

外籍学者讲学材料之四十一

# 植物营养与施肥原理

西德李比希大学

K. 门格尔教授

农牧渔业部教育司

西北农学院

1983年12月

## 前 言

根据西北农学院与西德李比希大学(Der Justus Liebig Universität)校际协作计划,中央农牧渔业部教育司邀请西德门格尔(K. Mengel)教授来华,于1983年5月24日到7月12日在西北农学院举办了“植物营养与施肥”讲习班,参加讲习班的主要是全国高等农业院校农业化学教师,此外还有中国科学院南京土壤研究所及西北水土保持研究所等单位的科研人员。共56人。

门格尔教授是西德著名的植物营养学家,现任李比希大学植物营养研究所所长兼该所作物产量生理与土壤养分动态研究室主任;同时还担任西德土壤学会“土壤肥力与植物营养委员会”主任和“李比希学会”会长。

门格尔教授在李比希大学讲授过“生物化学基础”、“植物营养生理与产量形成”、“土壤养分动态与施肥”以及“植物营养专题讲座”等课程。他的主要著作有:“植物营养原理”(英文版),“植物营养与代谢”(德文版),“生物化学基础”(德文版)等。这些著作在西德和欧美各国影响较大,获得很高的声誉。

他的科学研究广泛深入,不仅理论性很强,而且与农业生产密切联系;既研究土壤中各种养分的动态,又研究这些养分对各种作物的营养作用与产量形成的关系。他对铵态氮吸收的理论、硝酸还原酶作用的条件以及植物缺铁营养诊断的观点等都具有独创的见解。发表的论文很多,各国有关植物营养与土壤肥力方面的主要杂志几乎都有他的论文,如西德“植物营养与土壤学”(Z. Pflanzenernähr. Bodenk.),美国的“土壤科学”、“美国土壤学会”和“植物生理”(Soil Sci., Soil Sci. Soc. Amer. J., Plant Physiol.),日本的“土壤科学与植物营养”(Soil Sci. Plant Nutr.),荷兰的“植物与土壤”(Plant and Soil)。还有“农业杂志”(Agronomy Journal),“园艺学报”(Acta Horticulture),国际钾研究所出版的“钾的研究评论与进展”(Potassium Research Review and Trends)等。他的学识渊博,造诣很深。

《植物营养与施肥原理》是门格尔教授在西德李比希大学讲授“土壤养分动态与施肥”和“植物营养生理与作物产量形成”两门课中选出来的30个专题,并增加了最近发表的有关论文资料,其中有些论文在专家讲授时尚在印刷中,如植物缺铁营养诊断,硝酸还原酶作用的条件以及土壤中磷的缓冲能力等。这本专集的主要参考文献有140篇,内容丰富,所提的学术观点对我们启发很大,可供全国高等农业院校农业化学教师,土化专业高年级学生和研究生以及从事农业化学、植物营养和土壤肥力科研工作人员的参考。

西北农学院“植物营养与施肥讲习班领导小组”要我写这本专集的前言。由于本人学识有限,恐不能表达出这本专集的丰富内容,但我深信,读者阅读之后,定会感到很多启发和收获,这对今后的教学、科研和生产工作,将会有很大的帮助。

孙 毅

于杭州1983年9月

# 目 录

|                                              |       |       |
|----------------------------------------------|-------|-------|
| 前 言                                          | ..... | (iii) |
| 第一讲 自然界的氮素循环(一)                              | ..... | (1)   |
| 一、 自然界氮素循环的概述                                | ..... | (1)   |
| 二、 有机氮矿化的氨化作用                                | ..... | (8)   |
| 三、 矿化作用产生的 $\text{NH}_4^+$ 在土壤中的动态           | ..... | (5)   |
| 四、 粘土矿物晶层间固定铵的释放                             | ..... | (7)   |
| 第二讲 自然界的氮素循环(二)                              | ..... | (10)  |
| 一、 硝化作用(Nitrification)                       | ..... | (10)  |
| 二、 氮的淋溶(N—Leaching)                          | ..... | (11)  |
| 三、 氮的净矿化作用(Net Mineralization)               | ..... | (12)  |
| 四、 反硝化作用(Denitrification)                    | ..... | (13)  |
| 五、 硝化作用的抑制                                   | ..... | (14)  |
| 第三讲 自然界的氮素循环(三)                              | ..... | (16)  |
| 一、 生物固氮的简述                                   | ..... | (16)  |
| 二、 非共生固氮(Non symbiotic $\text{N}_2$ -fixers) | ..... | (16)  |
| 三、 共生固氮(symbiotic $\text{N}_2$ -fixers)      | ..... | (20)  |
| 第四讲 氮素化肥在土壤及植物体中的动向(一)                       | ..... | (23)  |
| 一、 农业中的氮素平衡                                  | ..... | (23)  |
| 二、 氮肥的形态及其在土壤中的转化                            | ..... | (24)  |
| 三、 铵态氮与硝态氮的比较                                | ..... | (27)  |
| 第五讲 氮素化肥在土壤及植物体中的动向(二)                       | ..... | (32)  |
| 一、 液态氮肥                                      | ..... | (32)  |
| 二、 缓效氮肥                                      | ..... | (33)  |
| 三、 氰氨化钙                                      | ..... | (37)  |
| 第六讲 氮肥施用量的估测与作物的品质                           | ..... | (40)  |
| 一、 氮肥施用和作物产量                                 | ..... | (40)  |
| 二、 氮肥用量的计算                                   | ..... | (41)  |
| 三、 氮肥对作物产量和品质的影响                             | ..... | (46)  |
| 第七讲 土壤中磷的形态与动态平衡                             | ..... | (50)  |
| 一、 土壤无机磷的主要形态                                | ..... | (50)  |
| 二、 土壤中磷的吸附过程及其机制                             | ..... | (51)  |
| 三、 土壤有机态磷                                    | ..... | (54)  |
| 四、 土壤的活性磷与非活性磷                               | ..... | (55)  |
| 五、 土壤供磷的容量、强度因素和缓冲曲线                         | ..... | (56)  |

|      |                |      |
|------|----------------|------|
| 第八讲  | 土壤的供磷特征与磷肥的施用  | (58) |
| 一、   | 土壤磷缓冲力与作物吸磷的关系 | (58) |
| 二、   | 土壤磷缓冲力的测定      | (58) |
| 三、   | 磷的老化           | (59) |
| 四、   | 土壤磷的净释放        | (60) |
| 五、   | 磷肥             | (60) |
| 六、   | 磷肥在土壤中的动态      | (62) |
| 七、   | 磷肥的施用方法        | (65) |
| 八、   | 土壤有效磷测定方法的比较   | (66) |
| 九、   | 肥料磷在土壤中的固定     | (67) |
| 十、   | 磷的重要生理功能       | (68) |
| 第九讲  | 含钾矿物、晶格结构及供钾特性 | (69) |
| 一、   | 土壤中的含钾粘土矿物     | (69) |
| 二、   | 含钾粘土矿物的结构      | (69) |
| 三、   | 粘土矿物对钾的吸附特性    | (74) |
| 四、   | 不同土壤的含钾状况      | (75) |
| 五、   | 土壤钾的形态         | (75) |
| 六、   | 植物对层间钾的利用      | (76) |
| 七、   | 土壤中有效钾的测定方法及应用 | (78) |
| 八、   | 钾肥及钾在土壤中的动态    | (81) |
| 第十讲  | 钾的固定与施钾策略      | (82) |
| 一、   | 钾的固定           | (82) |
| 二、   | 施钾肥的策略         | (83) |
| 三、   | 钾的生理功能         | (84) |
| 四、   | 作物缺钾症状         | (86) |
| 第十一讲 | 镁              | (87) |
| 一、   | 土壤中含镁的矿物       | (87) |
| 二、   | 土壤中镁的组分        | (89) |
| 三、   | 有效性镁的测定方法      | (90) |
| 四、   | 镁肥的性质及用量       | (90) |
| 五、   | 作物体内镁的生理功能     | (91) |
| 第十二讲 | 硫              | (93) |
| 一、   | 土壤中硫的含量        | (93) |
| 二、   | 土壤中硫的形态        | (93) |
| 三、   | 自然界中硫的循环       | (94) |
| 四、   | 作物对硫的吸收        | (97) |
| 五、   | 缺硫地区及硫肥施用      | (97) |
| 六、   | 硫在作物体内的生理功能    | (98) |

|      |               |       |
|------|---------------|-------|
| 第十三讲 | 钙素营养与酸性土壤施用石灰 | (101) |
| 一、   | 钙对作物的重要生理功能   | (101) |
| 二、   | 酸性土壤与含钙化合物    | (105) |
| 三、   | 钙对土壤结构的重要意义   | (110) |
| 第十四讲 | 盐土和碱土         | (113) |
| 一、   | 盐、碱土的特性及其形成   | (113) |
| 二、   | 盐、碱土的毒害及其改良   | (114) |
| 第十五讲 | 有机肥料特性与土壤肥力   | (116) |
| 一、   | 有机肥料特性        | (116) |
| 二、   | 有机肥与农业中养分循环   | (117) |
| 三、   | 绿肥            | (119) |
| 四、   | 堆肥            | (120) |
| 五、   | 秸秆还田          | (120) |
| 六、   | 土壤中的有机质积累     | (123) |
| 七、   | 现代农业的特点       | (126) |
| 八、   | 肥料生产与能量的消耗    | (128) |
| 九、   | 能源的形成问题       | (129) |
| 第十六讲 | 淹水土壤的养分动态     | (130) |
| 一、   | 淹水土壤的还原力及测定   | (130) |
| 二、   | 淹水对土壤pH的影响    | (131) |
| 三、   | 淹水后土壤养分的变化    | (132) |
| 四、   | 淹水稻田土壤剖面      | (133) |
| 五、   | 影响养分有效性的因素    | (135) |
| 第十七讲 | 土壤养分的缓冲力与根系活动 | (137) |
| 一、   | 土壤的缓冲性能与养分有效性 | (137) |
| 二、   | 根表活动与养分有效性    | (139) |
| 三、   | 根的分泌物         | (144) |
| 四、   | 根际微生物         | (145) |
| 第十八讲 | 微量元素(一)       | (147) |
| 一、   | 铁             | (147) |
| 二、   | 锰             | (154) |
| 第十九讲 | 微量元素(二)       | (157) |
| 三、   | 锌             | (157) |
| 四、   | 铜             | (159) |
| 五、   | 钼             | (161) |
| 六、   | 硼             | (163) |
| 第二十讲 | 微量元素(三)       | (167) |
| 一、   | 土壤中的硅         | (167) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 二、 硅的生理功能·····                        | (167) |
| 第二十一讲 高等植物的水分生理——经济用水·····            | (170) |
| 一、 水分的功能·····                         | (170) |
| 二、 植物体内的含水量·····                      | (170) |
| 三、 水势的概念·····                         | (171) |
| 四、 水势的组成·····                         | (172) |
| 五、 溶质势与渗透作用·····                      | (172) |
| 六、 重要的生理渗透物质·····                     | (175) |
| 七、 水势的测定·····                         | (175) |
| 八、 生物膜的结构·····                        | (175) |
| 第二十二讲 植物吸收养分的机理(一)·····               | (178) |
| 一、 通过生物膜的被动和主动运输·····                 | (178) |
| 二、 驱动力(drlving force)的推理·····         | (179) |
| 三、 细胞为什么带负电荷·····                     | (182) |
| 四、 离子载体学说·····                        | (183) |
| 第二十三讲 植物吸收养分的机理(二)·····               | (186) |
| 五、 阳离子的拮抗作用——非专化性阳离子竞争作用·····         | (186) |
| 六、 硝态氮的吸收·····                        | (188) |
| 七、 阳离子的主动吸收·····                      | (188) |
| 八、 水在植物体内的运转·····                     | (190) |
| 第二十四讲 水分胁迫与作物的蒸腾作用·····               | (195) |
| 一、 土壤水势(Soil water potentials)·····   | (195) |
| 二、 植物缺水的生理效应·····                     | (196) |
| 三、 植物对水分胁迫的适应·····                    | (197) |
| 四、 有效利用水分·····                        | (199) |
| 五、 水分胁迫与二氧化碳同化作用·····                 | (202) |
| 第二十五讲 盐土作物的营养生理·····                  | (205) |
| 一、 植物对盐土的适应·····                      | (205) |
| 二、 植物生长在盐碱土上的症状·····                  | (206) |
| 三、 耐盐植物·····                          | (208) |
| 第二十六讲 植物的氮素代谢与碳素同化作用·····             | (210) |
| 一、 作物对矿质态氮的同化作用·····                  | (210) |
| 二、 二氧化碳的同化作用·····                     | (219) |
| 第二十七讲 作物产量形成中源与库的关系(一)·····           | (225) |
| 一、 作物主要的生理库·····                      | (225) |
| 二、 叶绿体是真正的生理源·····                    | (225) |
| 三、 磷酸运载体(phosphate translocator)····· | (226) |
| 四、 叶绿体内氨基酸的合成·····                    | (228) |

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| 五、 长距离运输.....                                | (229) |
| 第二十八讲 作物产量形成中源与库的关系(二).....                  | (234) |
| 六、 韧皮部的装载机理——钾对养分运转的功能.....                  | (234) |
| 七、 韧皮部运输机理——推拉系统(push and pull system) ..... | (236) |
| 八、 生理库组织中韧皮部的装载(unloading) .....             | (237) |
| 九、 植物生理库的主要生化过程.....                         | (237) |
| 第二十九讲 植物激素的形成及其功能.....                       | (239) |
| 一、 植物生育阶段中植物激素的功能.....                       | (239) |
| 二、 植物激素的主要种类.....                            | (239) |
| 三、 吲哚乙酸的合成.....                              | (240) |
| 四、 生长素的功能.....                               | (241) |
| 五、 赤霉素.....                                  | (242) |
| 六、 矮壮素.....                                  | (243) |
| 七、 细胞分裂素.....                                | (243) |
| 八、 脱落酸(ABA) 休眠素 .....                        | (245) |
| 九、 植物激素在作物不同生育阶段的功能.....                     | (246) |
| 第三十讲 作物生产中的植物激素.....                         | (247) |
| 一、 目前激素研究存在的问题.....                          | (247) |
| 二、 禾谷类发育过程的植物激素.....                         | (248) |
| 三、 光照对植物激素形成的影响.....                         | (245) |
| 四、 禾谷类产量构成因素.....                            | (250) |
| 编后记 .....                                    | (253) |

## 第一讲 自然界的氮素循环(一)

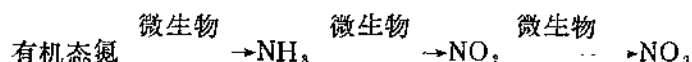
### ——土壤有机氮的矿化作用及氮离子的动态——

作物需要的营养元素很多,其中需要氮的数量较大。从全球范围来看,在所有营养元素中,氮是限制作物生长和产量形成与品质改善的最重要因素。因此,在讲土壤养分时,首先从氮素开始。

#### 一、自然界氮素循环的概述

氮是活性很强的植物营养元素,它以不同形态存在于大气圈、岩石圈和生物圈中,在它们之间经常相互转换。大气中的氮以分子形态存在,同时也有氮的各种氧化物。大气中的氮通过同化作用进入生物圈,这种同化作用是靠少数几种微生物来完成的。大气中的氮除了通过生物途径进入土壤外,也可通过物理、化学的变化使分子态氮变成氮的氧化物,氮的氧化物以及铵和铵离子都可随降雨进入土壤。土壤微生物可同化氮和这些含氮化合物而形成有机态氮。

土壤有机态氮在土壤微生物作用下分解为无机态氮的过程称矿化作用。矿化作用可分三步,主要过程简述如下:



第一步产生氨,称“氨化作用”。氨被氧化成亚硝酸,进一步再被氧化为硝酸,称为“硝化作用”。

有机质的矿化作用是一个很重要的过程。矿化作用所形成的重要产物硝态氮和氨态氮,是植物吸收利用氮素的主要形态。硝态氮能被植物吸收,也会随降雨淋洗到土壤深层,造成氮素的流失。此外,硝态氮作为氧的载体可被微生物还原成 $\text{N}_2$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ ,使氮从土壤中逸散于大气。硝态氮被还原为 $\text{N}_2$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的过程称为反硝化作用。由此可见,在土壤中一方面有分子态氮的被同化,另一方面也有硝态氮还原为 $\text{N}_2$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 等气体,形成了土壤与大气的氮素交换。这两个过程都要靠微生物完成。

硝态氮和氨态氮被植物和土壤微生物吸收后,同化成有机态氮,称为“氮的生物固定作用”。同时在土壤中还有氮的非生物固定作用。这种非生物固定作用包括两个方面,其一是有机质对亚硝酸态氮的固定作用,这种固定作用的机制目前尚不清楚;其二是粘土矿物对铵离子的专性固定作用。上述这些固定作用对于研究植物的土壤氮素营养都是很重要的,后面还要详细讨论。

土壤中无机含氮化合物除了硝酸盐的反硝化作用引起氮素气态损失外,氨的挥发也是导致土壤氮素损失的一个重要方面。

综上所述,自然界中氮素循环的主要过程可用图1—1表示:



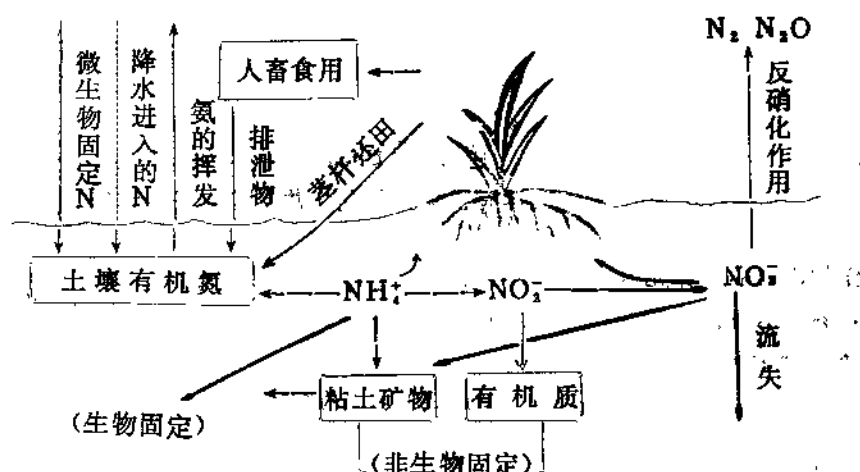


图 1—1 自然界中氮素的循环示意图

在讨论氮素循环的各细节前，使大家对大气与土壤之间氮的交换有一个数量的概念，引用表 1—1 来加以分析。

表 1—1 地壳中的氮素平衡 (Werner 1980)

| 氮素的来源与损失                 | 数量 $N \times 10^9$ 公斤/年 |
|--------------------------|-------------------------|
| 工业生产的氮                   | + 46                    |
| 生物固定的氮                   | + 100~200               |
| 降雨中的氮                    | + 140                   |
| 降雨中的 $NO_3^-$ 和 $NO_2^-$ | + 60                    |
| 反硝化作用                    | - 200~300               |
| 氮的挥发                     | - 165                   |

由表 1—1 看出，在全球范围内，土壤氮素的来源主要有四个方面：

- (1) 来自工业生产的氮，每年有  $46 \times 10^9$  公斤；
- (2) 来自生物固定的氮每年有  $100 \sim 200 \times 10^9$  公斤，生物固定的氮比工业生产的氮多一倍以上。这就说明了生物固氮的重要性；
- (3) 随降水进入土壤的铵态氮每年有  $140 \times 10^9$  公斤；
- (4) 随降雨进入的亚硝态氮和硝态氮每年有  $60 \times 10^9$  公斤。

土壤中的氮进入大气的过程是通过反硝化作用和氮的挥发作用进行的。反硝化作用损失的氮量每年达  $200 \sim 300 \times 10^9$  公斤，比来自生物固定的氮量还多。氮的挥发和随降雨进入

土壤的氮量差不多。至于土壤中氮素的输入与输出之间平衡的真正状况目前还不清楚。但是，毫无疑问，使用的化学氮肥显然参与了整个氮的循环。

## 二、有机氮矿化的氨化作用

在陆地上有各种不同的土壤，有机质含量差异很大，有机态氮含量也很不一致，它们的含量也与土层的深度有关。一般耕作土壤全氮含量每公顷为1000~10000公斤，林地和牧草地土壤含氮量甚至还高些，比每公顷作物一生需要的100~200公斤氮量要高得多。但土壤中大部分有机态氮不能直接被作物利用，在作物生长期，只有一小部分被矿化。在非耕地有机氮每年矿化的氮仅为0.1~2%或者3% (Guo 1983)，这在生产中实际上没有多大的意义，而且有机氮的矿化率在很大程度上还取决于它本身的质量。

### (一) 土壤有机态氮的组分

根据土壤有机质的矿化情况，将土壤有机态氮粗略分为两个组分：

#### 1、对作物难于利用，甚至无效的有机氮。

这类有机氮主要有胡敏酸氮，富里酸氮和杂环氮。它们很稳定，难于被微生物分解。在有些土壤中，如黑钙土，有机态氮含量很高，但有效态氮含量可能较低，甚至极低。

#### 2、对作物有效的有机氮。

这类有机氮系指土壤生物体中的氮。土壤中有活的生物体 (biomass) 如细菌、真菌、藻类和线虫类等。这些生物体中的氮虽然不能直接被作物所利用，但生物体死后极易分解成有效态氮。活的与死的生物体氮由蛋白质、核酸、氨基酸、酰胺和氨基糖组成，这些都极易分解成无机态氮。由于微生物的生命周期极短，因此这些生物体的有机态氮是土壤中有效氮的主要来源。不同土壤类型，生物体氮的数量不同，见表1-2。

表1-2 不同土壤类型中生物体氮的数量  
(Anderson & Domsch, 1980)

| 土壤类型  | 土壤利用情况     | 氮量 (公斤/公顷12.5公分) |
|-------|------------|------------------|
| 棕色灰化土 | 农耕地、甜菜     | 2.7              |
| 灰化土   | 农耕地、苜蓿和三叶草 | 5.9              |
| 潜育土   | 农耕地、水稻     | 8.2              |
| 棕壤    | 林地         | 11.2             |
| 黑钙土   | 农耕地        | 17.5             |
| 有机质土  | 草地         | 45.5             |

在上表中，棕色灰化土是欧洲中部的典型土壤，那里进行着集约经营，其轮作方式甜菜—谷物—甜菜—谷物，所以土壤含生物体氮的数量低，仅30公斤/公顷左右。灰化土，酸性较强，作物的轮作方式不同，包括豆科作物，如三叶草，其生物体氮的数量比棕色灰化土要高。

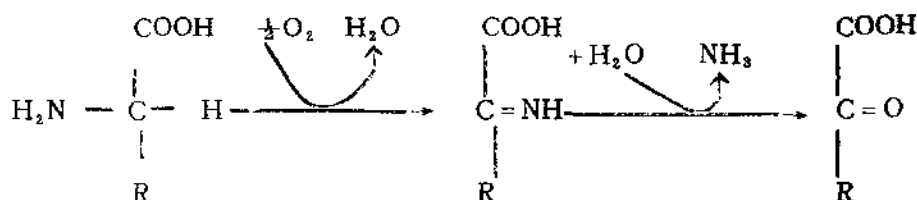
出一倍。潜育土有半年时间为水饱和，下层有一不透水层，所以上层是积水的。下雨的时候，上层都充满着水，土壤缺氧，对有机质分解有影响，所以有利于土壤有机质的累积。林地不耕作，有较多的生物体氮。黑钙土中生物体氮的含量也比较高。草地能累积大量的生物体氮，一般永久性草地有大量的有机质累积，这种草地根系密集，在根区有大量的土壤微生物繁殖，一旦被开垦种植作物，第一年就有大量氮素释放出来。因此，在谈到作物土壤养分时，应特别区分土壤中两类有机态氮的组分，第一组分约占有机态氮总量的80%左右，第二组分是活的与死的生物体氮。后一组分对作物氮素营养有特别重要的意义，而前一组分则只对改良土壤结构起重要作用。这里所谈的是如何估价土壤的有效态氮，土壤有机态全氮量往往不能提供任何有关有效态氮的可靠资料，而后一组分则是土壤中有效氮的主要来源。

## (二) 氨化作用

这一部分是谈土壤有机态氮分解的生物化学过程。土壤的有机氮主要是蛋白质，而蛋白质在许许多多微生物作用下水解产生氨基酸，氨基酸进一步脱氨就产生了有机酸和氨。由蛋白质分解到释放氨的整个过程称为“氨化作用”(Ammonification)。起氨化作用的微生物有真菌和细菌，称为氨化菌。土壤中有许多微生物能进行氨化作用，一般来说温度高氨化就强，最适宜的温度为25~30℃。因此，有机态氮的矿化速率取决于温度。热带地区可能有利于氨化作用。在大陆性气候条件下，寒冬季节长，一年中仅有一段时间能够进行氨化作用。在干旱条件下水分是氨化作用的限制因子。

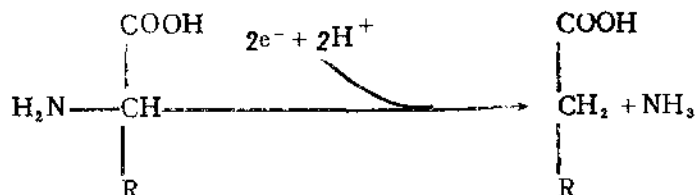
在氨化作用中脱氨过程有两种类型。

### 1、氧化脱氨(Oxidative deamination)



这一过程许多微生物都能进行，需要氧，然后脱氨，整个过程称为氧化脱氨。它要在土壤中有大量氧气的好气条件下发生。

### 2、还原脱氨(Reductive deamination)



土壤在嫌气条件下，如水稻土，土壤处于还原条件，有大量的电子存在，同时，不论pH值如何，土壤中也都有H<sup>+</sup>，

在上述反应中， $2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}$

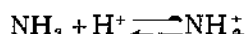
所以还原脱氮作用的实质是氨基酸加入  $2H$ ，生成了脂肪酸与氨。在水田中，脂肪酸往往有累积，并对作物产生毒害。还原脱氮作用的速率没有氧化脱氮高，因此一般说嫌气条件下产生的氨量也没有好气条件下的多。

两种脱氮作用产生的是  $NH_3$  分子，容易挥发，但是在土壤中它也很容易被质子化而形成铵离子。

### 三、矿化作用产生的 $NH_4^+$ 在土壤中的动态

#### (一) 质子化作用 (Protonation)

$NH_3$  很容易被质子化，其反应式：



这是一个基本的反应式，虽很简单，但极为重要。形成的  $NH_4^+$  是一个离子，易溶于水，也能被土壤吸附。 $NH_3$  是分子，易挥发。上述反应式的平衡取决于土壤 pH 值，当土壤中  $H^+$  浓度高时，所有的  $NH_3$  都被质子化；若  $H^+$  浓度不高，则一部分以  $NH_3$  形态存在，有的就被挥发掉。质子化与土壤 pH 值的关系如图 1—2 所示。

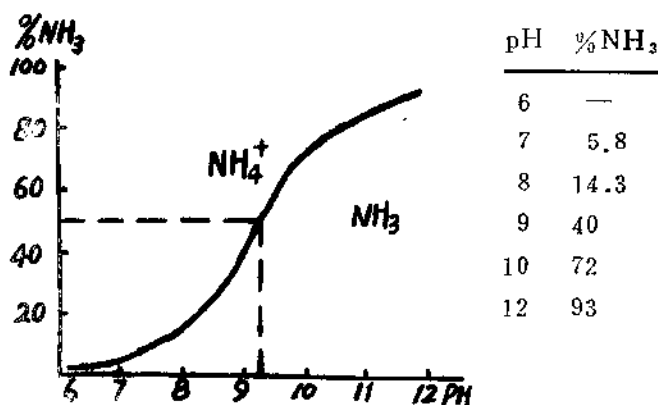
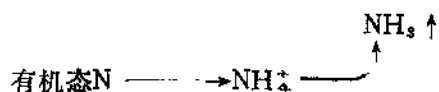


图 1—2 质子化与土壤 pH 的关系

由图 1—2 看出，当 pH 接近或低于 6 时，似乎全部以  $NH_4^+$  形态存在。在 pH = 9.2—9.3 时，则  $NH_3$  和  $NH_4^+$  各占一半，这一 pH 值被称为 pK 值。pH = 7.0 时，氨有 6% 是以  $NH_3$  形态存在，易被挥发，随着氨的挥发，反应的平衡向左边移动，所以，甚至在 pH 7 时，氨也会不断地损失，这是由于氨的挥发破坏了反应的平衡。所以有机氮的氨化引起  $NH_3$  的挥发，可用反应表示：



在 pH 7.5 时， $NH_3$  从土壤中逸出，进入大气的数量增加。值得注意的是，在所有 pH 高于 7 的土壤中，土壤有机氮就会以这种方式逐步损失掉，这一过程是无法终止的。因此，在表 1—1 中就见到，土壤中有相当数量的氨（每年达  $165 \times 10^9$  公斤）由于挥发进

入了大气。

## (二) 植物和微生物对铵的吸收 (uptake)

作物与微生物对 $\text{NH}_4^+$ 的吸收,使土壤中的 $\text{NH}_4^+$ 转变为有机氮,防止了土壤中氮的损失,

## (三) 粘土矿物对铵的专性和非专性吸附作用 (unspecific & specific adsorption)

$\text{NH}_4^+$ 可被土壤的粘土矿物所吸附。土壤的粘土矿物有两种类型,即2:1型和1:1型。2:1型的有伊利石和蛭石等,它们对于 $\text{NH}_4^+$ 的吸附是重要的。这一类粘土矿物的结构是晶层的上下为四面体,中间为八面体,两个晶层之间为层间。在层间存在着 $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ 的专性吸附点。通常在自然的晶体层间中是 $\text{K}^+$ ,在边缘也可能是 $\text{NH}_4^+$ 。提到 $\text{NH}_4^+$ 的吸附,与 $\text{K}^+$ 的情况相类似。根据 $\text{NH}_4^+$ 在粘土矿物上的位置,可分三种,如图1—3

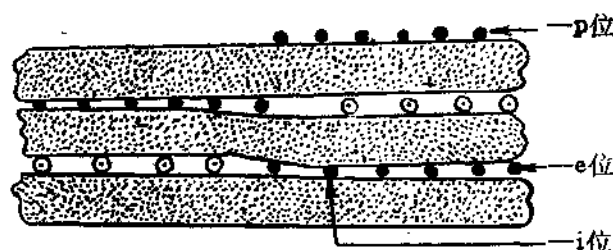


图1—3 2:1型粘土矿物固定 $\text{NH}_4^+$ 的位置 (Rich, 1968)

在图1—3中,吸附离子的位点在晶层表面上的称p位,在边缘上的称e位,在层间里面的称i位。三种吸附位置的结合键强弱不同,因此,如何区别它们是很重要的。p位结合键很弱,这里吸附的 $\text{NH}_4^+$ 很容易被重新释放。例如在施铵态氮肥,立刻进行土壤分析,就会发现在这个部位有大量的铵存在,但不久铵就减少了。e位对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附是个较强的部位。i位对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附是极强的,通过这种方式吸附的主要粘土矿物有伊利石、蛭石和蒙脱石。

如果一种土壤中主要含有1:1型的粘土矿物,如高岭石类型的粘土矿物,它对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附能力就很弱。在热带砖红壤中的粘土矿物属高岭石类型,对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附量很少。在一些含伊利石、蛭石和蒙脱石的粘土矿物土壤中则吸附 $\text{NH}_4^+$ 量多,它们是 $\text{NH}_4^+$ 专性吸附很重要的矿物类型。一般冲积土,特别是由黄土发育的土壤,对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附有重要的意义。这类土壤的 $\text{NH}_4^+$ 专性吸附很可能在土壤 $\text{NH}_4^+$ 吸附中占重要部分。土壤吸附能力不仅决定于这种粘粒矿物的含量,还取决于粘土矿物中 $\text{K}^+$ 和 $\text{NH}_4^+$ 的饱和度,这里要区别两种不同的情况,即非膨胀型和膨胀型。在非膨胀型情况下,e位和i位都被 $\text{K}^+$ 所占据,有时被 $\text{NH}_4^+$ 所占据,而在膨胀型情况下,吸附在边缘部位的可能是 $\text{Ca}^{++}$ 或者是 $\text{Mg}^{++}$ 。

由有机氮分解产生的 $\text{NH}_4^+$ ,当土壤的粘土矿物处于非膨胀的情况下,因为层间被其它离子占据, $\text{NH}_4^+$ 只能在p位吸附。由于这种吸附能力微弱, $\text{NH}_4^+$ 可从土体中被淋走,如果土壤的粘土矿物在膨胀的情况下, $\text{NH}_4^+$ 就可能有e位和i位的吸附,粘土矿物收缩后,就产生 $\text{NH}_4^+$ (或者 $\text{K}^+$ )的固定。以这种方式固定的 $\text{NH}_4^+$ ,即层间i位上吸附的 $\text{NH}_4^+$ ,在粘土矿物收缩以后能否对植物有效?仍然是营养上研究的一个很重要的问题,这就是土壤中铵的动向。据报道,土壤中被固定的 $\text{NH}_4^+$ 的数量每公顷可达500~3000公斤,如果在

作物生长季节中，可能有10%被释放出来，即50~300公斤/公顷。一般文献认为上述这种固定的 $\text{NH}_4^+$ 对植物是无效的，这一概念在近几年已有所改变。

#### 四、粘土矿物晶层间固定铵的释放

根据近几年的研究，被粘土矿物晶层间固定的 $\text{NH}_4^+$ 是可以释放的，释放的 $\text{NH}_4^+$ 对植物是有效的。这里介绍比利时学者Praag等的一个试验结果，见表1—3。

表1—3 剖面中被固定的 $\text{NH}_4^+$ 的数量 (Praag等, 1980)

| 土壤深度<br>(公分) | 1972年小麦收获后<br>( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ppm) | 1973年燕麦收获后<br>( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ppm) |
|--------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0~10         | 80.5                                          | 81.4                                          |
| 10~20        | 89.3                                          | 81.5                                          |
| 20~30        | 92.8                                          | 69.1                                          |
| 30~40        | 104.0                                         | 62.5                                          |
| 40~50        | 110.0                                         | 63.9                                          |
| 50~60        | 115.0                                         | 88.1                                          |
| 60~70        | 127.8                                         | 98.0                                          |

上述试验在黄土发育的灰白色的灰化土上进行，1972年到1973年分别种植冬小麦、燕麦，释放的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 相当于250公斤/公顷。由上表可以看出：一年后，0—10公分被固定的 $\text{NH}_4^+$ 并无差别；10—20公分开始下降；30—40公分下降较多；40—50公分下降得更加明显。30—70公分土壤中被固定的 $\text{NH}_4^+$ 对燕麦是相当有效的。这个所谓被固定的 $\text{NH}_4^+$ 的含量在年复一年的变化着，如按公顷面积来计算， $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的释放量可达250公斤，这个可观的数字比一般谷类作物的需要量还要高。

一九八一年我们在黄土发育的冲积土上，用 $^{15}\text{N}$ 标记和其他研究技术，发现在作物整个生长季节中有200~400公斤/公顷氮可以释放出来。试验研究的结果如图1—4所示。

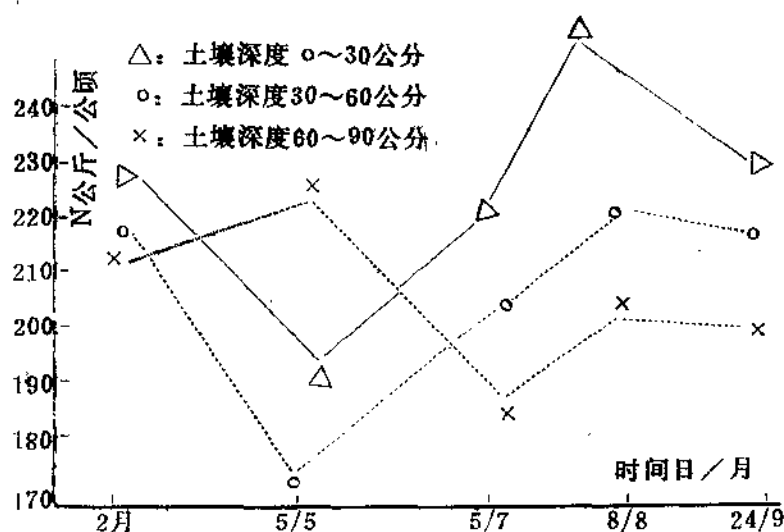


图1—4 不同土壤深度和采样时间土壤固定铵的变化  
(Mengel & Scherer, 1981)

0—30公分是表土层，2月份开始播种燕麦。从上图的曲线可看出，0—30，30—60公分土层中固定的 $\text{NH}_4^+$ 在5月5日以前随时间下降，这是由于作物吸收所致，随后在深层土壤（60—90公分）固定的 $\text{NH}_4^+$ 的数量也下降，这和燕麦根系下伸吸收有关。在温暖和潮湿月份里，矿化作用继续进行，使固定的 $\text{NH}_4^+$ 得到补充，因此数量又有所上升。如果仅仅在作物播前和收获后各进行一次分析，就看不出它的这些变化了。以上结果是在含有机氮丰富的冲积土上取得的，而在黄土上所得的结果则是一直下降的曲线。

我们还得到水稻土上所进行试验的结果，这是我的协作者在菲律宾的研究，见表1—4。

表1—4 水稻土种植水稻条件下固定 $\text{NH}_4^+$ 的释放量  
(keerthisinghe等, 1983)

| 土 壤   | 释放量ppm | 氮（公斤/公顷） |
|-------|--------|----------|
| 粉砂粘壤土 | 46     | ~90      |
| 粘质氧化土 | 10     | ~20      |
| 粘质氧化土 | 22     | ~40      |

以开始移栽水稻到收获，两者之间的差异为释放量，粉砂粘壤土是46ppm，其它分别是10ppm和22ppm。若按每公顷计算，不同土壤的释放量每公顷分别相当于90，20和40公斤。从总体上看，在有些土壤上 $\text{NH}_4^+$ 的固定和释放是一个重要的过程，从我们研究所在西德Giessen地方取得的新的研究成果看出，黄土的肥力特性在很大程度上取决于这种特有的 $\text{NH}_4^+$ 的固定与释放能力。具有这种特有机制的土壤，能够贮存 $\text{NH}_4^+$ 。

这种固定的 $\text{NH}_4^+$ 虽不易被植物吸收，但能长期保持其有效性。

有些土壤能固定 $\text{NH}_4^+$ ，也能释放 $\text{NH}_4^+$ ，问题是层间固定的 $\text{NH}_4^+$ 如何释放。在正常温度下被固定的 $\text{NH}_4^+$ 是不稳定的，因为每个离子均按各自的振动能量而振动，也可脱离晶层，释放出来，所以不稳定。

振动强度取决于土壤水分含量，在干旱条件下，土壤水分少，层间紧缩，振动受到限制。如果土壤水分含量多，层间膨胀， $\text{NH}_4^+$ 就释放出来。因此，被固定的 $\text{NH}_4^+$ 与土壤溶液中的 $\text{NH}_4^+$ 处于动态平衡中。土壤溶液中铵离子浓度高时，即限制固定 $\text{NH}_4^+$ 的释放，相反会促进固定 $\text{NH}_4^+$ 的释放，所以要区分固定离子的净释放（net release）。当被固定铵离子释放后，土壤溶液中的铵离子又被吸附，如果其吸附量等于释放量，则净释放量为零。土壤溶液中 $\text{NH}_4^+$ 浓度越低越有利 $\text{NH}_4^+$ 的净释放，如土壤溶液中 $\text{NH}_4^+$ 浓度低于 $0.01 \text{ mM}$ 时，就有净释放。但可耕地土壤溶液的 $\text{NH}_4^+$ 浓度一般为 $0.1 \text{ mM}$ ，所以无净释放。据试验将粘土用 $^{15}\text{N}$ 标记的铵溶液处理，经四个月分析，结果表明固定的 $\text{NH}_4^+$ 离子总量没有变化，但 $^{15}\text{N}$ 却被 $^{14}\text{N}$ 代换而进入土壤溶液。这个试验证明晶层固定的 $\text{NH}_4^+$ 与土壤溶液中的 $\text{NH}_4^+$ 处于动态平衡中。在栽培情况下，因根系对 $\text{NH}_4^+$ 吸收，根际 $\text{NH}_4^+$ 浓度迅速下降，可达 $1-2 \mu\text{M}$ ，此时土壤有 $\text{NH}_4^+$ 释放。同时还可促使其他阳离子（ $\text{Na}^+$ ）进行交换以取代 $\text{NH}_4^+$ 的位置，促使粘粒膨胀，引起更多 $\text{NH}_4^+$ 的释放，这是净释放量。但在一般土壤中 $\text{NH}_4^+$ 浓度为 $100 \mu\text{M}$ 。如果在没有植物生长时就不可能有 $\text{NH}_4^+$ 的净释放。如果有植物生长，这种净释放量也很小。

因作物种类不同根系的发育也有差异，对促进 $\text{NH}_4^+$ 的释放也不一样。如燕麦比小麦根系大一倍，对固定态 $\text{NH}_4^+$ 的吸收也高50%。

净释放的 $\text{NH}_4^+$ 可以进行硝化作用，用下述简式表示：



如果释放的 $\text{NH}_4^+$ 形成 $\text{NO}_3^-$ ，那就不能返回晶层，硝化作用与 $\text{NH}_4^+$ 的固定是对抗的，硝化作用可以促进 $\text{NH}_4^+$ 的释放。有作物生长时能促使土壤固定 $\text{NH}_4^+$ 的释放，其释放量大于休闲地。休闲地的硝化作用决定于 $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 比，故 $\text{NH}_4^+$ 释放量很低，每公顷约以硝 $10 \sim 20$ 公斤。

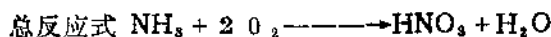
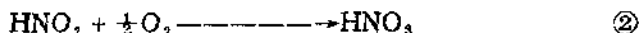
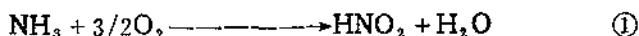
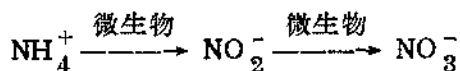


## 第二讲 自然界的氮素循环 (二)

### 硝化作用与反硝化作用——

#### 一、硝化作用 (Nitrification)

在土壤微生物的作用下,氨氧化为硝酸的过程称“硝化作用”。它是一个生物学过程,而不是纯化学作用。在硝化过程中发现有自养型微生物 (Autotrophic microorganism) 和异养型微生物 (Heterotrophic microorganism), 但是最重要的是自养型微生物。这类微生物能从无机盐的氧化作用中获得能量, 并利用二氧化碳作为碳源。硝化作用的简单过程:



整个反应分两个过程, 都是氧化作用。每个过程都只有少数微生物参与作用。

在①式中, 即亚硝化过程中使 $\text{NH}_3$ 转化为 $\text{HNO}_2$ 的细菌, 亚硝化毛杆菌属 (Nitrosomonas); 亚硝化叶菌属 (Nitrosolobus); 亚硝化螺菌属 (Nitrospira) 等。亚硝化毛杆菌属于30—40年代发现, 仅存在于施用堆肥和人畜粪尿的土壤中。亚硝化叶菌属是最新发现, 在农耕地都可找到, 对很多土壤的亚硝化过程起重要作用。

在②式中, 即硝化过程中, 使 $\text{NO}_2^-$ 转化为 $\text{NO}_3^-$ 的细菌为硝化杆菌属 (Nitrobacter)。

这些参与亚硝化和硝化过程的细菌, 都需要氧的供应, 因此, 在通气良好的条件下, 随着硝化作用的进行, 会使土壤的pH降低。如种植三叶草翻压后第二年, 土壤pH由7下降至6.8, 一般pH下降0.1~1单位。过去有人认为pH下降的原因是由于绿肥分解产生了有机酸造成, 但实际是硝化作用产生的强酸 ( $\text{HNO}_3$ ) 所致。此外硝化细菌对pH也很敏感, 当pH低时, 抑制硝化作用。如土壤pH小于5时, 则不可能发生硝化作用。所以硝化作用应出现在pH5以上, 在酸性土壤上难发生硝化作用。如灰化土的硝化作用几乎不能发生。

硝化作用要在有氧条件下进行, 淹水土壤也不易产生硝化作用, 所以硝态氮的淋溶也少。铵态氮肥施于旱地, 土壤硝化作用快, 作物吸收的氮以硝态氮为主。由于硝态氮不被