切相关。据北京市海淀区 23 块蔬菜地施肥量调查，每季蔬菜平均施氮量高达 $780\text{kg}/\text{hm}^2$ ，超过蔬菜作物需氮量的数倍。据对北京主要供菜产地山东寿光市的调查，该地 11 个大棚平均施氮（N）量为 $1804.2\text{kg}/\text{hm}^2$ ，施磷（ P_2O_5 ）量为 $968.8\text{kg}/\text{hm}^2$ ，施钾（ K_2O ）量为 $740\text{kg}/\text{hm}^2$ ，远远超出蔬菜的需肥量。过量施肥导致蔬菜品质下降，硝酸盐含量超标。

根据十五届三中全会的精神，必须合理地控制化肥用量，实现农业可持续发展。因此，我国在增加化肥用量的同时，必须改善化肥生产结构，制定化肥区域合理分配政策，科学施肥，提高化肥利用率，控制化肥污染，这已成为当务之急。

本书分五部分内容，第一部分为化肥在农业系统中的循环与作用，讲述了化肥在土壤-植物-大气-水体生态系统中循环转化的特点、新趋势及它对粮食增产和土壤培肥等不可替代的独特作用。第二部分为化肥与生态环境，是本书的重点，系统阐述了化肥在生产、施用过程中对土壤、水体、大气以及对农产品、人体健康等的各种影响。第

三部分为化肥环境污染的防治，讲述了以合理施肥、提高化肥利用率、减少环境污染为目标的一系列技术措施，以及针对各种污染而应采取的一些实用的治理技术措施。第四部分为化肥影响的环境经济学评价，以理论方法的阐述和案例分析相结合的方式，概算了我国某些典型地区化肥污染的环境成本，给读者化肥环境污染一个量化的概念。第五部分为化肥环境影响的政策分析，在以上分析的基础上，对我国的化肥生产、施用从产业发展的角度和技术经济的角度提出了一系列的政策建议，从宏观上促进我国的化肥合理施用，实现农业的可持续发展。

本书由崔玉亭总策划，作者分工为：第一篇的第一章、第二篇的第六、七章、第三篇的第十章（第一节、第五节、第六节）和第四篇的第十三章（第二节）由崔玉亭撰写；第一篇的第二、三章和第五篇的第十四、十五章由李季撰写；第二篇的第四章、第三篇的第九章和第四篇的第十二、十三章（第一节）由靳乐山撰写；第二篇的第五章和第三篇的第十章（第二节、第三节）、第十一章由李花粉、杜森撰写；第二篇的第七章由乔玉辉撰写，全书的初稿统编由崔玉亭等完成。在全书的策划、撰写、编辑和出版一系列过程中，承蒙中国农业大学曹一平教授的亲切指导和化学工业出版社孙绥中先生的大力支持，在此深表感谢。

152165

内 容 提 要

化肥对我国粮食增产、食物安全起着非常重要的作用，在未来 30 年中，其增产潜力仍然巨大。化肥因不合理施用而带来的效率降低和环境污染正日趋加重，这必须引起我们的高度重视。面对科教兴国和可持续发展两大国策，根据十五届三中全会精神，合理控制化肥施用、实现农业可持续发展已成为当务之急。本书系统地论述了化肥在生产和施用过程中对土壤、水体、大气以及对农产品、人体健康等方面的影响；概算了我国某些典型地区化肥污染的环境成本；提出了以合理施肥、提高化肥利用率、减少环境污染为目标的一系列技术措施和针对各种环境污染而应采取的一些实用的治理技术措施。并对我国的化肥生产和施用从产业发展和技术经济的角度提出了一系列的政策性建议，对促进我国化肥的合理施用、实现农业的可持续发展有重要的参考价值。本书可供农业战线上的领导干部和科技人员参考，也可供教学科研单位的同行借鉴。

目 录

第一篇 化肥在农业系统中的循环与作用

第一章 化肥在农业生态系统中的循环转化	1
第一节 化肥向生态系统中的输入	3
第二节 化肥元素在土壤中的转化	5
第三节 作物对化肥营养元素的吸收	9
第四节 农田养分平衡及化肥在环境中的损失	12
第二章 化肥在粮食增产中的作用	17
第一节 国外化肥增产作用	17
第二节 国内化肥增产作用	20
第三节 化肥对粮食增产的贡献份额	24
第四节 化肥的粮食增产潜力	26
第三章 化肥施用在土壤培肥中的作用	29
第一节 化肥在养分循环中的地位	29
第二节 化肥与土壤肥力	34
第三节 化肥培肥潜力	43

第二篇 化肥与生态环境

第四章 化肥生产与生态环境	46
第一节 我国化肥生产现状	46
第二节 氮肥生产与生态环境污染	50
第三节 磷肥生产与生态环境污染	57
第四节 钾肥生产与生态环境污染	62
第五章 化肥施用与土壤生态环境	67
第一节 重金属污染	67
第二节 有机副成分的污染	73
第三节 氟的污染	76

第四节	放射性污染	77
第五节	土壤硝酸盐的积累	81
第六节	土壤理化性质的改变	84
第七节	化肥对土壤微生物和植物病虫害的影响	87
第六章	化肥施用与水环境	89
第一节	化肥水环境损失的途径	89
第二节	施肥与地面水体富营养化	92
第三节	施肥与水体硝酸盐污染	98
第七章	化肥施用与大气环境	102
第一节	氮肥气态损失途径	102
第二节	施肥与温室效应	103
第三节	施肥对大气环境的其他影响	112
第八章	化肥施用与农产品质量及人体健康	115
第一节	施肥对农产品质量的正面效应	115
第二节	重金属对农产品的污染	116
第三节	硝酸盐对农产品的污染	127
第四节	其他元素对农产品的污染	136

第三篇 化肥环境污染的防治

第九章	化肥生产的环境污染防治	142
第一节	化肥厂清洁生产工艺	142
第二节	化肥生产环境污染的末端治理	149
第十章	化肥施用的环境污染防治	155
第一节	合理施肥量的确定	155
第二节	配方施肥	160
第三节	施用化肥增效剂	169
第四节	节水节肥的水肥综合管理技术体系	173
第五节	有机无机相结合的综合作物养分管理体系	175
第十一章	化肥环境污染的治理	181
第一节	水体物理处理方法	181
第二节	水体化学处理方法	183
第三节	水体生物处理方法	188
第四节	水体富营养化的防治对策	196

第四篇 化肥污染的环境经济学评价

第十二章	化肥效益的环境经济学评价	203
第一节	化肥的最优使用量	203
第二节	化肥施用的外部环境成本	207
第三节	化肥的边际机会成本	211
第四节	外部环境成本的评估技术	213
第十三章	化肥生产的环境成本案例分析	217
第一节	湖南和湖北水稻生产案例	217
第二节	苏南太湖流域作物生产案例	222

第五篇 化肥环境影响的政策分析

第十四章	化肥产业发展政策分析	232
第一节	化肥生产及布局	232
第二节	化肥贸易及价格	237
第三节	化肥产业政策评价与建议	240
第十五章	化肥使用技术经济政策分析	245
第一节	化肥使用现状	245
第二节	化肥的污染防治	250
第三节	化肥使用技术政策的评价与建议	253
参考文献		258

第一篇 化肥在农业系统中的循环与作用

第一章 化肥在农业生态系统中的循环转化

农业生态系统是为了获取农产品而人工建立起来的生态系统，在多年频繁的耕作、施肥、灌溉、种植与收获作物等人为措施的影响下，形成了不同于原有自然生态系统的养分循环特点，表现在以下几个方面：

(1) 农业生态系统有较高的养分输出率与输入率。这是指随着作物收获及产品出售，大量养分被带至系统之外；同时作为补偿，又有大量养分以肥料、饲料、种苗等形态被带回系统，使整个养分循环的开放程度较自然系统大为提高；

(2) 农业生态系统内部养分的库存量较低，但流量大，周转快。自然生态系统地表较稳定的枯枝落叶层以及土壤有机质的积累，形成了较大的有机养分库，并在库存大体平衡的条件下，缓缓释放出有效态养分供植物吸收利用。农业生态系统在耕种条件下，有机养分库加速分解与消耗，库存量较自然生态系统大为减小，而分解加快，形成了较大的有效养分库，植物吸收量加大，整个土壤库养分周转加快；

(3) 农业生态系统的养分保持能力较弱，流失率较高。农业生态系统有机库小，分解旺盛，有效态养分投入量多，同时，生物结构较自然系统大大简化，植被及地面有机物覆盖不充分，这些都使得大量有效养分不能在系统内被及时吸收利用，而易于随水流失；

(4) 农业生态系统养分供求同步机制较弱。自然生态系统养分有效化过程的强度随季节的温度和湿度变化而消长，自然植被对养分的需求与吸收也适应这种季节变化，形成了供求同步调节的自然机制。农业生态系统的养分供求关系受人为的种植、耕作、施肥、灌溉等措

施影响，供求的同步性差，是导致养分流失、高投低效的重要原因。

农业生态系统的上述养分循环特点，随着农业的集约化而不断加强。认识这些特点，建立合理的养分循环模式和管理体系，是合理施用化肥，引导农业向良性循环发展的基础^[1]。

化肥在农业生态系统中的循环可分为以下四个主要部分：

- (1) 化肥向农业生态系统中的输入；
- (2) 化肥在土壤中的转化；
- (3) 植物的吸收；
- (4) 在土壤中的贮藏及水、气环境中的损失。

化肥营养元素在农业生态系统中的循环转化模式如图 1-1 所示，包括化肥在内的农业生态系统养分循环的一般模型见表 1-1。

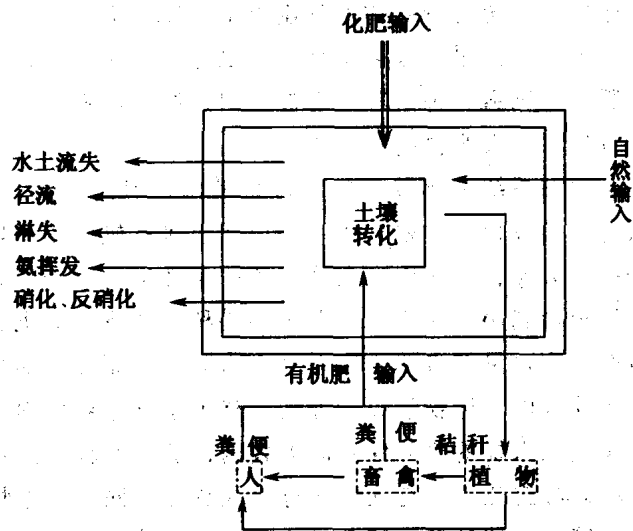


图 1-1 化肥营养元素在农业生态系统中的循环转化模式

农田的养分循环状况决定着系统的生产力和持续性，生产投入的效率及环境后果，在化肥参予农田生态系统的养分循环后，系统生产力、生产效率、甚至环境后果都在发生变化。揭示化肥在生态系统中的循环及这些变化对合理施肥及农业生态可持续性管理将有重要意义。

表 1-1 农业生态系统养分循环的一般模型

输入项		输出项	
生产性输入:		生产性输出:	
	种子种苗		经济产量
	化肥		秸秆
	厩肥		皮、壳、糠、麸
	人粪尿		
	其他农家肥		
	还田秸秆		
	城镇杂肥		
	生物固氮(共生固氮)		
	灌水带人		
非生产性输入(非人控输入):		非生产性输出(非人控输出)	
	干湿沉积物(降水带人)		地面流失带走
	地面流入		排水
	自生固氮		淋溶丢失
	底层输入		风蚀
	氮吸收		反硝化
			氮挥发

第一节 化肥向生态系统中的输入

化肥是农田养分输入中增长最快的一项。1950~1980年,世界化肥用量从14000kt增加到1.3亿吨,预测到2000年世界化肥用量将达到3亿。由于化肥在作物增产中起着重要作用,许多生产者为了追求高产,不考虑具体的土壤气候条件,以及作物的营养特性,长期过量地或不科学地施用化肥,我国更是如此,化肥用量由1980年的1269t增加到1995年的35940kt,增加了185%,平均年增加1550kt,年增长率为12.2%,全国有机肥与无机肥的施用数量与比例如表1-2所示。

表 1-2 全国有机肥与无机肥的施用数量与比例

年 份	1947	1957	1965	1975	1980	1985	1990	1995
有	N	1637	2533	3012	4246	4280	5118	6110
机	P ₂ O ₅	828	1302	1533	2200	2279	2714	3300
肥	K ₂ O	1967	3055	3439	5273	5623	6592	7600
kt	合计	4432	6890	7984	11719	12182	14424	17010

续表

年 份	1947	1957	1965	1975	1980	1985	1990	1995	
化肥 kt	N	6	316	1206	3640	9433	12588	17409	22240
	P ₂ O ₅	0	52	552	1609	1609	4079	6468	9940
	K ₂ O	0	0	3	230	230	1091	2026	3769
	合计	6	368	1760	5379	5379	17758	25903	35940
磷钾 比例	P ₂ O ₅ /N	0	2	5	4	2	3	4	4
	/ % K ₂ O/N	0	0	0	1	0	1	1	2
有机	N	2728	80	25	12	5	4	3	3
无机	P ₂ O ₅		250	28	14	14	7	4	3
	K ₂ O			11463	229	244	60	35	20
	合计	7387	187	45	22	23	8	6	5

注：根据李庆逵 (1998)^[2] 整理。

目前我国化肥施用的一些不合理方面主要表现在：

一、化肥区域分配不合理，一些地方盲目过量施肥

我国化肥的分配采用与粮油挂钩的奖励政策，使化肥过多的投向高产地区，如沿海各省、市、区老商品粮基地。1996 年，闽、粤、沪、苏、浙等发达地区的化肥施用量高达 750kg/hm²；甘、藏、青、黑、内蒙古等边远、欠发达地区仅相当于发达地区的 17%，每公斤化肥的粮食产量却比前者高 4.9 倍。化肥的区域分配不合理，明显制约了化肥总体利用效率的提高。

二、化肥的施用比例不合理

根据大量试验资料分析，平均 6000kg/hm² 粮食中氮、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 的吸收比例约为 1:0.45:1。目前我国大部分地区的实际氮磷钾施用比例为 1:0.45:0.169，特别在高产条件下，作物对钾肥的需求更为迫切。钾肥与氮、磷肥的比例严重失衡，已经影响了作物对氮、磷的吸收。微肥的使用也很不平衡，由于大量耕地缺乏微量元素，即使增施氮磷钾化肥也难以发挥增产效果，而微量元素肥料的增产效果却越来越显著。

由于化肥供应的比例失调，加上化肥总量依然短缺，因此，目前相当大一部分地区并不是根据作物需肥情况进行科学施肥，而是“有什么就买什么，买什么就施什么”，致使化肥难以发挥增产效果。

三、配方施肥推广不力

平衡施肥是增加作物对养分吸收和提高化肥利用率的关键，配方

施肥是其具体措施。大量试验资料表明,在施用氮肥的同时,施用其他限制性养分(包括磷、钾和中、微量元素)可以提高氮肥的利用率。

据1986~1993年进行的平衡施肥试验,氮、磷、钾平衡施肥可使禾谷类作物平均增产21%,块根、块茎类作物增产37%。问题根源在于,目前配方施肥的推广面积不大,导致化肥的利用率无法提高^[3]。

四、无机化施肥愈来愈普遍

1979~1980年世界氮、磷、钾有机肥与无机肥的比例分别为1.4:1, 6.3:1, 6.3:1; 1989~1990年这一比例已降至1.3:1, 0.6:1, 5.6:1, (据FAO肥料年鉴折算),即磷素化肥施用量按养分计已大大超过有机肥提供磷量。我国1983年施用的氮、磷、钾有机肥与无机肥的比例,就已达到0.4:1, 0.6:1, 5.6:1(据鲁如坤, 1989)。近几年,无机肥比重呈进一步提高的趋势,1995年已变为0.27:1, 0.33:1, 2:1(见表1-2)。

随着农村经济的发展,尤其在经济发达地区,昂贵的农村劳动力机会成本使人们抛弃了几年农业使用有机肥的传统,取而代之的是较单一品种化肥的大量投入,1995年全国及农村经济发达地区的有机氮相对密度如表1-3。

表 1-3 全国及农村经济发达地区的有机氮相对密度 (1995年)

全国	发达地区	上海	江苏	苏南	武进
0.24	0.18	0.13	0.13	0.10	0.16

注:1. 资料来源于崔玉亭 (1998)^[4];

2. 发达地区包括上海、北京、广东等9个省市,苏南指苏州、无锡、常州、所辖县级市及丹阳市,武进为苏南一县级市。

第二节 化肥元素在土壤中的转化

一、氮在土壤中的转化

化学氮肥施入土壤后,被作物吸收利用的只占其施入量的30%~40%^[5],大部分氮肥经各种途径损失于环境之中,使得氮肥的利用率降低,农业生产成本上升,并对水环境造成了污染。在农田氮素进

入地表水和地下水的过程中，各种形态的氮素之间，氮素与周围介质之间，始终伴随和发生着一系列的物理、化学和生物化学转化作用。与环境问题紧密相联的几个过程有：①吸附作用；②矿化作用；③硝化作用与反硝化作用；④氮挥发。

（一）吸附作用

土壤颗粒和土壤胶体对铵离子都具有很强的吸附作用。土壤颗粒对铵离子的吸附特性取决于土壤颗粒比表面和粘土矿物组成，土壤胶体对铵离子的吸附作用决定于胶体的组成和表面性质。土壤对铵离子的吸附作用在氮素运移与转化过程中具有重要的意义：一方面，由于土壤对铵离子的吸附，使得大部分的可交换性铵得以保存在土壤中；另一方面，从氮素对地下水的污染来看，由于土壤对铵离子具有保持作用，阻滞了铵离子向深层土壤的淋失，减轻了氮素对地下水的污染。但是，当土壤对铵离子的吸附达到最大值时，亦即土壤对铵离子的吸附达到饱和时，在渗入水流的作用下铵离子还可能进入地下水中，加重地下水的氮污染^[6]。

（二）矿化作用

有机氮的矿化是指有机氮在土壤微生物的参与下转化成可溶性氮的过程，它对土壤氮循环具有重要意义。土壤氮素的矿化常用矿化率来表示，即矿化量占土壤全氮量的百分率，它是影响土壤供氮量及作物施肥量的重要因素。在影响矿化量的众多因素中，除了土壤全氮量、土壤水热条件等重要因素外，氮肥使用及作物生长对土壤有机氮矿化也有某些影响^[5]。

1. 氮肥对土壤氮素矿化的影响

加入氮肥后土壤矿化氮量表现有所增加，这种现象常称之为“激发效应”。据研究，在大多数情况下，氮肥的激发效应（尤指正激发效应）只是一种表现现象。肥料氮替代一部分土壤矿物氮而转入有机态，使土壤来源的矿物氮的生物固持量比不加时有所减少，从而表现为土壤矿化氮量的增加。在某些情况下，氮肥的激发效应也可以是“真实的”。例如在某些贫瘠土壤上，由于氮肥促进了作物根系的伸展，增大了根系利用土壤的体积，从而吸收了更多的氮素。