

当代科技重要著作·农业领域

中国 土壤氮素

NITROGEN IN
SOILS OF
CHINA

江苏科学技术出版社

JIANGSU
SCIENCE AND
TECHNOLOGY
PUBLISHINGHOUSE



王 编

朱兆良 文启孝 主编

中国土壤氮素

NITROGEN IN
SOILS OF
CHINA

42.190
江苏科学技术出版社

中国 土壤氮素

江苏科学技术出版社

朱兆良 文启孝 主编

(苏)新登字第002号

中国土壤氮素

朱兆良 文启孝 主编

出版发行：江苏科学技术出版社

经 销：江苏省新华书店

印 刷：淮阴新华印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 19.5 插页 5 字数 473,000

1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷

印数 1-3,000 册

ISBN 7-5345-1292-1

S·184 (精)定价：12.00元

责任编辑 陆宝珠

我社图书如有印装质量问题，可随时向承印厂调换。

内 容 简 介

本书系统地总结了我国土壤氮素研究领域积累的大量资料,较充分地反映了我国在这一领域中取得的主要成果。全书共分4篇14章,涉及到该研究领域中的主要方面,其中包括:土壤氮素的含量、形态和 ^{15}N 丰度,土壤氮素的内循环及相联过程,固氮作用和氮素损失,氮素管理与农业生产及人类健康等。本书可供土壤、农业、植物生理和环境科学工作者参考。

致 读 者

社会主义建设的根本任务是发展生产力，而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代，科学技术的进步，不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素，也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步，推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策，进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科技兴省”的决定，江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下，经省政府批准，由省科学技术委员会、省出版总社和江苏科学技术出版社共同筹集，于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”，用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立，能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件，以通过出版工作这一“中介”，充分发挥科学技术作为第一生产力的作用，更好地为我国社会主义现代化建设和“科技兴省”服务；并能带动我省科技图书提高质量，促进科技出版事业的发展 and 繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物，期待得到各方面给予热情扶持，在实践中不断总结经验，使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金，以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次首批获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世，还得到中国核工业华兴建设公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持，特此表示衷心感谢！

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

1990年10月

前 言

土壤氮素是土壤学中历史悠久且又十分活跃的一个研究领域。长期以来,这方面的研究一直是围绕着农林牧业的生产而进行的。近些年来,随着化学氮肥施用量的急剧增加,氮素管理与环境质量及人类健康的关系已受到了广泛的注意。与此同时,随着相关学科的发展,土壤氮素的研究在微观上日益深入,在宏观上则愈趋综合。在这两方面的研究中,氮素循环各过程以及它们之间的联系的定量研究,愈来愈受到了重视。

氮素是作物生长中极其重要的营养元素之一,施用氮肥对农业生产的发展起了重要的作用。全世界年施用氮肥已达 7000 余万吨(以氮计),我国每年施用氮肥多达 1400 万吨左右,是世界上施用氮肥最多的国家。然而,氮肥利用率常较低,损失严重。据研究,在我国农田生态系统中氮肥的损失约高达 40~60%。损失的氮素或进入大气,导致“温室效应”,或进入水体,引起水质污染(如富营养化等)。因此,如何合理地施用氮肥,促进生物固氮,提高土壤的供氮能力等,一直是各国学者十分重视的研究课题。

我国关于土壤氮素的研究始于 30 年代,而在近 30 多年来,随着生产的发展和科技的进步,土壤氮素的研究工作有了较快的发展。先后开展了“长效碳铵”、“碳酸氢铵粒肥深施”、“稻田中化肥氮的损失”、“稻田土壤的供氮能力和氮肥施用量的推荐”、“农田生态系统中硝化、反硝化作用与氮素损失”,以及“生物固氮”等一系列研究工作,取得了重大进展,在农业生产上已经并将进一步发挥重要的作用。

国外关于土壤氮素已经出版了一些专著和论文集。在我国,虽然在 1986 年出版过一本氮素工作会议论文集,但尚无系统而全面地论述有关我国土壤氮素问题和研究成果的著作。本专著的出版填补了这一空白。这种以一国的研究成果为主撰写成的专著,在国际上还是少见的。

本书由中国科学院南京土壤研究所有关人员编著,是本所 1987~1990 年所长任期目标的内容之一。我们相信,本书的出版将在推动我国土壤氮素研究的深入发展中发挥重要的作用。同时也希望同行们对书中的不足之处提出批评和建议。

赵其国

1990 年 11 月于南京

撰 写 人 员

第 一 章	文启孝		
第 二 章	邢光熹	曹亚澄	孙国庆
第 三 章	朱兆良		
第 四 章	文启孝	程励励	
第 五 章	陈家坊		
第 六 章	李良谟		
第 七 章	姚惠琴		
第 八 章	李良谟		
第 九 章	蔡贵信		
第 十 章	刘芷宇		
第十一章	朱兆良		
第十二章	程励励	文启孝	
第十三章	马立珊		
第十四章	朱兆良		

目 录

第一篇 土壤氮素的含量、形态和 ^{15}N 丰度

第一章 土壤氮素的含量和形态	3
一、氮素的含量和分布	3
二、无机态氮	7
三、有机态氮	12
四、结语	23
第二章 土壤 ^{15}N 自然丰度变异	27
一、不同土壤表土中 ^{15}N 自然丰度的变异特征	27
二、土壤剖面中 $\delta^{15}\text{N}$ 的分异及其影响因素	31
三、结语	33

第二篇 土壤氮素的内循环及相联过程

第三章 土壤氮素的矿化和土壤氮素有效性指标的评价	37
一、土壤氮素的矿化	37
二、氮肥施用和植物生长对土壤氮素矿化的影响	44
三、土壤氮素的供应	48
四、土壤氮素有效性指标和土壤供氮量的预测	52
第四章 铵的固定和释放	60
一、铵的固定作用	60
二、固定态铵的含量和分布	63
三、生物有效性	67
四、铵的固定和释放在土壤氮素肥力和氮素转化研究中的意义	70
第五章 铵的吸附和扩散	76
一、土壤对铵离子的吸附	76
二、铵离子的吸附形态	80
三、交换性铵的解吸	84
四、土壤对铵离子的缓冲性	88
五、土壤中铵离子的扩散	89
第六章 硝化作用	94
一、硝化微生物	94
二、影响硝化作用的因素	97
三、不同土壤的硝化活性	102
四、硝化作用形成的 N_2O	105
五、硝化作用的动力学	106
六、硝化抑制剂	111

第三篇 固氮作用和氮素损失

第七章 生物固氮作用	123
一、主要的生物固氮体系	124
二、影响生物固氮的生物和环境因子	134
第八章 反硝化作用	145
一、土壤中的反硝化细菌	145
二、土壤的反硝化势及其影响因素	152
三、水稻土中氮素反硝化损失的机制	158
四、土壤中肥料氮的反硝化损失量	164
第九章 氨挥发	171
一、氨挥发的机理和影响因素	171
二、氨挥发的测定方法	175
三、农田生态系统中氮肥的氨挥发损失	178
四、减少氨挥发损失的途径	185

第四篇 氮素管理与农业生产及人类健康

第十章 根际土壤的氮素状况	197
一、土壤—根界面的氮素	197
二、肥料氮在根际土壤的浓度梯度	199
三、氮肥形态对根际 pH 的影响	203
四、作物根系对土壤氮的吸收特性	207
第十一章 农田生态系统中化肥氮的去向和氮素管理	213
一、农田生态系统中化肥氮的去向	213
二、提高氮肥利用率和增产效果的技术途径	228
第十二章 有机肥料氮的转化以及有机—化学氮肥的综合管理	250
一、有机肥氮的转化及其对土壤肥力的影响	250
二、有机肥和化学氮肥配合施用时代氮素的转化和供应	255
三、有机肥—化学氮肥的综合管理	260
第十三章 农田氮素管理与环境质量和作物品质	267
一、农田氮素损失对环境的影响	267
二、农田氮素管理在改善作物品质和保护环境质量中的意义	278
三、农田氮素损失的控制对策	281
第十四章 我国农业生态系统中氮素的循环和平衡	288
一、生物固氮量	288
二、收获物中氮的再循环	293
三、施入农田后肥料氮的损失	295
四、与水循环相联系的氮素收支	296
五、我国农业生产中的氮素平衡	298
六、结语	300

第 一 篇

土壤氮素的含量、形态和¹⁵N丰度

第一章 土壤氮素的含量和形态

土壤氮素在土壤肥力中的作用是众所周知的。已经知道,即使在施用大量氮肥的情况下,作物中积累的氮素中约有50%系来自土壤,在某些土壤上这个数字甚至在70%以上^[5]。可见,了解土壤的供氮能力是拟定合理施用氮肥的主要根据。土壤中氮素的含量、分布、以及它的形态方面的知识,是阐明土壤氮素供应能力,以及氮素在土壤中的行为等问题的基础。本章将对我国这方面的研究结果作一概略总结。

一、氮素的含量和分布

土壤中的氮素绝大部分以有机态存在,它的含量和分布与土壤有机质密切相关。土壤有机质含量决定于其年形成量和分解量的相对大小,因此,影响每年进入土壤的有机物质数量和有机物质分解速率的因素,包括水热条件、土壤质地等,都将对土壤有机质和氮素含量产生显著的影响。

(一) 自然土壤表土中的含量

表1.1列入了我国各自然植被下的土壤表土中有机质和氮素的含量。由表1.1可见,在温带,由东向西,随着降水量的逐渐降低和蒸发量的逐渐增大,植物生物量逐渐减少,分解速率则逐渐增大,因此有机质和氮素含量依黑土—黑钙土—栗钙土—漠钙土的序列逐渐减少。由北向南,随着温度的增高,分解速率的增大远胜于植物生物量的增多,土壤有机质和氮素含量依黑土—暗棕壤和白浆土—棕壤—褐土的序列明显降低。由此继续往南,虽然随着温度和降水量均逐渐增高,更有利于有机物质的分解,黄棕壤的有机质和氮素含量继续降低,但可能由于植物生物量的增大,更甚于分解速率的增大等原因,自此以后,却依黄棕壤—红壤、砖红壤的序列逐渐升高。黄壤由于海拔较高,较低的温度和较高的降水量使之较红壤、砖红壤更有利于有机质的积累,土壤有机质和氮素含量较红壤、砖红壤尤高,而与暗棕壤、白浆土相近。高山地带,虽然由于全年大部分时间冰冻,植物生物量很低,但分解速率更低。因此,在长期的成土过程中,土壤中也积累了较多的有机质和氮素(表1.1)。

(二) 耕地土壤耕层中的含量

耕地土壤中的有机质和氮素含量,除受上述各自然因素的制约外,更强烈的受到人为耕作施肥等的影响。自然因素的影响表现在:各地区耕地土壤耕层中的有机质和氮素含量的变异趋势,大体上与自然植被下的土壤相似;东北黑土地区最高,黄土高原和黄淮海平原最低,长江中下游、江南、云贵高原及四川,以及华南、滇南、蒙新、青藏等地区,介于此二者间。后者中大体上又有依长江中下游、江南—蒙新、云贵高原及四川—华南、滇南、青藏

表 1.1 自然植被下主要土壤类型表层的有机质和氮素含量^[4,5]

(平均值±标准差, 0~20 厘米)

土 类	标 本 数	有 机 质 (g/kg)	全 氮 (g/kg)	C/N
黑土	92	107±42	5.03±2.00	12.4±1.2
黑钙土	26	62.7±27.8	3.13±1.40	11.7±1.6
栗钙土	32	24.2±9.1	1.42±0.51	9.9±1.5
棕钙土、灰钙土	35	12.3±6.4	0.74±0.37	9.7±2.2
漠土	16	5.7±3.8	0.44±0.27	7.7±1.8
白浆土	7	73.9±45.3	3.41±1.93	12.5±2.4
暗棕壤	21	92.0±42.9	3.74±1.89	14.6±2.7
褐土、棕壤	11	35.4±20.7	1.69±0.91	12.2±2.6
黄棕壤	13	26.7±17.1	1.47±0.99	10.6±2.3
红壤				
非侵蚀	42	43.9±17.8	1.73±0.76	15.8±4.2
侵蚀	20	15.6±6.6	0.71±0.30	12.2±4.0
砖红壤、赤红壤				
非侵蚀	29	40.4±14.1	1.67±0.61	14.7±3.8
侵蚀	25	17.3±0.39	0.80±0.27	13.4±4.4
黄壤	45	66.9±34.3	2.58±1.22	16.2±4.7
高山、亚高山草甸土	21	82.9±37.6	4.06±1.91	12.2±3.3
高山、亚高山草原土	15	24.9±13.7	1.66±0.98	8.8±1.3
磷质石灰土	15	94.4±58.6	6.39±4.20	8.8±1.2

的序列而逐渐增多的趋势。上述变异除了主要受气候条件的制约外,还受其他一些因素的影响。例如,东北黑土区的有机质和氮素含量最高,还和土壤开垦的时间较短,耕地土壤的前身有机质和氮素含量较高有关。蒙新、青藏二地区也与此相类似。黄土高原、黄淮海平原二地区的有机质和氮素含量最低,不但是因为土壤侵蚀较严重和河流泛滥频繁的缘故,而且可能与该二区土壤质地较轻、粗,且普遍存在着较大量的游离碳酸钙有关。人为因素的影响表现在:①除绿洲土外,由于土壤开垦后,长期来,无论作物生物量高或低,其中大部分均被刈割移去,年遗留于土壤中的有机物质数量,远较在自然植被下的为低;另一方面,在耕种条件下,表土干湿交替次数和强度增加,通气条件也较好,有机物质的分解速率多较在自然植被下的为高。因此,土壤的有机质和氮素含量恒显著的较在自然植被下的为低。②土壤有机质和氮素含量因耕作制度的不同,而有明显的差异。水稻土可作为这方面一个典型的例子。在种植水稻的条件下,一方面施入的有机肥和作物遗留的根茎量较多;另一方面,一年中较长时间的渍水条件又使有机物质的分解速率降低,加之田面平整,片蚀轻微。因此,各地区水稻土的有机质和氮素含量常较相应旱地以及果园土壤为高(表 1.2)。

上述土壤有机质和氮素含量的变异,无论是自然植被下的土壤,或是耕地土壤,都是就总的大致趋势而言。实际上,无论自然植被下的同一土类或同一地区的耕地土壤,它们的有机质和氮素含量,都可以因自然因素和人为影响的差异而有较大的不同。以耕地土壤为例,仅在长江中、下游的江苏省范围内,各分片内土壤有机质和氮素含量的差异,即可达半

表 1.2 不同地区耕层土壤的有机质和氮素含量^[5]

(平均值±标准差)

地 区	利用情况	标本数	有机质 (g/kg)	全 氮 (g/kg)	C/N
东北黑土区	旱地	251	56.7±25.5	2.63±1.04	12.4±1.9
	水田	21	49.6±15.0	2.58±0.77	11.2±0.8
蒙新	旱地	125	18.3±9.1	1.10±0.53	9.7±1.6
青藏	旱地	57	27.7±16.7	1.44±0.64	11.0±3.7
黄土高原	旱地	216	10.4±4.2	0.70±0.28	8.8±1.6
黄淮海	旱地	320	9.7±4.8	0.63±0.29	9.0±1.8
	水田	14	15.1±6.3	0.93±0.29	9.4±0.8
长江中下游	旱地	49	15.8±6.7	0.93±0.33	10.0±3.0
	茶园	20	14.5±5.4	0.81±0.25	10.4±1.6
	水田	524	22.7±9.2	1.34±0.47	9.8±1.5
江南	旱地	118	15.7±6.1	0.90±0.29	10.2±2.2
	茶园、桔园	15	18.3±3.4	0.97±0.24	11.3±2.2
	水田	321	24.6±10.1	1.43±0.59	10.0±1.6
云贵高原、四川	旱地	71	19.3±12.8	1.09±0.57	9.7±2.2
	水田	124	27.3±24.1	1.49±1.12	10.5±2.6
华南、滇南	旱地	31	26.8±12.0	1.39±0.77	11.9±3.3
	胶园	77	24.3±3.9	1.13±0.43	12.7±2.2
	水田	181	28.5±12.4	1.50±0.67	11.1±2.0

倍之巨;太湖片最高,分别为 28.2g/kg 和 1.47g/kg,里下河片次之,沿江片再次之,镇、仪、六丘陵片最低,仅分别为 16.4g/kg 和 1.03g/kg^[1,2]。不仅如此,即使在一很小范围内,也可因地形部位和成土母质的不同,土壤有机质和氮素的含量各不同。例如,在丘陵地区,岗、塝地的土壤,其有机质和氮素含量常较低;反之,冲、畈地的土壤则较高。甚至地形部位和自然条件均相同,土壤的有机质和氮素含量,也常因离村庄的远近而不同,离村庄近的土壤,因施肥较多,有机质和氮素含量也就较高,远的则由于施肥较少,含量即较低。

土壤水分状况和质地,是影响有机质和氮素含量的两个重要因素。水分过多,导致嫌气过程,有机物质分解速率降低。质地粘重,不但通气性差,微生物和酶的活动受到抑制,且有机物质受到粘粒的保护而可给性降低。因此,排水不良或质地粘重的土壤,其有机质和氮素含量常较排水良好或质地轻、粗的土壤为多。这无论在一个大的地区范围或很小的范围内,都常可以看到这种现象。统计资料表明,华北平原砂土、两合土和淤土耕层土壤中的有机质含量,大约为 1:3:5.3^[1];在太湖平原,粘壤质中性潜育性水稻土的有机质和氮素含量,分别为 25.8 g/kg 和 1.59 g/kg,质地较轻粗的石灰性潜育性水稻土仅分别为 19.2g/kg 和 1.16g/kg^[21]。

(三) 剖面分布

不同土壤不仅表土的有机质和氮素含量不同,且其剖面分布状况也各异。有机物质进

1) 文启孝, 1979, 江苏省土壤的有机质状况及其与土壤肥力的关系。

2) 朱兆良, 1979, 江苏省土壤的供应能力。

入土壤的方式,是决定有机质和氮素剖面分布状况的因素。前者又主要决定于植被类型。在森林植被下,进入土壤中的有机物质主要为凋落物,因此有机质和氮素常富集于表层,自表层向下即急剧减少。特别是在寒温带条件下,由于冻土层的存在,植物根系的分布受冻土层的限制,不能下伸时是如此。在草本植被下,除由土表进入土壤的植物残体外,根系也是土壤有机质的主要来源。因此,有机质和氮素的剖面变化较平缓。当然,不同生物气候条件下,草本植被的类型和其他成土条件的不同,有机质和氮素的剖面分布亦各异。黑土的腐殖质层最为深厚,可达80~100厘米或以上,栗钙土的腐殖质层一般仅在22~44厘米间。漠钙土因植物生物量很少,分解又较强烈,因而全剖面各土层的有机质和氮含量均极低。高山亚高山草原和草甸土,因冻土层的存在,其有机质和氮素的剖面分布状况,与森林植被下的土壤相似(图1.1)。

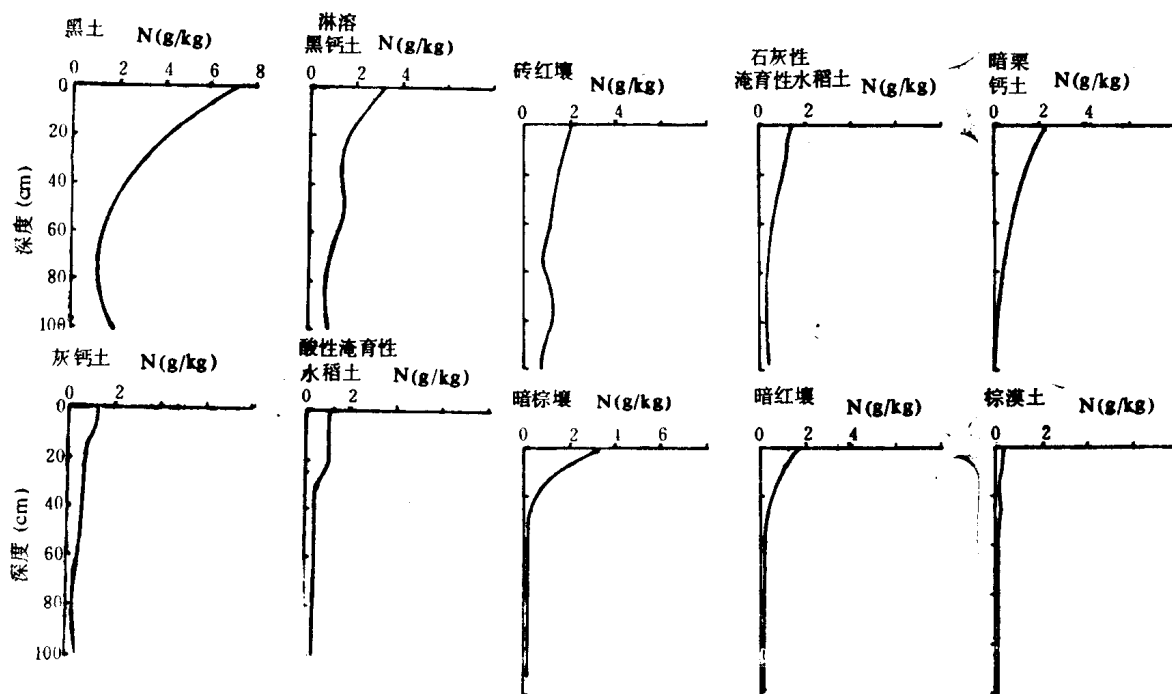


图 1.1 一些代表性土壤中氮素的剖面分布

施入表土的有机肥料,是耕地土壤有机质的主要来源之一。作物根系也集中在耕层,特别是犁底层发育良好的水稻土是如此。因此,除了强烈受到前身土壤影响的土壤,以及具有埋藏层的土壤以外,耕地土壤的有机质和氮素含量,一般均自亚表层以下即锐减。

有机质和氮素的剖面分布状况,是影响其剖面储量的一个因素。在自然植被下的土壤中,黑土因其表层碳、氮含量最高,且腐殖质层深厚而碳氮储量也最高(除泥炭土和沼泽土外),依次为暗棕壤、砖红壤、红壤、黑钙土、栗钙土、灰钙土等,而以棕漠土的储量为最低。在耕地土壤中,除东北黑土区外,太湖地区土壤的有机质和氮素储量最高,黄淮海平原和黄土高原最低,以黄土高原的安塞县为例,其0~20厘米的碳、氮储量,仅约为太湖地区土壤的1/4,0~100厘米的仅为太湖地区的1/2.5~1/3(表1.3)。

表 1.3 一些农地土壤的有机质和氮素储量(t/ha)

地 区	土 壤	0~20cm		0~100cm	
		C	N	C	N
太湖	黄泥土	35.41	3.48	87.96	10.15
	白 土	30.28	2.98	69.43	9.19
	乌栅土、紫泥土	42.29	4.18	129.4	12.59
	乌砂土、夹砂土	20.79	3.15	66.30	9.02
	平 均*	34.71	3.68	94.29	10.93
黄淮海	平 均	16.82	1.57	67.77	5.81
安 塞 (陕西)	黑垆土	21.24	3.64	88.05	9.84
	黄绵土	9.14	1.41	37.51	4.95
	绵砂土	6.76	0.86	29.31	3.86
	平均*	6.93	0.90	29.91	3.93

* 按全区面积计算。

二、无 机 态 氮

无机态氮包括固定态铵、交换性铵(包括土壤溶液中的铵)、 NO_3^- 、 NO_2^- 和 N_2O 等, 它们占表土中全氮的比例最低的仅 1% 左右, 最高可达 40%。以 1 米土体计, 最低的仅占全氮的 1.7%, 高的可达 60% 以上。固定态铵是无机态氮中数量上最主要的成分。有关固定态铵的来源、含量, 有效性等, 在第四章另有讨论, 此处不赘述。

(一) 交换性铵和 NO_3^- -N

交换性铵和 NO_3^- -N 最易被植物吸收, 具有重大的农业意义。它们的含量决定于土壤中矿化作用、生物固持作用、铵的固定和释放、硝化作用、植物吸收、以及氨挥发、反硝化作用和淋失等各种作用。它们在土壤中的含量, 是上述这些作用综合作用的结果。

1. 耕地土壤耕层中的动态

耕地中, 在不施肥的情况下, 作物生长期, 表土中交换性铵和 NO_3^- -N 的含量, 由于作物的不断吸收, 一般变动在一至十几 mg/kg 之间。作物播种前或苗期时最高, 可达十几个 mg/kg ; 分蘖期及其以后迅速降低, 常在一至几个 mg/kg 之间。在施肥的条件下, 施肥后的一段时间内, 交换性铵和 NO_3^- -N 的含量升高, 以后亦急剧降低。施肥后, 交换性 NH_4^+ 和 NO_3^- -N 升高的幅度和维持在较高水平上时间的长短, 视施肥量的高低、施用的时间和作物种类等而异。作基肥施用, 在通常的施肥量下, 施肥后交换性铵和 NO_3^- -N 量, 可高达 150mg/kg 以上^[10], 维持在 15mg/kg 以上的时间较长。冬小麦可达 2 个月之久(表 1.4); 水稻则可达 15~30 天(图 1.2)。且作物生长后期时, 其含量也略较不施肥者为高。在不种植作物的情况下, 耕地中交换性 NH_4^+ 和 NO_3^- -N 的含量则因季节等而异。冬季气温低, 矿化作用弱, 它们的含量也低。随着气温的升高, 矿化作用增强, 它们的含量也相应