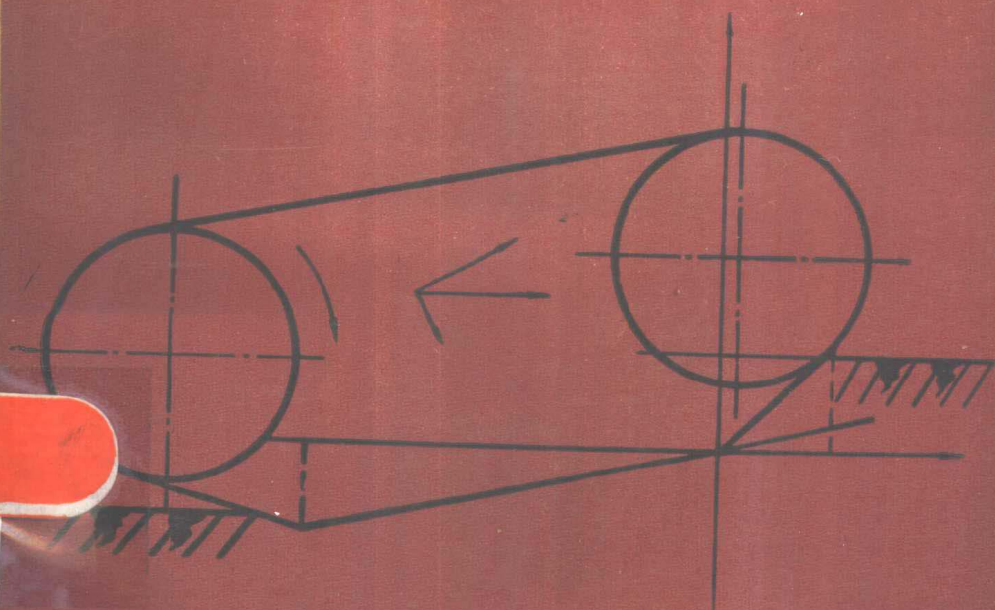


孙一源 高行方 余登苑编著
农业出版社

农业土壤力学

NONG YE TU RANG LI XUE



农业土壤力学

孙一源 高行方 余登苑 编著

农业出版社

农业土壤力学
孙一源·高行方 余登苑 编著

农业出版社出版（北京朝内大街130号）

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 11.25 印张 274 千字
1985 年12月第1版 1985年12月北京第1次印刷
印数 1—3,850 册

统一书号 16144·2864 定价 2.80 元

前 言

农业土壤力学是研究土壤特性及其受力后变化规律的科学。农业土壤是指能生长作物、有一定肥力的地球陆地表面的疏松表层。这层土壤具有较大的孔隙度（约占50%），有良好的气、热、水和肥状况，适合作物及某些微生物生长发育。耕层土壤还需按照人们的要求，采用各种方式进行耕作，以便保持并提高土壤肥力，才能使农产品的收获量持续不断地增加。土壤耕作多采用耕作机具，因此就需研究耕作部件与行走装置和土壤之间的相互作用，了解土壤的切削、破碎、翻转、压实和支承等过程、能量消耗以及最后应达到的土壤状况。这就是农业土壤力学要讨论的主要内容。在农机具与土壤相互作用中，除了分析其受力状况、土壤运动和所需能量外，还应注意土壤结构、水、肥、气、热等物理性状及其对肥力的影响，后者往往会被忽视，这正是编者要强调的一个方面。

土力学起源于十八世纪，农业土壤力学萌芽于十九世纪。直至1925年K. Terzaghi的《土力学》著作问世之后，才成为独立的一门学科，近半个世纪以来，在土力学的基本理论、测试技术和计算方法等方面得到很大发展。三十年代В. М. Горячкин的“农业力学”讲座开设之后，才开始系统讨论农业机械力学问题，其中包括耕作部件和行走装置与土壤的相互作用。直到1961年地面-车辆系统力学第一次国际会议在意大利都灵召开之后，才建立了“地面力学 (Terramechanics)”这个新的概念。1968年W. R. Gill和G. E. V. Berg的《耕作与牵引土壤动力学》一书出

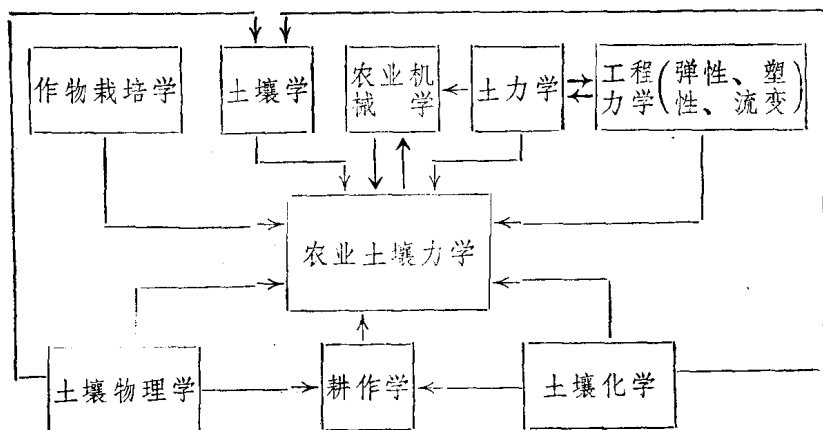
版，被誉为这一领域中的“里程碑”，更引起人们的广泛注意。然而书中对“农业土壤”的特点反映得还感不足。

按照目前的一般的理解，地面力学应包括：

地面力学(土壤-机器系统力学) — { 行走力学 (土壤-车辆系统力学)
耕作力学 (土壤-耕作机械系统力学)

农业土壤力学除包括地面力学的内容外，还应研究土壤在机械作用下的物理、化学和生物学特性——即肥力状况与土壤的物理、化学和力学性状之间的关系。只有从这个角度去分析问题，才能为加速农业机械学的发展，提供较为完备的基础。从这个意义上讲，这方面的研究工作还是进行得比较少的。

农业土壤力学和相邻学科之间的关系，可由下面的框图表示，这充分说明农业土壤力学是一门较为复杂的新兴边缘学科。



农业土壤力学是介于“农业土壤”与“力学”二门学科之间的边缘科学，有若干基本原理虽可从“土力学”、“工程力学”和“土壤物理学”等学科中汲取，但又要考虑“土壤”的特殊性。因为“土”往往作为地基、堤坝的支承材料，仅需分析其应力、应变等力学性质，无需研究水、肥、气、热等“肥力”因素对作物生长的影响。因此，为发展土壤加工机械（如耕作机械和土方工程机

械)与陆地行驶的车辆,就必须研究农业土壤的力学问题。

我们按对农业土壤力学的粗浅理解,编写了本书。全书分四章,第一、二两章为土壤的基本特征和力学性质,试图说明土壤肥力和诸因素之间的关系。在这部分中还讨论了土壤强度的由来,说明了粘粒与胶体等的作用。第三章为耕作力学,从楔与土壤的相互作用开始,分析了耕作部件设计中的部件几何形状、受力状况和磨损等问题,以铧式犁为重点讨论了有关问题。第四章为行走力学,着重讨论了车轮、履带和滑板(包括船体式滑板)与土壤的相互作用,结合我国特点,还分析了水田中行走问题。书中对一些问题的定量描述、测试技术和数学模型等,作了扼要的介绍。

限于编者的水平,本书又是初步尝试,缺点和错误是难免的,诚恳地希望读者批评指正。

编著者

一九八四年四月

目 录

第一章 土壤的基本特征——肥力与诸因素间的关系.....	1
§ 1—1 土壤的形成过程和剖面特征	1
§ 1—2 土壤的组成与质地	7
§ 1—3 土壤“活性”的基础——粘粒和土壤胶体	14
§ 1—4 土壤水分	23
§ 1—5 土壤的通气性和导热性	32
§ 1—6 土壤结构	42
第二章 土壤的主要力学性质	54
§ 2—1 土壤强度	54
§ 2—2 土壤的外摩擦	77
§ 2—3 水田粘性土壤的流变性与触变性	97
第三章 耕耘作业中的土壤动力学性质	108
§ 3—1 楔对土壤的作用.....	108
§ 3—2 耕作部件的设计方程.....	130
§ 3—3 犁体曲面的几何模型及其曲面的测绘.....	133
§ 3—4 土壤沿犁面的运动.....	163
§ 3—5 耕作部件的受力状况及其测定.....	177
§ 3—6 土壤旋转加工机械.....	212
§ 3—7 耕作机械工作部件的磨损及提高其耐磨性的主要措施.....	232
第四章 土壤与农机行走机构的相互作用	248
§ 4—1 土壤承载能力与机具下陷.....	248
§ 4—2 履带行走机构的行走阻力.....	254
§ 4—3 履带行走机构的土壤推力.....	266
§ 4—4 轮子与土壤的相互作用.....	281
§ 4—5 水田滑板与土壤的相互作用.....	313

§ 4—6	农机行走机构的通过性.....	319
§ 4—7	轮式及履带自走机具的转向条件.....	332
§ 4—8	土壤压实和水田泥脚加深问题.....	344

第一章 土壤的基本特征——肥 力与诸因素间的关系

§ 1—1 土壤的形成过程和剖面特征

“土壤”这一术语，应用虽极普遍，由于分析角度的不同，所表达的涵义也就各异。从土壤学的观点来看，土壤是具有自己发生发展历史的一种独立的自然体。不仅从形态，物质组成上，而且从结构和功能上都可以剖析的物质实体，是作物生长的介质。农业土壤是指“地球陆地表面能够生产植物收获物的疏松表层”。土壤其所以能够生长植物，人类其所以能够获得植物收获物，就是因为土壤具有肥力。所以“农业土壤”的概念是与肥力的概念分不开的。

但从“土壤力学”的角度来分析，常将土壤作为具有弹塑性或粘弹塑性多相自然体。为便于研究，常把土壤作为连续线性变形体，其应力-应变关系近似地作为线性关系处理，以便于应用弹性理论，来计算土壤力学问题。力学分析的注意力集中在载荷作用下，土壤的应力-应变和强度，土壤可塑性和流变性、土壤的分散性、结构性和各向异性等特性，并对土壤应力-应变的非线性关系，亦日益受到重视。

从事农业机械设计制造的工程技术人员，从力学上研究土壤，其目的为如何减少工作部件的能耗及降低行走机构的阻力，以提高其经济效益。但农机具加工土壤的目的是改善土壤的物理状况，为作物创造良好的生长条件，也就是通常所说的提高土壤肥力，

从而获得高产，这是根本的目的。因此，对土壤的研究，既要用力学上研究土壤的变形和强度，又要从农业上研究土壤的肥力，两者不可偏废。农机工作者对土壤力学性质和肥力的研究，犹如航空工程对空气动力学的研究，船舶工程对流体力学的研究一样重要。没有这方面知识来指导设计工作，则设计出的机具的适应性、可靠性和安全性就可能带有盲目性。据此，下面将先对土壤肥力及其有关知识略加介绍。土壤肥力是土壤中水、肥、气、热作用的结果，是一个综合指标，既取决于土壤的水分，营养状况，又取决于空气，热状况。也就是说土壤肥力，不仅是土壤水、肥的函数，同时也是土壤空气和温度的函数，是一个多变量的函数。肥力可以从化学的、物理的、物理化学的、生物的各种不同的方面进行研究。

鉴于农机具加工土壤，主要是改善土壤的物理特性，特别是孔隙度，从而改善土壤的水、肥、气、热性状，提高土壤的肥力。所以本章将着重从物理的方面对土壤肥力进行分析研究。

一、土壤的形成过程

远古时代，地球的表面最初只有大块岩石，而它们的组成成分不同，在气候因素（日光、空气、水分等）的作用下，进行物理、化学等风化作用，使坚硬巨大的岩石，逐渐变成疏松多孔的岩石碎屑，成为“成土母质”。坚硬的岩石形成疏松多孔的母质，这种表观现象，实际上是由于岩石与气候因素之间，进行了大量的物质与能量交换的结果。母质是成土的基础。由于母质疏松多孔，便具有透水性、保水性和通气性，同时岩石在风化的过程中，还产生不少可溶性的矿质营养元素，如钾、钙、镁、磷等，为低等绿色植物的生长创造了条件，使得某些能从大气中固定氮素的生物得以定居，并为母质积累了一定氮素营养，为高等植物的后续生长提供了物质基础。由于生物在土壤中通过自己的生命活动，尤其是绿色植物的光合作用，将无机物转化成为有机物，从而使

太阳能转化成为化学能。这不仅把太阳能纳入了成土过程的轨道，并使得分散在岩石、水和大气中的营养元素，能向土壤表层聚积，在一定的时间、空间条件下，土壤肥力便从无到有，从低级到高级逐步形成。生长在土壤中的生物有机体死亡之后，其残体经微生物的分解，一部分形成腐殖质留在土壤中，就从根本上改变了母质的物理、化学、生物学性质，使“死”的母质，变成了“活”的土壤，使土壤的肥力发展到一个更高阶段。所以，在生物这个主导因素的作用下，母质与生物之间的能量和物质交换，是成土过程的主导过程。土壤在形成过程中所处的地形（包括海拔高度、坡度和自然位置），直接影响着土壤形成过程的方向、速度和强度，是引起物质作水平方向移动的首要因素。地形不仅直接同地表径流、土壤的冲蚀、沉积和地下水活动有关，并能引起地表温度的差异。例如沼泽地的形成、盐渍土的产生，都与地形有关。土壤类型分布的区域性，高地与低地土壤之间的“共轭性”，都是地形所引起的产物。时间虽是土壤形成过程的助动因素，但土壤的形成必须在一定的时间-空间条件下进行。母质、气候、生物和地形对土壤形成综合作用的效果，也随时间的推移而不同。不同年龄、不同发生历史的土壤，即使其他条件相同，也将属于不同类型的土壤。

所以土壤是母质、气候、生物、地形和时间综合作用的产物。也可以说成土过程的实质是：母质与气候（水分、热量）之间的能量交换，是成土过程的基本动力；土壤内部物质的迁移和转化是成土过程的实在内容。一个深厚的腐殖质层，有机-无机复合体的形成，水、肥、气、热的供应与协调，会使土壤具有独特的生命力——肥力。所以，自然土壤是在母质、气候、生物、地形和时间等五大成土因素共同作用下所形成的独立的历史自然体。

各成土因素不仅同等重要，不能替代，而且还相互影响，相

互制约。环境条件的多样性，增加了成土过程的复杂性，从而得到土壤的肥力水平和力学性质各异各类土壤。土壤性质的多样性与成土因素之间的关系，犹如函数与变量之间的关系，任何一种土壤性质的变化，都取决于各种成土因素变化的总和，因此便形成性状千差万别的各类土壤。

二、土壤肥力

土壤具有特殊的生命力——肥力，这是它区别于其他自然体最本质的属性。土壤既是人类、植物和动物，相互满足彼此需要的“共生社会”中的一员，又是一个独立的生态系统。在这个系统中外界输入于土壤的物质和能量（肥料、机械耕作、水、光能等），在土壤内部进行迁移和转化的结果，又以人类所需的产量的形式，输出到外界环境中去。这种迁移和转化反映了土壤的综合特性，也就是肥力。所谓土壤肥力，就是土壤具有不断地供应和协调为植物生长所必需的水、肥、气、热的能力。其中水、肥、气、热因素，称为肥力因素。

在土壤肥力的诸因素中，肥的因素（营养因素）主要是指植物生长所必需的各种营养元素，如氮、磷、钾、钙、镁和某些微量元素，如铁、锰、铜、锌、钼等。另一些因素，如空气、热，虽非构成植物体所必需，但对植物的生长发育能产生直接或间接的影响，故称为环境因素。还有的因素，既是营养因素又是环境因素。例如水是植物生长所必需的营养因素。由于水分和空气，在土壤中经常是相互消长的，土壤含水量的多少，势必影响土壤的通气状况；而且水同空气的比热不同，也势必影响土壤的热状况，从而影响土壤中一系列的物理、化学、生物和力学性质，所以水也是个重要的环境因素。

肥力的环境因素，包括土壤的空气、热状况，土壤的持水性等。土壤的机械组成也是一个重要的环境因素。因为组成土壤的大小不同颗粒，以各种方式相互粘结，使土壤具有一定的结构。

土壤的良好结构可使土壤疏松多孔，既有利于土壤气体的交换，又有利于土壤的热传导和土温上升；既有利于土壤养分的转化，又有利于植物根系的伸展和生理活动。土壤水分的多少，温度的高低，不仅影响植物根系的生理活动，而且也影响各类土壤微生物的活动和类型的变化，影响土壤营养物质的转化和吸收。因此土壤肥力与环境及营养诸因素间呈现错综复杂的关系。

耕作土壤：在自然土壤的基础上，由于人类的耕作、施肥、灌溉和排水等生产活动，可增加土壤养分，控制土壤水分和空气状况，改善土壤的物理性、化学性和生物学特性，提高了土壤肥力。人类这种改变土壤性质，提高土壤肥力的过程，也就是通常所说的“土壤熟化过程”。自然土壤经过人工熟化以后，便进入一个新的、更高级的阶段，成为“耕作土壤”。自然土壤是在五大成土因素的综合作用下所形成的，其中生物因素起主导作用，而“耕作土壤”是在自然因素和人为因素的共同影响下而形成的，其中人工熟化培肥过程，起着决定性的作用。耕作机械加工土壤（耕、耙、耨等），是人工熟化培肥的重要一环，其所以能提高土壤的肥力，主要是改善了土壤的结构性，也就改变了土壤的孔隙状况，从而改变了空气、热状况，使水、气、热协调。这些环境因素的改善，也导致了营养因素的改善，这是土壤肥力提高的主要原因。所以“耕作土壤”，不仅是历史的自然体，而且还是人类劳动的产物。

三、耕作土壤的剖面特征

耕作土壤既是历史自然体，又是人类劳动的产物，因此，在自己的发生发展历史中，在垂直的剖面上（即土壤剖面），会形成从形态、物质组成以及结构和功能各不相同的，纹理明显的各种层次。土壤的这种层次构型，是土壤剖面最重要的特征。

耕作土壤整个剖面从上到下，大体分为耕作层、犁底层、心土层和底土层（图 1—1）〔2〕。

耕作层：一般深度约20cm，最浅15cm，最深30cm。由于疏松多孔，营养物质丰富，作物根系总量80%以上，都集中分布于这一层。但水田土壤同旱地土壤相比，却有着许多物理、化学、生物和力学性质上的差异。水田土壤长期浸水，所以它的耕作层又叫淹育层。该层结构分散呈微团聚体状态存在，土壤松软而粘重，可塑性、粘着性大，因而，机具的耕作阻力增大。又由于承载能力小（水田土壤承载能力主要靠犁底层），机具的行走部分容易下陷和滑转。

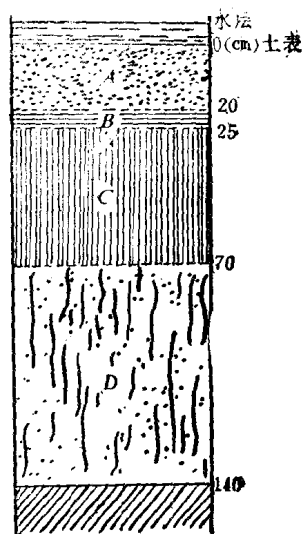


图 1—1 水田土壤剖面特征

A. 耕作层 B. 犁底层
C. 心土层 D. 底土层

犁底层：位于耕作层之下，厚约5—7cm。由于受犁耕过程的机械挤压等作用，使土层压实，以及粘粒下移沉积形成此层。常呈扁平的块状或片状结构。该层结构紧密，有明显的保肥、保水作用，特别是水稻田，不仅是保水、保肥的重要原因，承载作用也主要依靠该层。

心土层：位于犁底层之下，土层较紧实，承载能力强，并具有一定的保肥保水能力。旱地土壤20—30%根系分布在该层，水田土壤因常受地下水升降和浸水的影响，多呈棱块状结构，并密布锈斑锈点，故称斑纹层。

底土层：位于心土层之下。旱地土壤一般位于土表面60—70cm以下，土层相当紧密，作物根系分布较少。水田土壤该层呈青灰色，所以又称青泥层或潜育层。

自然条件的多样性，加之耕作水平的不同，各层的厚度以及

层次的分化程度也各异，上述各层是较为典型土壤剖面。

§ 1—2 土壤的组成与质地

一、土壤的组成

岩石风化成母质，母质在成土过程中，由于组成岩石的化学成分不同，因而，抗风化作用的稳定性也各异。另外母质的成因类型亦不相同，其结果在土壤中便形成大小不同的矿物颗粒。这些从数厘米大的岩石碎

块，到几微米甚至百分之几微米的胶粒的土壤颗粒，有的呈单粒，有的由于粘粒及有机-无机复合体的胶结作用，而成团聚体或微团聚体状态，结果使土壤成为具有一定孔隙的多孔体。在土壤的孔隙中，充满着水分和空气，所以土壤是一种不连续的

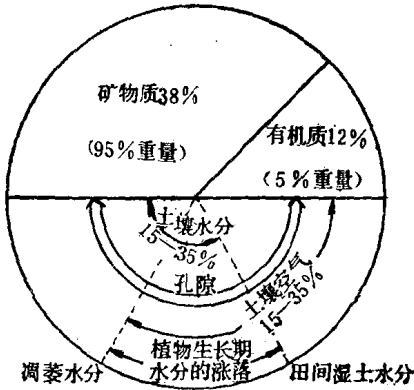
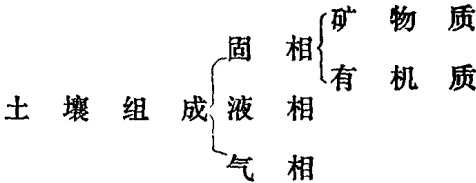


图 1—2 旱地土壤三相容积比例

具有固相（矿物质、有机质）、液相（水分）、气相（土壤空气）三相组成的分散系。三相之间相互联系、相互转化、相互影响，构成一个有机整体（图 1—2）。



一般的旱地土壤，固相物质所占体积，约为土壤总体积的 50%，其中矿物质约占 38%（重量的 90—98%），有机质约占 12%

(重量的 2—10%), 液相和气相分别占土壤总体积的 15—35%。

1. 土壤矿物质 土壤矿物质, 是土壤的骨骼, 由岩石经风化及成土作用后形成。不同的岩石其化学性质也不一样, 因此会形成不同的矿物。土壤矿物质可分为:

原生矿物: 岩石在风化及成土过程中, 由于化学性质稳定, 其化学组成、化学结构均未发生变化, 只发生形状、大小等物理性状的改变, 仅有机机械性的破碎。一般直径为 1—0.01mm 的粗颗粒, 均属原生矿物。原生矿物中以石英、云母、长石最多。石英抗风化能力最强, 最不容易分解, 所以含量最高。砂土中石英的含量有时可在 85% 以上。原生矿物因为颗粒比较粗, 比表面积 (每单位重量土壤所占的总表面积, 称比表面积, 单位是 cm^2/g) 小, 因此表面活性低, 对土壤的各种性质影响也就小。

次生矿物: 原生矿物在风化及成土过程中, 不仅形状、大小等物理性状发生改变, 而且化学性质也发生改变, 重新形成一种新的矿物, 称为次生矿物。次生矿物的种类很多, 主要有铁、铝氧化物 (如三水铝石 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、水铝石 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、针铁矿 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、褐铁矿 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等) 以及次生铝硅酸盐 (如伊利石、蒙脱石、高岭石等)。粘粒主要是由次生矿物组成。次生铝硅酸盐和铁、铝氧化物, 是土壤矿物质中最细小的部分, 所以常称为粘土矿物。粘土矿物由于颗粒细小, 具有特殊的组成和结构, 土壤的许多物理、化学、力学等性质, 都与粘土矿物的含量有关。

2. 土壤颗粒的分级 土壤是由大小不同的颗粒所组成, 由于它们的物理、化学、力学等性质不同, 因此对土壤性质的影响也各异。为了便于研究土壤的各种性质, 把土壤颗粒大小相近、性质相似的颗粒划为一组, 称之为粒级 (或粒组)。

粒级划分的标准, 各国很不一致。在我国的文献资料中常见有国际制、苏联制 (Н. А. Качинский) (表 1—1)。我国土壤科

表 1—1 国际制、苏联制(Н. А. Качинский)
土壤颗粒分级标准

国 际 制		苏联制 (Н. А. Качинский)	
粒级名称	粒径(mm)	粒 级 名 称	粒 径 (mm)
砾 石	> 2	石 块	> 3
粗 砂	2—0.2	砾 石	3—1
细 砂	0.2—0.02	粗 砂	1—0.5
粉砂粒	0.02—0.002	中 砂	0.5—0.25
		细 砂	0.25—0.05
		粗 粉 砂	0.05—0.01
		中 粉 砂	0.01—0.005
		细 粉 砂	0.005—0.001
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

表 1—2 我国土壤颗粒的分级标准

颗粒名称	粒径范围 (mm)	一 般 特 征
石块	>10	透水性很大, 无粘结性和粘着性, 无膨胀性和可塑性, 无毛细管水, 保水保肥力差, 养料缺乏
粗 砾 石砾	10—3	透水透气性大, 无粘结性及粘着性, 无膨胀性和可塑性, 毛细管水上升高度不超过粒径大小, 保水保肥差, 养料缺乏
粗砂砾 砂粒	1—0.25	易透水, 无粘着性, 无膨胀性和可塑性, 干燥时松散, 毛细管水上升高度小, 保水保肥力差
粗粉粒 粉粒	0.05—0.01	透水性小, 湿时稍有粘结力和粘着力, 遇水稍有膨胀, 可塑性小, 干时稍有收缩, 毛细管水上升高度大, 且较快, 分散性大。其性状介于砂粒与粘粒之间
粗粘粒 粘粒	0.005—0.001	透水性很小, 可塑性和粘结性强, 粘着性大, 本身所含养料丰富, 具有吸收性能, 保水保肥性强, 膨胀收缩性明显, 透气性差, 毛细管水上升高度大, 但速度慢。粘粒是土壤最活跃的部分
粘 粒	<0.001	