

土壤物理学基础 及其研究法

刘孝义 依艳丽 编著

东北大学出版社

前 言

土壤物理学是土壤科学的一个分支。它已有一个多世纪的发展历程，在许多学科中（诸如耕作学、作物栽培、农业物理、生态、水文地质、工程地质、土壤改良、农田水利和环境等等）都得到广泛应用。但是，由于种种原因土壤物理学的进展与许多学科相比仍有很大差距。近十年来，由于科学技术的快速发展，新兴技术的不断渗透，交叉学科的兴起，使这门传统的土壤物理学有了长足的进步。

《土壤物理学基础及其研究法》一书系作者在从事多年土壤物理学教学和科研基础上，参阅国内外有关土壤物理较新资料撰写而成；其中部分章节是反映作者近几年一些科研成果。编著此书旨在帮助读者在学习土壤物理学基础知识时，还可掌握一些有关的研究和测定方法。

本书第九章“土壤磁学及其研究法”为国家自然科学基金（批准号 49671040）和霍英东教育基金资助项目的部分内容。

此书可供土壤物理、土壤改良、生态、环境、农业气象等教学和科技工作者参考。

由于作者学识所限，错误难免，望读者批评指正，以便再版时改正。

刘孝义

于沈阳农业大学
土地与环境学院

1998年2月

目 录

第一章 绪 论.....	(1)
一、土壤物理学的定义及其主要的研究内容.....	(1)
(一) 定义.....	(1)
(二) 研究内容.....	(2)
二、土壤物理学发展史简介.....	(4)
(一) 古代农业生产中的土壤物理.....	(4)
(二) 18~19 世纪初土壤物理研究概况	(5)
(三) 近代土壤物理学的进展.....	(7)
三、建国以来我国土壤物理学进展.....	(9)
(一) 土壤结构	(10)
(二) 土壤质地	(11)
(三) 土壤水分	(12)
(四) 土壤力学性质	(13)
(五) 土壤电磁学	(13)
四、土壤物理学面临的任务	(13)
(一) 保护土壤水资源及其合理利用	(14)
(二) 土壤水分和溶质运移	(14)
(三) 土壤空气和温室效应	(14)
(四) 土壤物理性质的空间变异性	(15)
(五) 保护地农业、人工结构	(15)
(六) 土壤电磁学	(15)
(七) 土壤物理新技术和测试手段	(15)
(八) 学科间的渗透和交叉	(15)

第二章 土壤的一般物理性质 (16)

一、土壤固相、液相、气相的基本概念 (16)

二、土壤三相物质的容积和质量比 (16)

(一) 土壤比重 (17)

(二) 土壤容重 (17)

(三) 土壤湿容重 (或称总容重) (18)

(四) 土壤干比容 (18)

(五) 土壤孔隙度 (18)

三、土壤湿度 (18)

(一) 土壤重量含水量 (亦称质量含水量) (18)

(二) 土壤容积含水量 (19)

四、土壤分子—离子构造和表面现象 (20)

(一) 土壤相间表面的几何特性 (21)

(二) 土壤固相表面离子—电场和阳离子交换 (25)

(三) 土壤相间相互作用的热力学基础 (27)

(四) 气态水与土壤固相和液相界面相互作用 (29)

(五) 液态水与土壤固相界面相互关系 (38)

第三章 土壤颗粒和质地 (45)

一、一般概念 (45)

二、土壤颗粒的矿物和化学组成 (45)

(一) 原生矿物 (46)

(二) 次生矿物 (46)

三、土壤颗粒粒级 (51)

四、土壤的颗粒组成和质地分类 (54)

(一) 卡琴斯基土壤质地分类 (55)

(二) 国际制土壤质地分类 (58)

(三) 美国土壤质地分类制 (59)

五、土壤粒径分析	(61)
(一) 土粒分散处理	(61)
(二) 粒级分析原理	(62)
(三) 土壤粒径分析——吸管法	(65)
(四) 土壤粒径分析——比重计法	(74)
(五) 土壤质地分析——手摸目测法	(79)
第四章 土壤结构	(81)
一、一般概念	(81)
二、土壤结构体的种类	(81)
(一) 块状结构体和核状结构体	(81)
(二) 柱状和棱柱状结构体	(82)
(三) 片状结构体	(82)
(四) 团粒结构体	(82)
三、土壤颗粒团聚化形成条件和形成机制	(83)
(一) 粘团	(83)
(二) 土壤微团聚体	(85)
四、土壤微团聚体分析	(89)
(一) 分散系数	(90)
(二) 土壤结构系数	(91)
(三) 团聚度	(91)
(四) 抗浸系数	(91)
五、土壤结构的形成及其特性	(92)
(一) 土壤结构形成条件及其形成机制	(92)
(二) 土壤结构组成的物理特性	(97)
六、土壤结构的评价	(101)
七、土壤结构的管理	(104)
八、人工结构改良剂	(106)
九、土壤团聚体组成研究法	(109)

十、土壤容重和土壤孔隙度.....	(112)
(一) 一般概念.....	(112)
(二) 土壤容重的测定.....	(114)
(三) 土壤孔隙度的测定.....	(116)
第五章 土壤水分的保持与运动.....	(122)
一、土壤水分类型.....	(122)
二、土壤水分性质.....	(124)
(一) 吸湿水.....	(124)
(二) 毛管水.....	(125)
三、土壤含水量的测定.....	(129)
(一) 电导法.....	(130)
(二) 中子法.....	(131)
(三) γ -射线法.....	(132)
四、土壤水的能态.....	(134)
(一) 总土水势及其分势.....	(135)
(二) 土水势的单位.....	(142)
(三) 土水势的测定.....	(142)
(四) 土壤水分特征曲线.....	(148)
(五) 影响土壤水分特征曲线的主要因素.....	(149)
五、土壤水分运动.....	(153)
(一) 土壤水分运动的一般规律.....	(153)
(二) 饱和土壤水分运动.....	(155)
(三) 非饱和土壤水分运动.....	(166)
(四) 土壤气态水运动.....	(184)
(五) 土壤渗透势的测定.....	(186)
第六章 土壤水分循环.....	(190)
一、土壤水分平衡.....	(190)

(一) 渗出型.....	(191)
(二) 非淋溶型 (或封闭型)	(192)
(三) 淋溶型.....	(192)
(四) 土壤气候湿度指标.....	(192)
二、土壤蒸发.....	(194)
(一) 基本概念.....	(194)
(二) 裸露土壤毛管悬着水蒸发.....	(194)
(三) 裸露土壤毛管支持水蒸发.....	(197)
(四) 土壤总蒸发量.....	(198)
(五) 土壤蒸发的测定法.....	(201)
三、土壤渗透.....	(204)
(一) 土壤渗透几种情况.....	(205)
(二) 土壤水分再分配.....	(207)
(三) 土壤渗透的测定法.....	(209)
第七章 土壤气相.....	(214)
一、土壤通气性对农作物生长的影响以及土壤气体 在生态学中的作用.....	(214)
(一) 通气性对土壤性质的影响.....	(214)
(二) 土壤通气孔隙.....	(215)
(三) 土壤空气组成及其影响因素.....	(216)
二、土壤与大气间的气体交换.....	(217)
(一) 土壤气体的对流运动.....	(218)
(二) 土壤气体扩散运动.....	(220)
(三) 土壤呼吸及其调节.....	(222)
三、土壤气相研究法.....	(225)
(一) 土壤空气容量及通气孔隙.....	(225)
(二) 土壤通气系数测定法.....	(226)
(三) 土壤气体扩散系数 (或扩散率) 的测定.....	(228)

(四) 土壤空气组成的测定·····	(230)
第八章 土壤热状况·····	(240)
一、土壤能源和地表辐射平衡·····	(240)
(一) 辐射平衡·····	(240)
(二) 热量平衡·····	(242)
二、土壤热交换·····	(245)
(一) 土壤热容量·····	(247)
(二) 土壤导热率·····	(248)
(三) 土壤导温率·····	(250)
三、土壤热状况和土壤温度状况·····	(251)
(一) 土壤温度变化的日、年循环周期·····	(251)
(二) 土壤温度对植物生长和某些环境气体的 影响及其调节·····	(255)
四、土壤热状况的研究法·····	(260)
(一) 土壤温度的测定法·····	(260)
(二) 土壤冻结及解冻深度的测定·····	(264)
(三) 土壤热物理性质的测定·····	(265)
第九章 土壤磁学及其研究法·····	(269)
一、概论·····	(269)
(一) 土壤磁学发展简要回顾·····	(269)
(二) 土壤磁学的主要研究内容·····	(271)
二、磁学的基本知识·····	(272)
(一) 磁场、磁感应强度、磁力线·····	(273)
(二) 物质的磁化·····	(276)
(三) 岩石矿物和土壤的磁性·····	(282)
三、我国主要土壤磁化率剖面·····	(291)
(一) 红壤、黄壤类土壤磁化率剖面·····	(292)

(二) 东北地区几种主要土壤的磁化率.....	(293)
四、土壤—植物电磁处理效应.....	(304)
(一) 土壤磁处理效应.....	(305)
(二) 土壤—植物磁处理效应.....	(319)
五、土壤磁学研究法.....	(330)
(一) 采集土样及待测土样的制备.....	(330)
(二) 土壤磁化率的测定.....	(331)
(三) 土壤自然剩磁的测定.....	(335)
(四) 土壤—植物的磁处理技术.....	(337)
附 录.....	(341)
主要参考文献.....	(349)

第一章 绪 论

一、土壤物理学的定义及其主要的研究内容

土壤物理学是土壤学中研究发生在土壤中的一切物理现象或过程、物质和能量状态和交换的一个极为重要的学科分支。

(一) 定义

土壤物理和其他许多学科一样，经历着一个发展过程，即从简单到复杂，从静态到动态，从单一学科到多学科渗透等发展过程。半个世纪以来，土壤物理学的发展，从内容到定义（概念）均有较大变化。在不同的发展时期，土壤物理学有过不同的含义。

Baver, L. D (1940) 认为，土壤物理学是“研究土壤物理性质的科学”。他于1956年又提出：“……土体的机械性质称为土壤物理性质，对这些性质的研究，叫做土壤物理学”。

Качинский Н. А. (1965) 提出：研究土壤物理性质、物理过程及其定向改变是土壤学专门分支。“研究土壤物理性质和机械物理性质的综合以及目的，为农业、林业、道路建设、土壤环境和疗养建筑等的基本调节方向。”

Резут. и. Ъ (1964)：土壤物理学是“关于土壤物理条件，水、气、热状况以及紧实度和结构性的科学。”

Hillel, D (1971)：“真正的土壤物理学，作为研究土壤中物质与能量的状态和转运的科学。”“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过程”。“因为物理学是从物质和能量（他们的形态和转化）的研究，所以，土壤物理学是从土壤物质的状态和运动以及能量的通量和转化的研究”。

熊毅 (1983)：“土壤物理学在土壤学中是一门重要的基础学

科分支。它专门研究土壤固、液、气三相体系的物理现象、特性和状况,其中包括土壤颗粒、结构、水分、空气、热特性、机械物理性质,电、磁和放射性等,也在研究之列。迄今,它的研究内容仍在继续发展(引自姚贤良编著的《土壤物理学》序言,1986)。

华孟(1993):“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”。

土壤物理学的完整定义,尚需进一步探讨。笔者认为:土壤物理学乃是研究土壤中发生的一切物理现象和过程,物质(包括“场”)和能量平衡和交换,测定和调控土壤中发生的各项物理过程等的手段和方法,并为持续发展农业、水利和工程建筑以及环境科学等方面提供科学依据和技术措施。

(二) 研究内容

近20~30年来,随着科学的飞速发展,多学科渗透和交叉,土壤物理学研究范围不断扩大和加深,横向联系日趋广泛,产生了许多边缘学科(或领域)和分支。同时,由于采用各种现代化技术和测试手段,土壤物理研究工作也不断深化。

土壤物理学主要内容如图1.1(框架图)所示。土壤物理学内容应包括:土壤固相颗粒组成及其几何排列形式,土壤水分行为、溶质流,热状况、土壤空气及其与大气交换,机械力学性质,抗侵性,电、磁性质等及其变化。就其物理意义而言,土壤物理学是研究土壤中物质(固、液、气三相和“场”)和能量平衡、交换的科学。学习和研究土壤物理的目的,在于了解土壤中物理现象机理或过程的控制机制,相互作用关系以及他们对植物生长发育的影响,在生物圈和大气圈物质循环中或在生态系统中的作用。以便通过耕作、排灌、施肥、改土、水土保持、环境保护、科学管理等措施,为不断提高耕地质量、防治土壤污染,提高作物产量和质量、提高生态环境质量,为持续农业的发展提供重要参数和技术措施。

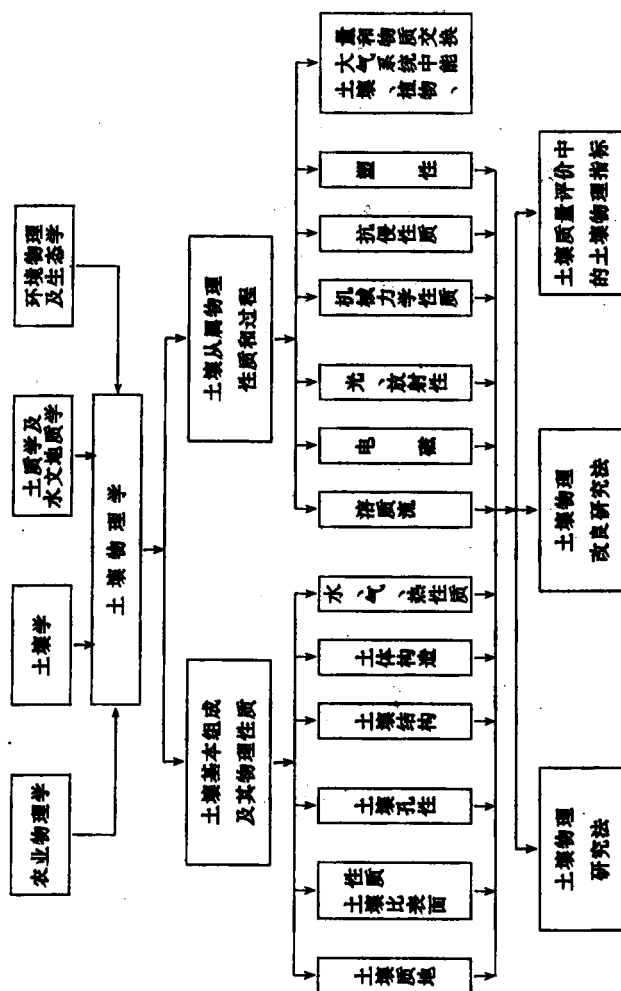


图 1.1 土壤物理学主要相关学科及其研究的主要内容框架略图

当今世界面临的人口、资源和环境三大问题，土壤（土地）是人类赖以生存的重要资源，土壤物理系资源和环境的重要组成部分。研究土壤物理的最终目的就是既要发挥土壤资源的最大生产潜力，又要保护土壤资源不受破坏。对土壤资源必须有足够的认识（从土壤物理角度）。土壤是一个极其复杂的自然体（生命和非生命），是一个经常处于变动的多孔体（其中，有液相气相、离子交换、溶质流，水热条件等等），是一个经常与大气圈、地质圈、水圈、生物圈不断发生物质和能量交换的场所，又是作物生长的物质基地。不难看出，土壤物理与农业生产、生态环境有着极为密切的关系。其研究范围一般可包括：

- (1) 土壤基本物理性质及其时空变化的研究；
- (2) 土壤流体行为，固—液、固—固、气—液—固界面的能量交换；
- (3) 研究土壤—植物—大气连续体系（Soil—plant—Atmosphere Continuum），即 SPAC 系统中物质和能量交换及其调控；
- (4) 与土壤有关的环境气体（ H_2S ， CH_4 ， SO_2 ， N_2O ， CO_2 等）产生和防治；
- (5) 与土壤质量的关系。

二、土壤物理学发展史简介

（一）古代农业生产中的土壤物理

古代传说中有许多朴素的农业科学知识，我国古籍中有关土壤物理知识，概括有：

(1) 夏禹治水时（四千多年前）按土地颜色、质地以及水分状况等性状，将全国九州的土壤划分为“壤”、“黄壤”、“白壤”、“赤埴垆”、“白坟”、“里坟”、“坟垆”、“涂泥”及“青黎”等类。

(2) 春秋战国时代（公元前 722～221 年）《管子·地员篇》记述了土壤水与植物生长的关系，如“黑植宜稻麦”，其地下水位约七尺；赤植宜大蒜与麦，其地下水约十四尺；“黄唐无宜地，

只有黍稷”，其地下水为二十一尺；“赤垆，历疆肥，五种无不宜”，其地下水为二十八尺。《吕氏春秋》将土壤划分为坚硬的“垆土”和柔软的“𦵏土”。

(3) 汉武帝时(公元前 32~7 年)《汜胜之书》记有宜耕期问题，如“春地气通，可耕硬地里垆土，辄平摩其块以生草，草生复耕之，天有小雨复耕和之，勿令有块以待时，所谓强土弱之也。”“慎无旱耕，须生草，至可耕时，有雨即耕，土相亲，苗独生，草秽烂，皆成良田，此一耕而当五也。不如此而旱耕、块硬、苗秽同孔出，不可锄治，反为败田。”

(4) 北魏时(公元 386~524 年)《齐民要术》中对耕作时期、深度和程序等都以土壤水分为依据，如：“凡耕高下田，不问春秋，必须燥𦵏得所为佳。若水，旱不调，宁燥不𦵏，燥耕虽块，一经得雨，土则分解。𦵏耕坚𦵏，二年不佳”。

(5) 近代《便民图纂》提出土壤精耕、细耙和细耪等观点。北京中山公园社稷坛的“五色土”即五方之意：北方黑土、南方红土、西方白土(盐碱土)、东方青土(渍水)、中央黄土。

古时欧洲，人们曾用挖土坑回填，以松土出地面高低，来评价土壤优劣。在美国人们常用土色评价土壤肥力，黑色为沃土，红色和黄色为中，白色土为瘦土。

(二) 18~19 世纪初土壤物理研究概况

随着生产的发展，至 19 世纪有关土壤物理的论述亦逐渐增多，诸如：

(1) 柯莫夫(俄国。1788)《论农业》，书中描述了黑钙土的结构、水、气、热等。指出结构良好的土壤，富于养分，土壤湿度为 25% (重量) 左右适于作物生长。

(2) 泰伊尔(1806)《农业的合理基础》著作中强调腐殖质在土壤结构形成和改善土壤物理性质方面的贡献。

(3) 舒伯勒(Schubler, 1833)《农业化学原理》中，首次报道了土壤物理调查资料，提及了土壤颗粒、结构、水、热、结持

度、导电性等。

(4) H. Darcy (1856) 在研究城市供水过程中, 提出著名的水分运动的达西定律, ($g = K\Delta H/L$), 达西定律至今还在被广泛地利用着。

(5) 舒马赫 (Schmacher, 1864), 首次出版了《土壤物理学》(Die physik des bodes), 提出了“毛管孔”、“非毛管孔”和“毛管持水量”的概念, 还提到了土壤物理改良问题。

(6) 乌尔内 (Wollny) 为建立土壤物理学做出了杰出的贡献, 于 1879~1898 年主编了 20 卷《农业物理学研究》杂志 (其中有土壤物理、植物和空气), 杂志收集和介绍了各国的土壤物理研究资料。

乌氏认为作物生长和施肥效果取决于土壤物理性质, 提出了排水收集器 (Lysimeter) 的测定方法。

(7) 道库恰耶夫 (DokuyueBa . B. B) 是土壤发生学派极为著名的学者, 他在《我们的草原今昔》(1892) 和《俄罗斯黑钙土》(1883) 著作中, 论述了俄罗斯的干旱及其改良措施, 建立了长期定位观测点, 他的学生 Измалтский А. А 和 Высочкий Г. Н 在土壤调查和水分研究中, 做出了非凡的工作, 较为系统地提出了土壤水分类型分类 (吸湿水、毛管水和重力水)。

(8) King 被称为“英国土壤物理之父”, 著有《农业物理学》(1899), 论述了土壤水分与耕作的关系。

(9) 勃里季斯 (Briggs, 1897, 1907) 较为系统地研究了土壤水, 并提出了“毛管水”和持水当量的概念。

(10) 白金汉 (Buckingham, 1907) 为 Briggs 实验室的同事, 他首次提出“毛管势”和毛管传导度等概念, 即所谓土壤水分“能量观点”创始人, 当时, 这种观点并未有较快的进展, 可是此种观点已被今天的土壤物理界所共识, 并有飞速的研究进展, 它已成为土壤水分术语中的“土水势” (Soil Water Potential) 概念。

(三) 近代土壤物理学的进展

本世纪 20~30 年代以来, 土壤物理学的研究有长足的进展, 许多国家建立了相应的土壤物理研究机构, 出版了众多的有关土壤物理学著作, 国际土壤学会成立了土壤物理专业委员会 (1924)。

1. 土壤结构方面

П. А. Костычев (前苏联, 1934), E. J. Russell (英国, 1935), L. D. Bayer (美国, 1948), В. Р. Вильямс (前苏联, 1939, 1951) 对土壤结构进行了系统的研究, 威氏建立了团粒结构学说, 并形成了一套草田轮作制的耕作制度。Н. А. Качинский (1930, 1947), У. Н. Антипов-Каратаев (1930, 1948) 等前苏联许多学者对土壤结构形成机制方面进行了卓有成效的工作。

2. 土壤水分方面

土壤水分在土壤物理研究中是比较活跃的领域。许多国家对土壤水分的研究都十分关注, 历届国际土壤学会土壤物理专业委员会学术论文中有关水分的研究报告居多 (约占 60%~70%)。30~60 年代著名的土壤水分科学家有 А. Ф. Лавренко (1936, 专著: 《Поперечные Грунтовые воды》), А. А. Поге (1937, 1947, 1952, 1956, 专著有: 《Поперечная влага》), Н. А. Качинский (1947, 1950), М. М. Абрамова (1953, 1956) 等前苏联学者在土壤水分分类, 保持和运动做了大量研究工作, 取得了显著的研究成果, 尤其是 А. А. Поге 的专著《土壤水分》已被土壤学者、农业生态和农业气象学者所关注。N. A. Gardner (1920), L. A. Richards (1922, 1944), H. L. Penman (1952, 1953, 1954) 也在土壤水分保持和运行及数学模型等方面做出了卓有成效的研究工作。

3. 土壤—植物—大气连续体的建立和发展

自 1966 年 Philip 提出土壤—植物—大气连续体系 (简称

SPAC) 以来, 土壤物理的研究, 尤其是土壤水分行为的研究有了新的起色, 将孤立的研究土壤水分, 视为土壤—植物—大气系统中水分的流动, 即是一个物理的连续的动态过程。(包括能流和物流)。随后, 又引进系统和生态学的理论和方法研究土壤中所存在的物理现象及其变化规律。许多国家 (尤其是西欧) 土壤物理学者相继开展了数学模型的研究, 发表了众多的水分运动有关的数学模型论文。关于土壤物理中的数学模型研究中也有不同的看法, 如 D. R. Nielsen (美国, 1982) 在印度新法里召开的第 12 届国际土壤学会土壤物理专业委员会上发言提出: “我从事多年数学模型研究, 发表了许多论文, 但至今难以解决实际生产问题。因为土壤是一个十分复杂的自然体, 时空变异甚大, 与其说建立数学模型, 还不如‘拿试管’到田间解决些实际问题。(笑声)”。

诚言, 土壤物理学的发展仍然较为落后, 但是, 近年来, 由于土壤物理学不断采用最新科学成果, 出现了不少新的生长点和边缘领域。深信, 与许多科学领域一样, 土壤物理也必将成为“自然科学的汇合场”和“富有巨大生命力的学科”之一。

4. 土壤物理学专著

从土壤物理学专著出版情况, 亦可大致看到土壤物理学学科的发展过程。30—50 年代土壤物理学著作较少, 其代表作有: Keen. B. A (1931) 《the physical properties of soil》; Baver. L. D (1940) 《soil physics》, 随后, Baver 又与 Gardner. W. H, Gardner. W. R (1972) 和着出版了 (第 4 版) 《土壤物理学》; П. В. Вершинин 等 (1959) 《Основы агрофизики》。到 60 年代, 尤其是 80 年代以后, 土壤物理学的出版数量大增, 其代表著有: Marshall. T. J, Holmes. I. W (1979) 《Soil physics》; Hillel. D (1980 a) 《Applications to soil physics》; Hillel. D (1980 b) 《Fundamentals of soil physics》; Hillel. D. (1982) 《Introduction of soil physics》(1988 年尉庆丰等中译本《土壤物理学