

D·希勒尔著

华孟 叶和才译

土壤和水

——物理原理和过程

农业出版社

土 壤 和 水

——物理原理和过程

D. 希勒尔著

华孟 叶和才译

农 业 出 版 社

DANIFL HILLEL Soil and Water:
Physical Principles and Processes, 1971

土 壤 和 水
——物理原理和过程

D. 希勒尔著

华孟 叶和才译

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 9.875印张 235千字
1981年7月第1版 1981年7月北京第1次印刷
印数 1—6,350册

统一书号 16144·2098 定价 1.25元

序 言

土壤和水是我们自然环境以及我们农业的两项基本资源。在世界的许多地方，由于人口不断增长的压力使这些资源不足或导致对它们的滥用。因此从长远的基础上考虑，有效地节约和管理这些资源的必要性是我们时代最为生命攸关的事业之一。为此，加深和传播土壤-水系统的性质和行为与气候学条件、植物生长以及水文循环各方面关系的知识就愈来愈重要了。

本书中，著者试图说明控制土壤-水系统的物理原理，特别是构成田间水循环各过程的系列。本书是对土壤物理学和其有关学科（如植物学、生态学、农艺学、微生物学、地质学、水文学、地理学以及农业和土木工程学）的学生们和专业工作者们，提供他们需要或可能关心的基础和现代的土壤物理学说明。

本书说明的虽然是土壤物理学应用的各个方面，但说明的途径却是更多地偏于基础而不是直接功利主义的。著者相信，从长远的发展看，解决各项问题的基本途径最实际的方法是教授和应用这一学科。物理原理和过程的基本了解，将能使这个领域的工作者们在改变着的情况和未预见到的问题面前调整他们的想法。相反地，现成的解答必然是针对特定和不变的条件，因而对变化着的环境中发生的新问题很难应用。

在假定读者对于本书的主题很少或没有前期知识的情况下，著者力求使本书的论述尽可能易懂，另一方面，为了避免叙述过于简单化，也假定读者已具有基本的物理学和数学知识。对于缺

乏足够基础而感到消化材料有困难的读者和学生，以及有兴趣对进一步探讨上述知识的人们，则应参看更基础的教科书和众多的原著。我在此并不想编出一份完全无缺的参考文献目录，而是有选择地列出了著者认为能表明命题要点的参考文献。这与本书预定的性质是一致的，本书是说明性的，而不是百科全书性的。

本书是著者在以色列和美国，在不同水平上对工程师、农艺家、植物学工作者、地质学工作者和水文学工作者教授土壤物理学和土壤-水关系中个人经验的一项成果。把讲稿转化为书的最后动力产生于我在1968—1969年在威士康辛大学和1970年初在乔治亚大学作为土壤物理学访问教授侨居的时候。那时已显见一本土壤-水系统及其物理相互关系的基础的、易懂的和适度广泛的说明书籍实际上是普遍需要的。我并不期望能完全满足这一需要。没有一本由一位或甚至几位著者写成的书象是满足了这个需要。土壤物理学的范畴是太重要、太复杂和太有活力了，以致不能包蓄在任何一本书中，因为一本书必然代表一种特定的观点。

我极乐于感谢威士康辛大学的同事们在我准备本书的写作中所给予的意见和鼓励：首先是前土壤学系主任恩格尔贝尔特 (Lincoln E. Engelbert) 博士，在他的指示下我才从事这项工作。

目 录

序 言

绪论	1
----------	---

第一部分 物理原理

第一章 土壤的基础物理性质	7
A. 概述	7
B. 土壤是分散的三相体系	8
C. 土壤组成成分间的容积和质量关系	9
D. 土壤质地	15
E. 机械分析	17
F. 粘粒行为	19
G. 比表面和吸附现象	23
H. 土壤结构	27
I. 摘要	29
第二章 水的物理性质	30
A. 概述	30
B. 分子结构	30
C. 状态变化	34
D. 密度和压缩性	34
E. 水气压	35
F. 表面张力	37
G. 水表面的曲率和静水压力	39
H. 水对固体表面的接触角	41
I. 毛细作用	43
J. 固体表面上水的吸附	45

K. 渗透压	46
L. 气体的溶解度	48
M. 粘滞度	49
N. 摘要	50
第三章 土壤中水的状态	51
A. 土壤水的能量状态	51
B. 总土水势	53
C. 势概念的热力学基础	54
D. 重力势	57
E. 压力势	58
F. 渗透势	61
G. 土水势的定量表示	61
H. 土壤水分特征曲线	64
I. 滞后作用	69
J. 土壤水含量(湿度)的测定	72
K. 土水势的测定	77
L. 摘要	82
第四章 饱和土壤中的水流	83
A. 细管中的薄层流	83
B. 达西定律	86
C. 重力、压力和总水头	90
D. 垂直土柱中的水流	92
E. 混合土柱中的水流	94
F. 通量、流速和弯曲度	95
G. 导水率、透水率和流动性	96
H. 达西定律的限制	99
I. 导水率和透水率与孔隙几何的关系	101
J. 均一性和各向同性	104
K. 饱和土壤导水率的测定	104
L. 饱和流方程	105
M. 摘要	108
第五章 不饱和土壤中的水流	109
A. 概述	109

B. 不饱和流与饱和流的比较	109
C. 导水率和吸力与湿度的关系	112
D. 不饱和流的一般方程	116
E. 扩散率	117
F. 玻尔茨曼 (Boltzmann) 解	120
G. 不饱和导水率和扩散率的测定	122
H. 水气运动	125
I. 热梯度关联的水输送	127
J. 溶质的运动	128
K. 土壤通气	133
L. 摘要	135

第二部分 田间水循环

第六章 入渗—水进入土壤	139
A. 概述	139
B. 过程的描述	140
C. 入渗过程中土壤剖面的水分分布	142
D. 水平向入渗	144
E. 垂直入渗	146
F. 格林 (Green) 与阿姆特 (Ampt) 的研究途径	150
G. 渗入有间层的土壤	153
H. 对地表有结皮的土壤的入渗	155
I. 雨水入渗	161
J. 地表径流	164
K. 摘要	165
第七章 入渗后的土壤水再分布	167
A. 概述	167
B. 过程的描述	168
C. 再分布过程中的滞后现象	170
D. 再分布过程的分析	171
E. 田间持水量	175
F. 影响再分布及“田间持水量”的因素	178

G. 摘要.....	179
第八章 地下水的排水.....	181
A. 概述.....	181
B. 地下水流的现象.....	183
C. 流方程.....	185
D. 地下水位降落的分析.....	187
E. 流网、模型与模拟.....	189
F. 影响排水的因素.....	193
G. 排水设计方程.....	195
H. 摘要.....	197
第九章 裸露土壤表面上的蒸发.....	199
A. 概述.....	199
B. 物理条件.....	200
C. 地下水位处的毛管上升.....	202
D. 有地下水位情况下的稳定蒸发.....	203
E. 高地下水位导致的盐渍化危险.....	207
F. 在没有地下水位情况下的蒸发(土壤干燥).....	209
G. 非恒温蒸发.....	214
H. 蒸发与水分再分布同时进行.....	216
I. 减少土壤干燥时的水分损失.....	218
J. 摘要.....	219
第十章 植物吸收土壤水.....	221
A. 概述.....	221
B. 关于土壤水对植物的有效性的经典观念.....	223
C. 关于土壤水有效性的新概念.....	226
D. 土壤—植物—大气作为一个物理连续体统.....	228
E. 进入植物根部的水流.....	232
F. 根系吸取水分.....	238
G. 土壤湿度、水吸力与蒸腾速率之间的相互作用.....	243
H. 蒸腾与生产的关系.....	246
I. 摘要.....	247
第十一章 大田中的水量平衡与能量平衡.....	249

A. 概述	249
B. 根层的水量平衡	250
C. 水量平衡的定值	252
D. 田间的辐射交换	255
E. 总能量的平衡	257
F. 热与水汽向大气层输送	259
G. 平流	262
H. 潜在蒸散 (盆曼方程)	263
I. 摘要	265
附录 1 流方程的数值解	266
附录 2 流方程的可分变数 (玻尔茨曼) 解的数学大纲	284
参考文献	288

绪 论

土壤-水系统在自然界和人类生活中的重要性，自从文化的开端和人类觉醒到要了解与环境的关系时就被认识到了。古希腊人把土壤和水当成构成整个自然界四个原始元素中的两个。古希伯来人认为人类本身是用“阿发尔”制造出来的，并且注定要归还给它，照字义“阿发尔”就是土壤物质。今天，不减于古代，人类最终仍是把生存依赖于土壤-水系统和由它支持的植物生命。

尽管已有早期的认识，但真正的土壤物理学，做为研究土壤中物质与能的状态和转运的科学，却是非常年青的。历史上，土壤学其它分支的发展，如土壤发生学（研究土壤做为自然体的起源、发展和分类）和土壤化学（研究土壤的化学组成和过程）早于土壤物理学一个或两个世代约三十至六十年。类此，水科学或水文学的早期发展，既不是伴同着也不是基于土壤-水系统的专门研究，而土壤-水的各种相互关系却是水文循环所包括各过程的链锁中如此重要的一个环节。

自从本世纪开始以来，特别是从三十年代以来，土壤物理学建立起来了，并日益被认识到，无论做为独立的分科或做为各自然科学的汇合场地，都是普遍关心的、有活力的范畴。今天，确实，在世界上数百个地方都在进行着土壤物理学各种基础的与应用方面的研究，这些研究是与水文学、生态学、工程学和农业结合进行的。虽然取得了很大进展，使土壤物理学日益精确和定量，但是仍然大量存在着错误的理解和概念。这主要是由于这个学科本身固有的困难所致。

土壤本身就是极度复杂的。它是由无数碎散成不规则形状、和成各式各样组合与错综排列的几何图形的固体成分（矿物质的和有机质的）所组成，这个错综的几何图形几乎是复杂到无法确切说明的程度。有些固体物质是由结晶颗粒所组成，而另一些则是无定形凝胶，无定形凝胶可以包被结晶颗粒和改变它们的行为。这些附着的无定形物质可以包括铁和铝的氧化物或是有机质，有机质本身附着在土粒上，同时也把土粒联接在一起。土壤固相物质与通过土壤孔隙的流体（水和溶质、气体）相互作用。

土壤-水复合体系并不存在固定的性质或稳定平衡条件，因为它交替地干燥和湿润、饱和与反饱和、膨胀与收缩、分散和凝聚、裂开裂缝、团聚成团粒、压实，以及进行化学变化和结构重新排列。特别遵从这些变化的是胶体粘粒，它吸附水和代换性离子。

水本身是有独特和复杂行为的一种物质，经常溶解着或释放出物质，在温度、压力和溶质的影响下，常常有状态（固、液、水汽）和性质（粘滞度、表面张力等）的改变。

由于土壤在所有时间内，在各组成成分之间都表现有极其复杂的相互作用，简直是近于不可能在任何时间对它的准确物理状态给予完全的定义。因此，处理任何一项特定的土壤和条件，我们通常不得不采用容易的方法，那就是简化我们的系统，集中在对处理中的问题显示有最大和最直接作用的因素上，对那些外加复杂性的因素可以当成次要因素暂予忽略。

有许多情况，在土壤物理学中应用的理论和公式并不说明土壤本身，而是说明一种理想的和有明确定义的模型，这种模型是用来模拟土壤的。例如，在不同的时间和不同的目的下，土壤可以比做小球体的集合体，或比做一束毛细管，或比做平行的胶体小扁平体的集合体，或甚至比做一个机械的连续体。我们趋向于宏观地说明这个系统，而不是微观地；即，我们不是确定任何一

个特定的颗粒或孔隙,而是企图用各个部分的总平均表明其整体。

这些模型和陈述的价值有赖于在特定情况下它们的真实性程度,但是充其量它们只能是土壤行为的部分解释,不能再多。那些我们有选择地予以忽略的复杂情况,事实上并没有消失。一旦确定了最重要的(或“原生的”)作用,我们就会发现为了精炼我们的模型,我们现在还必须考虑次于最重要的(“次生的”)作用,如此无限类推下去。我们发展土壤知识,像其它的复杂系统一样,是由逐步的近似法取得的。

从更简单的或“更纯的”系统借用来的,过于简化的概念和理论应用到土壤,我们必须注意不要过于严格地或拘于字义地对待我们的模型。所以,土壤物理学现今的理论,应当打一定折扣,因为它们是由土壤物理学家们竭力企图用完全易错的、简化的办法(虽然是勇敢的),使他们的系统易于处理中发展出来的。然而,随科学的发展,科学的工具也就更加敏锐,同时能够处理一些以前的土壤物理学家们不得不忽略的复杂性。

在土壤物理学中使用模型,当然,不是唯一的。事实上,它是所有物理科学中一项传统的和不可缺少的工具。一个理论是物质世界的过程或结构的一种语言模型。模型企图解释事物的行为,和观察到的事件间的因果链环。

应当知道,所有的模型和理论都是观念化的,它们可能并不明显地与观察到的事物完全相符。例如,没有人看见过一个电子,但是这个概念的模型,在物理学中起着极其重要的作用。再例如,热并不真正“流动”,但是把它与流体相比论,帮助我们掌握热的行为,用熟悉的术语了解它,因而也便于我们思考。有些事物流动的视觉形象导致我们联想到梯度,联想到从较高到较低水平流动的自然趋势。这就变成有用的和与事实相符了。可是,当一个模型开始就引向错误,距离事实过远,则我们必须修订或替换它。

模型最好是用简明和洗练的数学语言表示。我们树立一个方程用以说明模型的行为。我们可以转化这个方程，用以预测模型在不同条件下会怎样行为。如此，模型不仅用来对我们已知的进行摘要，并且能预示未知的。然后，我们用试验校订我们的预示，如果它适合，我们就有了一个工作模型。因此，没有试验，理论就不能前进。相反地，没有理论的试验，就像是没有思想和没有要领的，它会使我们陷入一个永远增长的、外表上无关和随机的事实堆的泥沼中去。

我们科学中的哲学不过如此。我们真正的现今的土壤-水系统物理行为的知识，经验性的和理论性的两方面，还仍然是相当零碎和不调和的。有大量素材还存在矛盾，还有待于完整理论的发展。在说明讨论中的和未解决的问题时，著者只好凭自己的判断。这是一个相当危险的尝试，因为没有一个当事人是永远没有偏见的。为此，应当批判地阅读本书。一本公正的土壤物理学书，必须反映这一系统的复杂性，即使是对我们现今的不完整的土壤物理知识企图给予一个调谐的和逻辑的说明也应该如此。

作为土壤科学各个方面的一般背景知识和补充研究，读者可参考下列书籍：“土壤化学” (Bear, 1955); “粘粒矿物学”(Grim, 1953); “土壤的物理化学和矿物学” (Marshall, 1964); “土壤学基础” (Millar et al., 1965); “灌溉原理和实践” (Israelson 和 Hansen, 1962); “土壤保持” (Kohnke 和 Bertrand, 1959); “土壤植物关系” (Black, 1968); “土壤物理学”(Baver, 1956); “土壤的特征和性质” (Buekman 和 Brady, 1960); “土壤” 美国农业部农业年报 (1957); “水” 美国农业部农业年报 (1955); “土壤物理条件和植物生长”(Shaw 编, 1952); “土壤分析方法” (Black 编, 1965); “农业土地的灌溉”(Hagon et al., 编, 1967); 和 “农业物理学”(Rose, 1966)。

第一部分 物理原理

第一章 土壤的基础物理性质

A. 概 述

“土壤”一词是指地球陆地表面的风化的和散碎的外壳。它是开始从岩石受物理和化学的崩解和分解过程，同时受到大量生物种类的活动和累积残余物的影响而形成的。土壤可以从许多不同的观点来研究和说明，所以土壤学事实上是几个分离的但又相互联系的学科的聚结。

我们处理土壤是从土壤物理学的观点，把它当成土壤学的一个分支，研究土壤的物理性质以及说明、测定和控制土壤中发生的各项物理过程。因为物理学是从物质和能（它们的形态和转化）的研究，所以土壤物理学是从事土壤中物质的状态和运动以及能的通量和转化的研究。

研究土壤物理学的目的，一方面在于取得对土壤和其在地球表面整个地球物理学系统中的作用，以及所有与之有关的循环过程（如水循环和能交换）的基础了解；另一方面，土壤物理学在实践上的目的则在于提供利用灌溉、排水、水土保持、土壤耕作、土壤结构改良、土壤通气和土壤热量调节等做为正确土壤管理的手段，以及使用土壤做为建筑材料或做为道路与建筑物的基础。

由此可见，土壤物理学同时是基础和应用科学，有着极为广阔的关系范围，有许多是与土壤学的其它分支，以及其它各种科学如水文学、气候学、农艺学、植物学、生态学和地质学等共同