

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

# 土壤物理学

附实验指导

华 孟 王 坚 主编

土壤 植物营养专业用

北京农业大学出版社

主 编 华 孟  
副 主 编 王 坚  
编 者 (以姓氏笔划为序)  
王 坚 王砚田  
华 孟 秦耀东  
责任编辑 徐正一  
封面设计 郑 川  
版式设计 徐正一

## 前 言

土壤物理学虽属土壤科学的一个分支，但在水文、水利、植物栽培和管理（包括大田作物、苗圃、造林、草场等各方面）、气象、农业气象、自然地理、水土保持和环境保护等学科中都得到广泛应用。其重要原因之一是土壤的物理结构和水、溶质、空气、热量等在土壤中的转移以及与相邻自然体的交换，构成了上述物质与能量在自然循环中的一个重要环链。所以，当今的土壤物理学主要以研究土壤物理结构和物质与能量在土壤中的转移为中心内容。传统的土壤物理学中所包括的土壤力学性质和应用、土壤在不同含水量状况下所表现的各种物理性质和现象以及粘粒矿物的行为等都分别属于土力学、流变学、陶土学等学科的范畴，在本书中未作详述，“土壤水和植物生长的关系”本应作为本书的一个重要内容，但由于时间紧迫，许多材料还不够成熟，尚需斟酌，拟在今后专著介绍。

土壤固体的物理结构状态，简称为土壤基模，它的基本特征是一个表面积巨大的多孔体。物质和能量在这一多孔体中的运动原理和与外界交换的规律和过程构成了本书的中心内容，并以土壤水的转移和田间过程为重点，以适应我国北方和世界性水资源不足的严重现象。土壤在田间的分布是极不均一的，本书也初步介绍了土壤的空间变异性及其研究方法。

在实际工作中我们深感许多土壤物理现象缺乏形象说明，很难令初学者理解。同时，许多土壤物理参数在不同性状的土壤上差别很大，因此，很难相互引用，应当实际测定。此外还有不少测试手段尚在发展之中，需要校订和不断探索。于是我们根据编写教材方案，附上了在北京农业大学为大学生和研究生开设的实

验指导。其中不少是根据本实验室的经验和条件设置的。愿使用本教材的老师按各自的情况和需要选择，并热切盼望与同行们进行交流，以便改进和充实。

在主编全面策划的基础上，编著者各自分头执笔。各章的分工如下：

华 孟：前言，第一章；

王 坚：第三、四、五章；

秦耀东：第二、六、七章；

王砚田：实验指导。

分别撰写之后再由主编校订、讨论和修改，合成本书。务求系统，格调一致。所以本教材实际上是多年教学实践基础上的集体创作。

这本土壤物理学教材在我国尚属首创，不妥和错误之处必多，希望得到各界的批评指正。

本教材初稿完成后，西北农业大学张君常教授详加审阅，赐予中肯建议。对此，我们深为感激。

**华 孟**

1992年10月

# 目 录

第一章 土壤基模 .....	(1)
第一节 土粒的粒径分布 .....	(2)
一、土粒的粒级 .....	(2)
二、土粒的粒径分布和分析 .....	(5)
三、土壤质地 .....	(9)
第二节 土壤团聚 .....	(13)
一、粘团的形成 .....	(13)
二、粘团的再团聚 .....	(16)
三、土壤团粒的稳定性和粒径分布 .....	(18)
四、土壤结构 .....	(22)
第三节 土壤的比表面积和孔隙状况 .....	(26)
一、土壤的比表面积 .....	(27)
二、土壤的孔隙状况 .....	(30)
第四节 土壤的胀缩 .....	(34)
第五节 土壤基模中三相物质比 .....	(37)
一、比重 .....	(38)
二、容重 .....	(38)
三、总容重 .....	(38)
四、干比重 .....	(39)
五、孔度 .....	(39)
六、空隙比 .....	(39)
七、土壤湿度 .....	(39)
八、充气孔度 .....	(42)
第二章 土壤水的能量和运动 .....	(44)
第一节 土壤水的测定 .....	(44)
一、烘干法 .....	(44)

二、中子法 .....	(45)
三、 $\gamma$ 射线法 .....	(47)
四、TDR法 .....	(49)
第二节 土壤水的能态 .....	(50)
一、土水势及其分势 .....	(51)
二、土水势的单位 .....	(55)
三、土壤水吸力 .....	(56)
第三节 土水势的热力学基础 .....	(57)
一、自由能 .....	(57)
二、土壤水的自由能 .....	(58)
三、土-水-气系统的自由能 .....	(60)
第四节 土壤水特征曲线 .....	(61)
一、土壤水特征曲线的定义 .....	(61)
二、影响土壤水特征曲线的因素 .....	(65)
三、滞后现象 .....	(66)
第五节 基模势与土壤水特征曲线的测定 .....	(69)
一、基模势的测定 .....	(69)
二、土壤水特征曲线的测定 .....	(73)
第六节 土壤水流综述 .....	(74)
一、毛细管中的层流运动 .....	(74)
二、土壤水流简化模型, 通量 .....	(77)
第七节 饱和流 .....	(78)
一、达西定律 .....	(79)
二、达西定律的适用范围 .....	(81)
三、土壤导水率 .....	(82)
四、饱和流方程——Laplace方程 .....	(85)
五、不同情况下的达西定律 .....	(88)
第八节 非饱和流 .....	(91)
一、非饱和流与饱和流的比较 .....	(92)
二、非饱和流的达西定律 .....	(93)
三、非饱和流的基本方程 .....	(96)
四、非饱和流基本方程的解 .....	(99)

五、扩散率和非饱和导水率的测定.....	(102)
第三章 田间水分循环.....	(106)
第一节 入渗.....	(107)
一、入渗现象.....	(107)
二、入渗水在土壤剖面的分布.....	(110)
三、不同入渗条件下的定量研究.....	(114)
第二节 再分布和内排水.....	(121)
一、再分布过程的描述.....	(121)
二、再分布过程的分析.....	(122)
三、关于“田间持水量”概念的讨论.....	(124)
第三节 土面蒸发.....	(125)
一、基本概念.....	(125)
二、蒸发的定量研究.....	(128)
第四节 植物吸收土壤水.....	(135)
一、植物的吸水机理.....	(135)
二、根系吸水的定量分析.....	(138)
第五节 田间水量平衡与能量平衡.....	(142)
一、土壤—植物—大气连续体.....	(142)
二、田间水量平衡.....	(145)
三、田间能量平衡.....	(147)
第四章 土壤中溶质运移.....	(155)
第一节 溶质运移的机制.....	(155)
一、对流或质流.....	(156)
二、扩散.....	(156)
三、水力弥散.....	(160)
第二节 溶质运移方程.....	(163)
一、基本方程.....	(163)
二、求解方法.....	(164)
第三节 溶质运移与土壤基模特性.....	(170)
一、溶质在大团粒结构土壤中的运移.....	(170)
二、溶质的吸附—解析与运移.....	(172)
三、溶质运移与植物吸收.....	(175)

第五章 土壤空气	(177)
第一节 土壤空气的组成和变化	(177)
一、土壤空气的组成	(177)
二、土壤空气与植物生长	(181)
第二节 土壤中的空气流	(183)
一、气体的对流运动	(183)
二、气体的扩散运动	(186)
三、土壤空气扩散率的测定	(190)
第三节 几个有待深入研究的问题	(192)
一、土壤孔隙连续度和弯曲度	(192)
二、孔隙连续度与溶质运移	(194)
三、土壤剖面上的非稳态流	(196)
第六章 土壤温度和热流	(198)
第一节 土壤的热性质	(198)
一、土壤的热容量	(198)
二、土壤的热传导和导热率( $\lambda$ )	(200)
第二节 土壤中的热流及其基本方程	(204)
一、土壤中的热流	(204)
二、土壤热流基本方程	(205)
三、土壤中热流问题的解	(207)
第三节 土壤热参数的测定	(208)
一、土壤热容量的测定	(208)
二、土壤热传导率( $\lambda$ )和热扩散率( $D$ )的测定	(209)
第四节 温度对土壤水、气保持和运动的影响	(210)
一、温度对土壤水吸力的影响	(210)
二、温度梯度影响下土壤水、气的再分布	(211)
三、非恒温条件下,非饱和土壤水分运动	(212)
第七章 土壤的空间变异	(214)
第一节 地域化变量,时间序列,一阶矩和二阶矩	(215)
一、地域化变量	(215)
二、时间序列	(215)
三、一阶矩和二阶矩	(216)



第二节	二阶平稳假设和内蕴假设	(218)
一、	二阶平稳假设	(218)
二、	内蕴假设	(219)
第三节	半方差的估算	(220)
一、	一维半方差的估算	(220)
二、	二维半方差的估算	(222)
三、	半方差图的绘制	(222)
第四节	半方差模型	(224)
一、	协方差和半方差的性质	(224)
二、	半方差模型	(225)
三、	安全型和危险型半方差	(227)
第五节	半方差函数的几个问题	(229)
一、	支撑尺寸, 正则化	(229)
二、	套合模型	(230)
第六节	横互相关	(232)
第七节	合理取样数目的确定	(234)
第八节	Kriging插值	(237)
附实验指导		(243)
实验一	土壤的粒径分析	(243)
实验二	土壤的微团粒分析——吸管法	(253)
实验三	中子测水仪在田间的使用	(256)
实验四	张力计的组装和使用	(263)
实验五	土水势及其分势	(269)
实验六	高基模势(低吸力)范围的土壤水 特征曲线的测定	(272)
实验七	压力板(膜)法测定土壤水特征曲线	(278)
实验八	土壤饱和导水率的测定	(280)
实验九	土壤入渗率的测定和层状土壤入渗现象的观察	(290)
实验十	土壤水再分布的观察与非饱和导水率的测定	(296)
实验十一	土壤水扩散率的测定	(302)
实验十二	土壤空气组成的测定——气相色谱分析法	(309)
实验十三	土壤导热率、土壤比热、热扩散率的测定	(311)

实验十四	土壤通气性的测定.....	(316)
实验十五	土壤的膨胀.....	(320)
实验十六	植物叶水势的测定(压力室法)和叶面温度的测定(红外法).....	(322)
附录	常用换算单位.....	(325)

## 第一章 土壤基模

土壤基模是指土壤的固体部分，它是一个多分散和多孔的体系。多分散是指土壤的固体物质由不同比例的粒径粗细不一、形状和组成各异的颗粒（通称土粒）所组成。土粒中粘粒的粒径（ $<5\sim 1\mu\text{m}$ ，各国规定不同）最细，属胶粒范畴，比表面积巨大，是土粒中最活跃的部分。粘粒中无机和有机胶粒的比以及粘粒矿物的类型都对其表面活性有重大影响。土壤基模中各级粗细土粒的数量和比例，现称为土壤（或土粒）的粒径分布，传统工作中也常称为土壤的机械组成和质地。自然土壤基模的土粒除碱土外，大多是多个粘粒和其它细土粒团聚在一起称为土壤团粒。许多情况下，这些团粒在水中并不完全分散，其不分散者是水稳性团粒。团粒的粒径不一，各级粗细团粒在土壤基模中的数量比称为土壤团粒的粒径分布。

分散的土粒和团粒间以及团粒内必然存在着众多的孔隙，大多数土壤基模中孔隙所占的容积为一半左右。单位容积干土壤（即土壤基模）中孔隙所占容积，用百分数表示称为孔度或总孔度；用比值表示则称为孔隙比或孔比。土粒和团粒的粒径分布和排列得紧实程度不同自然会影响到孔度、各级不同孔径孔隙数量比、孔隙的形状、弯曲和联结程度等的差异。上述基模孔隙的诸多特征合称为土壤的孔隙状况，其中孔度和孔隙的孔径分布是较易于测定的。

每一类土壤各有其特殊的基模特征，通常就是以上述的土粒和团粒的粒径分布，土壤比表面积和土壤孔隙的孔径分布表示之。有时也包括有机胶体的数量和粘粒矿物种类。土壤基模特征是成土过程的产物，是物质和能量在土壤中保持和运动以及植物

生长的基础或介质。它和土壤的环境因素共同决定着这些物质和能量在自然界循环中土壤环节的过程以及植物生长状况。不了解土壤的基模特征，也就无法了解土壤中各项运动过程的真实状况。

## 第一节 土粒的粒径分布

### 一、土粒的粒级

土壤基模中土粒的粗细不同，不但比表面积有巨大差异，而且土粒间孔隙的孔径也有显著区别。土粒由粗到细是连续的，并没有截然界限，为科技工作的方便，人们就企图按土粒粗细把土粒分为若干级别，每一定粒径范围称为一个粒级，近百年来粒级的划分才逐渐有明确的尺度。显然，粒级的划分是人为的，因而随研究者的目的不同，就有不同的划分标准，譬如，在土壤力学，土工学，地质学，水利学等方面就与土壤科学中划分的具体标准不同。另外，还有两点必须注意：一是各粒级的界限并不是绝对的，即不是超出这个界限边缘的土粒就有完全不同的性质和组成，而是在这个界限范围内的绝大部分土粒具有某些特定的性质和组成；二是土粒的形状极不规则，已知粘粒是扁平状的，粗一些的土粒则形状各异，目前的几何方法还很难求出它们的粒径。在实际工作中粗土粒（粒径 $>0.25\text{mm}$ ）用不同圆形孔径的筛加以分离；细土粒（粒径 $<0.05\text{mm}$ ）已细到无法筛，用其在静态介质（水）中沉降的速度或不同流速的流体（水）中沉积出来加以分别，现代多用前一方法。土粒在水中沉降速度因其形状而异，而形状又很不一致，近百年来都是采用与土粒沉降速度相同的球体土粒的直径或半径为其粒径，称为当量粒径。同理区分粗土粒的圆筛孔的孔径也是区分它们的界限，但在文献中不常这样明确说明。

世界各国大都按土粒粗细分为砾、砂粒、粉粒和粘粒四个大

的粒级，但其具体界限和每个大粒级的进一步划分则有一定差异。我国自30年代引进近代实验科学的土壤学以来，因种种原因未能进行土粒分级的基础研究，而是借用美国的、原苏联的、和国际土壤学会通过的分级方案。它们的划分尺度如表1.1：

表 1.1 国际制、美国制、前苏联制的土壤粒级划分方案

国际制*		美国制		前苏联制(卡庆斯基)			
粒级名称	粒径大小 /mm	粒级名称	粒径大小 /mm	粒级名称	粒径大小 /mm		
石 砾	>2	石块	>3.0	石块	>3		
砂粒 {	粗 砂	2~0.2	粗 砾	3~2	石 砾	3.0~1.0	
	粗 砂	2~0.2	极粗砂粒	2~1	粗砂粒	1~0.5	
	细 砂	0.2~0.02	细 砾			中砂粒	0.5~0.25
			粗砂粒	1~0.5		细砂粒	0.25~0.05
			中砂粒	0.5~0.25			
		细砂粒	0.25~0.1				
		极细砂粒	0.1~0.05				
粉(砂)粒	0.02~0.002		0.05~0.002	粗粉粒	0.05~0.01		
				中粉粒	0.01~0.005		
				细粉粒	0.005~0.001		
粘 粒	<0.002	粘 粒	<0.002	粗粘粒 (粘质的)	0.001~0.0005		
				细粘粒 (胶质的)	0.0005~0.0001		
				胶 体	<0.0001		

• 新近，国际制又做了一些修改。

砾是最粗的土粒，我国主要农区的土壤并不多见，只是在土石区、近河滩的山坡土壤中才出现至影响土壤基模特征的程度。传统的概念，特别是在农业土壤工作中，常把<2~3mm做为土粒粒径的上限，室内制备供分析用的土壤样品是将砾筛分出去。但当砾的数量达到影响土壤性质时，应加以记载，列在分析报告

中。

砂粒是不规则颗粒状的，矿物组成主要是石英、也有长石、云母等的碎块（片），有时还含有少量的角闪石、锆石、辉石、电气石等深色或重矿物。石英和长石等常见的砂粒矿物表面往往局部地附着有氧化铁、锰或碳酸钙的沉淀。细小颗粒有时也成胶膜包被在砂粒的表面，使得砂粒的颜色并不完全同于其原矿物的颜色。砂粒在各国的进一步（亚级）划分方案中，大多分为粗、中、细砂或只划分粗砂和细砂，只有在美国农部的划分方案中还分出极细砂和极粗砂两个亚级。本书将按在我国使用已超过40年的苏联（卡庆斯基）方案进行讨论，实际上各方案相差并不非常巨大。

粗砂泛指3或2mm至1mm的土粒，它们的比表面积小，表面只能吸附微量水分子（包括水气分子），包被其表面，成极薄的水分子层。粗砂粒间的孔隙粗，大多超过表面毛细现象的孔径，所以它所保持的水往往是在粗砂粒间的接触点，为弯月面力所保持，在与植物根接触时，也能被吸收。这种情况在砂砾混合或以砾为主时更为明显。透水和通气能力强。

细砂和粗粉粒的矿物组成与砂粒类似，两者的性质相近。它们已有明显的表面吸附水分子的能力，颗粒间孔隙的孔径表现最活跃的毛管作用，毛管水上升迅速，上升高度可达2~3m，但粗粉粒的透水性稍逊。有较明显的粘结性，粘着性，干缩和湿胀，大雨后或灌溉水后经干燥土表出现结皮、板结或起坷垃（但不坚实），和深度不同的裂纹，一般不超过1~2cm。在一定的含水量范围内表现可塑性。这些物理性质都是粗粉粒强于细砂。中砂的性质则居于粗砂和细砂之间。

中、细粉粒的矿物组成仍与砂粒相同，但表面积增大，表现出不同程度的属于胶粒范畴粘粒的若干性质。表面吸附水分子的力强，毛管力强，毛管水上升或向其他方向运动缓慢，毛管水上升后高度可能相当高，但所需时间过长、速度过慢，实践意义不

大，透水性相当差。中、细粉粒的粘结、粘着、可塑性以及干缩湿胀皆较强，容易形成土表的结皮，板结和硬坷垃。土壤基模中这样粒级含量高，尤其是细粉粒会造成耕作上的困难，质量也不易保证。剖面中有这样的土层会使水的垂直流动困难。

粘粒是土粒中最细部分，其粒径上限在各种划分方案中规定虽有些差异（如美国农部的方案规定为 $5\mu\text{m}$ ，国际方案规定为 $2\mu\text{m}$ ，苏联卡庆斯基方案规定为 $1\mu\text{m}$ ），但实际意义并不大，大量土壤粒径分析表明， $<5\mu\text{m}$ 的土粒绝大部分是 $<1\mu\text{m}$ 的。粘粒矿物组成主要是各类粘粒矿物，它们大多有次生的（在土壤形成过程中产生的，以区别原在地球表层存在的原生矿物，如砂粒和粉粒所含的矿物）铝铁硅酸盐，一般分成蒙脱石、伊利石（水化云母）和高岭石三大组；此外还有无定形二三氧化物和硅酸盐或水合二氧化硅的凝胶，经常含有可察觉数量的腐殖质胶粒，它们往往成复合状胶粒存在。粘粒矿物是扁平的片状或盘状，具有极大的比表面积，胶粒表面有负电荷与其邻近的土壤水中的阳离子形成双电层。巨大的表面积和表面电荷，使得粘粒有极强的吸附水分子能力，形成与其粒径比较相对厚的吸附水层或水膜。粘粒间的孔隙孔径极细微，粘粒吸附的水膜就有可能充满或堵塞这些细微的孔隙。或许孔隙中在吸附水膜外还有少许空间借助毛管作用保持少量水，孔隙越细毛管力越强，致使粘粒间孔隙总容积较同体积砂粒间孔隙多，所以粘粒的总（最大）持水量高。不言而喻，粘粒在一定含水量范围表现极强的粘结性、粘着性和可塑性，干缩湿胀的程度极高，经湿润后的干粘粒容易出现较厚的结皮和板结，并且形成坚硬的坷垃和土块，要极大的力量才能敲破打碎，也需有很高的耕作技术才能得到较好的耕作质量。所以粘粒含量高的土壤，尽管有较多的作物养料，却很难管理。幸亏田间情况下，除碱土外，粘粒大多团聚成微团粒或团粒，可以自然缓解或改善上述情况。

## 二、土粒的粒径分布和分析

土壤中，严格地说，土壤基模中含有不同比率的各级土粒，完善地表达方式是用粒径分布曲线，曲线的横轴为粒径( $d/\text{mm}$ )的对数，纵轴为小于某一粒级的累积百分数，如图1.1。在曲线上可以寻求任何粒径范围的土粒数量。曲线上各点是由粒径实测得来。设实测结果为各级土粒在土壤中的质量  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_1, \dots, M_n$ ，总样品质量为  $M_s$ ，而相应各级土粒所占分数或百分数为  $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$ ，则小于某一定粒径( $F_i$ )的累积百分数或分数为：

$$F_i = (M_s - \sum_{i=1}^i M_i) / M_s \quad (1.1)$$

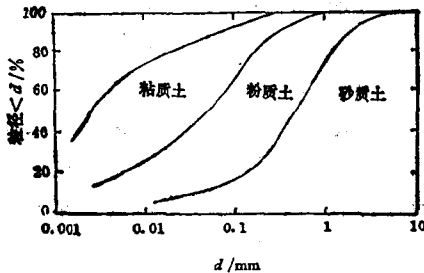


图 1.1 三种类型土壤的粒径分布 (概略的)

粒径分析过去也称机械分析，是土壤实验科学中最古老的技术，它包括以下步骤。严格而论，几乎每项步骤都有一定程度偏离实际的假定或争论的问题。

1. 土粒的分散 田间或自然土壤，绝大部分或全部粘粒都是相互团聚成粒径不同的团粒，微团粒是粘粒直接凝聚而成，粗团粒则主要是由腐殖质和某些情况下土壤中的石灰物质、游离铁等所起的作用。直接凝聚在中性土壤主要是代换性  $\text{Ca}^{2+}$  离子的作用，在酸性土壤则还有代换性  $\text{Al}^{3+}$  的作用，土壤溶液中盐类溶质浓度较高，也促进粘粒凝聚。因此在传统的分散处理中包括用  $\text{H}_2\text{O}_2$ - $\text{HCl}$  处理和施加含  $\text{Na}^+$  的化合物作为分散剂。 $\text{H}_2\text{O}_2$  是为破坏腐



殖质，稀HCl是为溶解游离的CaCO<sub>3</sub>和其他胶结剂，并用H<sup>+</sup>代换有凝聚作用的Ca<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>等离子和淋洗土壤溶液中的溶质。代换性H<sup>+</sup>也有凝聚粘粒作用，必须用分散粘粒的Na<sup>+</sup>代换之，所用Na<sup>+</sup>的数量不能过多地超过土壤的代换量（详见本章第二节“土壤团聚”）。

凡此种种，不仅手续繁杂费时，且稀HCl淋洗中，也可能淋出一部分粘粒的组分，如无定形的二三氧化物和水合氧化硅等。因此需要收集稀HCl淋洗液，进行化学分析测定。更重要的是腐殖质和碳酸盐等也是土壤固相的一部分，除去它们与田间情况不合。因此，近来常对供分析的样品，直接投入可固定Ca<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>等高价离子的Na盐，常用的是偏磷酸钠。最后利用各种机械的方法进行搅拌，使分散完全。最简单的方法就是利用高于1个大气压的小股气流，激荡加分散剂的土壤溶液，省时快速。

关于样品的分散处理尚无统一规定，分析报告中必须注明。

2. 粗土粒的筛分：用粗细不同孔径的筛相继筛分经分散处理的样品滤液可得出不同粒径的土粒数量。现代技术所能制备精确的筛孔，多在250μm以上，最多到125μm。根据标准筛的要求，筛孔<600μm允许5%的筛孔偏离规定值，筛孔孔径在600~125μm之间为7.5%，筛孔<125mm则可高达10%。所以常规粒径分析中大多只对>0.25mm的土粒实行筛分。

3. 细土粒的沉降分离：无法筛分的细土粒，普遍采用Stokes定律，按土粒在流体（水）中沉降快慢区分出不同粒级的土粒。该定律是说明在一定密度和粘滞度的流体中，球形颗粒在重力作用下沉降，其最终沉降速度（或称末速）与颗粒的半径平方成比例。

颗粒在真空中沉降不受任何阻力，只是受重力作用沉降速度将有所增加。在流体中沉降则颗粒遭受一定的摩擦力（ $F_r$ ），它与颗粒半径和沉降速度的乘积以及流体的粘滞度成比例。G.G.Stokes（1851）指出 $F_r$ 应等于：