

TURANGFEILIAOXUE

土壤肥料学

下 册

刘念祖 陆景陵 编

中央广播电视大学出版社

土 壤 肥 料 学

下 册

刘念祖 陆景陵 编

中央广播电视大学出版社

目 录

第六章 植物营养及植物对养分的吸收	1
第一节 植物生活及营养条件	1
一、植物营养的重要性.....	1
二、植物体内养分的组成.....	1
三、必需营养元素的一般功能.....	3
四、各种必需营养元素之间的相互关系.....	4
第二节 植物对养分的吸收	5
一、根系对养分的吸收.....	5
二、土壤养分的有效性.....	7
三、养分进入根内的途径和机理.....	8
四、植物的根外营养.....	10
五、环境条件对根系吸收养分的影响.....	12
六、矿质养分在植物体内的运输.....	13
第三节 作物营养特性与肥料施用	14
一、作物的营养期.....	14
二、作物吸收养分的关键时期.....	16
第七章 作物的氮素营养和氮肥的合理施用	18
第一节 作物的氮素营养	18
一、作物体内氮素的内容和分布.....	18
二、氮素的营养功能.....	18
三、作物对氮素的吸收和同化.....	19
四、作物对缺氮和氮素过多的反应.....	21
第二节 土壤中氮素的循环	22
一、土壤中氮素的形态.....	22
二、土壤中氮素的转化.....	22
三、反硝化作用.....	25
四、土壤中的生物固氮作用.....	26
第三节 各类氮肥的性质和施用	27
一、氮肥的特点及目前生产、施用的概况.....	27
二、氮肥制造的方法.....	27
三、氮肥的性质和施用.....	28
第四节 氮肥的合理施用	41
一、氮肥利用率.....	41
二、农田氮肥损失的途径和提高利用率的措施.....	42
三、氮肥的施用技术.....	43
第八章 作物的磷营养和磷肥的有效施用	45
第一节 作物的磷营养	45
一、作物体内磷的内容和分布.....	45

二、磷的营养功能	46
三、作物对磷的吸收和同化	48
四、作物对缺磷和供磷过多的反应	48
第二节 土壤中磷的循环	49
一、土壤中磷的形态和含量	49
二、土壤中磷的转化	51
第三节 各类磷肥的性质和施用	53
一、磷肥的资源 and 制造方法	53
二、磷肥品种的分类	54
三、各种磷肥的性质	55
第四节 磷肥的有效施用	62
一、土壤条件与磷肥施用	62
二、作物特性及轮作换茬与磷肥施用	63
三、磷肥品种的选择	64
四、氮、磷肥料的配合施用	64
五、合理施用磷肥的两个问题	64
第九章 作物的钾营养和钾肥的合理施用	66
第一节 作物的钾营养	66
一、作物体内钾的特点	66
二、钾的营养功能	67
三、作物缺钾的一般症状	71
第二节 土壤中的钾	72
一、土壤中钾的含量	72
二、土壤中钾的形态和转化	72
三、土壤中钾的有效性	73
第三节 钾肥的性质和施用	73
一、我国的钾矿资源和钾肥生产概况	73
二、钾肥的性质和施用	74
三、提高钾肥肥效的因素	76
四、合理施用钾肥的原则	77
五、解决钾肥供应不足的途径	78
第十章 作物的钙、镁、硫营养和石灰、石膏的施用	80
第一节 作物的钙、镁、硫的营养功能	80
一、钙的营养功能	80
二、镁的营养功能	81
三、硫的营养功能	82
第二节 土壤中的钙、镁、硫	83
一、土壤中钙的含量、形态和转化	83
二、土壤中镁的含量、形态和转化	83
三、土壤中硫的含量、形态和转化	84
第三节 钙、镁、硫肥的施用	84
一、石灰肥料的种类、性质和施用	85

二、镁肥的种类、性质和施用	87
三、硫肥的种类、性质和施用	88
第十一章 微量元素及微肥施用技术	90
第一节 各种微量元素的主要营养功能	90
一、铁的营养功能	90
二、硼的营养功能	91
三、锰的营养功能	91
四、铜的营养功能	92
五、锌的营养功能	93
六、钼的营养功能	94
七、氯的营养功能	95
第二节 土壤中的微量元素	96
一、土壤中的铁	97
二、土壤中的硼	97
三、土壤中的锰	99
四、土壤中的铜	101
五、土壤中的锌	102
六、土壤中的钼	103
七、土壤中的氯	103
第三节 微量元素肥料及其施用	103
一、微量元素肥料的种类和性质	103
二、微量元素肥料的一般施用技术	104
三、提高微量元素肥料肥效的因素	106
第十二章 复合肥料的生产和施用	108
第一节 复合肥料及其类型	108
一、复合肥料的概念	108
二、复合肥料的类型	108
第二节 发展复合肥料的条件	109
一、农业生产的发展对化肥品种提出了新的要求	109
二、化肥工业发展水平的提高使生产高浓度复合肥料有了可能	109
三、农化服务体系不断完善, 为发展多品种、多规格的复合肥料创造了条件	110
第三节 复合肥料的优缺点	110
一、复合肥料的优点	110
二、复合肥料的缺点	111
第四节 我国主要的复合肥料品种及其特性	111
第五节 复合肥料施用技术及应注意的问题	115
一、选择适宜的复合肥料品种	115
二、复合肥料与单质肥料应配合施用	116
三、针对复合肥料品种的特点, 采取相应的施肥方法	116
第十三章 有机肥料	117
第一节 概述	117

一、有机肥料的分类	117
二、有机肥料在农业生产中的作用	118
三、有机肥料与化学肥料特点的比较	119
第二节 有机肥料的腐熟和管理	120
一、腐熟的目 的	120
二、腐熟过程中养分的变化	120
三、有机肥料腐熟的调控	123
第三节 粪尿肥	124
一、人粪尿	124
二、家畜粪尿与厩肥	126
第四节 堆肥和沤肥	129
一、堆肥	129
二、秸秆直接还田	131
三、沤肥	132
四、沼气池肥	133
第五节 绿肥	133
一、种植绿肥的意义	133
二、绿肥的分类及种植方式	134
三、主要绿肥作物的生长习性	135
四、绿肥翻压技术要点	135
第十四章 配方施肥技术	139
第一节 概 述	139
一、配方施肥的定义和内容	139
二、推广配方施肥技术的主要依据	139
第二节 配方施肥的理论基础	141
一、养分归还(补偿)学说	141
二、最小养分律	142
三、报酬递减律与米采利希学说	144
四、因子综合作用律	146
第三节 配方施肥中几种确定施肥量的方法	149
一、养分丰缺指标法	149
二、养分平衡法	150
三、肥料效应函数法	153

实 验

实验一 作物营养缺素症的观察	157
实验二 土壤对不同形态氮肥的吸持能力	160
实验三 土壤对水溶性磷酸盐的固定	161
实验四 化学肥料的定性鉴定	162
实验五 碳酸氢铵含氮量的测定(中和法)	163
实验六 过磷酸钙中游离酸的测定(水浸提—中和法)	165

实验七	过磷酸钙中有效磷的测定	166
实验八	灰肥中钾的测定(火焰光度法)	167
实验九	植物样品的采集和制备	168
实验十	植物干物质和水分的测定	172
实验十一	植物样品粗灰分的测定	174
实验十二	植物样品中氮、磷、钾养分的联合测定	175
实验十三	土壤全氮含量的测定	180
实验十四	土壤速效磷含量的测定	183
实验十五	土壤交换性钾含量的测定	185

第六章 植物营养及植物对养分的吸收

第一节 植物生活及营养条件

一、植物营养的重要性

一粒种子落入土中，在适宜的条件下，能生根、发芽，逐渐长成一株植物，在经历几个生育阶段以后，它又会结出丰硕的子实。实践证明，植物生长发育脱离不了环境，而营养条件是植物正常生长发育所必不可少的。每一棵活的植物都具有从周围环境中吸取物质，并利用它建造自身体躯或利用它取得自身所需的能源。人们经常把植物从外界环境中吸取所需的物质，以维持其生长和生命活动的作用称为营养；植物体所需要的元素称为营养元素。植物就是不断地从外界环境中吸取它所需要的各种营养元素，进行同化作用，以维持其生命活动。植物所构成的体物质（包括各器官）正是农业生产的基础。

提供充足的养分，以满足植物对营养的要求是农业生产获得丰收的保证，养分供应不足，往往是产量不高的主要因素之一。实践证明，施用肥料能明显地提高产量和改善产品品质。施肥是增产的重要措施已普遍为人们所接受。我国粮食增产，依靠走扩大耕地面积的道路的可能性已不大，必然要以提高单位面积产量为主攻方向，然而提高单位面积产量则依赖于各项农业措施。增施肥料是必不可少的农业措施之一。世界各国的研究和统计资料表明，在所增加的粮食产量中，大体上50%应归功于增施肥料，尤其是增施化学肥料。就另一个增产因素——改良品种来讲，它和增施肥料也是分不开的。优良品种如果没有营养条件的配合，是很难发挥其增产潜力的。提高耕地的复种指数也需要有更多的肥料投入才行。由此可见，施用肥料以调节植物营养状况是农业生产中一项极其重要的措施。

二、植物体内养分的组成

（一）必需营养元素和非必需营养元素

要了解植物正常生长发育需要什么养分，首先要知道植物体的养分组成。如果把新鲜植物烘烤，即可获得干物质，将干物质燃烧使之灰化，就可以得到植物灰分。用化学方法进行灰分分析，就可以了解到植物灰分中至少有几十种化学元素。但是，它们并非全部都是植物所必需的营养元素，因为人们早就认识到，植物体内某种营养的有无以及含量的多少，并不能作为营养元素是否必需的标准。植物不仅能吸收它所必需的营养元素，同时也会吸收一些它并不必需的元素，甚至可能是有毒害作用的元素。因此，为了确定某种营养元素是否必需，就只有采取一些特殊的研究方法，即采用在有意识的不供给某一元素的条件下，进行溶液培养或砂培（因为土壤中含有各种养分，无法有意识地排除某一元素的存在），以观察植物的反应。根据植物的反应来确定其是否必需。

确定某一营养元素是否必需，科学家阿隆（Arnon）和斯托德（Stout）于1939年提出了三条标准。这三条标准是：

第一，这些化学元素对所有植物的生长发育过程是不可缺少的。缺少某一元素，植物就

不能完成其生活周期（即由种子萌发到开花、结实，又形成种子的过程）。

第二，缺乏这种元素时，植物会表现出特有的症状，而且其它任何一种化学元素均不能代替其作用，只有施加了这种元素后，症状才会减轻或消失。

第三，这种元素必须是对植物起直接的营养作用，而不是改善环境的间接作用。

符合这三条标准的才能被确定为是植物必需的营养元素，否则只能是非必需营养元素。

(二)必需营养元素的种类和来源

尽管植物体内的化学元素种类很多，但根据三条标准的要求，目前一般公认高等植物所必需的营养元素共有16种。它们是碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、硼、锰、铜、锌、钼和氯。植物体内所含的其它化学元素，一般认为是植物非必需的营养元素。因为，它们不是所有植物普遍需要的，有时只是在特定条件下对植物生长有益，有时表现为有刺激生长的作用，或是为某些植物类群所必需。如藜科植物需要钠、豆科植物需要钴、蕨类植物需要铝，硅藻需要硅等。所以，目前称这些元素为有益元素。此外，还应该指出，随着科学的发展及在分析技术和化学药品的纯化技术方面的进一步提高，可以预计今后一定将会有更多的化学元素被确定为高等植物必需的营养元素。

各必需营养元素在植物体内的含量相差很大（表6-1），一般可根据植物体内含量的多少划分为大量营养元素和微量营养元素。大量营养元素含量一般占干物质重量的0.1%以上，它们是碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁、硫九种；微量元素的含量一般在0.1%以下，有的只含0.1ppm，它们是铁、硼、锰、铜、锌、钼和氯。

以上这些元素在植物体内的含量常受植物种类、植物年龄以及环境中其它矿质元素含量等因素的影响。尤其是环境条件的影响，可使体内各营养元素的含量发生明显的变化。在植物组织中常出现某些微量元素含量明显超过其生理需要量，例如铁、锰的含量能接近植株中硫或镁的含量，这主要是环境条件影响的结果。植物各器官中营养元素的含量，并不能完全

表6-1 正常生长的植株其干物质中营养元素的平均含量

元素及符号	微摩尔/克 (干重) ($\mu\text{mol/gDW}$)	毫克 / 千克 (PPm)	%
钼(Mo)	0.001	0.1	
铜(Cu)	0.1	6	
锌(Zn)	0.30	20	
锰(Mn)	1.0	50	
铁(Fe)	2.0	100	
硼(B)	2.0	20	
氯(Cl)	3.0	100	
硫(S)	30		0.1
磷(P)	60		0.2
镁(Mg)	80		0.2
钙(Ca)	125		0.5
钾(K)	250		1.0
氮(N)	1,000		1.5
氧(O)	30,000		45
碳(C)	40,000		45
氢(H)	60,000		6

反映植物真正对这些养分的需要量，尤其是一些非必需营养元素是被动吸收而进入植物体的。

在这些必需营养元素中，碳和氧来自空气中的二氧化碳，氢来自水和空气，而其它的必需营养元素几乎全部来自土壤。只有豆科植物有固定空气中氮气的能力，它可以从空气中获得一部分氮素；植物的叶片也能吸收一部分气态养分，如二氧化硫就是一个例子。由此可见，土壤不仅是植物立足的场所，而且也是植物所需矿质养分的供给者（图6-1）。

实践证明，作物产量水平常常受土壤肥力状况的影响，尤其是土壤中能直接被植物吸收利用的有效态养分的含量对产量的影响更为明显。

尽管作物90%以上的干物质是由碳、氢、氧三个元素组成的，土壤所供给的养分在数量上仅占5%左右，但影响作物产量的往往是由土壤所供给的那一部分养分，特别是氮、磷、钾三种营养元素，作物对它们的需要量大，而大多数土壤中有效态氮、磷、钾养分数量却不很丰富，在供需之间有明显的差距。

农业生产实践证明，为了提高产量，常需要施用肥料以调节土壤和植物间的供需关系，施用氮、磷、钾肥料后有良好的增产效果。所以，人们称氮、磷、钾为肥料三要素，并十分重视研究三要素的增产原因。

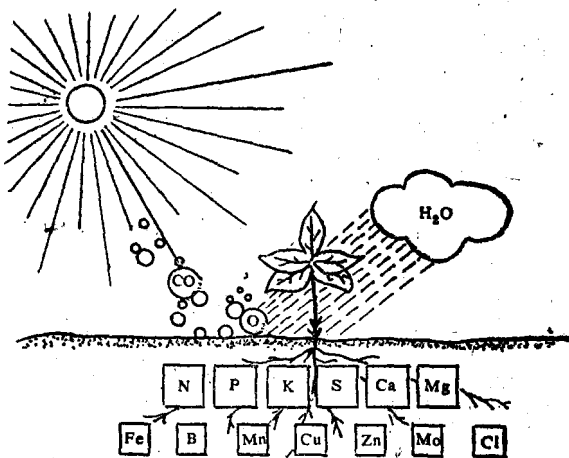


图6-1. 植物所需养分来源的示意图

三、必需营养元素的一般功能

从植物生理的角度，可以把16种必需营养元素按其生物化学作用和生理功能进行分类。这样能反映出这些营养元素在各方面所担负的作用。据有关资料介绍，16种营养元素可划分为作用相似、性质相近的几组。

（一）碳、氢、氧

碳、氢、氧是植物有机体的主要组成成分。它们可形成多种多样的碳水化合物，如纤维素、半纤维素和果胶质等是细胞壁的组成物质，而细胞壁也是支撑植物体的骨架；碳、氢、氧还可以构成植物体内的活性物质，如某些维生素和植物激素，它们能直接参与代谢活动；同时它们也是糖、脂肪、酚类化合物的构成者，其中以糖最为重要。糖类是合成植物体内许多重要有机化合物（如蛋白质、核酸等）的基本原料。碳水化合物在降解过程中还能提供能量，这是不可忽视的重要功能之一。

（二）氮、磷、硫

含有氮、磷、硫的蛋白质和核酸是与植物体生命有关的物质。氮、磷、硫是维持生命所必需的元素，尤其是氮素，常被称为生命元素。磷对植物生命的重要性不亚于氮。硫也是生命活动所必需的元素，没有硫就没有含硫的氨基酸，当然也就不能形成蛋白质。可见，氮、磷、硫是与生命活动紧密联系的三个必需的营养元素。

(三)钾、钙、镁

钾、钙、镁是金属元素，以离子的形态被植物根系吸收利用，它们常作为酶的活化剂，使酶蛋白处于最佳状态。它们还具有许多特殊的作用，如维持细胞的渗透势和保持离子间的生理平衡等。

(四)微量元素

许多微量元素是以螯合物形式结合于酶的辅基中，通过这些元素化合价的变化而传递电子，并担负着植物体内的氧化还原反应。某些微量元素能与专性蛋白结合，从而明显提高其催化作用的效率；有的微量元素在基质与酶之间起桥梁作用，从而有利于酶促作用的进行。

总之，各种营养元素都有其各自的特殊作用，同时也相互配合，综合作用于植物生长发育以及代谢过程之中。

四、各种必需营养元素之间的相互关系

(一)同等重要和不可代替律

从上述内容我们已经知道，植物所必需的营养元素共有16种，它们在植物体内的含量相差悬殊；就它们的营养功能来说，每一个必需营养元素均具有各自的特殊作用，而且往往需要相互配合，发挥综合作用。

大量试验证实，各种必需营养元素对于植物所起的作用是重要的，其重要性没有区别，也就是说同等重要的，它们各自所起的作用，不能被其它元素所代替。所谓同等重要和不可代替可以从两方面来理解：第一，各种必需营养元素对植物的重要程度，不因植物体内含量的多少而有差别。换句话说，在植物需要量上，虽有多有少，但缺少任何一种必需营养元素都是不行的。缺少大量营养元素植物就不能正常生长，缺少微量营养元素植物也不能正常生长。即使是微量元素，如果严重缺乏也会导致植物死亡，造成绝收。这说明，尽管植物对大量营养元素和微量营养元素的需要量不同，有时可以相差千倍、万倍，但它们在植物生命活动中的重要性是相同的。例如，在我国南方某些地区，因土壤缺硼，油菜会出现只开花而很少结籽或不结籽的现象。这也称为油菜“花而不实”。尽管植物对硼的需要量只占干物质的十万分之一（比起氮素大约小1000倍），但它对植物的生长发育的影响却很大。第二，各种必需营养元素都有自身某些独特的作用，因而某一营养元素的作用不能为其它营养元素所代替。例如，缺少氮素就必须施氮肥来缓解植物受害的状况，若施用含其它养分的肥料，则无法消除受害状况，即使施得再多也无济于事。在缺磷的土壤上，施大量氮肥是不会有明显效果的。例如，在一些新开垦的生荒地或因平整土地使底土外露的地块，施用较多的氮肥也难于提高产量，这是因为上述土壤主要是缺磷，补充的氮素代替不了磷的作用。在同等重要和不可代替问题上，还应该进一步指出，某些必需营养元素之间，如果是化学性质相近，或对植物具有相似的作用，或能够影响相同的代谢过程的条件下，似乎有相互代替的趋势（如施钠可部分地满足糖用甜菜对钾的要求，施硼能部分的消除亚麻缺铁症等）。这些相互代替的趋势反映了一些营养元素在植物营养作用中的复杂关系。但是，这种代替作用仅仅是部分的、暂时的，是在某些次要作用上的代替，而在各种必需营养元素所具有的某些特殊生理功能方面是不能代替的。事实上，缺少任何一种必需营养元素，必然使植株不能正常生长发育，甚至死亡。

(二)养分平衡

作物在整个生育期中需要吸收各种养分，而且所需各种养分的数量也不同这是众所周知

的。作物对养分需要量的多少是由其生物学特性所决定的。而土壤中各种有效养分的数量，不一定就符合作物的要求，往往需要通过施肥来调节，使之大体上符合作物的要求。这也可以说，施肥可使土壤中的养分得到平衡。土壤养分平衡是作物正常生长发育以及获得丰产的重要条件之一。

随着农业生产的迅速发展，作物单产逐年提高，土壤中养分被大量带走。当各种养分供给不足时，作物的生长和产量会受到明显的影响。因此，人们常施用大量化肥，以维持和提高产量。但是，如果施肥不当（数量过多，尤其是偏施某一种养分）则将破坏养分的平衡，从而造成不良的后果。人为施肥不当造成的养分比例不平衡，常称为养分比例失调。养分比例失调往往会影晌作物体内的代谢，而导致产量不高和产品的品质下降。

多年来，我国农村就有偏施氮肥的习惯，而偏施氮肥对农作物生长的不良影响是明显的。氮肥施用过多，在作物生长前期，表现为营养体生长过于旺盛，如冬小麦表现为发苗快，分蘖多，叶片肥大，茎秆软弱，而冬前麦苗生长过旺，越冬时易受冻害；分蘖过多易形成无效分蘖，从而消耗大量养分，叶片肥大，茎软，植株则易倒伏。在生长后期，则表现为贪青晚熟，茎叶中的养分不能及时地输送到籽粒中去，造成千粒重明显降低，产量不高。棉田施氮肥过多，在生长前期常造成营养体徒长，体内碳氮营养比例失调而大量落蕾、落花；在生长后期，如遇气温偏高，则易引起“二次生长”，徒然消耗养分，而影响棉铃的增长；由于生育期延迟，则吐絮晚，使霜后花比重加大，致使纤维品质下降。如在供氮水平很高的地块上种植豆科作物，常表现为根瘤数量减少，根瘤菌的固氮能力下降。许多含糖分较多的瓜果，在过量施用氮肥的情况下，虽果实硕大、喜人，但常因体内的糖分要用于形成氨基酸和蛋白质，而导致果实中糖分减少和酸度不够而使品质明显变劣。

如果在施用氮肥的基础上，增施磷肥和钾肥，注意调节养分平衡，防止氮素养分过剩，就可以改变上述情况，而提高产量，改善品质。在施肥实践中，注意养分的平衡供应，不仅可以充分发挥各种养分的增产作用，而且可以在不增加施肥量的条件下发挥养分之间的相互作用而提高肥料的经济效益。目前在一些国家，已经注意运用养分之间的相互作用，并把它作为发展农业生产的一项有效措施。在我国也应该充分重视养分平衡和养分之间的相互作用问题，不断试验，不断总结，把科学施肥的水平提高一步。

第二节 植物对养分的吸收

一、根系对养分的吸收

根系是植物吸收养分的主要器官，然而，植物能否从土壤溶液中获得足够的养分，主要与根系的大小、吸收养分的能力以及土壤中养分状况有关。

如果把陆生植物的根系无损地从土壤中挖出来，就能看到植物根系生长的某些特点。根有向下延伸生长的习性；植物根系有主根、侧根和不定根三种，往往由主根和各级侧根构成庞大的根系。大量研究工作证明，根毛对吸收养分有极其重要的作用，它是由一部分表皮细胞向外突出而形成的。根毛在湿润的条件下往往生长得很繁茂，数量很多，成熟根毛的长度约为0.5~10毫米。根毛的数量和长度常随植物种类不同而有很大的差异，如玉米在每一平方毫米的表皮上约有420条根毛，而豌豆为230条。由于根毛的存在，使根表细胞的外表面积提高到原来的2~10倍，这能明显地增加根系的吸收面积。不仅如此，根毛的存在也起到缩短

土壤中养分迁移到根表的距离。总之，根毛在促进养分吸收方面的作用是十分明显的。

植物从土壤中获得养分有三种方式，即截获、质流和扩散（如图6-2所示）。

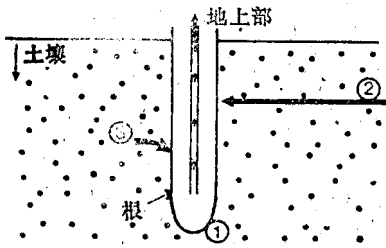


图6-2 根系吸收养分不同方式的示意图

- 有效养分在生长、伸长过程中直接从所接触的土壤中吸收，这种方式称为截获。由于根系不断地生长和伸长，故植物可以陆续获得一些养分，但是根系能直接接触的土壤占整个土体的比例却是很小的，同时根系也不可能分布到整个土体中去，所以根系截获的养分不多。据了解，植物
- ① 截获
 - ② 质流
 - ③ 扩散

根系通过截获所获得的养分通常只占植物吸收养分总量的百分之几，大部分都养分都不超过百分之十。由此可见，植物以截获所得到的养分，并不能满足它的全部需要。植物必须通过其它的方式来获得养分，这就是质流作用和扩散作用。

质流作用是由植物蒸腾作用引起的。植物的蒸腾作用需要消耗根际土壤中大量的水分，植物根系为了维持正常的蒸腾作用，必需不断地吸收周围土壤中的水分，这样在根际土壤和土体之间就会出现水势差。致使土体中大量水分流向根际土壤供植物吸收利用，而土壤水分中含有的各种水溶性矿质养分也随着土壤水分的流动而到达根表面，从而使植物根系能获得它所需要的养分，这就是质流作用。质流作用的推动力是土壤水势差，它使各种水溶性养分源源不断地流向根表。许多直接的观察证明，当植物蒸腾作用旺盛时，土体中某些离子态养分向根表面的迁移速率明显加快，根际土壤中就会出现养分的累积；相反，在蒸腾作用受到抑制时，这些离子态养分不仅不会继续累积，有时还可能从根表向土体反方向扩散，使根际土壤中养分出现亏缺现象。质流作用除直接受蒸腾作用影响外，还与土壤溶液中养分的浓度有关。

扩散作用是在根际土壤和土体之间出现养分浓度差时所引起的养分迁移现象。由于植物不断地从土壤中吸取养分，使得根际土壤溶液中的养分浓度相对降低，这样在根际土壤和土体之间产生养分浓度差。在养分浓度差的推动下，养分由浓度高的地方向浓度低的地方迁移，这就是扩散作用。扩散作用有时也受蒸腾作用的影响。当夜晚蒸腾量较小或白天土壤含水量不足时，植物蒸腾作用就会减弱或几乎停止，此时由于质流作用输送的养分不能满足植物的需要，在根表即出现养分的亏缺带，这就促进了扩散作用的进行。当蒸腾作用旺盛时，输送到根表的养分就比较多，如养分数量多于植物吸收的数量时，则会产生反扩散。扩散作用在根很大程度上与植物根系吸收养分的能力有关。当然，它也受土壤性质的影响，如土壤的缓冲性能、土壤含水量等都会影响养分在土壤中的扩散速率。

质流作用和扩散作用是植物获得养分的两种主要方式。一般认为，质流作用能在较长距离的范围内输送养分，可提供较多的氮素，尤其是 NO_3^- ，而提供磷、钾养分较少。扩散作用只能在根表附近短距离内进行，由于养分的性质和特点不同， H_2PO_4^- 的扩散明显低于 K^+ 。

就根系吸收养分的三种方式来讲，往往可以根据不同养分在土壤中的特性，表现为以某一种方式为主。但是，通常是三种方式同时存在，共同发挥作用，它们之间很难被严格区分。一般来讲，当土壤溶液中离子浓度高、植物蒸腾强度较大时，养分供应以质流作用为主，反之，土壤溶液中离子浓度低、而蒸腾强度不大时，扩散作用供应养分就显得更为重要。有的

科学家认为，养分到达根系，一开始是截获，紧接着是质流，当质流作用供应的养分不能满足植物需要时，就由扩散方式来输送养分。这也可以说，三种方式往往是相互补充，以满足植物对养分的要求。

二、土壤养分的有效性

我们必须明确，土壤中养分总含量的高低，并不能反映土壤能否满足植物对养分的要求，因为土壤中有许多养分都不是当季作物所能立即吸收利用的。科学家为了区分土壤养分被利用的程度，提出了土壤有效养分的概念。

土壤有效养分至少应该符合两个条件：第一，从养分形态上看，有效养分应该是植物可立即吸收利用的；第二，这些养分存在于植物根系能接触到的地方。只有具备这两个条件的养分才能真正被植物吸收利用，也才能称为有效养分。

本世纪初，有些科学家根据植物根系能分泌酸，并有溶解土壤中养分作用的事实，设法探索植物吸收养分的问题。从模拟根系的状况出发，提出利用稀酸或有机酸浸提土壤，用化学分析的方法以求得土壤中有效养分的含量。最早是采用1%柠檬酸作为有效养分的浸提剂，所测定出的数值就是通常所说的化学有效养分。但是，化学浸提方法所获得的数值，往往与植物实际生长状况的相关关系并不十分吻合。这是因为化学有效养分的数值不能全部反映出植物对养分吸收的实际情况，它只能说明土体中有多少养分是植物可以吸收利用的。但不能说明真正能被植物吸收的养分究竟是多少。因为植物根系并不可能全部接触到能被浸提剂浸提出的土体中的养分。经过大量研究工作以后，美国土壤学家 A·Barber 认为，根际范围内的养分是实际有效养分，而根际以外土体中的养分只能属于潜在有效养分，虽然从养分形态上看，它们是有用的，但这部分养分远离根系，在未迁移到根表面以前，并不可能被植物利用。用化学浸提方法是无法区分“实际”和“潜在”有效养分的。由此可见，养分是否有效，除形态上应是速效性的外，同时还需要考虑到养分所处的位置，这也就是养分空间有效性的问题。

从根系和养分所处的位置来看，远离根表面的养分必须通过质流或扩散作用，达到根系吸收养分的范围之内，才能属于实际有效养分。这不仅是指耕层土壤。事实上，从垂直剖面来看，底层土中的有效养分对植物生长发育和产量也是有贡献的。因为，植物不仅从表层土中吸收养分，植株长大以后也要从底层土中吸收养分。表6-2的资料就能说明，在某些时候底层土所贡献的养分也是不可忽视的。植物可从不同深度的土层中吸收一定数量的磷，而且各

表6-2 春小麦不同生育期的吸磷量与各层次土壤磷释放量的关系

有效磷含量 (乳酸法) (毫克P/100克土)	土壤深度 (cm)	吸磷总量 (千克/公顷·天)		
		孕穗期	开花期	灌浆期
		0.345	0.265	0.145
		磷释放量 (%)		
11.5	0~30	83.3	58.8	67.4
4.5	31~50	8.1	17.8	15.5
2.5	51~75	5.9	16.3	12.0
2.0	76~90	2.7	7.1	5.1

生育期从底层土中吸收的数量占总吸收量的比例是不相同的，生育后期从底层土中吸收的量有明显增加。因此，无论是表层土壤横向距离范围内的养分，还是底土层中不同深度的养分，它们能否真正成为有效养分都存在着空间上的概念。近几十年来的研究，使人们逐步认识到土壤和植物是一个动态的、不可分割的系统。

提高养分的有效性，一方面应该从提高养分移动性（如通过增施肥料提高土壤中养分浓度）减少某些养分被土壤吸附固定以及适当增加土壤含水量等方面来考虑，以促进养分能更多、更快地向根表迁移；另一方面，还需要促进根系生长，增加根系长度、密度和提高其吸收能力，使之能在更广、更深的范围内更迅速地吸收养分。

三、养分进入根内的途径和机理

（一）养分进入根组织的途径

养分通过质流和扩散作用到达根表，这只是为根系吸收养分准备了条件，而养分进入根组织，尤其是进入根细胞内部则是一个十分复杂的过程。

植物根系对外界环境中的各种养分有明显的选择吸收能力，这是植物自身的生物学特性所决定的。不仅如此，根系还具有逆外界浓度梯度累积养分的能力，即植物细胞内的离子浓度有时比外界介质中的浓度可高几倍，甚至几十倍。例如，大麦的离体根在24℃条件下，在营养溶液中经过10小时，根细胞内 K^+ 的浓度比外部营养溶液要高12.3倍， NO_3^- 要高5.2倍。

这种逆浓度吸收的现象是活的生物体所特有的。

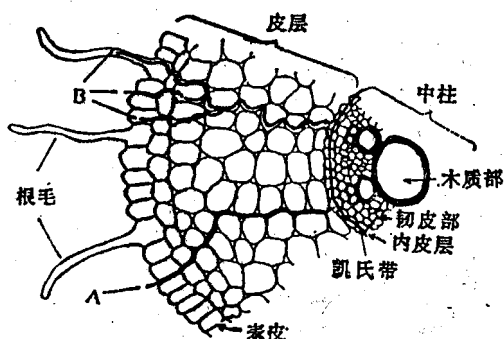


图6-3 根系吸收养分两条通道的示意图
A为质外体通道，B为共质体通道

植物根系吸收养分进入根内有质外体通道和共质体通道(图6-3)两条途径。1932年德国生理学家 E. Münch 创立了根部质外体和共质体的概念。他提出互相联系在一起的细胞壁和细胞间隙（还包括中柱内的部分木质部），可以被看作是一个统一的整体，称之为质外体。质外体与外部介质相通。根组织内皮层以外所有细胞壁及细胞间隙的空间是外部介质中的水分和养分能够自由进出的地方，所以也称为自由空间。因此，质外体所

指的空间大体上相当于自由空间，但这不是很确切的概念。

由于质外体区域内水分和养分可以自由进出，所以外部介质中的离子态养分在细胞间隙中可通过质外体通道转运到内皮层，但因遇到凯氏带而受阻，不能直接进入中柱，也不能进入细胞质膜以内的原生质中。这一段转运的过程也称为养分的被动吸收。遇凯氏带而受阻的养分，一般要根据植物对各种养分需求的状况，有选择地让一部分受阻的养分改道，穿过细胞质膜进入共质体通道。穿过细胞质膜，进入细胞原生质的过程称为养分的主动吸收。共质体由细胞的原生质(不包括液泡)组成，细胞原生质之间靠穿过细胞壁的胞间连丝使细胞与细胞连成一个整体。这些相互联系起来的原生质整体就称为共质体。共质体通道是靠胞间连丝把养分从一个细胞的原生质中转运到另一个细胞的原生质中，借助细胞原生质的环流，带动养分的运输，最后向中柱转运。在共质体运输中，胞间连丝起沟通相邻细胞间养分运输的作

用。

离子态养分在质外体和共质体中运输各有不同的特点，细胞壁上具有很多比离子大得多的充水孔隙，大多数离子可以顺利通过细胞壁。这种被动吸收具有的特点是，养分转运不需要消耗能量，吸收离子时没有选择性，受代谢作用影响小，而共质体运输有原生质膜屏障，对离子进入时有很强的选择性，并且要耗费能量，受代谢作用影响大。养分一旦进入原生质膜后，就不能再回到自由空间了。

(二) 养分进入细胞的机理

养分如何进入细胞，虽有多种解释和假说，但目前还没有十分肯定而完整的理论，普遍被人们接受的是离子泵解说和载体学说。

1. 离子泵解说 泵是细胞质膜上存在的一种特殊复合体，一般认为就是质膜上的蛋白质复合体，即ATP酶。ATP酶在少量钾离子(K^+)的作用下得到活化，促使ATP分解，放出能量，并驱使氢离子(H^+)泵出膜外，而构成质膜内外pH梯度。这一变化可使质膜发生变构，阳离子便得以进入细胞质内(图6-4)，同时 H^+ 还可以与阴离子协同运输进入细胞质内，由于阳离子进入细胞质，pH梯度便消失。为了维持继续运送阳离子进入细胞质中，就需要ATP再一次分解，形成新的pH梯度。如此反复，阳离子以及一些阴离子就可不断地进入细胞质内。

2. 载体学说 载体学说认为离子态养分不易单独通过细胞质膜，而需要借助于载体携带离子通过质膜。质膜上有一些分子具有载运离子过膜的能力，这些分子被称为载体。一般认为载体是磷酸化合物。载体具有明显地选择性和专一性，与载体有亲合性的离子才能被载体携带进入膜内。离子与活化的载体结合后可在质膜中扩散，由膜的外侧转运到膜的内侧，进入膜内侧后载体便把离子解脱下来，进入细胞质内。当载体经ATP所供给的能量再次活化后，它就可继续进行载运工作(图6-5)。运载过程中所需的能量由线粒体提供。

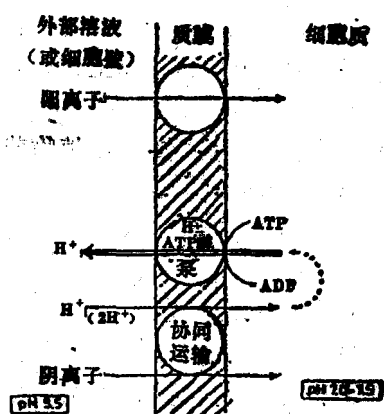


图6-4 H^+ 泵与阴、阳离子转运过膜关系的示意图

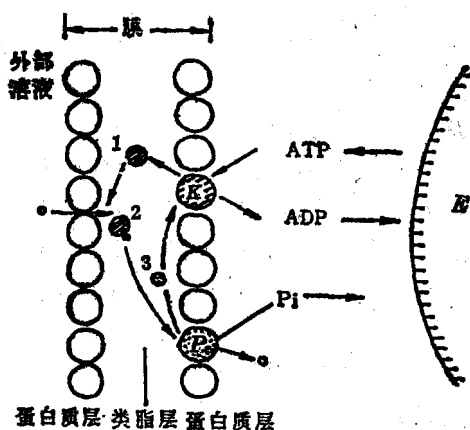


图6-5 离子-载体通过膜的运输图解

E: 能量来源 (叶绿体或线粒体) K: 磷酸激酶 P: 磷酸化酶 P_i : 无机磷酸 O_2 : 离子 1: 磷酸化载体 2: 载有离子的载体 3: 解除磷酸化的载体

离子通过质膜进入细胞之后，首先在细胞质中累积。但因细胞质的体积较小，贮存养分的能力有限，因而大部分离子又通过液泡膜进入液泡，在液泡中累积。当植物需要养料时，就可利用这一部分养分。细胞中累积的养分必需通过胞间连丝，经共质体通道，并借助细胞

原生质环流的作用，才能向根的中柱转运，最后进入木质部汁液中。

载体学说能够比较好的解释以下三个问题，第一，植物对离子的吸收具有选择性；第二，离子跨膜和在膜上转移的过程；第三，离子吸收与植物代谢作用的密切关系。

这些方面可以从植物吸收养分是主动的、消耗能量的过程，载体运载离子有专一性特点等角度来理解。因此，这一学说能够为大多数科学家们所接受。

四、植物的根外营养

(一) 根外营养的优点

植物不仅可以通过根系吸收养分，而且还可通过茎叶，尤其是叶片吸收养分。通过茎叶供给养分称为根外营养。尽管根外营养供给的养分数量有限，对植物需要量多的一些营养成分并不能够完全满足，但对果树补充微量元素养分还是一项有效的措施。植物根外营养有以下优点：

1. 直接供给养分，防止养分固定 根外追肥是采用喷施的方法，使肥料直接与植物体接触，因此植物可直接吸收养分，无需通过土壤。这既能使植物及时获得养分，又可避免有效养分的固定或转化。例如，在石灰性土壤上，施用磷、铁、锌等有效态养分后常因土壤 pH 的影响，而降低了有效性。若采用根外追肥方式，就可不受土壤条件的影响而获得良好的效果。

2. 叶片对养分的吸收和运转比根部快 吸收和运转快，能及时发挥肥效。用 ^{32}P 所做的试验证明，棉花涂抹 ^{32}P 同位素后，经 5 分钟，棉株各器官中均可发现有相当数量的 ^{32}P ，尤其在根、生长点和幼嫩的叶片中含量较多。如果采用向土壤施肥的方法，则经 15 个昼夜，才能获得接近涂抹处理 5 分钟时的效果。一般尿素施入土壤，需 4~5 天后才见效果，而根外喷施尿素只需 1~2 天就可显出效果。河南省同位素研究所的试验表明，在小麦孕穗期涂抹 ^{32}P ，1 小时后，就有相当数量的 ^{32}P 被吸收，并已运转到其它的部位，尤其是能迅速由旗叶运转到麦穗中。由此可见，采用根外追肥措施，对及时防治某种养分的缺乏症，解决因作物生育后期根系吸收养分能力减弱以及及时补救自然灾害所造成的损失等问题有重要作用。

3. 促进根系活力，弥补根系吸收养分不足的缺点 根外追肥和根部施肥在供给植物养分方面有相互补充的作用。在植物根系发育较差的情况下，根外追肥有利于加强植物体代谢，从而促进根系的活力，改善根系发育状况，尤其是在根系遭受损伤的情况下更是如此。由于根系活力的增强，又能促进植物的茎叶生长，增加叶面积，这也为根外追肥提供了良好条件。

4. 节省肥料，有较好的经济效益 据生产实践证明，根外喷施磷、钾及微量营养元素的数量，往往只需土壤施肥量的 10~20%，这可明显节省肥料用量，大大降低成本。但是，应该提出，肥料用量小，维持时间不如土壤施肥时间长，有时需根据具体情况适当增加喷肥次数。

(二) 养分进入叶片的机理

一般认为，叶片吸收的矿质养分是通过叶片角质层或气孔进入的。但有资料认为，角质层或气孔不是养分进入叶片的主要通道。因为，角质层无结构，不易透水，同时还有质膜起阻碍作用；叶片的气孔是很小的，水的表面张力很大，也阻碍着养分进入。晚近的研究表明，在叶片的表皮细胞外壁上有许多微细的结构，如在孔道细胞中以及叶毛基部和周围、叶脉的上下表皮细胞上都有微细结构。它是不含原生质的纤维细孔，能使细胞原生质与外界直接相