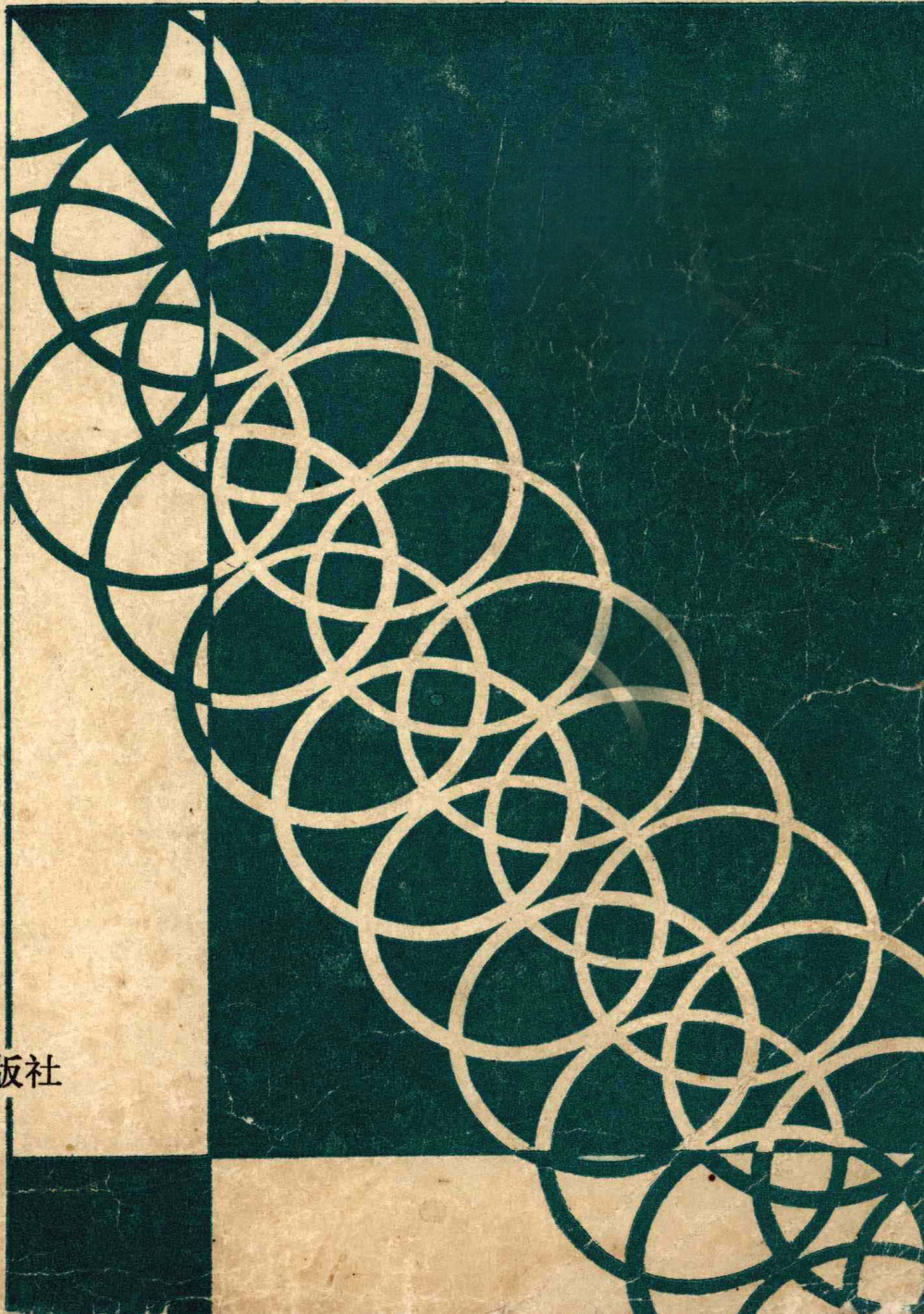


# 土壤物理学概论

[美] D·希勒尔著



陕西人民教育出版社

# 土壤物理学概论

D.希勒尔 著

尉庆丰 荆家海 王益权 译

朱祖祥 张君常 刘鹏生 校

陕西人民教育出版社

## 内 容 提 要

本书是著名土壤物理学家D.Hillel编写的一部教科书，书中阐明了近代土壤物理学的基本原理及其实际应用，反映了新的理论、观点和实验技术。可作为农学系、土壤学系及农业工程系学生的教材，也可供水利、林业等专业技术人员参考。

Daniel Hillel  
INTRODUCTION TO SOIL PHYSICS  
ACADEMIC PRESS 1982

### 土壤物理学概论

D. 希勒尔 著

尉庆丰 荆家海 王益权 译

朱祖祥 张君常 刘鹏生 校

陕西人民出版社出版、发行

(西安长安南路吴家坟)

新华书店经销 汉中地区印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 17印张 390千字

1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷

印数：1—1,500

ISBN 7-5419-0151-2/G·126

定价：3.40元

## 译 者 的 话

《土壤物理学概论》是著名土壤物理学家D.Hillel为农学系、土壤学系及农业工程学系学生编写的教科书，它也可作为水利、林学师生以及有关科技人员的参考书。书中阐明了近代土壤物理学的基本原理及其实际应用，也反映了一些新的理论、观点和实验技术。内容包括：土壤的一般物理性质，土壤质地，土壤结构，土壤水的含量与土水势，饱和与非饱和土壤中的水流，土壤空气及通气，土壤温度与热流，土壤的压实与固结，入渗与地表径流，内排水和土壤水的再分布，地下水的排水问题，裸土蒸发，植物对土壤水的吸收以及田间的水量平衡和能量平衡等。本书取材新颖，系统性强，清晰易懂，便于自学。而且各章都有例题，借以说明数学公式的应用，加深读者对重点内容的理解和掌握。

目前，国内虽然不乏土壤物理方面的专著，但还未见公开发行的这方面的教科书。因此，《土壤物理学概论》中译本的出版，对于土壤物理学的教学工作，无疑会起到一定的推动作用。

译稿承蒙朱祖祥、张君常、刘鹏生三位教授审校，又经马耀华同志在文字上进行了修改，陕西师范大学地理系张军同志还为本书绘制了全部插图，这里表示衷心的感谢。

## 序 言

这本书是最近出版的姊妹册《土壤物理学原理》和《应用土壤物理学》合二为一的缩简本，期望作为农学、园艺学、造林学、环境学及工程学大学生的教科书。书中删去了不必要的论题和复杂的部分，几乎没有多少保留。力求就土壤的物理性质及其对田间发生的诸过程的影响给以基本地、清晰易懂并便于自修地叙述。同时，也考虑到人们对这些土壤过程有益的或不利的干预。书中的例题，是想说明如何把以数学公式表达的抽象原理应用到实践中。作者期望该缩写本能比上述的那两本姊妹册更易为学生所理解，并激发起他们进一步钻研土壤物理学的兴趣。

D.希勒尔

马萨诸塞，阿姆赫斯特



# 目 录

## 序言

## 第一部分 基本关系

第一章 土壤物理学的任务	(3)
第二章 土壤的一般物理性质	(5)
2.1 概述	(5)
2.2 土壤物理学的定义	(5)
2.3 作为三相分散体系的土壤	(6)
2.4 土壤组分的容积与质量的关系	(6)
2.5 土壤剖面	(9)
例题	(10)

## 第二部分 土壤固相

第三章 <sup>4</sup> 土壤质地, 土粒大小分布及比面	(15)
3.1 概述	(15)
3.2 土壤质地	(15)
3.3 粘粒的性质	(17)
3.4 土壤质地类型	(19)
3.5 颗粒大小分布	(20)
3.6 机械分析	(21)
3.7 比面	(23)
例题	(25)
第四章 <sup>6</sup> 土壤结构及团聚作用	(27)
4.1 概述	(27)
4.2 土壤结构的类型	(27)
4.3 单粒状土壤的结构	(28)
4.4 团聚化土壤的结构	(29)
4.5 土壤结构特征的描述	(30)
4.6 团聚体的稳定性	(33)
4.7 土壤的结壳	(34)

例题	(35)
----	------

### 第三部分 土壤液相

<b>第五章 土壤水：含量及水势</b>	(39)
5.1 概述	(39)
5.2 土壤含水量(湿度)	(39)
5.3 土壤湿度的测定	(40)
5.4 土壤水的能态	(43)
5.5 土壤水势	(45)
5.6 土壤水势的定量表示	(49)
5.7 土壤水分特性曲线	(50)
5.8 滞后现象	(52)
5.9 土壤水势的测定	(53)
例题	(57)
<b>第六章 饱和土壤中的水流</b>	(60)
6.1 概述	(60)
6.2 达西定律	(61)
6.3 重力的, 压力的和总的水头	(63)
6.4 垂直土柱中的水流	(65)
6.5 通量, 流速和弯曲度	(66)
6.6 导水率, 渗透率和流动性	(66)
6.7 饱和土壤导水率的测定	(68)
例题	(69)
<b>第七章 非饱和土壤中的水流</b>	(71)
7.1 概述	(71)
7.2 非饱和流与饱和流的比较	(71)
7.3 导水率与吸力及湿度的关系	(72)
7.4 非饱和流的一般方程	(74)
7.5 水扩散率	(75)
7.6 非饱和导水率和扩散率的实验室测定	(77)
7.7 土壤剖面非饱和导水率的田间测定	(78)
7.8 气态水运动	(81)
例题	(82)

### 第四部分 土壤气相

<b>第八章 土壤空气与通气</b>	(89)
--------------------	------

8.1	概述	(89)
8.2	土壤空气的容积分数	(90)
8.3	土壤空气的组成	(91)
8.4	土壤空气的对流	(91)
8.5	土壤空气的扩散	(93)
8.6	土壤呼吸和通气的必要性	(95)
8.7	土壤通气的测定	(96)
	例题	(98)

## 第五部分 综合性质和行为

### 第九章<sup>12</sup> 土壤温度和热流 (103)

9.1	概述	(103)
9.2	能量传递的方式	(103)
9.3	土壤中的热传导	(104)
9.4	土壤的容积热容量	(106)
9.5	土壤的导热率	(107)
9.6	土壤剖面的热状况	(110)
	例题	(114)

### 第十章<sup>14</sup> 土壤压实和固结 (117)

10.1	概述	(117)
10.2	土壤压实性与湿度的关系	(118)
10.3	农田中土壤压实的产生	(119)
10.4	机械产生的压缩	(120)
10.5	土壤压实的后果	(124)
10.6	土壤压实的控制	(125)
10.7	土壤固结	(126)
	例题	(129)

### 第十一章 耕作与土壤结构管理 (132)

11.1	概述	(132)
11.2	传统的和现代的耕作方式	(133)
11.3	耕作研究中的问题	(134)
11.4	耕作农具的作用	(134)

## 第六部分 田间水分循环及其管理

### 第十二章<sup>14</sup> 入渗和地面径流 (139)

12.1	概述	(139)
------	----	-------



12.2	“入渗容量”或入渗性能	(139)
12.3	入渗过程中土壤剖面的水分分布	(141)
12.4	入渗性能公式	(142)
12.5	入渗的基本理论	(144)
12.6	间层剖面的入渗	(147)
12.7	地表有结壳土壤的入渗	(148)
12.8	雨水的入渗	(149)
12.9	地表径流	(150)
	例题	(151)
<b>第十三章</b>	<b>入渗后的内排水和再分布</b>	<b>(154)</b>
13.1	概述	(154)
13.2	完全湿润剖面的内排水	(154)
13.3	不完全湿润剖面中土壤水分的再分布	(155)
13.4	再分布过程的分析	(156)
13.5	“田间持水量”	(159)
13.6	影响田间持水量因素的概述	(161)
	例题	(162)
<b>第十四章</b>	<b>地下水的排水</b>	<b>(164)</b>
14.1	概述	(164)
14.2	非承压的地下水流	(164)
14.3	水位降落的分析	(165)
14.4	非承压地下水流方程	(167)
14.5	地下水的排水	(168)
14.6	影响排水的因素	(170)
14.7	排水设计方程	(171)
	例题	(174)
<b>第十五章</b>	<b>裸土蒸发</b>	<b>(176)</b>
15.1	概述	(176)
15.2	物理条件	(176)
15.3	有地下水位情况下的蒸发	(178)
15.4	高水位条件下的盐害	(179)
15.5	无地下水位条件下的蒸发(干燥)	(180)
15.6	干燥过程中第一、二阶段的分析	(182)
15.7	裸土蒸发的防止	(184)
	例题	(185)
<b>第十六章</b>	<b>植物对土壤水分的吸收</b>	<b>(189)</b>
16.1	概述	(189)
16.2	土壤—植物—大气连续体系	(190)

16.3	植物—水分关系的基本问题	(191)
16.4	根系吸收, 土壤水分移动和蒸腾	(192)
16.5	土壤水分有效性的经典概念	(194)
16.6	土壤水分有效性的新概念	(196)
16.7	灌溉, 水分利用效率和水分的保持	(197)
<b>第十七章 田间的水量平衡和能量平衡</b>		<b>(199)</b>
17.1	概述	(199)
17.2	根区的水量平衡 <small>名词: 根系</small>	(199)
17.3	水量平衡的估算	(201)
17.4	田间辐射能的交换	(202)
17.5	总的能量平衡	(204)
17.6	热和水汽向大气的输送	(205)
17.7	平流	(206)
17.8	潜在蒸散 (综合公式) <small>名词</small>	(207)
	例题	(208)
<b>参考文献</b>		<b>(211)</b>

# 第一部分

## 基本关系



# 第一章 土壤物理学的任务

我们足下的土壤是所有陆地生物的基本基质 (Substrate)。组成土壤的复杂而肥沃的混合物及其哺育生物的特殊属性, 是一个极为迷人的研究领域。土壤不仅是植物生长和微生物本身活动的介质, 而且也是许多废物处理的场所和再循环的加工厂。否则, 这些废物的积累, 便可能污染我们的环境。而且, 土壤支撑着我们的建筑物, 并作为泥土建筑物, 诸如水坝和路基的材料。

土壤学的基本任务, 是试图了解土壤的组成和它在生物圈中的作用, 这既来源于成为主要创造动力的人们的好奇心, 也来源于人们的迫切需要。土壤和水是农业的两个十分重要的基本资源, 也是我们的自然环境。世界上许多地方, 由于不断增长的人口压力或滥用它们, 导致了这些资源的不足。因此, 坚持不懈地管理好这些资源, 是我们这个时代最重要的任务之一。

过去, 正反两方面的经验都反复证明了有关土壤的知识对于保证文明的发展是必不可少的。在许多地区, 令人震惊地看到, 由于人为因素所造成的侵蚀而使良田变为荒漠, 或因不当的土—水体系管理而引起盐渍化, 加之不从长远利益出发, 而对不足的水资源的过度消耗以及有害废物对它的污染——这些确实使我们看到了一个管理不合理的典型模式。鉴于世界面临的人口—环境—食物危机, 我们绝不可继续浪费和滥用这样的宝贵资源。

土壤本身是极其复杂的。它由许多不规则碎裂的固体成分 (矿物的和有机的) 组成, 而这些固体成分又是以复杂得几乎难以描述的几何型式相互联结和排列着。其中一些是结晶颗粒, 另一些则是无定型凝胶, 它们可能包被在结晶颗粒的表面而改变晶体的行为。粘附的无定形物质, 可能是铁的氧化物, 或者是胶结土粒的有机复合物。固相与土壤孔隙中的流体, 即水和空气进一步相互作用。整个体系很少处于平衡状态, 这是由于交替发生着的湿润和干燥、膨胀和收缩、分散和絮凝、压实和开裂、阳离子的交换、盐类的沉淀和溶解以及有时发生的冻结和溶化。

作为植物生长的理想介质, 土壤必须贮存和供应水分及养料, 并且没有过量的有毒物质。土壤—水—植物体系进一步为下列事实复杂化, 即植物根系必须经常不断的呼吸, 而大多数陆生植物并不能以足够的速率从它们的地上部分输送氧气至根部, 以满足其呼吸的需要。因此, 土壤本身必须通气良好, 即通过它的充气孔隙与外部大气连续地进行氧气和二氧化碳的交换。过度潮湿的土壤会窒息根系, 正如过分干燥的土壤会使它们枯死一样。

这些, 只不过是年轻的土壤物理学面临的几个问题而已。真正土壤物理学的诞生也是上一代的事。尽管土壤中所有形式的物质和能量的状态与传导都是可以限定的,

但土壤物理学有其固有的复杂性，这可能就是它发展很晚的原因。

目前，关于土壤物理体系的知识仍然是极不完全的。因此，还应继续不断地探索大量涌现的新问题。科学的任务、乐趣以及有时的痛苦，就是坚持不懈地努力，以便对观察到的现象得到正确地理解和说明，而不是永远停留在昨天的结论上。因此，一部好的土壤物理学著作应当反映体系的复杂性，尽管这种正确地，合乎逻辑地描述，不可否认地还是不够完全的。

(尉庆丰译，朱祖祥校)

## 第二章 土壤的一般物理性质

### 2.1 概述

土壤是指风化和碎屑化了的地球陆地的表层。它的形成最初是通过岩石的物理风化和化学风化过程，并且受到大量的微生物和高等植物及动物残留物的积累和活动的影 响。物理风化过程使岩石分解为碎屑，该过程包括由于冷热交替而产生的岩石的膨胀与收缩，由于冻融交替和根系穿插所产生的应力以及被移动的冰、水和风所携带的颗粒的研磨作用。化学风化过程趋向使母岩中的原生矿物分解，包括水合、氧化还原、溶解和离解作用。通过沉淀作用的固定或者通过挥发和淋洗以及各种物理—化学交换反应，使其中的组成成分移去。这些风化过程中的分解产物常常被地表迳流、冰川或风搬运和沉积到别的地方。

在岩石和矿物原始风化过程的基础上继续着土壤的形成过程。在土壤发生过程中，物质的原有性质被次生物质（如粘土矿物）和生物的活动进一步改造。生物体的生长积累了有机物质，并产生了除原生矿物已经历的理化过程以外的一系列物理化学和生物化学反应。土壤发生过程终致形成特征的土壤剖面，这种土壤剖面将在本章的后边叙述。

### 2.2 土壤物理学的定义

在这本书里，我们将从土壤物理学的观点讨论土壤，可以把土壤物理学看作叙述土壤的物理性质，测定、预报及控制在土壤中或通过土壤所发生的物理过程的土壤学分枝。由于物理学是阐述物质和能量的形式及相互关系的科学，所以土壤物理学便是阐述土壤中物质的状态和运动以及能量的传导和转化的科学。

另一方面，土壤物理学的基本任务在于获得对支配土壤行为及其在生物圈中作用的机制的基本理解，包括这样一些相互联系的过程：如大地的能量交换以及田间水分和可移动物质的循环。此外，土壤物理学在实践方面，着重于通过灌溉、排水、土壤和水的保持、耕作、通气、土壤热量调节，以及为了工程目的的土壤材料的利用等，合理地管理好土壤。因此，土壤物理学是一门范围广泛的，既是基础的，又是实践的科学。它的很多方面与土壤学的其它分枝相交叉，并与其它学科，如地球生态学、水文学、微气候学、地质学、沉积物学、植物学、作物学相联系。土壤物理学也与土力学密切关联。土力学基本上是把土壤当作建筑和支撑材料来研究的。



## 2.3 作为三相分散体系的土壤

自然体系可能由一种或多种物质，一相或多相组成。由一种物质组成的体系，如果它的物理性质全是均一的，那么，它便是单相。完全由均一的冰组成的水体，便是其中一例。这样的体系是同相的。由单一的化学物质组成的体系也可能是多相的，如果这种物质在体系的不同部位呈现不同的性质。体系的某一范围内在物理上是均一的，便构成一个相。例如：冰水混合物在化学上是均一的，但在物理上是不均一的，因为它包括了两个相。自然界最普通的三相即是固相、液相和气相。

一个包含数种物质的体系，也可能是单相的，例如：盐、水溶液就是一种均一的液体。一个由数种物质组成的体系也可能明显地是不均一的。在一个不均一的体系中不仅在一相与另一相之间性质不同，而且在每一相的各个部分以及相与相之间的界面上也是不均一的。由于相与相之间的相互作用，在界面上便呈现出独特的现象。这些现象，包括吸附、表面张力和摩擦力的重要性，依赖于体系单位容积内表面积的大小。如果在体系中至少有一个相可被细分为众多的微小颗粒，它们共同组成很大的表面积（每单位容积），这种体系便称为分散系。溶胶、凝胶、乳胶和气溶胶都是分散系的例子。

土壤是一个不均一的、多相的、颗粒的、分散的和多孔的体系，其中每单位容积的表面积可能是很大的。土壤的分散性质和由此而产生的表面活性引起诸如水和化合物的吸附、离子交换、粘着、膨胀与收缩、分散与絮凝以及毛管现象。

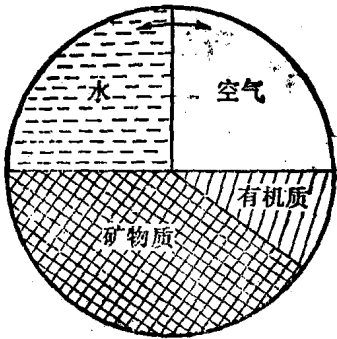


图2.1 植物生长最适条件下的中等质地土壤的组成（容积）。注意：固相物质和孔隙各占土壤容积的50%，而孔隙容积则等分为水和空气。箭头表明这些组成可能变化很大，尤其是水和空气呈负相关，一相的增加必然引起另一相的减小。

土壤中的三相，一般如下所述：固相组成土壤基质；土壤水，其中常常含有溶解物质，故应称为土壤溶液，组成土壤液相；而气相就是土壤空气。土壤的固相基质包括在化学和矿物组成以及大小、形状和方向上都不相同的颗粒。它也含有无定形的物质，尤其是粘附于矿物颗粒上并常常把它们粘结成团聚体的有机物质。土壤固相成分的结构决定着孔隙的几何性质，在这些孔隙中传导着和保持着水与空气。最后，土壤水和空气的组成不仅在时间上，而且在空间上都是变化着的。

土壤三相的相对比例是不断变化的，它依赖于诸如天气、植被和管理等因素。为给读者一些有关三相比例的一般概念，我们提供了相当简化的

的，如图2.1这样的图解，它表示一个接近植物最适生长条件的、中等质地土壤的容积组成。

## 2.4 土壤组分的容积和质量的关系

现在，让我们来讨论三相之间的容积和质量关系，并限定一些基本参数，这些参数

在表示土壤物理条件的特征上是有用的。

图2.2是一个理想土壤的图解，它表示一个代表性土壤样品三相的容积和质量。图的右边表示相的质量，相对于水和固相的质量来说，空气的质量 $M_a$ 被忽略不计了；水的质量为 $M_w$ ，固相的质量为 $M_s$ ，总质量为 $M_t$ 。这些质量也可用它们的重量来表示（质量和重力加速度的积）。它们的容积表示在图的左方：空气的容积为 $V_a$ ，水的容积为 $V_w$ ，孔隙的容积为 $V_f = V_a + V_w$ ，固相的容积为 $V_s$ ，代表性土壤的总容积为 $V_t$ 。

在该图的基础上，现在我们可以规定一些名词，它们一般地表示三个基本土壤组分的数量关系。

1. 固相密度（颗粒的平均密度） $\rho_s$

$$\rho_s = M_s / V_s \quad (2.1)$$

在大多数矿质土壤中，颗粒的平均密度约为2.6—2.7克/厘米<sup>3</sup>，即接近普遍存在于砂性土中的石英的密度。铝硅酸盐粘土矿物具有近似的密度。氧化铁及其它重矿物的存在增加 $\rho_s$ 的平均值，而有机物的存在则减小 $\rho_s$ 。有时，密度以比重来表示，它是在大气压条件下物质的密度与4℃时水的密度的比值。在公制中，由于在标准温度条件下，水的密度为1，因此比重在数值上等于密度（虽然无量纲）。

2. 干容重 $\rho_b$

$$\rho_b = M_s / V_t = M_s / (V_s + V_a + V_w) \quad (2.2)$$

干容重是干燥土壤的质量与总容积（固相和孔隙的总和）的比值。显然， $\rho_b$ 总是小于 $\rho_s$ ，并当孔隙容积为总容积的一半时， $\rho_b$ 便是 $\rho_s$ 的一半，即1.3—1.35克/厘米<sup>3</sup>。砂性土的 $\rho_b$ 可高达1.6，而在团聚化的壤土，或在粘土中，它可小到1.1克/厘米<sup>3</sup>。容重受土壤结构即土壤的疏松性或压实程度的影响，同时也受土壤膨胀与收缩性质的影响，这种性质依赖于粘粒含量和土壤湿度。然而，即使在极端压实的土壤中，容重仍然明显地低于土粒的密度，因为土粒不会完全连接在一起，土壤仍是一个多孔体，决非不可通透的。

3. 孔隙度  $f$

$$f = V_f / V_t = (V_a + V_w) / (V_s + V_a + V_w) \quad (2.3)$$

孔隙度是土壤中相对的孔隙容积指标，其值一般变化于0.3—0.6(30—60%)。质地粗的土壤比质地细的土壤具有较少的孔隙，尽管孔隙的平均直径前者大于后者。在粘性土中，随着土壤交替性地膨胀、收缩、团聚、分散、压实和龟裂，土壤的孔隙度变化很大。正如一般定义的，孔隙度一词是指孔隙的容积分数，而此值在平均意义上应等于面积孔隙度，（在一个代表性横断面上的孔隙分数），也应等于平均的线性孔隙度（是沿着通过土壤任何方向的某一直线的孔隙分数长度）。总孔隙度在任何情况下都不反映孔隙大小的分布，这种分布本身是一个重要的性质，它将在以后的部分讨论。

4. 孔隙比  $e$

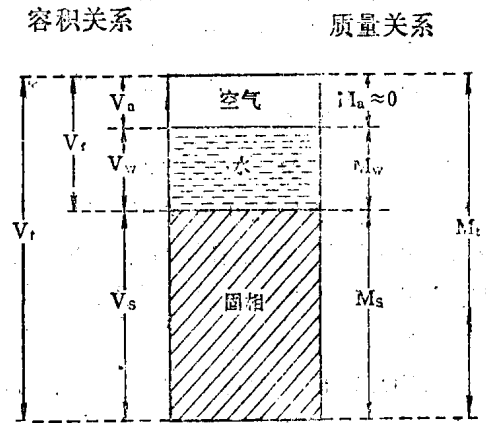


图2.2 作为三相体系土壤的图解