



全国高等农业院校教材

全国高等农业院校教材指导委员会审定



植物营养的土壤化学

王敬国 编著

土壤与植物营养专业用

北京农业大学出版社

全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教材指导委员会审定

植物营养的土壤化学

王敬国 编著
土壤与植物营养专业用

图书在版编目(CIP)数据

植物营养的土壤化学/王敬国编著. —北京:北京农业大学出版社,1995.7

ISBN 7-81002-724-7

I. 植… II. 王… III. 土壤化学-植物营养 IV. ①S153
②Q945.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 13704 号

北京农业大学出版社出版
(北京市海淀区圆明园西路 2 号)

北京农大印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

1995 年 10 月第 1 版 1995 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 16 开本 302 千字

印张:12.5 印数:1~2000 册

定 价:9.80 元

前言

根据教学的需要和农业部教育宣传司下达的编写任务,《植物营养的土壤化学》一书从1993年5月开始编写,于1995年4月定稿。

《植物营养的土壤化学》是从植物营养的角度,研究植物与土壤之间的相互关系,重点探讨土壤化学和生物化学过程与植物养分的有效性。其主要内容包括:①土壤—植物间养分物质交换的过程、原理和影响因素;②土壤中植物营养元素和有益元素的有效化过程,涉及到的元素有:氮、磷、钾、硫、钙、镁、铁、锰、铜、锌、硼、钼、硅、硒、钴、钼、钛和稀土元素。

本书将土壤学及各相关学科的基本原理与植物营养密切结合起来,其特点是:以植物与土壤的相互关系为主线,贯穿于整个课程之中;强调土壤过程的动态、动力学特征以及土壤生物和植物根系在养分转化方面的作用;充分注意到土壤性质的空间变异,以及土壤与环境间的物质与能量交换对土壤过程和土壤养分植物有效性的影响等。选用了许多新材料,反映了国内外土壤养分研究的最新成果。

本书是高等农业院校土壤与植物营养或土壤农业化学专业本科生的参考教材,可作为作物营养与施肥专业硕士研究生的必修教材,书名也是根据硕士研究生相应学位课程的名称确定的。本书对从事土壤肥料工作的农业教育和科技人员也有重要的参考价值。

全书由王敬国编著,杨志福教授主审,在本书编写过程中,得到了许多专家和同仁的帮助,体现了集体的智慧。其中,毛达如教授、夏荣基教授、陆景陵教授、陈伦寿教授、曹一平教授、杨志福教授、张福锁教授等参与了编写大纲的讨论和审定;陆景陵教授、李酉开教授、曹一平教授、蒋以超副教授和李晓林教授对本书编写提出了许多宝贵意见,并审阅修改了部分章节;江荣风讲师、陈新平讲师、以及万蕾、张毅功、刘学军、邹国元等同志参与了有关章节的校阅工作;张福锁教授提供了大量的参考资料,并为本书的编写提供了许多方便;编者对此深表感谢。同时,编者对夏荣基教授和赵玉萍教授在土壤化学方面,Lars Bakken教授在土壤微生物学和土壤生物化学方面的谆谆教诲和热心指导表示深深的谢意。此外,编者还感谢国家自然科学基金委对有关科研项目的资助。

限于时间和编者的水平,本书一定会有许多不足之处或不尽人意的地方,甚至会有一些错误,敬请阅读和使用本书的教师、科研人员、学生以及其他人士不吝赐教,编者将不胜感激。

编者

1995年1月

目 录

绪 论	(1)
1 土壤养分的植物吸收和迁移	(4)
1.1 植物的养分需要	(4)
1.2 土壤养分的植物有效性	(4)
1.3 土壤养分的供应	(5)
1.4 土壤养分的迁移过程及动力学特征	(6)
1.5 土壤性质与养分的迁移	(10)
2 土壤固液相间养分的交换	(13)
2.1 液相的组成及影响因素	(13)
2.2 固液相间养分交换的动力学特征	(15)
2.3 离子吸附与解吸	(18)
2.4 化学沉淀与溶解	(26)
2.5 矿物的化学风化	(27)
2.6 配位反应	(28)
2.7 氧化与还原	(29)
3 土壤养分物质的生物转化	(34)
3.1 土壤生物的多样性	(34)
3.2 土壤生物的生理适应性	(36)
3.3 土壤生物的生态适应性	(40)
3.4 微生态环境中的土壤生物	(43)
3.5 土壤酶	(46)
4 土壤有机碳的动态及其营养作用	(49)
4.1 土壤和植物系统中的碳素循环	(49)
4.2 新鲜有机物质的转化	(52)
4.3 土壤腐殖质的形成和稳定性	(57)
4.4 微生物代谢物的营养作用	(60)
5 土壤氮素的转化	(63)
5.1 土壤氮素的平衡	(63)
5.2 土壤有机态和无机态氮之间的转化	(66)
5.3 土壤中铵态氮的动态	(72)
5.4 土壤中铵的生物转化—硝化作用	(77)
5.5 土壤中硝酸的还原和移动	(80)
5.6 土壤氮的生物固定及生态效益评价	(85)
6 土壤磷的转化	(92)
6.1 土壤磷的形态与植物有效磷	(92)
6.2 土壤磷的有效化	(95)
6.3 土壤磷的吸附与解吸	(96)

6.4	土壤磷的沉淀与溶解	(98)
6.5	土壤磷的生物转化	(100)
6.6	土壤供磷能力及影响因素	(103)
7	土壤钾的动态	(107)
7.1	土壤钾的形态与植物有效性	(107)
7.2	土壤含钾矿物	(108)
7.3	土壤矿物结构钾的释放	(111)
7.4	土壤钾的固定和非交换性钾的释放	(115)
7.5	土壤交换态钾的吸附和释放	(117)
7.6	土壤钾的流失	(119)
8	土壤硫的转化	(121)
8.1	土壤硫的来源及含量	(121)
8.2	土壤硫的形态和植物有效性	(122)
8.3	土壤有机硫的生物转化	(121)
8.4	土壤无机硫的生物转化	(127)
8.5	土壤硫的吸附	(130)
9	钙和镁的土壤化学	(131)
9.1	钙和镁的化学性质	(131)
9.2	钙、镁的含量及形态	(131)
9.3	钙、镁矿物的风化	(134)
9.4	土壤溶液中的钙、镁	(135)
9.5	交换态钙、镁	(138)
10	微量元素的土壤化学	(142)
10.1	微量元素的地球化学特征	(142)
10.2	微量元素的来源和含量	(146)
10.3	微量元素的形态及植物有效性	(147)
10.4	微量元素的化学沉淀与溶解	(152)
10.5	微量元素的离子吸附与解吸	(153)
10.6	微量元素的氧化与还原	(161)
10.7	微量元素的配位反应	(169)
10.8	影响微量元素有效化的因素	(173)
11	有益元素的土壤化学	(177)
11.1	硅	(177)
11.2	硒	(180)
11.3	钴和镍	(183)
11.4	钛	(186)
11.5	稀土元素	(187)
	参考文献	(189)

绪论

《植物营养的土壤化学》是从研究植物与土壤相互关系入手,运用土壤化学、土壤生物学、土壤生物化学和生物地球化学的基本原理阐述营养元素和有益元素在土壤中迁移和转化过程,并进一步阐明土壤、生物和环境等因素在上述过程中对各种养分元素植物有效性的影响。

《植物营养的土壤化学》与农业生物学科

土壤是植物生长的主要介质。尽管无土栽培技术近年来发展很快,但土壤毕竟是提供植物养分的主要场所。即使以施肥方式补充养分,其中绝大部分也要与土壤接触,因为根外施肥只能是一种辅助手段。

植物对养分吸收利用以及自身营养状况直接受土壤养分元素形态及其有效性的影响,而土壤中各种元素的形态、迁移、转化及植物有效性等又与土壤物理和化学性质以及化学和生物化学过程有关。具体来说,涉及到土壤组分的矿物学和化学性质、化学风化过程中营养元素的释放、养分在土壤各相之间平衡的热力学和交换的动力学,以及养分的迁移,特别是根际土壤中养分迁移的状况等。其中,土壤微生物(包括原生动)、动物以及土壤酶对营养物质转化的作用受到了越来越多的重视,而且,生物化学过程常具有决定性作用。

在长期生物进化过程中,植物获得了主动适应各种土壤环境的能力。例如,近年来植物与土壤相互关系,特别是植物根际营养的研究表明,植物能够直接活化和利用土壤中缓效态和化学提取无效态养分;而且,这种活化和利用能力具有明显的植物种类和基因型特征。不仅不同种类的植物,而且同一种类不同基因型的植物品种在活化和吸收利用养分方面都有明显的差异。根系对土壤养分的活化过程实际上是植物根系与近根土壤固相物质之间相互作用的结果,主要是在根系的生理活动影响下,根际微域中物理、化学和生物学性质发生改变,从而活化了土壤固相中难溶性养分。固相物质的化学组分和性质、土壤的物理学性质以及环境因素都直接或间接地影响植物,并进一步影响土壤养分的活化。

综上所述,研究植物与土壤环境之间的相互关系,是从植物营养的角度,探讨土壤化学和土壤生物化学过程以及植物对土壤过程的影响,将对通过生物途径和农业措施更合理地利用土壤养分资源、减少能源消耗和环境污染等方面有重要意义。

《植物营养的土壤化学》的特点

本课程从植物营养的角度,将土壤学及各相关学科的基本原理与植物营养密切结合起来,目的在于运用这些原理解决实际中植物营养在土壤方面的问题。根据植物生长、土壤性质和土壤过程的动态特征,以及土壤的高度非均质性等因素,本课程具有以下几个特点:

(i) **植物与土壤的相互关系是贯穿于课程之中的主线** 必须明确,研究土壤化学和生物化学过程是围绕着土壤养分的植物有效化这一主题进行的,而不是孤立地研究这些过程。因

此,在研究中各个化学和生物化学过程本身不作详细的理论介绍,而只是应用其原理探讨与各种养分元素植物有效性有关的化学和生物化学反应。

(ii) **土壤过程的动态特征** 土壤化学和生物化学过程实际上是指土壤中物质交换的方式,而交换反应的平衡和移动方向都脱离不了外部环境。例如,在植物生长期间,土壤固相需要不断地向土壤液相补充养分,以满足植物生长的需要。养分补充的方式包括矿物的风化和有机物质的矿化;固相养分物质的溶解、解吸附、氧化和还原反应、配位反应,以及养分在溶液中的迁移等。而养分补充的具体状况取决于土壤性质,包括液相养分的种类和活度、养分在土壤固相的存在形态及性质、胶体种类、酸碱反应、Eh 值、土壤水分、温度等。必须指出的是,一旦其中某些条件发生变化,养分物质交换的强度、方向甚至方式都可能发生改变。这表明了土壤化学和生物化学过程具有很强的动态特征。土壤过程的动态特征具有时间和空间因素。在时间上,表现为土壤的某些性质随着植物对养分的吸收、根际效应、土壤生物活动、土壤和外界环境间物质和能量的交换而不断变化。这些土壤性质的变化将影响土壤过程的平衡及移动的方向。在空间上,表现为土壤的非均质性,各微域环境之间物质交换过程在不断进行。因此,可以认为土壤化学和生物化学过程从来就没有达到过真正平衡状态,或者只能说是有过瞬间的平衡。根据化学平衡原理预测土壤溶液中养分浓度的工作尽管在某些条件下、对某些元素取得了较好的效果,但存在的问题还不少。

(iii) **土壤过程的动力学特征** 土壤化学和生物化学过程难以达到平衡状态还与化学反应进行的速度有关。因此,要考虑到达平衡所需要的时间,即土壤过程动力学的研究。研究表明,各种化学和生物化学反应速率的差异很大,有的很快,有的则非常慢,因此到达平衡所需的时间有长有短。土壤有机质和粘土矿物,特别是土壤氧化物与金属离子发生的离子交换吸附反应通常速度非常快,在几分钟内甚至在瞬间可达到平衡。沉淀反应进行的就比较慢,因为沉淀的溶解过程只能在表面进行,而且受扩散速率的影响,所以反应就更慢。即使是在离子交换吸附平衡中,其离子的解吸附曲线与吸附曲线相比有明显的滞后现象。在土壤环境中,化学反应的动力学性质十分复杂,因为它们一般具有两种动力学特征:既有由化学反应所控制的动力学特征;同时又有由养分迁移速度所控制的动力学特征。

(iv) **土壤生物和植物根系的作用** 土壤生物包括土壤微生物(原生动物)和无脊椎动物等,它们在土壤养分物质的转化方面具有重要作用。土壤有机固相与土壤液相间的养分转化基本上是由土壤生物和土壤酶参与的生物化学过程,而且作为土壤中物质和能量转化的一个重要动力,土壤生物的类型具有多样性,其作用机理也有很大差异。例如,由土壤生物以及它们和植物根系释放的各种酶类参与的土壤物质和能量的转化过程有许多种。其中,对植物养分有效性有影响的主要生物化学过程包括:有机物质的分解、腐殖物质的形成和分解、有机氮、磷和硫的转化、有机配位体和还原性物质的合成与释放以及对微量元素的有效化的影响、植物生长调节剂和抑制剂的合成及释放对植物根系生长的影响等。

值得注意的是,土壤生物作用和生物化学过程对养分有效化过程的影响有积极的,也有消极的。例如,土壤生物的活动既可以促进养分的释放、增加养分的植物有效性,同时也存在着有机物质分解过程中微生物争夺养分,减少养分植物有效性现象。这种竞争作用在根际以及土体中有机质分解比较强烈时,尤为突出。

(v) **土壤性质的空间变异** 土壤是一个非均质体,它决定了土壤物理、化学和生物学性质在各微域环境中具有很大的差异性。例如,与其他部分相比,根际或者土壤生物活跃的微域

环境与土体之间的物理、化学和生物学性质明显不同,并导致化学和生物化学过程的差异,而且这些微域环境的土壤性质和过程的动态变化,对有关元素的植物有效性有直接而且是极其重要的影响。

(vi) **土壤与环境间的物质与能量交换对土壤过程的影响** 土壤是一个开放体系,与外部环境之间不断进行着物质和能量的交换。一方面,土壤中养分元素的转化和迁移过程是地球化学过程的一个重要组成部分,宏观过程对土壤的微观过程有重要影响。另一方面,人为活动也加快了土壤物质转化及与外界交换过程的进行。例如,随着工业化的进程,土壤中物质投入、流出的数量增加、速率提高,而且使得土壤与外部环境间物质交换过程,包括气态、固态以及溶质的交换过程更为复杂。因此,从宏观角度考虑物质交换的种类和数量对土壤过程及养分的植物有效性影响是不可忽视的。同时,还要注意到土壤过程对环境的影响,包括引起的大气温室效应及水体污染等。

《植物营养的土壤化学》的内容

植物营养的土壤化学属于一种边缘学科,具有植物营养(包括土壤肥力)、土壤生物学和生物化学、土壤化学和生物地球化学等学科交叉的特征。其内容包括两个方面:

(i) 土壤—植物间养分物质交换的基本原理和影响因素

a. 土壤养分的植物吸收和迁移及其限制因素 介绍与土壤养分植物有效性有关的一些概念、主要迁移过程及影响因素。

b. 土壤固相和液相间养分交换过程及动力学特征 讨论土壤溶液的组成和化学性质,土壤液相和固相间养分物质交换的一般规律,离子吸附、沉淀和溶解、氧化和还原、配位反应和化学风化的基本原理和动力学特征。

c. 土壤养分的生物化学转化基础 讨论与土壤养分转化和植物养分吸收有关的土壤生物的生理特征和生态分布,以及生物之间的相互作用,土壤酶的来源、分布及在营养物质转化方面的作用。

d. 土壤有机碳转化及其营养特性 介绍土壤—植物系统中碳素循环的一般规律,土壤生物在新鲜有机物质分解和土壤腐殖质形成和分解方面的作用;强调有机碳转化过程中有机活性物质,包括还原性物质、配位体和微生物次生代谢产物的释放及其生态意义。

(ii) **植物营养元素和有益元素的有效化过程** 从元素的化学特性和化学行为入手,运用化学平衡、土壤生物化学、化学动力学等的基本原理,围绕着必需营养元素氮、磷、钾、硫、钙、镁、铁、锰、铜、锌、硼和有益元素硅、钛、硒、钴、钼及稀土元素等在土壤中的动态与植物有效性的关系,进行较为深入的讨论。充分注意到植物根系活动与养分元素转化,元素之间的相互作用,以及元素转化过程的生态环境效益。强调主要化学和生物化学过程与特定元素动态及其植物有效性的关系。为了避免不必要的重复,对于某些化学行为近似的元素,将在有关元素的章节中进行讨论。

作为作物营养与施肥专业硕士研究生的学位课,《植物营养的土壤化学》的读者需要有地质学、普通土壤学、植物营养学、土壤化学、土壤微生物学等方面的基础。为了更好地理解本课程的内容,建议有兴趣的读者进一步阅读各有关元素的研究论文、综述和专著,以及土壤物理化学、土壤矿物学、土壤生物化学、微生物生态学和生物地球化学等学术著作的有关部分。

1 土壤养分的植物吸收和迁移

植物的生长和发育需要根系不断地从土壤中吸收养分。植物吸收养分元素的数量取决于植物的养分需要和土壤养分的供应能力,也受与植物生长和土壤养分元素转化过程有关因素的影响。本章从植物营养的角度,探讨与土壤养分元素植物有效性有关的一些概念性问题,以方便下面各章的讨论。

1.1 植物的养分需要

植物对养分元素种类和数量的需要主要受自身代谢过程的控制,与植物的种类和基因型有关。植物的养分需要体现在内部和外部两方面。

1.1.1 植物的内部养分需要 植物的生长和发育要求外部环境为其提供一定数量的养分,其需要量与植物的种类和基因型有关,并受植物体内代谢过程控制。植物的这种养分需要称为植物内部养分需要,其定义为达到某一特定的产量植物所需要营养元素的最低量。植物内部养分需要是一个容量因素,也有人将其定义为达到最大产量时,植物体内养分的浓度,这就成为一个强度因素。

1.1.2 植物的外部养分需要 与植物的内部养分需要相对应,植物对介质养分也有一定的数量要求。这种数量要求称为植物的外部养分需要,其定义为满足植物的内部养分需要的介质中养分最低数量,或者与该数量成比例的值。

植物的外部养分需要也可以用养分的强度指标,即与满足植物的营养需要相对应的生长介质溶液中养分的浓度来表示。因此,维持土壤溶液中一定的养分浓度对植物的生长是非常必要的。

1.2 土壤养分的植物有效性

养分元素存在于土壤气、液、固各相中,其形态非常复杂,只有很小一部分是对植物有效的养分,而且由于空间分布距离较远,植物实际利用的比例更低。

1.2.1 土壤中的植物有效养分

1.2.1.1 土壤有效养分的定义 按照 Barber(1984)的定义,土壤中的植物有效养分(或简称为土壤有效养分)是指根系能够接触到,并被植物以能够影响其生长的速率吸收的养分。这就明确要求植物有效养分不但在化学形态上,而且在空间上都应该是对植物有效的,且在数量上能够满足植物的营养需要。

1.2.1.2 土壤养分化学有效性和空间有效性 土壤溶液中的养分是化学形态上对植物有效的养分,但不一定是对植物实际有效的养分。因此有必要将养分区分为化学有效养分和空间有效养分。其中,化学有效养分是土壤中存在的植物能够利用的矿质态养分和简单有机态养分。在实际应用时,往往是指用某种浸提剂提取的养分,包括可溶性的离子态与简单分子态养

分、易释放的土壤固相表面吸附态养分以及植物易吸收和微生物易分解的有机态养分。与化学有效养分相对应的是缓效养分,即释放速率较慢的那部分养分。然而,由于空间分布的原因,化学有效养分并不等于实际有效养分。为此,人们提出了养分空间有效性的概念。所谓空间有效养分是指植物根系能够接触到的化学有效养分。空间有效养分除近根溶液的养分之外,还包括迁移到根土界面的养分以及根际土壤固相释放的难溶性养分。

养分空间有效性除了与土壤性质有关外,还取决于植物根系的形态和分布特征,根系吸收水分和养分的能力,以及根系活化和利用难溶性土壤固相养分的能力。其中,根系的总量、总根长、根比表面积(根毛的数量)及分布特征决定了根系与土壤的接触面积。根系水分和养分的吸收能力等因素,对土壤养分的吸收和迁移有着直接的影响。

1.2.2 植物根系对难溶性养分的利用 植物根系能够直接活化和利用根系附近的难溶性无机和有机固相养分,其活化和利用方式包括根际酸化作用、有机配位体的螯溶作用、根际氧化还原电位改变和还原性物质的还原溶解作用等促进根际土壤无机固相养分物质的活化,以及释放酶类对有机态养分物质转化的影响等。根系活化和利用根际土壤固相养分的方式和作用机理简要列在表 1.1。

表 1.1 根系对难溶性土壤固相养分的活化和利用

方 式	产 生 的 原 因	作 用 机 理
根际酸化作用	质子的主动分泌;根系和根际生物呼吸作用释放 CO ₂ ;吸收阳离子多于阴离子;有机酸的分泌。	难溶性含磷和微量元素化合物的溶解;非交换性钾和矿物态钾的释放。
螯溶作用	有机配位体的释放,主要包括有机酸类物质、酚类物质和氨基酸类物质以及铁载体的释放。	促进难溶性磷的释放和微量元素的植物有效性;矿物的分解和钾的有效性增加。
还原溶解作用	由质子和有机酸分泌、O ₂ 消耗引起的根际 Eh 值下降;根系释放有机酸、酚类和氨基酸类物质的还原作用。	锰、铁和钴氧化物和氢氧化物的还原溶解和锰、铁和钴的释放;以及与铁锰结合的铜、锌和磷等元素的释放。
酶促反应	释放酸性磷酸酶、蛋白酶、氨基酸水解酶、脲酶等	有机氮、磷和硫的矿化和释放。

根系的上述作用往往难以与根际生物的作用区分开来。但需要指出的是,在根际养分的活化过程中,植物根系起主导作用,因为土壤生物需要的碳源和能源主要来自于根系淀积物。

植物根系对难溶性养分的活化和利用能力具有明显的植物种类差异和基因类型特征。不同种类植物以及同一种植物的不同基因类型释放有机物质的种类和数量差异很大,活化和利用难溶性养分的能力显著不同。而且,许多植物只有在营养胁迫条件下才表现出对难溶性养分的活化能力。

1.3 土壤养分的供应

土壤对植物养分吸收量的影响主要表现在土壤养分的供应能力,包括土壤液相中养分的浓度、土壤固相对液相养分补充能力以及养分向根表迁移的方式和速率等。

1.3.1 土壤养分的供应过程 土壤养分的供应过程,也就是植物对养分的吸收和利用过程,如图 1.1 所示。

在生长过程中,植物根系可以通过截获的方式来吸收根上界面上的养分。然而,根系以此种方式得到养分的数量很少,除了高钙土壤能够满足植物对钙的需要量外,其他元素远远不够,因为根系所占的体积比较小。在土壤表层,植物根系的体积一般不到土壤体积的1%(表1.2)。

因此,根系通过接触而截获的养分很少,特别是植物需要量大的元素如氮、磷和钾等的截获量只占植物需要量的很小一部分。对许多营养元素来说,近根土壤溶液中养分离子的总量远不能够满足植物的需要。

为了满足植物的营养需要,土壤不断向近根土壤溶液补充养分,其补充方式包括土壤固相养分的释放和土体溶液养分向近根土壤的迁移。固相养分的补充能力决定了土壤养分的供应潜力,土壤固相养分的释放速率以及以质流和扩散形式进行的养分迁移速率,调节着土壤对植物养分的供应速率。上述因素都常常成为土壤养分供应的主要限制因素。许多土壤性质通过影响上述的某一因素而对土壤养分的供应能力,即土壤养分的植物有效性产生作用。

1.3.2 土壤养分的缓冲因素

土壤溶液中养分的浓度称为养分供应能力的强度因素,常用 C_l 来表示。决定土壤固相液相养分补充能力的主要因素,是土壤易转化态养分的形态和含量。所谓易转化态养分是指土壤固相保持的,并且易于通过土壤化学和生物化学作用释放的各种形态养分。土壤易转化态养分包括吸附和易溶解的无机形态养分以及易分解的有机形态养分等。易转化态养分往往是指用化学浸提方法和生物学方法测定的土壤有效养分部分,其含量称为土壤养分供应的容量因素,常用 C_s 表示。

为了定量描述土壤固相养分的补充能力,人们引入了土壤养分缓冲因素的概念。所谓土壤养分的缓冲因素是指植物根系吸收养分时,土壤液相保持一定浓度养分的能力。土壤养分的缓冲因素与养分的强度因素和容量因素之间的关系可以用下式描述:

$$b = dC_s/dC_l \quad (1-1)$$

其中 b 为养分的缓冲因素, C_s 为固相易转化态养分的含量, C_l 为液相的养分含量。

易转化态养分向土壤溶液中养分的转化过程,包括由溶度积控制的固体溶解过程,吸附态养分的解吸过程,随着土壤氧化还原电位改变、或者还原性物质释放而产生的固相养分物质的氧化和还原溶解过程,以及有机配位体的配位溶解作用等。一般来说,易转化态养分都存在于土壤固体表面,其含量取决于土壤养分的存在形态,又与土壤性质和养分的转化过程有关。养分转化过程不同,易转化态养分的组成有差异。此外,植物养分的吸收导致在根际存在着养分亏缺区,可以促进根际固相养分的释放。但是,除少数营养元素外,在植物生长期间,土体中固相只有不断地释放养分才能满足植物生长和发育的需要。

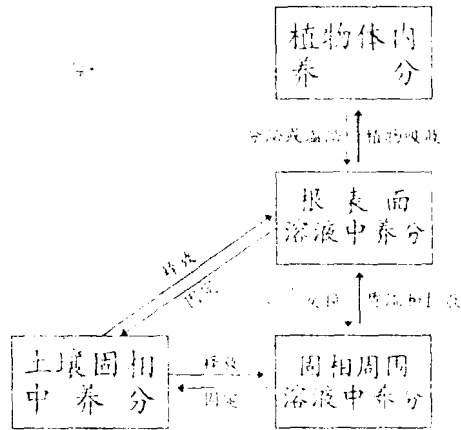


图 1.1 植物吸收和利用土壤养分的过程

表 1.2 表层 20cm 土壤中根系体积与土壤体积之比

植 物	根土体积比(%)
玉 米	0.40
冬黑麦	0.85
燕 麦	0.55
大 豆	0.91

资料来源: Barber, 1984

1.3.3 土壤养分的空间分布和迁移 土壤养分的空间分布常常是植物营养的限制因素,因为植物只能直接吸收存在于根表面溶液中的养分,大量存在于土体部分的养分需要通过迁移,进入根表面溶液,以供植物吸收。除了植物需要量低的养分,如微量元素,存在于根表面溶液中和近根固相养分的释放量就能够在很大程度上满足植物的需要外,对植物需要量大的养分,根表面溶液中和根际固相释放的养分在数量上很难满足植物的营养需要。例如,植物的大量营养元素如氮、磷和钾都需要通过不同的迁移方式进入近根土壤。

土壤中养分的迁移过程主要是质流和扩散。养分的质流迁移过程是指养分随植物蒸腾所引起的水分流一起向根运输的过程。当质流不能为植物根系带来它们所需要的全部养分时,根的吸收将会减少养分在根表面溶液中的浓度,而产生与根垂直的养分浓度梯度。此时,养分就会沿着该浓度梯度以热运动的方式向根表运输,即以扩散的方式进行迁移。对溶解度较大、在土壤溶液中含量大而植物需要量相对较小的养分,如钙镁元素以及硝态氮,质流可能成为主要的迁移方式。对大多数土壤养分,包括磷和钾等元素以及铵态氮,扩散是主要的迁移途径。

1.4 土壤养分的迁移过程及动力学特征

植物根系对养分和水分的吸收决定了养分的迁移方向,而养分元素迁移的方式和速率受根系吸收的速率、养分元素的移动性以及土壤性质的影响。

1.4.1 质流

1.4.1.1 养分的质流迁移 质流是指由植物吸收水分引起的水流,携带养分由土体向根表的移动。质流供应养分的数量与植物利用水分的流量和养分的浓度有关。常用下式来描述:

$$F_m = V_r C_r \quad (1-2)$$

F_m 为迁移养分的数量, V_r 为向根的水分流量, C_r 为溶液中养分的浓度。通过上式能够计算以质流的方式向植物根系迁移的养分的量。如果质流提供养分的量低于植物根系的吸收量,根际土壤中就会发生养分的亏缺。如果质流提供养分的量高于植物的吸收量,根际土壤中就会发生养分的累积。例如,在近根土壤常发现有钙、硫和镁的累积和氮、磷和钾等的亏缺。氮、磷和钾的亏缺以及可溶性盐在根际土壤的积累不利于植物的生长,特别是在干旱地区的灌溉土壤上,根际盐分的积累是引起植物盐害的直接原因。

1.4.1.2 根系吸水过程 在土壤—植物—大气连续体中,蒸腾是水分流动的动力,也是养分以质流方式迁移的动力。蒸腾不是一个稳定的过程,随着土壤的供水性能和土壤水分的来源而变化。而且,更重要的是,植物不是一个被动的水流通道。水分在植物体内的流动受到各种阻力,其阻力大小与植物种类、植物生长时期以及气候的变化有关,同时也受到根系吸水能力的影响。

根系吸收土壤水分的过程可以用模型来描述,这类模型有许多,大体上可以分为微观模型和宏观模型两种。其中,比较简单的是微观模型,又称单根径向源模型。这一模型将根视为具有单一半径和单一吸收特性无限长的圆柱体,水分流动是向根做径向流动,而且都是来源于以根轴为中心,半径为两根之间距离一半的圆柱体积中。当土壤的初始条件和导水性能等沿根长不变时,在忽略重力作用的情况下,其根系吸水所引起的水分流动可用径向水分流动方程表示。如:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r D_w \frac{\partial \theta}{\partial r}) \quad (1-3)$$

其中 θ 为土壤容积含水量, r 为吸收半径或根半径; D_w 为土壤水扩散率。当 $r=r_a, t>0$ 时, 植物的吸水量 V_0 为:

$$V_0 = 2\pi r_a K_s \frac{\partial S}{\partial r} = 2\pi r_a D_w \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (1-4)$$

S 为土壤水吸力, K_s 为土壤导水率, 与土壤水分含量和土壤的基膜特征有关。

在土壤水分流动是限制根系吸水的因素时, 植物的吸水量取决于根半径、土壤水分含量、土壤导水率或水扩散率, 而土壤导水率和扩散率又与土壤水分含量和土壤的基膜特征有关。此外, 影响植物吸收水分的因素还包括水分在根组织内的流动的阻力、土壤非均质性对土壤水流动的影响、根系分布不均一性、根系的吸水性能随根的部位而变化以及渗透压对土壤导水率和扩散率的影响等。因此, 在实际应用时, 应该予以考虑。

由上可知, 以质流方式迁移的养分数量与许多因素有关, 涉及到气候、土壤和植物三个方面。一般来讲, 以质流为主要迁移方式的养分在根表的累积表现出明显的日变化规律, 夜晚迁移的数量低于白天。而且, 植物吸收养分的数量也随着生育期而变化, 苗期的植株吸水量少, 由质流运输的养分量也比较少。

1.4.2 扩散 对大多数养分, 根系截获和质流不能满足植物的营养需要。在植物吸收作用下, 根表面与土体之间的出现养分浓度梯度, 养分沿着浓度梯度向根表扩散, 扩散是植物磷、钾等元素的主要来源。

扩散是由分子和离子的热运动引起的养分元素自发的迁移方式。只要溶液中有浓度梯度的存在, 养分就会发生由高浓度区向低浓度区的移动, 直到两边溶液达到平衡为止。养分离子在根外某处的浓度变化可用下式来描述:

$$\frac{dC_l}{dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d(r D_e \cdot \frac{dC_l}{dr})}{dr} \quad (1-5)$$

其中, dC_l/dt 为溶液中离子浓度随时间的变化, r 为距根轴的径向距离, D_e 为均质土壤中的有效扩散系数。该式表明在根土界面上的养分浓度最初是减少的, 随着时间的变化土壤的亏缺区会沿着径向方向而扩大。

限制土壤中养分离子扩散的主要因素是浓度梯度和扩散系数。其中, 扩散系数还与土壤性质和溶液中养分的浓度有关, 其表达式为:

$$D_e = D \theta f \cdot \frac{dC_l}{dC_s} \quad (1-6)$$

其中 D 为水溶液中的扩散系数, θ 是土壤的容积含水量, f 是曲折性或阻抗因数, dC_l/dC_s 是养分离子缓冲力的倒数, 其中 dC_l 为土壤溶液中养分离子浓度, dC_s 为土壤中可扩散养分离子的总量, 包括溶液中离子的总量以及能够从土壤固相部分释放出来的养分数量。由于离子通过土壤的充水孔隙路径曲折, 因此扩散的距离会增加。此外, 当缓冲能力较高时, 溶液中养分易被土壤所吸附, 影响其在土壤中的扩散。基于这些原因, 土壤中养分比溶液中养分的移动性一般要低几个数量级。

养分在土壤中的扩散系数可以用来估计根际养分亏缺区范围。平均的亏缺距离 ΔX 随时间而增加, 与 D_e 的关系如下:

$$\Delta X = (2tD_e)^{1/2} \quad (1-7)$$

其中, t 为时间。

尽管我们分别讨论了养分的质流和扩散, 实际上两者同时发生并且相互联系。在水分流内, 养分离子和分子不断地进行热运动, 因此不可能将两者在植物养分吸收上的比例确切地计算出来。

1.4.3 植物吸收养分的动力学模型 植物的吸收是养分迁移的主要动力, 限制养分吸收的主要因素是其在土壤中的迁移速率, 因此, 描述养分迁移过程的动力学方程, 往往与植物根系吸收养分的方程相一致。

1.4.3.1 模型 植物吸收养分的动力学模型中的代表是 Claassen 和 Barber (见 Barber, 1984) 用极坐标的方法建立起来的模型, 这个模型的基本考虑是生长在土壤上的植物对养分的吸收包括了两种过程: 以质流和扩散将养分运输到植物根系的过程以及植物根系对养分的吸收过程。假定这两个过程同时发生并且植物对养分的吸收服从米氏动力学方程, 公式就可以写:

$$J_r = D_e \cdot b \frac{dC_l}{dr} + V_0 C_l = \frac{I_{\max}(C_l - C_{\min})}{(K_m + C_l - C_{\min})} \quad (1-8)$$

其中 J_r 为植物吸收养分的量, r 为距根轴的径向距离, C_l 是土壤固相养分离子浓度, D_e 为有效扩散系数, 用来描述养分沿浓度梯度扩散的速度, C_l 是土壤溶液中养分离子的浓度, V_0 为水分吸收量, $C_{\min}$ 为溶液养分离子的最低浓度, 此时植物的净吸收为零, K_m 为米氏常数, $I_{\max}$ 为最大吸收速率。模型中前一项是以扩散方式迁移到根表的养分数量, 后一项是以质流方式迁移到根表的养分数量。扩散速率与根系表面养分的浓度有关。根系的大小和单位根表面积对养分的吸收速率, 将影响根系对养分的吸收。同时, 单位根表面积对养分的吸收速率, 也与根表面养分的浓度有关。

根据质量作用定律, 根表吸收的养分应该等于土壤提供的养分。随着 r 减少, 养分会由一维单向运动变为多维径向运动。假定植物根系是光滑的并且其吸收养分的方式符合米氏方程式, 经过数学整理后, 得到下列公式:

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r D_e \frac{\partial C_l}{\partial r} + \frac{V_0 r_d C_l}{b}) \quad (1-9)$$

其中 b 为养分的缓冲力, 其他参数如 r_0 为根的半径; t 为时间。

设置初始条件和边界条件可对上式进行积分。例如, 当 $t=0$ 时, $r > r_0$ 处养分没有变化, 即:

$$C_l = C_{li} \quad (1-10)$$

其中 C_{li} 为土壤溶液中养分离子的初始浓度。

当 $t > 0$ 和 $r = r_0$ 时,

$$D_e \cdot b + \frac{dC_l}{dr} + V_0 C_l = \frac{I_{\max}(C_l - C_{\min})}{(K_m + C_l - C_{\min})} \quad (1-11)$$

表明在根表面植物养分的供应量与植物根系养分的吸收量相等。

假设相邻根系对养分发生竞争时, 两个根轴之间距离的一半为 r_1 。因此, 当 $t > 0$ 和 $r = r_1$ 时, 得到:

$$D_e \cdot b \frac{dC_l}{dr} + \frac{r_0}{r_1} \cdot V_0 C_l = 0 \quad (1-12)$$

表明根系之间存在竞争性的吸收。在非竞争条件下 r_l 处的浓度没有变化。因此：

$$C_l = C_h \quad (1-13)$$

上述模型的假设条件有许多，主要包括：a. 土壤各向同质并且是均匀的；b. 根表与根附近的土壤水分含量相同并且接近于田间持水量，在垂直于根的方向无明显的水分梯度；c. 作物仅从土壤溶液中吸收水分；d. 养分向根的移动是质流和扩散共同的结果；e. 植物对养分的吸收符合米氏动力学方程；f. 根分泌物和微生物活动不影响根系的养分吸收；g. 根是光滑的圆柱体；h. 养分的吸收与根的新老无关；i. 假定 D_e 和 b 与溶液养分浓度无关；j. 养分吸收与水分吸收速率无关。这些条件在自然状态下的土壤中很难全部满足。尽管如此，这个模型在研究土壤中植物对养分的吸收过程仍有较强的适用性。

根据这个模型，最近几年不少人引入了许多新的参数，主要是考虑到植物根系的吸收特性，包括根毛的长度和数量、根系的分布特征、根系的生长以及体内养分的运输速率等。涉及到土壤方面的参数基本上没有变化，因此这个模型在指导我们对土壤养分供应能力的理解方面仍有重要意义。

1.4.3.2 参数的测定 在 Claassen 和 Barber 模型中，用来描述土壤养分供应能力的三个参数， C_h 、 b 和 D_e 都可以在实验室测定。以磷为例，通过从土壤中分离土壤溶液的方法测定溶液中磷的初始浓度 C_h 。 b 值是通过在不同磷浓度下，测定养分吸附或解吸等温线来得到的。常用的是解吸等温线，因为它更符合实际。但是，也有人常用吸附等温线，因为比较容易测定。但对不同元素，估计 b 值的方法不同。例如，由于钾的吸附和解吸等温线比较接近，因此可用吸附等温线来求钾的 b 值。而磷就必须用解吸等温线，因为其吸附和解吸等温线相差较大。等温线通常是在 0.01mol/L CaCl_2 的背景电解质溶液中测定的，此浓度接近于土壤溶液的离子强度。然后可以根据方程式(1-6)和测定有关参数估计 D_e 值。

1.4.4 化学方法估计土壤有效养分的局限性 从上述模型的分析中可以看到，描述土壤向植物根系供应养分能力的重要参数有 3 个，包括 D_e 、 b 和 C_h 。而在有土壤化学测试方法相关研究中只倾向于用一个到两个参数，主要是 C_e 和 C_h ，并将它们作为土壤养分有效性指标。根据目前的研究结果，只有当 D_e 和 b 与 C_h 相关时，土壤液相的养分浓度 C_h 才是一个可靠的土壤养分有效性的指标。然而，这种情况只有在土壤化学性质相同，对某一养分元素进行研究时才会发生。这也解释为什么用于估计土壤养分的植物有效性的化学测定方法，其应用范围受到很大限制的原因。

1.5 土壤性质与养分的迁移

养分元素在土壤溶液中的浓度和植物的养分需要，决定了元素在土壤中主要的迁移方式。土壤溶液中浓度较低而植物需要量较大的养分元素，扩散是它们主要的迁移途径。而土壤溶液中浓度高的养分，质流是其迁移的主要途径。养分元素的移动性是决定该养分由土体向根表面迁移速率的主要因素。元素的移动性取决于元素的化学性质以及元素与土壤固相物质之间的反应。关于这方面的问题请参考在元素各章的讨论，本节只讨论土壤的物理和化学性质对养分元素迁移速率的影响。这些因素主要是：

1.5.1 溶液中养分的浓度和缓冲能力 土壤溶液中养分元素的浓度和土壤固相的补充能力，影响养分迁移的方式。例如，硝酸根不易被土壤固相所保持，主要存在于土壤液相中，质流是其

主要迁移方式。土壤溶液中养分的浓度,直接影响以质流或者扩散方式迁移养分的数量。而且,养分的浓度以及缓冲能力还影响扩散的速率。如式 1—6 所示,土壤中养分的有效迁移系数 D_e 与土壤溶液中养分浓度成正比,与土壤养分的缓冲能力成反比。因此,养分缓冲能力强的土壤,以扩散形式为主要迁移途径的养分移动性降低。

1.5.2 迁移过程中溶液中养分与土壤固相之间的反应

由于土壤的非均质性和养分元素分布的空间变异性,在迁移过程中养分有可能与土壤固相物质发生反应,或者被土壤生物所利用,这将影响养分迁移的种类和数量。特别是对那些容易与土壤固相发生吸附作用的养分元素,由于吸附反应进行的较快,影响程度会更大。

养分在迁移过程中与土壤固相物质之间的相互作用有三种形式(图 1.2)。其中,(a)表示固相物质对正在迁移水溶态养分的补充作用;(b)表示水溶态养分在迁移过程中被土壤固相吸附或者土壤生物吸收等;(c)表示水溶态养分在迁移过程中与固相物质没有发生反应。由于土壤的非均质性,上述三种过程均可同时发生。

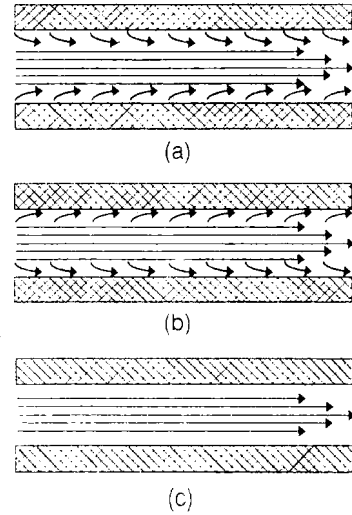


图 1.2 土壤溶液养分在迁移过程中与固相物质之间的反应

1.5.3 阻抗因素 土壤水分和养分向根系表面的迁移过程,包括质流和扩散均受土壤水分含量、土壤质地和土壤紧实度等因素的影响。这些因素可以概括为土壤弯曲程度,即阻抗因素。阻抗因素决定了迁移路径的长短,同时也影响扩散系数。阻抗因素常用曲折率来表示,可以通过测定的非吸附性离子(如 ^{36}Cl)在一定温度和离子强度下穿过土壤所需要的时间来求得。

土壤的阻抗因素与土壤水分含量、粒径、孔径分布和土壤容重等因素有关。例如,土壤水分的连续性是养分以扩散或质流形式迁移的基础,因此,在一定范围内增加土壤容重可以增加土壤水分的连续性,提高扩散和质流运输养分的数量。例如,有人发现,当容重为 $1.1 \sim 1.3 \text{ g cm}^{-3}$ 之间时,随着土壤紧实度的增大,扩散速率增加。这是由于土壤气体孔隙数量的降低,土壤水分连续性增加的结果。但是,当容重超过 1.3 时,土壤颗粒压得互相靠在一起,养分迁移的路径更加弯曲,扩散和质流的距离增加,养分迁移的数量反而下降。土壤质地和土壤紧实度通过影响土壤水分的能态和移动性,间接地影响养分的迁移速率;同时也直接影响养分与固相物质之间的反应及养分的移动性。

1.5.4 温度 扩散和质流的速率还受土壤温度的影响,根据 Stokes—Einstein 公式,养分离子在水中的扩散系数与温度的关系如下:

$$D_e = \frac{K_B T}{6\pi r_i \eta} \quad (1-14)$$

式中 K_B 、 T 、 r_i 与 η 分别是 Boltzman 常数、绝对温度、离子半径和水分粘滞度。温度除了直接影响扩散系数之外,还影响水分粘滞度。例如,在 15°C 时, η 是 1.139 , 25°C 时 η 的值是 0.89 ; 当温度由 25°C 降至 15°C 时, D_e 是 25°C 时的 0.78 倍。此外,温度的变化还影响 dC_i/dC_e 值(表 1.3)。