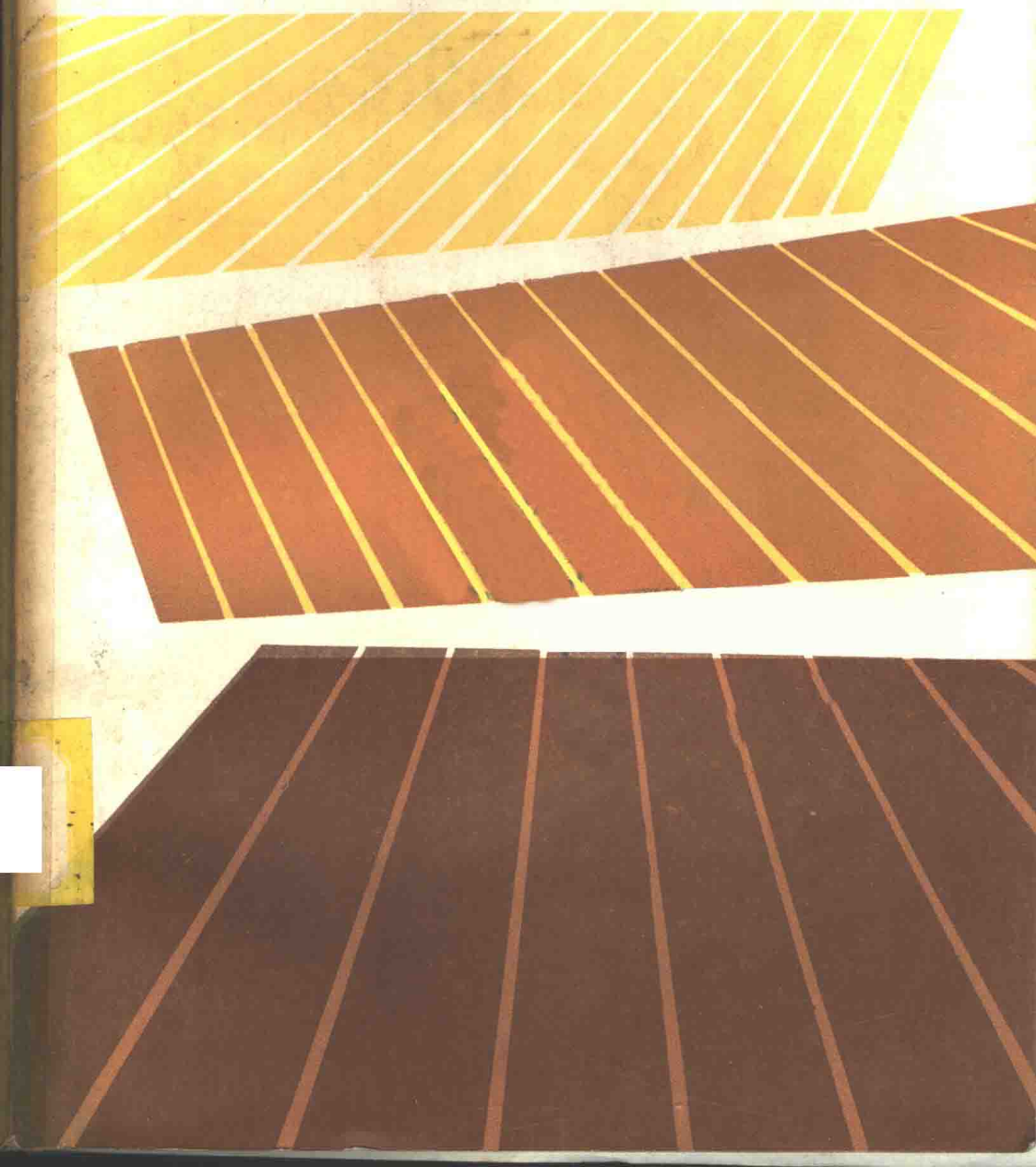


土壤物理学

姚贤良 程云生等编著 农业出版社



土 壤 物 理 学

姚贤良 程云生等编著

农 业 出 版 社

主编 **能毅**

土壤物理学

姚贤良 程云生等编著

* * *

责任编辑 阎京萌

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 17印张 439千字
1986年12月第1版 1986年12月北京第1次印刷
印数 1--2,600册

统一书号 13144·289 定价 3.55元

前 言

本书是在中国科学院南京土壤研究所所长熊毅教授的直接指导下进行编写的。全书较为系统地阐述了土壤固相、液相和气相的物理性质及其相互关系以及土壤的热量状况；介绍了这些性质对植物生长的影响及其科学管理措施。固相部分的物理性质占六章，即第一章，土壤颗粒和质地；第二章，土壤结构的发生和分类；第三章，土壤结构的评价和管理；第四章，土-水系统的物理性质；第五章，土壤变形和耕作及第六章土壤的磁性。液相物理性质占四章，即第七章，土壤水分的保持和运动；第八章，田间土壤水分循环；第九章，裸露土壤的蒸发和第十章土壤水分和植物吸水的关系。气相物理性质即第十一章，土壤空气。最后一章为土壤热量状况。在各章中，既介绍了有关土壤物理学的基本理论，应用范围，主要性质的测定原理，又列举了不少我国土壤物理工作者的研究资料，有助于读者了解土壤物理学各研究领域的现状和发展趋势，以及土壤物理学在我国国民经济建设中的重要作用。

本书不是一般教科书，也不是专题论文集，而是较为系统地介绍土壤物理学的基本原理及其在农业生产中应用的参考书籍，可供土壤、农学和水利等方面的科研、教学和生产工作者参考。

编著者

一九八三年六月

序 言

一

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、热学特性、机械物理性质、电、磁和放射性等，及其相互间的关系。土壤物理性质对植物生长发育的影响等，也在研究之列。迄今，它的研究内容仍在继续发展。土壤物理学中的水、热、气等物质与能量的转移和运动已成为自然界物质与能量循环中的一个重要部分。随着近代数学和物理学的渗透和遥感、同位素及电子计算机的应用，土壤物理学的发展更为迅速，并在农业、水利、环境、土木等多方面都得到广泛应用。

当前，由于世界人口和消费的日益增长，人类对土地资源的需求与日俱增，人类破坏土地及占用或污染良田的情况日益严重，因而增加粮食产量的任务更为迫切和重要。要解决这个严重的问题，不论是继续扩大耕地，改良低产土壤，或广泛推行集约农作制培育地力，都需要进行土壤物理学的研究。

二

我国农业历史悠久，关于土壤物理学方面的成就和经验历代农书中早就有纯朴而生动的记载。早在四千多年前，夏禹治水时就按土地颜色、质地以及水分状况等特征，把全国九州的土地划分为“壤”、“黄壤”、“白壤”、“赤埴垆”、“白坟”、“黑坟”、“坟垆”、“涂泥”及“青黎”等矣。春秋战国时代（公元前722—221年）《管子·地员篇》记述了不同土壤的地下水位与作物生长的关系，如“黑埴宜稻

麦，”其地下水位约七尺；“赤埴宜大蒜与麦，”其地下水约十四尺；“黄唐无宜也，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。关于结构方面，《吕氏春秋》将土壤分成坚硬的“垆土”和柔软的“鞞土”。

汉代武帝时（公元前32—7年）《汜胜之书》记有适时耕作的问题。如“春地气通，可耕坚硬地黑垆土，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。”北魏（公元386—524年）《齐民要术》中对耕地的时期、程序、深度和方向等都以土壤水分含量为标志。书中有云，“凡耕高下田，不问春秋，必须燥湿得所为佳。若水，旱不润，宁燥不湿，燥耕虽块，一经得雨，土则分解。湿耕坚砾，二年不佳。”

元、明、清时代强调精耕细作，改良土壤，发展绿肥，培养地力。《王祯农书》倡导“垦耕”、“耙劳”、“锄治”、“灌排”、“施肥”等以改土培肥。《便民图纂》提出土壤精耕、细耙和细耘等论点。《沈氏农书》指出“种田总不出粪多力勤四字”，并对水稻水浆管理提出“立秋边，或扬干，或耘干，必要田干裂缝方好”，“惟此一干，则根脉深远，苗干苍老，结莠成实”。以上这些历史记载都是古代劳动人民通过当时农业生产实践所取得的土壤物理性质方面的经验。

本世纪三十年代初期，我国有少数土壤学者开展了土壤颗粒分析，质地分类，铜盒试验和土壤结持性等研究，但工作不多。直至五十年代新中国建立以后，土壤物理学研究才得到发展。

五十年代初，为国民经济发展的第一个五年计划作准备，开展了荒地勘察，黄河中游水土流失防治，进行了华北平原灌区的流域规划以及长江流域规划调查。在这些工作中结合开展土壤物理性质的研究工作，例如东北地区黑土开垦后团粒结构的变化，黄土区有关土壤侵蚀的物理特性的分析，华北平原中含盐水分的毛细管运行

的研究，为土壤物理性质研究起了积极的推动作用。

1958年全国第一次土壤普查推动了土壤物理学的大发展，各地相应地建立了土壤物理专业研究机构，并广泛开展了研究。在东北黑土、风砂土、西北黄土高原建立了定位半定位试验站以研究这些地区土壤水分的变化规律，为科学预报墒情、提高水分利用率作出了贡献。在南方结合橡胶产量与土壤含水量的关系，红壤改良与土壤结构改善的关系，使研究工作获得了大量的科学资料。太湖地区高产水稻土物理性质的研究，明确了要得到稻麦双丰收，水稻土物理性质的改善以及水气的协调和管理是不可缺少的关键。

七十年代以来，我国土壤物理研究有了明显的进展。1977年由中国科学院土壤研究所主持，召开了第一届全国土壤物理专业会议，有20个省、市、自治区的90多位代表参加。在会上广泛地进行了学术交流，对推动土壤物理学研究起了重要作用。1979年由中国土壤学会举办了“土壤水分能量概念及其应用”的培训班，对推动这一领域的研究起了积极有效的作用。1980年中国土壤学会第四次全国代表大会暨年会上正式成立了土壤物理专业组。1982年又举行了来自20个省、市、自治区88位代表参加的第二次全国土壤物理专业会议。主要交流了应用能量概念研究土壤水分的保持和运行方面的研究成果，并相应地建立了研究土壤物理性质的测试技术和装备。这标志着我国土壤物理学的研究已进入一个新阶段。

三

土壤水分是土壤物理学研究中比较活跃的领域。我国东北的黑土、白浆土，西北的塬土，华北的浅色草甸土以及南方的砖红壤水分状况的动态研究表明，土壤水分状况虽与气候的干湿有一定的联系，但并不完全吻合。如冻层明显的东北地区，春季气候干旱，但土壤水分状况却是一年中湿的时期；至春末夏初，气候进入湿季，而土壤水分含量却日趋下降，达到一年中的最低值。这种不一致性对调节作物用水以及合理安排作物布局都有极其重要的参考意义。

各类土壤中的有效水范围与质地、结构、矿物类型和有机质含量都有密切的关系。有效水范围(0.3—15巴)内的水分对植物吸收不是等效的,随着吸力的增加,土壤的比水容量($d\theta/ds$)不断下降,同时毛管传导度也急剧降低,这对植物都会产生影响。

热带砖红壤的持水特性与其它土壤不同。发育于玄武岩风化物上的砖红壤其粘粒含量虽高达60%以上,但因水稳性微团聚体的含量亦高,所以它的持水性很强,而供水性却类似砂土。因此,在湿热带的砖红壤地区经常会出现干旱的威胁。

华北平原土壤水盐运行的研究结果,充分证明土壤中水盐移动和积盐主要与毛管水活动有关。而毛管水的运行又受质地和结构的影响。粘土中的毛管水上升速度缓慢,如土壤剖面中有厚度大于30厘米的粘土层时,则还会出现毛管上升水流中断现象。所以粘土地表不积盐的地下水临界深度较浅。砂土中毛管水上升速度虽快,但高度低,因此地下水临界深度与粘土相近或略大,表层也不易积盐。壤土中毛管水上升的速度快且高度高,因而临界深度较深,易遭盐害。良好结构的土壤,由于通气孔隙的存在,表层易形成自然幕,因而可以抑制盐分向表土集中。

珠江三角洲和大湖地区是我国著名的高产区。为了进一步提高产量,复种指数逐渐提高,合理的水分管理已成为当前十分重要而迫切的任务。太湖地区自七十年代以来,实行大面积改稻麦两熟制为双季稻三熟制之后,由于土壤集约耕作,淹水时间较原来延长了一个半月左右,加之季节过紧,难以实现干耕晒垡等措施,烂耕烂耙次数增多,土壤结构易遭破坏,通气透水性能下降,土壤粘闭,持水能力增强。这不仅使旱作易受渍害,而且使水稻排水烤田效果减弱,很不利于高产。广东、江苏、浙江、上海郊区的研究表明,采用各种形式的排水设施(包括暗管、鼠洞、暗沟、线沟等),是解决上述问题的重要途径。种植水稻地区的农田排灌体系,应从地上向地下转移,这不仅节约劳力和能源,提高土地利用效率,还可为发展农业机械化、培肥土壤、建设高产稳产农田准备条件。据在太湖地区的研究结果,暗管的埋设深度和间距应因土而异,粘土要深些、

窄些，而壤土可浅些、宽些。

土壤结构是土壤肥力的重要基础。东北黑土，西北灰钙土、垆土，华东滨海盐土，华北潮土以及华中华南红壤中10—0.25毫米的水稳性团聚体是可以反映土壤肥力状况的，至于砂质土或砂壤中，上述粒级团聚体的含量往往与有机质多少呈正相关。但对某些粘质土壤，如第四纪红色粘土侵蚀面上的红壤和下蜀黄土侵蚀面上的黄棕壤，10—0.25毫米水稳性团聚体的含量往往不能反映土壤的肥力水平，而必须补充孔隙性及胶结物质等的研究资料。

南方砖红壤、赤红壤及红壤的结构性与一般土壤不同，粘质红壤的粘粒含量虽高达60%，但因含有较多的氧化铁铝和高岭石，粘粒的活度（塑性指数/粘粒含量）低，因而形成水稳性较高的微团聚体（1—0.01毫米），含量可高达90%以上。因此，粘质红壤的水分和力学等性质不同于一般粘质土壤，而类似砂质土壤。一旦结构被破坏，极易造成水土流失，因此，在管理上应尽量考虑保持土壤结构。

分布较广的水稻土，其结构性如何，是人们所关心的一个问题。土壤淹水植稻期间的结构特征与旱作土壤不同，土壤微团聚体的组成比大团聚体更为重要。良好结构的水稻土含粗微团聚体（直径1—0.01毫米）的数量相对较多，这对调节水气矛盾，协调养分保肥都有重要意义。

应用磨片技术来研究土壤微结构形态，在一定程度上能直观反映微团聚体的大小、形状和孔隙的分布情况，但由于镜检视野较小，要全面观测土壤结构形态仍有一定的局限性。

不良的土壤结构通过合理轮作、适时耕作、施用有机肥料、秸秆还田以及施用人工合成改良剂等途径进行改善，都能获得良好的效果。

众所周知，耕作机具的设计以及耕作质量的评价离不开土壤的力学参数。五十年代末期，在全国范围内曾广泛开展深耕改土试验，结果是适当深耕结合施用有机肥料，可起到改土增产的作用。近年来，各地都在摸索免耕或少耕的改土增产的适用条件。其中有许多问

题，如免耕的土壤条件、合宜的茬口、施肥技术以及防治杂草等尚需深入研究。

土壤颗粒组成和质地分类是土壤物理学研究的一项最基本的工作。早在三十年代已有这方面的论述，以后又提出了一个以美国分类制为基础的我国土壤颗粒分级制。五十年代曾对颗粒分析方法进行了系统的研究，提出了分散剂的选用应视土壤酸碱度而异；对石灰性土壤宜用偏磷酸钠，中性土用草酸铵和酸性土用氢氧化钠。

七十年代末，根据大量分析结果，结合我国具体情况并参照国外分级系统，拟订了我国土壤颗粒分级标准及质地分类系统。土粒分级标准与苏联卡庆斯基分级制相比，主要不同点在于把细粉粒（0.005—0.001毫米）改为粗粘粒。这是因为，该级颗粒已具有较明显的膨胀、流塑及持水性等胶体特性。质地分类结合土壤地带性分布特征并结合群众术语，以砂粒（1—0.05毫米），粗粉粒（0.05—0.01毫米）和粘粒（<0.001毫米）为基础，按其不同比例拟出三组十一种质地名称，编制了1/1400万的全国土壤质地图，并阐明了全国土壤颗粒分布有从西到东、从北到南逐渐变细的规律。

近年来，土壤磁学性质的研究已引起注意，特别在土壤磁化率以及利用磁化水进行灌溉等研究方面已有不少报道。研究表明，土壤磁化率能反映土壤的成土过程及土壤利用改良过程中某些特性的变化，从而有可能利用这一性质为土壤发生分类、制图以及土壤改良服务。应用磁化水灌溉洗盐和增产的效果已较明显，但其作用机理尚不甚清楚。应用直流电改良盐碱土的小区试验已获成功。

土壤热学性质的研究，除气象部门进行了一些土壤及近地层温度变化的观测以及农田小气候变化对作物生长的影响外，其他研究很少。

四

近十多年来，国际间土壤物理学的进展较快。美国和澳大利亚等国在土壤水分管理方面的研究，西欧诸国在土壤结构和耕作等方面

的研究都已取得了重要的结果,而且已在生产中发挥了应有的作用,作出了贡献。相比之下,我国的土壤物理研究,不论基础的还是应用的,不论在广度还是在深度上都进行得不多、不系统。大量与工农业生产密切联系的土壤物理工作未引起足够的重视,而开创性的工作基本上还是空白。就以五十年代末期和近几年来开展的两次全国土壤普查的工作来说,配合调查而进行的化验工作多局限于土壤化学方面,对土壤物理性质的测验重视不够。我在北方曾碰见一个土壤普查化验的人,他告诉我那个地方缺雨,施硝酸铵也不起作用,可是他并不查土壤墒情却在田里化验硝酸态氮,这有什么用?我举这个例说明土壤物理测定没有受到人们的重视。对此,我们应当广作宣传。

许多国家为了检验某一地区的耕作、轮作制度能否获得最大的改土效果和经济效益,都设有长期的试验基地,而我国在这方面的投资甚少,资料也不多,很难拿出系统的资料和结果来。至于开创性的工作,诸如土壤—植物—大气中的水分运动以及应用资源卫星和电子计算机来检测预报土壤水分等富于战略性的研究工作仍属空白。我国主要土壤类型如红壤、水稻土、盐渍土等的基本物理性质的研究也很不系统。这些研究工作无论对发展我国土壤物理学,还是解决工农业生产中出现的一些问题,都是不可缺少的重要内容。

我国土壤物理学比较落后,其原因很多,但人们对这一学科分支的重要性认识不足,重视不够,是阻碍其发展的主要原因,当然土壤物理学研究的困难也是人所共知的。土壤物理性质的研究宜保持原状和原位,而土壤的不均一性又给测试技术带来许多困难。另外,土壤物理性质测试仪器装备,现成的很少,需要特制和改建。测试技术又难于掌握,需要专门训练,尽管是一些普通简单的测定技术,也不是容易掌握的。我国土壤物理学的起步较晚,从事这项工作的科技人员为数较少,再加上重视不够,所以多年来进展不快。但从几次土壤物理专业会议的召开情况,我看土壤物理学界不乏有识之士,前途大有希望。

中国科学院南京土壤研究所的土壤物理研究室在六十年代初期

已汇集相当数量的工作人员，文革以后人员陆续分散，这几年来虽然人员日少，但是他们仍坚持努力工作，部分同志根据多年的研究资料，参照国际某些新版的土壤物理学专著和专题参考文献编辑成《土壤物理学》一书。它既不是教科书，又不是论文集，而是为从事农业、水利、土木工程等科技、教学和生产工作者提供一本有关土壤物理学基础知识的参考书。这本书的出版，既体现我国土壤物理学家不懈的努力，又可以推动我国土壤物理学的发展。我深信土壤物理学界大出成果，多出人材，将在四化建设中起到重要的作用。

熊毅

一九八三年

目 录

序 言

第一章 土壤颗粒和质地	1
一、土壤颗粒的概念	1
二、土壤颗粒的特性	1
(一) 土壤颗粒的表面积和表面性质	2
(二) 土壤颗粒的矿物及化学组成	8
(三) 土壤颗粒的物理性质	14
(四) 我国土壤颗粒的分布特点	19
三、土壤颗粒分析的原理	20
(一) 土壤的分散	20
(二) 土壤颗粒分析	22
四、土壤颗粒的分级及质地分类	25
(一) 土壤颗粒的分级	25
(二) 土壤质地分类	28
五、土壤质地与土壤肥力的关系及其调节	37
(一) 土壤质地和土壤肥力的关系	37
(二) 土壤质地剖面与肥力的关系	38
(三) 不同质地土壤的合理利用和调节	39
第二章 土壤结构的发生和分类	48
一、土壤结构的概念	48
二、土壤结构的发生	49
(一) 土壤的团聚性	50
(二) 土块崩解	58
(三) 稳定性土壤团聚体的形成机制	64
三、土壤结构的分类	75
(一) 按结构体形态分类	77

(二) 按不同起源的土壤结构分类	78
(三) 按微形态特征分类	80
第三章 土壤结构的评价及管理	84
一、土壤结构的评价	84
(一) 土壤结构的田间形态评价	85
(二) 团聚体数量指标评价	86
(三) 土壤孔隙性的评价	90
二、土壤结构的肥力意义	99
(一) 土壤结构和土壤溶质	100
(二) 土壤结构和土壤水分	103
(三) 土壤结构和根系生长	105
三、土壤结构的管理	109
(一) 合理耕作	109
(二) 合理轮作	113
(三) 增施有机肥料	117
(四) 人工结构改良剂的应用	118
第四章 土-水系统的物理性质	126
一、土壤和水的相互作用	126
二、土壤粘度	129
(一) 粘度的概念	129
(二) 粘度测定的原理	131
(三) 影响泥浆粘度的基本因素	133
三、土壤膨胀	134
(一) 粘土晶架结构和膨胀	134
(二) 粘土膨胀的理论	136
(三) 膨胀的研究方法	141
(四) 影响土壤膨胀的因素	145
四、土壤粘附和粘结性(内聚力)	147
(一) 表面张力和水的能量效应	147
(二) 土壤粘附性(粘着性)	151
(三) 土壤粘结性	156
五、土壤收缩	162
(一) 收缩阶段	162

(二) 土壤膨胀和收缩的滞后现象	163
(三) 土块收缩的测定	165
六、土壤可塑性	165
(一) 可塑性发生的原理	166
(二) 流限和塑性限的测定	167
(三) 影响塑性界限的因素	171
(四) 塑性界限的意义	175
七、土壤结持度(稠度)和土壤的管理准则	179
第五章 土壤变形和耕作	187
一、土壤应力与应变	187
(一) 土壤应力	187
(二) 土壤应变	190
(三) 应力-应变关系	192
二、土壤强度	195
(一) 剪强度	195
(二) 土壤坚实度(硬度)	202
(三) 承压强度	207
三、土壤的流变特性	208
(一) 流变概念	209
(二) 流变模型	211
(三) 土壤的结构和流变特性	213
四、土壤耕作	215
(一) 耕作的概念和问题	215
(二) 耕作力学	217
(三) 作业和碎土	222
(四) 土壤的粘附和调节	224
五、农业土壤的压实	227
(一) 土壤压实和物理特性	228
(二) 土壤压实的原因	229
(三) 土壤对压力和变形的反应	232
(四) 土壤压实的防止和调节	241
第六章 土壤的磁性	249
一、土壤矿物的磁性	250

(一) 物质的磁性	250
(二) 土壤矿物的磁性结构	253
(三) 土壤矿物的磁化率	254
(四) 土壤氧化铁矿物的磁性	255
二、土壤磁性的影响因素和变化规律	257
(一) 岩石和成土母质	257
(二) 土壤水分状况	259
(三) 土壤有机质	260
(四) 土壤颗粒组成	262
(五) 风化和成土过程中磁性的消长	266
三、我国土壤的磁性	267
(一) 富铝土(红壤)纲土壤的磁化率剖面	268
(二) 淋溶土纲土壤的磁化率剖面	271
(三) 半淋溶土纲土壤的磁化率剖面	272
(四) 钙成土纲和石膏-盐层土纲土壤的磁化率剖面	273
(五) 水稻土及其起源土壤的磁化率剖面	273
四、土壤物理性质的磁法改良	277
(一) 磁扬处理土壤	277
(二) 土壤磁性改良剂的应用	279
第七章 土壤水分的保持与运动	284
一、土水关系	285
毛细管模型	285
二、土壤含水量	287
(一) 表示方法	287
(二) 含水量测定	289
三、土壤水的能量状态	290
(一) 压力势, Ψ ,	292
(二) 基质势, Ψ_m ,	292
(三) 溶质势, Ψ_s ,	293
(四) 水势, Ψ_w ,	293
(五) 重力势, Ψ_g ,	294
(六) 总势, Ψ_t ,	295
* 势的合并	295

(八) 单位	296
(九) 一个平衡系统的总势	297
(十) 水分特征曲线	298
(十一) 滞后现象	301
(十二) 温度对水势的影响	302
(十三) 水势测定	303
四、土壤水运动	307
(一) 饱和土壤水运动	308
(二) 非饱和土壤水运动	311
(三) 瞬态流方程	314
(四) 扩散方程	315
(五) 参数测定	317
(六) 土壤水流动第二定律	321
(七) 水汽运动	322
第八章 田间土壤水分循环	326
一、土壤水分渗透	326
(一) 渗透过程中土壤水分的分布	327
(二) 湿润锋	327
(三) 土壤渗透速率、土壤入渗量	332
(四) 几种不同情况下的渗透和渗透方程	334
(五) 地表径流	345
二、土壤水分的再分配	345
(一) 再分配过程中剖面含水量的变化	346
(二) 滞后作用对再分配过程中剖面含水量的影响	348
(三) 再分配过程中湿润锋的移动	349
(四) 影响再分配的因子	350
(五) 田间持水量	350
三、农田排水	353
(一) 农田水分过多对土壤和作物的影响	353
(二) 农田排水的任务与排水原则	355
(三) 排水和水分再分配	357
(四) 地面排水	358
(五) 地下排水	360