

# 土壤物理学

[澳] T. J. 马歇尔 J. W. 霍姆斯 著

科学出版社

# 土壤物理学

[澳] T. J. 马歇尔 著  
J. W. 霍姆斯

赵诚斋 徐松龄 译

孙 鸥 王 ~~松~~ ~~林~~ 鉴 校

科 学 出 版 社

1 9 8 6

## 内 容 简 介

本书以水分为重点,全面论述了土壤水分的保持和运行、土壤结构、土壤的变形行为和温度,并结合水、气、热三者讨论了根系环境。全书文字简练,理论性强,注意联系田间的应用。作者根据澳大利亚的经验阐述了土壤上的污水处理方法,对某些重要的研究方法,如利用同位素和其它示踪物质研究土壤水和地下水的移动等,也作了详细介绍。

本书可供从事土壤、植物和水资源的科研人员和工程技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

T. J. Marshall and J. W. Holmes

SOIL PHYSICS

Cambridge University Press, 1979

## 土 壤 物 理 学

〔澳〕 T. J. 马歇尔 J. W. 霍姆斯 著

赵诚斋 徐松龄 译

孙 鸥 王秀全 朱 鉴 校

责任编辑 洪庆文

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1986年4月第一版 开本: 787×1092 1/32

1986年4月第一次印刷 印张: 12 插页: 1

印数: 0001—2,800 字数: 275,000

统一书号: 13031·3133

本社书号: 4495·13--12

定价: 2.85元

## 前 言

本书的对象是从事土壤、植物或水资源的科学工作者以及学习土壤物理学的学生。为了让具有不同背景的土壤学家、农学家、化学家、物理学家、水文学家及土木工程师等与土壤物理学有关的人都能阅读，我们对有些人看来似乎属于常识的而对其他人可能不熟悉的土壤科学、物理学及数学等专业术语作了必要的解释。同样，本书使用的国际单位制(SI)在土壤物理学领域内尚未普遍采用，因此，我们也作了详细说明。背景的差异很可能是存在于国家之间的，而不是存在于不同专业之间。为了对不同背景的读者有所帮助，我们对书内图表也引用了非国际制单位的数据，并在附录A中列出单位和换算系数。为了简明表示流量方程，我们引用了矢量记法，在土壤物理学文献中就是常用这种方法来表示的，它并不需要具备矢量分析的专门知识。

中心课题是多孔材料中水的状态问题。在本书前几章就介绍了水分保持原理，因为这是后面大多数论题的基础。在开始章节里，我们概括地论述了土壤的物理特性，以便提供一个与水相互作用，并且水在其内移动的多孔材料性质的轮廓。与土壤行为有关的特性在阐明土壤与水分的关系之后，专门作更详细的叙述。只要有可能，我们总是设法将有关原理和田间应用联系起来。

即使浩瀚的书目提要，也不可能超越有限的早期有关的论文。书中我们注明了主要的原始资料来源。读者如需要知

道详情细节，可参阅本书列出的参考文献。

T. J. Marshall

J. W. Holmes

1978年7月

• 11 •

土壤三甲

# 目 录

## 前 言

第一章 土壤的组成	1
1.1 土壤的描述和分类	1
1.2 土壤颗粒	4
1.3 孔隙	9
1.4 含水量	12
1.5 粘土矿物	14
1.6 交换性阳离子	18
1.7 粘粒表面离子的分布	20
1.8 湿润热	22
1.9 颗粒大小分析	24
1.10 颗粒的表面积	33
第二章 土壤和水分的相互作用	36
2.1 基质与水分保持	36
2.2 土壤水分的势能	39
2.3 势的单位	44
2.4 干土中的水分	46
2.5 毛管性	51
2.6 膨胀	54
2.7 载荷对水分保持的影响	59
2.8 水分特征的滞后现象	60
第三章 含水量和水势的测定	66
3.1 含水量	66

3.2	基质势	74
3.3	基质势与渗透势的结合	82
3.4	田间测定方法的适宜性	89
第四章	土壤水分运动的原理	92
4.1	Darcy 定律	92
4.2	孔隙度和孔隙大小对流体传导的影响	96
4.3	非饱和土壤中的水流	105
4.4	导水率和土壤水分扩散率	108
4.5	非均质土壤中的水流	116
4.6	温度梯度下的水分运动	119
第五章	土壤中水分的分布	124
5.1	入渗	124
5.2	入渗后土壤水分的再分布	136
5.3	土壤排水至静止水位时的稳态入渗	141
5.4	土表蒸发期间水流向上的稳态流	145
5.5	进入层状土壤的稳态渗漏	146
5.6	入渗的测定	150
第六章	土壤和蓄水层中的地下水	154
6.1	人工排水	154
6.2	自然排水	163
6.3	竖井排水	168
6.4	非稳定态的田间排水	173
6.5	水力传导度、导水度和蓄水系数的田间测定	177
第七章	应用同位素和其它示踪元素研究土壤水和地下水	185
7.1	环境同位素	186
7.2	其它示踪水流的方法	201

7.3	关于土壤水和地下水的示踪测定技术	204
第八章	土壤结构	206
8.1	定义和图解	206
8.2	颗粒的团聚作用	207
8.3	生物团聚作用	209
8.4	物理团聚作用	212
8.5	孔隙	216
8.6	潮湿土结构的稳定性	222
8.7	土壤组成对结构稳定性的影响	225
8.8	影响结构的措施和处理	229
第九章	土壤变形	234
9.1	结持度(稠度)	234
9.2	强度	237
9.3	水分对强度的影响	241
9.4	压缩	244
9.5	牲畜和机具对土壤的压实	247
9.6	膨胀和收缩引起的变形	250
9.7	土壤破坏	252
9.8	耕作	254
9.9	土壤侵蚀	258
第十章	土壤水分管理	267
10.1	水分保持	267
10.2	灌溉	275
10.3	土壤盐渍化及其控制	278
10.4	混合置换	286
10.5	灌溉水质	290
10.6	土壤上废物的利用和处理	292
10.7	排水	294



第十一章	根的物理环境	298
11.1	导言	298
11.2	穿透阻力	299
11.3	通气性	304
11.4	土壤温度	311
第十二章	植物和土壤水	320
12.1	根对水分的吸收	320
12.2	水的有效性	325
12.3	溶质向根的移动	328
12.4	水分从植物叶片向大气的蒸散	331
12.5	区域性水分收支	340
附 录		345
A.	国际单位制 (SI) 和其它单位的某些换算 系数	345
B.	其它数据, 包括20℃时液态水的一些特性	346
C.	连续方程	347
参考文献		349

# 第一章 土壤的组成

## 1.1 土壤的描述和分类

覆盖地球陆地表面较薄的土壤覆盖物是一种性质变化很大的多孔性物质。它的固相是由岩石风化成的无机物或伴有栖居于土壤的动植物有机产物的运积物所组成。这些物质有些是石砾、砂粒和叶屑状等可加辨认的残余物质，而另一些象粘土矿物和腐殖质则是土壤形成过程中长期的有机和无机化学变化的结果。形成的土壤其质地范围可从粗砂到细粘土，而其有机质含量则可从重量百分数小于5%的一般数值到约占80%的泥炭土。

土壤的上述性质以及其它一些性质由于所处地表位置的不同和构成土壤剖面的上下层次位置的不同而有很大区别。因此，它对辨认自然界土壤物质发生的某些程序很有用处。土壤剖面（从土表到有植物根系分布的深层）就成为研究土壤分布的基础。如知一系列影响土壤发育的条件，从土壤剖面即可显示出其可预测的性状。水分下渗时将溶于水中的物质或胶体带到下层，从而生成显示出土壤剖面特征的淀积层或淋溶层。气候越湿润，淋失越强，因此，那些可在干旱地区可以积累的包括氯化物、硫酸盐和碳酸盐在内的一些矿物质在较湿润的条件下从剖面排水中移走（如图 1.1）。同样，母质的类型不同对土壤可打下各自的烙印。例如砂质土从砂岩和花岗岩比从页岩和玄武岩发育而来的可能性更大些，因此前者含有大量的砂粒般大小的石英。其次，植被的类型也

影响剖面的有机质。例如东欧和北美广大的草地，由于植物细根腐烂的结果有可能形成深厚的黑色土层。与黑钙土或黑土相反，那些在森林覆盖下发育的土壤，其有机质主要是以枯叶层覆盖在它的表面，所以原则上只有在森林地区的棕色土和灰化土的较浅的表层才有。此外，地形也影响土壤的发育。所以平地的土壤较诸受侵蚀的坡地土壤的土层更为深厚，而且，今日呈现的剖面很可能是已经发育成熟几千年之久，也可能是受近期环境变化的影响正在进行相当快速的变化，如排干的沼泽地或正在受侵蚀的山坡地就是这样。因此，时间、母质、气候、植被和地形都对土壤性质的形成起着它一部分的作用。

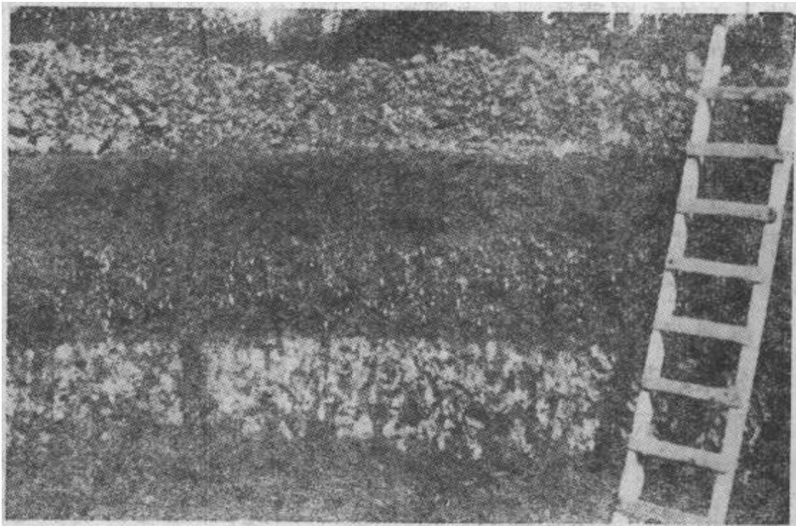


图1.1 澳大利亚伦马克半干旱地区的土壤剖面图。梯子的上两档处为土表，第四档开始为碳酸盐聚积层，第五、六横格之间为硫酸盐（石膏）层

俄罗斯学者在十九世纪就已指出，在大陆范围内出现的各种典型土壤类型的广阔土带，在地理上与气候、植被以及其它环境因素是一致的。认识这些广阔土带可推动土壤及其

分类的研究。但这种土壤分类的发生学方法实际上有它的局限性，因为对土壤起源的了解还很不完整，美国的早期土壤研究处于农场土壤详测的水平，对土壤的鉴定只利用剖面的特征，而不采用发生学分类标准，而这在当时已是一种全世界通行的土壤分类研究方法。大区概测规范与农场详测规范之间土壤分类上的脱节要通过不同分类制的不同方法来解决 (Buol, Hole, McCracken, 1973)。目前，除了联合国粮农组织与联合国教科文组织所达成的关于世界土壤图绘制基础的协议外，还没有一个被普遍接受的分类系统，即使有的话，主要也是限于国家性质的。美国农部的土壤分类系统（土壤调查规范，1975）基本上根据土壤剖面的特征而不是土壤发生学。Northcote (1974) 编纂了一种实用索引，如采用这种索引，只要根据土壤剖面的特征就能精确地把澳大利亚的土壤直接绘制成符合大区概测规范的土壤分类图。而另一方面，苏联在土壤分类方面却是更多地使用土壤发生学来区分中间型的和高度精细的类型。

土壤分布图通过使用手钻、原状取土器和挖坑后的观察，结合地表观察与空中摄影来绘制。对土壤的质地、结构、颜色和其它性状的描述于野外进行，然后在实验室对代表性土样进行测定，提出每种土壤类型各个土壤层次性状的数据。采用这种方法进行大面积土壤调查费用低廉。土壤调查报告附有这种测算结果的土壤剖面图，可用于农业、水利、民用工程、城市规划和污水处理方面。此外，土壤调查报告还包含非农用土地的数据及意见 (Simonsen, 1974)。但是，对费用浩大的道路、机场以及建筑物的工程设计必须附有更精确样品和试验的调查报告。土壤材料的分类系统较之土壤剖面更常用于以工程估算为目的的试验。某些试验我们将在后面加以阐述。

土壤图的使用者必须估计到这样一个事实，即土壤的性状从某一考察点到下一个考察点可有连续性的演变，至于图中标出的不同种类土壤边界之间发现不连续情况则必须慎重处理。土地后来的发展也可能引发新的条件变化，例如某一地区处于灌溉下就影响地下水面。所有这些变化的重要性可能超过任何原先土壤类型之间的差别。Aitchison (1973) 在对使用土壤调查资料于基础工程方面的广泛经验作出好评时，另外又指出，由于城市发展所引起几米深处土壤水分状况的变化可以严重地改变土壤调查所预期的土壤性质。

土壤物理学涉及到土壤剖面和土壤材料两方面。土壤剖面和我们有关的一个方面是植物根层深度以及其外的水分分布。土壤作为一种材料来阐述时，我们将于本章其它部分讨论它的固相和提供水及空气贮存和通道的骨架结构。

## 1.2 土壤颗粒

组成土壤骨架的单个粒子按照它们的直径是否小于 2 微米截然分为两类。粘粒部分 ( $< 2$  微米) 包括具有化学和物理活性的粘土矿物在内，它们是从岩石风化而成的或直接从迁移沉积的母质中形成的次生矿物。非粘土部分含有惰性矿物和岩石碎屑，有时为次生结核，它们可以根据体积大小进一步分成粉砂、砂和砾石，而大小的范围又因通用标准的不同而有不同。其中的三种不同分级标准在图 1.2 b 中以对数标出。颗粒大小分析的结果用累积曲线表示，见图 1.2 a。从这些图表中可以读出任何一种标准的相应大小范围之间同组颗粒的数量。更为常见的是用表示每部分土壤百分数的土粒大小分布表直接表明。土壤调查报告中的百分数以通过 2 毫米筛孔的烘干土为基础。如有超过 2 毫米的砾石则需另行分

开列入报告。土壤分析前要进行预处理，以便确保土粒为分散的单个颗粒而不是成簇的。报告中的体积大小为直径，但是，因为土粒具有各种形状，因此只是在大颗粒以筛孔大小为基础的直径，较小的颗粒以沉降速度为基础的直径，才能视为有效直径。

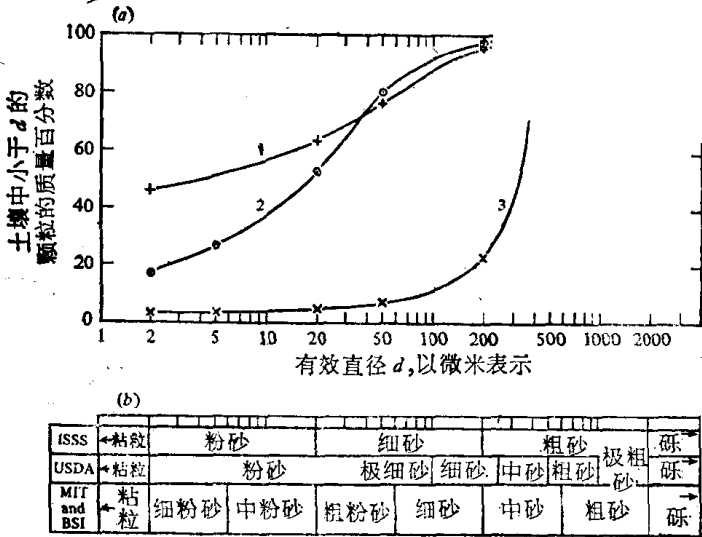


图1.2 土壤颗粒大小的分析

- (a) 粘土 (1)、粉砂壤土 (2) 和砂土 (3) 三种土壤质地的累积曲线。  
 (b) 国际土壤学会 (ISSS)、美国农业部 (USDA)、麻省理工学院 (MIT) 和英国标准研究所 (BSI) 分级制的颗粒大小范围 (f = 细, m = 中, CO = 粗, v = 极)

图1.2中三种土壤颗粒大小的分布绘成图1.3 a 中三角坐标的三个顶点, 顶点表示相应的 100% 的砂、粉砂和粘粒组。这里粉砂组和砂土组之间的大小极限为 50 微米 (美国农业部制), 但是其它三角图表也适用于极限为 20 微米系统 (Marshall, 1947) 和 60 微米系统 (Hodgson, 1974)。这些图中标出的空间表示所描述的田间土壤每种质地的典型范围。值得注意的是用“粘”、“粉砂”和“砂”这些词可以用作

粒径分组（例如这里“砂”表示砂粒级的大小），也可作为质地名称，这时“砂”的意思是指土壤为砂土质地。在田间测定土壤质地时以湿土在手指间的感觉来确定非粘土物质的粗细，并判定粘土的塑性和强度。这就为土壤问题的初步研究、土壤咨询业务和土壤调查提供了有用的定性资料。

颗粒大小的分析也可用非粘性物质的平均直径相对于粘粒含量来表示。得出的坐标图要比单独地任意划分颗粒大小（2微米的除外）所得的三角坐标图为优。质地分类如图 1.3 b 所示。使用的符号属于粘粒含量的有五级，非粘性物质的粒径有三级，如同在三角坐标图中这些质地类别组成图面的中部，每种描述田间质地的土壤（在括弧中所标明的）成群出现。粘粒含量等级的区分线并不成一条直线，因为一定粘粒含量的土壤随着它们非粘性物质的平均粒径的减少，其粘性的增加总是少一些的缘故（Marshall, 1947）。这一观察已经影响到质地三角坐标的设计要允许粉砂质土壤较之相应的砂质土壤的平均粘粒含量要高些。

当某一样品的颗粒直径分布的点落在质地坐标图上时，所定的等级不是必然与田间描述的相符。这点根据 Marshall (1947) 考察1100种澳大利亚土壤每一等级的散乱情况可资证明。同样，在Foss、Wright和Coles (1975) 所测试的美国马里兰州的600种土壤中，只有一半是相符的，如分级误差在4%的允许范围则约有三分之二是相符的。差异的产生不仅是由于田间测试的主观性，而且也是由于在具体情况下粘土矿物、交换性阳离子、有机质和胶结剂能强烈影响在田间对质地的估测。虽然一一相符不可能做到，但是质地坐标图能提供一个参考标准，有助于在大量的样品进行试验时能保证描述的可靠性。

许多国家的土壤调查中（土壤调查规范，1975；Taylor和

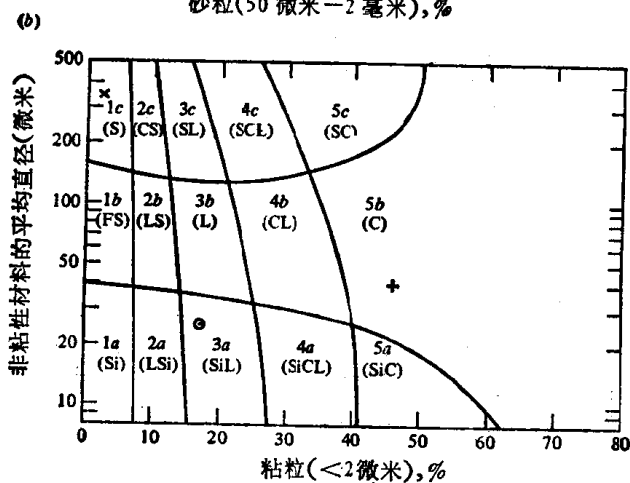
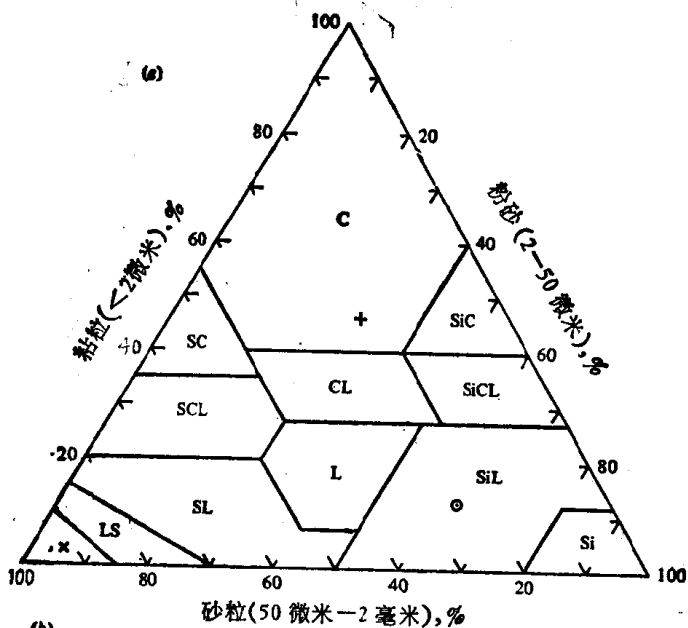


图1.3 土壤质地与土粒大小分布之间的关系图

(a) 美国农业部质地三角坐标图 (土壤调查规范, 1975)

(b) 质地图。图中  $> 2$  微米的颗粒用平均粒径表示 (Marshall, 1947)

[F=细, S=砂(质), Si=粉砂(质), C=粘(质), L=壤(质), 标出的记号点表示图1.2中的三种土壤]



Pohlen, 1962; Hodgson, 1974; Hodgson 等, 1976; 加拿大农业部, 1974), 颗粒大小的分析都以三角坐标图来确定质地作为土壤分类的依据。正如Childs和Youngs (1974)所指出的, 这一点意味着认为田间质地的描述不能与分析相配合是不正确的。如果质地分类严格按照颗粒大小的分析, 根据图1.3b中那种分类而不是用传统的描述术语(这些术语有其本身的意义并且在一般情况下与颗粒大小分析相符)来加以区分, 那末上述疑虑就不存在了。

组成土壤颗粒的矿物质反映了母质的属性和岩石的风化程度。母质的矿物成分在稳定性方面变化很大, 因此它们在土壤中的组成也变化很大。石英( $\text{SiO}_2$ )常在非粘粒部分占优势, 因为它能抵抗风化, 并且富含于某些母质中, 例如花岗岩、砂岩和表面沉积物。在原生硅酸盐矿物中, 白云母和钾长石较之其它长石类矿物或含铁镁矿物更具抗性。次生矿物含有相对可溶性物质(如石膏、方解石、白云石)和一些不溶性物质(如铁、铝和硅的氧化物和氢氧化物)。很显然, 抗性低的矿物通常只存在于风化不强烈和淋洗不强的土壤中, 或者是母质能提供较为丰富的抵抗性物质的土壤里。为了进一步获得这些有关土壤矿物学的知识, 读者可参阅Brewer的著作(1964)。

上述矿物主要存在于非粘粒部分, 但是也不限于此, 因为它的下限值为2微米是任意决定的。粘粒部分的主要矿物质是风化的次生产物, 一般称为粘土矿物。如X射线衍射图象所示, 它们均具有明显的晶体结构, 并且主要是呈片状, 见电子显微镜照片(图1.4)。此外在X射线下也可能在粘粒中发现某些非晶形物质。粘粒颗粒的大小约在5纳米以下, 是膨胀、塑性和阳离子交换等现象所在场所, 对土壤的物理性质具有深刻的影响。