



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

土壤物理学

邵明安 王全九 黄明斌 著

Soil Physics



高等教育出版社
Higher Education Press



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

土壤物理学

■ 邵明安 王全九 黄明斌 著

Soil Physics



高等教育出版社
Higher Education Press

图书在版编目(CIP)数据

土壤物理学/邵明安,王全九,黄明斌著. —北京:
高等教育出版社,2006.11
ISBN 7-04-020489-4

I. 土... II. ①邵...②王...③黄... III. 土壤物
理学 IV. S152

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第119146号

策划编辑 陈正雄 责任编辑 张海雁 封面设计 王凌波 责任绘图 尹莉
版式设计 王莹 责任校对 刘莉 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京汇林印务有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2006年11月第1版
印 张	21.75	印 次	2006年11月第1次印刷
字 数	410 000	定 价	34.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20489-00

内 容 简 介

本书除前言和附录外,共分9章。第1章为土壤基质和质地,主要包括土壤颗粒的概念和特性、土壤质地和土壤结构;第2章至第4章为土壤水分保持和运动的基本概念、原理、方程以及田间土壤水分平衡;第5章为土壤热量状况,主要介绍土壤中的热量平衡以及传递过程和模型;第6章为土壤空气,主要介绍土壤中气体的组成、运动机制和模型;第7章为土壤溶质迁移,主要介绍了土壤溶质的质量平衡、迁移机制与模型及其田间管理;第8章为土壤的空间变异性,主要介绍土壤物理特性的空间变异性及时间稳定性,可为田间土壤物理过程的模拟和精准农业的实施提供相关依据;第9章为植物根系吸收土壤水分与土壤水分有效性,主要介绍植物根系吸收土壤水分的过程、影响因素和模型以及土壤水分有效性的动态概念;为了帮助一些研究生较好地理解有关模型,本书还增加了土壤物理学的常用数学方法作为附录,主要介绍矢量分析和积分变换;多数章节(含附录)均有例题,以帮助选修这门课的研究生更好地掌握所学内容。本书的重点是土壤中的水、热、溶质等物质运动和能量转换,这些重点内容也是土壤物理学与其他相关学科和领域的重要结合点;本书的特点在于强化土壤学与物理学和数学等基础学科的深入交叉,以及土壤物理学在农业、生态和环境等领域的应用。

本书可作为农业、水利、生态、地理、水土保持、环境保护、土木工程和环境医学类专业研究生的教科书,也可供有关科技人员参考。

中国科学院研究生院教材编审委员会

主 任：白春礼

顾 问：余翔林

副 主 任：马石庄(常务) 刘志鹏 韩兴国 苏 刚

委 员(按姓氏笔画排列)：

石耀霖 刘嘉麒 杨 乐 李伯聪 李 佩 李家春

吴 向 汪尔康 汪寿阳 张文芝 张增顺 徐至展

黄荣辉 黄 钧 阎保平 彭家贵 裴 钢 谭铁牛

地学学科编审组

主 编：黄荣辉

副 主 编：石耀霖

编 委：白世伟 许厚泽 刘昌明 刘嘉麒 施 平 陈述彭

周蕙兰 滕吉文

总序

在中国科学院研究生院和高等教育出版社的共同努力下，凝聚着中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血和汗水的中国科学院研究生院教材面世了。这套教材的出版，将对丰富我院研究生教育资源、提高研究生教育质量、培养更多高素质的科技人才起到积极的推动作用。

作为科技国家队，中国科学院肩负着面向国家战略需求，面向世界科学前沿，为国家作出基础性、战略性和前瞻性的重大科技创新贡献和培养高级科技人才的使命。中国科学院研究生教育是我国高等教育的重要组成部分，在新的历史时期，中国科学院研究生教育不仅要为我院知识创新工程提供人力资源保障，还担负着落实科教兴国战略和人才强国战略，为创新型国家建设培养一大批高素质人才的重要使命。

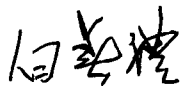
集成中国科学院的教学资源、科技资源和智力资源，中国科学院研究生院坚持教育与科研紧密结合的“两段式”培养模式，在突出科学教育和创新能力培养的同时，重视全面素质教育，倡导文理交融、理工结合，培养的研究生具有宽厚扎实的基础知识、敏锐的科学探索意识、活跃的思维和唯实、求真、协力、创新的良好素质。

研究生教材建设是研究生教育中重要的基础性工作。由一批活跃在科学前沿，同时又具有丰富教学经验的科学家编写的中国科

学院研究生院教材,适合在校研究生学习使用,也可作为高校教师和专业研究人员的参考书。这套研究生教材内容力求科学性、系统性、基础性和前沿性的统一,使学习者不仅能获得比较系统的科学基础知识,也能体会蕴于其中的科学精神、科学思想、科学方法,为进入科学研究的学术殿堂奠定良好的基础;优秀教材不但是体现教学内容和教学方法的知识载体、开展教学的基本条件和手段,也是深化教学改革、提高教育质量、促进科学教育与人文教育结合的重要保证。

“十年树木,百年树人”。我相信,经过若干年的努力,中国科学院研究生院一定能建设起多学科、多类型、多品种、多层次配套的研究生教材体系,为我国研究生教育百花园增添一枝新的奇葩,为我国高级科技人才的培养作出新的贡献。

中国科学院 常务副院长
中国科学院研究生院 院长
中国科学院 院士



二〇〇六年二月二十八日

前 言

土壤物理学是土壤科学的一个重要分支,它是土壤学与物理学的交叉领域。它以研究土壤的物理性质及土壤中的物理现象、过程和能量转换为主要任务,同时兼顾与土壤中的化学、生物等过程的耦合。有关土壤的物理性质和土壤中的物理现象所阐述的内容主要包括土壤颗粒、结构,土壤中的水分、溶质及有关热学、电磁学性质和放射性等。土壤中的水、热、气和溶质等物质运动和能量转换是目前土壤物理学研究的核心内容,同时也是与其他相关学科和领域的重要结合点。随着物理学、数学、信息科学、计算科学以及高新技术的不断渗透和广泛应用,它已发展成为一门相对独立而又与其他学科紧密联系的学科分支。土壤物理学在农业、水利、生态、地理、水土保持、环境保护、土木工程、环境医学乃至一些军事领域都得到了广泛和重要的应用,在很多方面已经取得了丰富的成果和成就。

当今世界范围内,人口、粮食、资源和环境压力给土壤物理学提出了新的挑战,要求土壤物理学从传统的研究思路中拓展开来,在解决人口、粮食、资源和环境与可持续发展之间的矛盾中发挥重要作用。因此,不断发展和创新自然成为土壤物理学自身的主题。由于该学科分支的飞速发展,以及受编著者的知识所限,编著一本内容丰富多彩的土壤物理学研究生教材显然是一项艰巨的任务。幸运的是目前国内外有一些土壤物理学的研究论著和研究生教材可作为重要参考,加之国内外的土壤物理学同行从事了大量的相关研究,取得了可喜的成果;编著者还得到了中国科学院研究生院选修这门课程的研究生的大力支持,这促使我们整理以往的教案和材料,参考有关论著和教材,组织编写这本《土壤物理学》教材。编著者在参考有关论著和国内外有关教材和科研成果的基础上,试图在内容的丰富、学科的深入交叉以及基本理论的实际应用上有所充实和拓展,期望本书对科研院所和重点高等院校的研究生在从事相关科学研究方面有所

II 前 言

帮助。

本书是在中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心邵明安和黄明斌 2000 年编著的《土-根系统水动力学》基础上拓展而成的。在编写过程中,主要参考了美国加州大学 Riverside 分校 William A. Jury 和依阿华州立大学 Robert Horton 教授 2004 年编写的 Soil Physics(第六版),美国麻省大学 Daniel Hillel 教授 2000 年编写的 Environmental Soil Physics,中国科学院南京土壤研究所姚贤良和程云生研究员 1986 年编著的《土壤物理学》,清华大学雷志栋、杨诗秀、谢森传教授 1988 年编著的《土壤水动力学》,中国农业大学秦耀东教授 2002 年编写的《土壤物理学》等。在这里向他们表示衷心的感谢。

在编写过程中,我的学生韩祥伟、曾辰、刘春利、付晓莉、周蓓蓓、黄传琴等协助我作了一些前期工作;我的三位博士生(魏孝荣、马东豪、胡伟)还参与了本书的编写工作。第 1 章由魏孝荣编写;第 2、3 章由马东豪编写;第 8 章由胡伟编写;第 4、9 章和附录由黄明斌研究员编写;第 5、6、7 章由王全九研究员编写。本人负责教材的申报和本书的前期准备工作,制定了编写提纲,设计了所有章节的内容,负责本书的统稿并对所有章节进行了修改,马东豪、魏孝荣和付晓莉在统稿过程中给予了协助。在这里,向我的学生们表示感谢。在编写过程中的有关费用,由国家自然科学基金项目(90502006)和西北农林科技大学创新团队项目(土壤-植物系统中物质迁移)资助,在此深表谢意。

这本教材从申报、批准、编写、签订出版合同到最后定稿只有一年左右时间,由于时间短、水平所限,书中难免有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

邵明安

2006 年 6 月

主要符号列表

a	—通气孔隙度
A	—土壤柱体横断面面积
B_λ	—波长为 λ 的波所辐射的能量强度
C	—土壤溶质总浓度
c	—真空中的光速
C	—吸附达平衡时溶液中的浓度
$C(\theta)$	—比水容量
C^*	—与吸附热有关的常数
C_a	—空气热容量
c_a	—吸附态的溶质浓度
c_g	—气态溶质的浓度
C_g	—单位体积的土壤空气浓度
c_l	—水溶态溶质的浓度
C_{ox}	—氧化剂浓度
c_p	—空气的定压比热
C_R	—根系表面溶解于水的氧气浓度
C_{Re}	—还原剂浓度
C_s	—土壤质量热容量
C_{sj}	—固体颗粒 j 的热容量
C_v	—土壤的容积热容量
CV	—变异系数
C_w	—水热容量
d	—当量孔径

II 主要符号列表

D	—水动力弥散系数
$D(\theta)$	—土壤水分扩散率
D_0	—溶质在水中的分子扩散系数
D_{wv}^a	—水汽扩散率
D_g^a	—空气扩散率
D_g^s	—土壤气体扩散率
D_h	—溶质机械弥散系数
D_{lh}	—水动力弥散系数
D_1^s	—根系周围土壤固-液相中的扩散系数
D_1^w	—氧气在纯水中的扩散率
D_m	—土壤中的分子扩散系数
$D_m(\vartheta)$	—膨胀土水分扩散率
D_T	—温差作用下的水分扩散系数
D_{Tv}	—水蒸气传导率
D_w	—水分和水汽扩散系数
D_w	—自由水中的分子扩散系数
$D_{w/v}$	—由于水分运动所引起的热扩散率
e	—水汽压
E	—土壤蒸发速率
E^*	—潜在蒸散速率
E_0	—标准氧化还原电位
E_h	—氧化还原电位
E_{max}	—最大蒸发速率
E_{pl}^*	—潜在蒸腾速率
e_s	—饱和水压
E_s^*	—土壤潜在蒸发速率
ESP	—交换性钠百分比
ET	—蒸散量
ET_0	—参考作物蒸腾量
f	—A 流区含水量的比例
f_s	—充气孔隙度
g	—重力加速度
G	—土壤热通量
GMD	—团聚体几何平均直径

h	—土壤水吸力
H	—显热通量
H	—最大毛细管上升高度
H	—单位体积土壤所含的热量
h^*	—土壤溶液基质势
H_0	—土壤表面积水深度
h_d	—进气吸力
h_j	—半径为 R_j 的毛细管对应的基质吸力
H_v	—单位体积热量
I	—地球表面接受的辐射量
$I(t)$	—累积入渗量
$i(t)$	—土壤表面入渗速率
I_0	—垂直于光柱的太阳辐射通量密度
i_f	—稳定入渗率
i_i	—初始入渗率
J_c	—空气通量
J_{ds}	—土壤中的溶质分子扩散通量
J_{dw}	—自由水中的溶质扩散通量
J_g	—气态溶质通量
J_h	—溶质机械弥散通量
J_H	—土壤总热流通量
J_{hc}	—热传导通量
J_{hv}	—对流热通量
J_{lb}	—水动力弥散所引起的溶质通量
J_φ	— φ 轴方向上的水流通量
J_r	— r 轴方向上的水流通量
J_{s0}	—土体的通量密度
J_v	—水或水蒸气通量
J_w	—通过土壤的水流通量
J_w^-	—三维空间里用矢量表示的水流通量
J_{w0}	—入渗表面水流通量
J_{wc}	—对流引起的溶质通量
J_{wv}	—水汽通量
J_{wx}	— x 方向上的水流通量
J_{wy}	— y 方向上的水流通量

IV 主要符号列表

J_{wz}	— z 方向上的水流通量
J_z	— z 轴方向上的水流通量
k	—热传导率
$K(\theta)$	—土壤非饱和导水率
K_a	—气体传导率
K_d	—吸附系数
K_{eff}	—层状土的有效导水率
K_f	—稳定时结皮土壤的饱和导水率
K_i	—初始土壤的饱和导水率
K_k	—反应平衡常数
K_r	—单位根长的根系透水系数
K_s	—饱和导水率
K_{sx}	— x 方向上的饱和导水率
K_{sy}	— y 方向上的饱和导水率
K_{sz}	— z 方向上的饱和导水率
K_t	—表面结皮的饱和导水率
K_w	—离子反应电离常数
K_i	—根组织导水率
$K^*(\vartheta)$	—膨胀土非饱和导水率
l	—毛细管弯曲度
L	—潜在汽化热
LAI	—叶面积指数
L_c	—表观毛管长度
$L_e(z, t)$	—有效根密度
L_{nrd}	—正态化的根长密度分布函数
L_r^{eff}	—根系有效深度
M	—组成土壤孔隙的不同型号的毛细管尺寸的数量
m_a	—土壤气相物质的质量
m_s	—土壤固相物质的质量
m_t	—土壤三相物质的总质量
M_v	—水分子量
m_w	—土壤液相物质的质量
M_w	—水分子的摩尔质量
MWD	—团聚体平均重量直径
n	—单位时间内监测器记录的 γ 射线计数

N	—土壤中的慢中子计数
n_0	—放射源的源场强度(或无土样时的监测器中子计数)
n_i	—参考含水量下 γ 射线透射强度
N_j	—半径为 R_j 的毛细管的数量
n_j	—单位面积内半径为 R_j 的毛细管的数量
N_s	—水中或标准吸收剂中的慢中子计数
p	—给定温度下气体蒸气压
p	—气体压力
p_0	—给定温度下液体的饱和蒸气压
P_a	—大气压
P_l	—液体内部产生的压强
Q	—溶质的吸附量
Q_b	—矿物表面水化阳离子的电荷密度
$Q_{in}(t-t')$	—时间 $t-t'$ 输入土壤中的溶质速率
Q_j	—通过半径为 R_j 的毛细管的流量
Q_m	—溶质最大吸附量,在单分子层吸附时为吸附位点数量
$Q_{out}(t)$	—累计溶质出流率
Q_t	—矿物表面总电荷密度
Q_u	—矿物表面未水化的阳离子电荷密度
r	—湿度计常数
R	—延迟因子
r_a	—单位质量土壤固相中各种反应造成的化学物质减少的量
r_a	—空气阻力
r_a	—水汽扩散阻力
r_c	—单位体积土壤中各种反应造成的化学物质减少的量
R_e	—根系周围固-液态土壤基质的扩散率
R_E	—被地球表面反射到太空中的热能
r_g	—单位体积土壤空气中各种反应造成的化学物质减少的量
r_H	—单位体积土壤的热流损失率
RH	—相对湿度
R_j	—毛细管半径
R_k	—土壤和植被冠层散射的热能
r_l	—单位体积土壤水中各种反应造成的化学物质减少的量
R_{max}	—最大根密度
R_n	—太阳净辐射

VI 主要符号列表

R_{nl}	—净长波热能辐射
R_r	—根系阻力
r_s	—表面阻力
R_s	—太阳总辐射
R_s	—土壤对水流的阻力
R_{sr}	—根系吸水过程中所遇到的阻力之和
r_w	—单位容积土体内植物根系的吸水速率
s	—土壤饱和度
S	—吸渗率
SAR	—钠吸附比
S_f	—湿润锋处的平均基质吸力
S_{max}	—最大吸水速率
T	—温度
$T(t)$	—蒸腾速率
T_a	—平均气温
T_d	—平均露点温度
u	—相对颗粒的水流量
u_z	—风速
v	—比容积
V	—已吸附的气体体积
V_a	—土壤气相物质的容积
V_m	—表面覆盖了一个单分子层气体时所吸附的气体体积
V_s	—土壤固相物质的容积
V_t	—土壤三相物质的总容积
V_w	—土壤液相物质的容积
W_a	—土壤样品的烘干重
W_g	—为土壤样品所吸附的极性化合物的重量
\bar{X}	—样本的均值
Z	—气体压缩因子
z_f	—湿润锋位置
z_h	—湿度测量高度
z_m	—风速测量高度
z_{oh}	—控制热和蒸汽传递长度
z_{om}	—糙率长度
\bar{Z}	—变量 Z 的数学期望值

\tilde{Z}	—变量 Z 的中数
\hat{Z}	—变量 Z 众数
σ	—Stefan - Boltzmann 系数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
α	—质量交换系数
α_T	—热扩散率, 包括潜在热传导和对流的作用
β	—太阳角
γ	—两流区水流速度的比
γ_A	—吸附速率
γ_D	—解吸速率
γ_g	—单位体积空气反应的损失率
γ_{kurtosis}	—峰态值
$\gamma_s(h^*)$	—无量纲盐分胁迫函数
γ_{skewness}	—偏态值
$\gamma_w(h)$	—无量纲水分胁迫函数
ϵ_r	—土壤的相对介电常数
ζ_g	—土壤孔隙弯曲系数
$\xi_1(\theta)$	—液体扩散弯曲系数
η	—液体粘滞系数
Θ	—有效饱和度
θ	—土壤容积含水量
θ_f	—田间持水量
θ_i	—为初始含水量
θ_{im}	—不可动区含水量
θ_m	—可动区含水量
θ_m	—土壤质量含水量
θ_r	—滞留土壤含水量
θ_s	—饱和容积含水量或土壤孔隙度
θ_{so}	—土体的容积比例
θ_v	—土壤容积含水量
θ_{wp}	—凋萎含水量
λ	—弥散度
λ	—波长
λ_m	—最大波长
μ	—液体的动力粘度

VIII 主要符号列表

μ_m	—水的 γ 射线吸收系数
μ_s	—土壤矿物的 γ 射线吸收系数
μ_v	—单位容积土壤的土水势
ρ	—土壤空气密度
ρ_a	—恒压下空气密度
ρ_b	—土壤容重
ρ_{bz}	—饱和时土壤容重
ρ_s	—土粒密度
ρ_v	—水汽密度
ρ_w	—水的密度
ρ_v^*	—饱和水汽密度
σ	—表面张力系数
τ	—单位面积上产生的内摩擦力
ν	—液体的运动粘度
φ_0	—根内皮层处的水势
φ_1	—内皮层处的水势梯度
ψ	—单位重量土壤的土水势
ψ_g	—重力势
ψ_m	—基质势
ψ_p	—压力势
ψ_r	—植物根水势
ψ_s	—溶质势或渗透势
ψ_T	—温度势
ψ_w	—土壤水汽的水势
$\psi_x(t)$	—根木质部水势
Ω	—在单位表面上形成一个单分子层所需的极性液体的质量
ω	—水汽与土壤的温度梯度比值
Δp	—接触面气液两侧的压强差
∇	—拉普拉斯算子
ϑ	—水和土粒所占孔隙的比例
φ	—水面与管壁的接触角