

土壤物理学研究的现状、挑战与任务^{*}

李保国 任图生

(中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

张佳宝

(中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

摘 要 根据新近土壤物理学研究进展,论述了土壤物理学在土壤学中的定位和在自然科学和社会可持续发展中的地位;从研究的对象、内容、尺度、理论、方法和测定技术方面,阐述了土壤物理学研究现状;分析了新形势下土壤物理学面临的挑战;提出了我国土壤物理学研究未来 10 年 5 个方面的主要任务,即:农业可持续发展中的土壤物理问题,土壤结构形成过程及其稳定性,土壤中能量传输和物质运移过程,土壤性状及过程的时空变异与尺度转化,土壤物理过程与土壤化学、土壤生物过程的耦合。

关键词 土壤物理;过程;模型;测定技术;尺度

中图分类号 S153 **文献标识码** A

1 土壤物理学的定位与地位

1.1 土壤物理学的定位

土壤物理学是研究土壤中三相(固相、气相和液相)的状态及物理过程的科学^[1,2]。土壤三相的状态不仅反映固相、气相和液相在土壤中的多少及所占的比例,而且包括各相的能量状态、结构和物理特性。土壤中物理过程则主要指土壤中各相、三相之间以及土壤与植物、大气、水体、岩石的物质和能量交换过程。近年来,土壤生物(植物根系、微生物和原生动)与土壤固相、气相和液相之间的相互作用过程也为土壤物理学所关注。

1.2 土壤物理学的地位

土壤位于大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的交叉带,是陆地生态系统各子系统相互作用、相互联结的中心。土壤表层的能量和物质交换过程对全球气候变化有着重要的影响。土壤中的各种生物和化学过程,以及植物的生长和发育都依赖于土壤的物理状态(含水量、温度、质地、结构和孔隙度等)和土壤中的能量物质交换过程。土壤中的水分物理过程既是陆地水循环过程的重要组成部分,又是土壤与其他圈层间进行物质传输的纽带,而以水分

运动为驱动的溶质运移过程直接决定着地下水的质量。土壤水分状况以及影响土壤水分状况的土壤结构动态变化过程与土壤的抗侵蚀能力密切相关。因此,无论是土壤学科的其他分支(土壤化学、土壤生物学等),还是水文学、气象学、水文地质学、农田水利学、自然地理学和植物生理学等,都与土壤物理学有密切的联系。加强土壤物理性状和物理过程的研究,不仅是其他学科发展的必需,而且也是保持和提高土壤质量、保护和改善生态环境、促进国民经济健康、稳定和协调发展的基础。

2 土壤物理学研究现状

2.1 现代土壤物理学学科发展的简要回顾

20 世纪初,美国物理学家 Buckingham (1907)首先介绍了土壤水毛管势的概念,并指出了毛管水势与含水量关系的重要性。在此基础上,另外一名美国物理学家 Richards 提出了土壤总水势的概念(1928)和著名的描述土壤水分运动的 Richards 方程(1931),标志着现代土壤物理学的诞生^[4],用能态观点研究土壤水逐步地取代以形态学观点与方法(以前苏联 A. A. 罗戴为代表)。土壤物理学对土壤性状和物理过程的研究也从此逐步由静态走向

^{*} 长江学者和创新团队发展计划(RT0412)资助

作者简介:李保国(1964~),男,山西襄汾人,教授,从事土壤过程量化、土壤-作物系统模型、水土资源利用等方面研究。E-mail: libg@cau.edu.cn

收稿日期:2008-04-30;收到修改稿日期:2008-05-16

动态、由定性描述走向定量化、由总结经验走向揭示机理。

20世纪50年代,在 Buckingham 和 Richards 理论的基础上,发展了土壤水、热和溶质运移的动力学模型。20世纪70年代后,随着计算机技术的发展,土壤物质迁移和能量转化过程的定量模拟研究迅速发展并取得了丰富的成果^[7~11]。然而,对于田间土壤,由于土壤结构的非均质性、时空变异性以及土壤与环境因子之间的非线性关系,这些建立在传统均匀介质/有效介质假设基础上的土壤物理学理论就难以描述土壤中各种复杂的物质、能量交换过程。因此,随机理论、统计学理论和地统计学原理近来在土壤物理学研究中得到了广泛应用^[10~12]。

现代土壤物理学的研究对象既包括颗粒组成、结构、水分和温度等基本土壤性状,也有水分和溶质运移的物理、化学和生物过程等。土壤物理学的研究范围已经从实验室和田间小区走向了农田、流域和区域尺度^[13]。

在研究手段和实验方法上,随着微观探测技术(如 X 成像、CT 等)、电子技术和遥感技术的飞速发展,土壤物理性状和过程的非接触性测定受到了越来越多的关注。

2.2 土壤物理学发展趋势

近 10 多年来,土壤物理学取得了重大进展。纵观这些重大进展可以发现,他们不仅来自于原有方向上的延伸,而且源于新的研究方向和空间的开辟和拓展。其主要动力,首先是由于 20 世纪后期人类在人口、经济发展、资源利用、生态安全、环境保护等问题上面临的严峻挑战,使所有学科都不能置身事外,通过学科交叉,共同努力寻找综合的解决途径已成为最大需求;其次是其他学科快速发展为土壤物理学新领域的开辟提供的有力支持^[14]。因此,现代土壤物理学形成了从微观和宏观两个尺度上进行拓展和深入;多学科交叉,相互渗透;与实际应用的紧密联系为特点的发展趋势。

事实上,现代土壤物理学的发展已经超出了传统疆界。一个突出的表现是,长期以来针对农业土壤研究水流和化学物质传输规律的模式已被大大扩展,许多关于工业生产、城市发展和工程活动对土壤和环境影响,特别是对地下环境影响方面的土壤物理问题已经包括其中。土壤是一个具有多样生物学组分和非线性物理学特征的系统,而该系统具有这种特征的根本原因,是纳米尺度到区域尺度的异质性,土壤物理学对该系统的研究应该能发挥

重要作用^[2,15]。

正是土壤的异质性为当今土壤物理学提出了无尽的挑战,同时提供了创新的源泉,导致现代土壤物理学赋予新的研究内容,并已经扩展到我们将其称之为土壤的整个异质性介质,或所谓的非饱和和多孔介质。可以看到,新的令人振奋的研究领域一是处在多学科交叉点上,如尺度转换问题、孔隙刻画和模拟、物理过程与生物过程的整合、复杂的非线性不稳定现象等;再者是处于高新技术进步使得这种进展成为可能的地方,如非介入测量技术、先进的计算方法等。可以预见,土壤物理学新一波的进展不仅能以传统方式为农业生产服务,而且能与环境保护、石油工程、河口沉积物、材料化工、能源、航天、地热、分形数学、相变等方面的研究密切结合,在解决应用问题和科学发展上发挥重要作用。因此,现代土壤物理学发展具有如下趋势:

(1) 在研究对象和内容方面,土壤生物与物理性状和过程的相互作用和相互影响、农田面源污染的过程和机理、热学—力学互作下(如冻融过程)土壤性状和过程的变化受到了广泛关注。引进了多相流理论,重视土壤性状和过程的定量化,强调田间非均质、非等温条件下土壤物理过程的机理,使研究结果更加逼近现实。

(2) 从研究尺度来看,土壤物理学向着微观和宏观两个方向发展。小到研究土壤颗粒表面水分子的排列和土壤生物个体随土壤溶液的运动,大到研究流域或区域范围内土壤、土地利用/覆被、水分等地表性状与过程的定量化描述^[3,10,16,17]。

(3) 在研究理论方面,近 10 年来,非平衡态统计物理学、流体力学的前沿方法和思想被采用^[14]。为了描述孔隙以及粒子大小的分布规律,分形以及多重分形分析方法被广泛采用,突破了土壤水分分布和运动的毛细管均质模型这一基本设定;在处理水分含量变化的有效孔隙结构时,渗流/逾渗(Percolation)理论被尝试用来解释水分特征曲线经验模型中参数的物理含义;以及不同含水量条件下电导率、热导率和扩散系数的变化规律;偏离达西定律的运输方程被引入分数阶导数的对流弥散方程以及连续时间随机行走(CTRW)代替。上述进展对土壤物理学的影响将是深远的。

(4) 在研究方法上,针对土壤结构的非均质性、时空变异性以及土壤与环境因子之间复杂的非线性关系,参数估计技术、地统计学、分形数学和随机模型被引入到土壤物理学研究之中。参数估计技

术在土壤水、热、溶质耦合迁移的研究中得到了广泛应用;地统计学对研究土壤性状的空间变异性、确定观测数据和测定结果的置信度等方面得到了长足发展;分形数学和混沌模型为研究土壤质地、孔隙特征和水分迁移过程的关系提供了有效的手段。在宏观尺度上,遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)技术的结合则使土壤物理学基础研究实现了向大范围(流域或区域)过程的转变^[3,13]。由于计算机模拟能将土壤物理过程中主要参数的作用进行量化分析,计算机图形处理功能以及各种分析软件的发展将对复杂边界条件和不规则几何形状下的溶质输运、吸附解吸、热传导以及电磁波传播、表面张力效应等进行模拟研究,从而取代大量的实验。例如,基于SEM(扫描电镜)、CT、X射线成像以及MRI(磁共振成像)的实验结果,可以应用计算机重构得到土壤的虚拟孔隙结构,并分析相应的结构参数(孔隙大小分布、空间关联函数和粗糙指数等);在虚拟孔隙结构上,可以利用传统的格点 Boltzmann 方法、Monte-Carlo 模拟来研究气体和水分在孔隙内部的运动规律;采用能够处理流体、电磁场和热耦合的有限元方法来研究耦合场条件下的能量、物质输运规律;利用量子化学中的密度泛函(Density function)以及分子动力学方法(Molecular dynamic)来模拟原子尺度条件下的吸附—解吸过程^[14]。

(5) 在测定技术方面,土壤物理学正在大力吸收其他学科中涌现出的新的测量技术。在微米到纳米尺度结构测量方面,强磁场 NMR 和脉冲梯度场 NMR 可以得到孔隙大小分布 PSD;相应的成像技术 MR 能够得到 10 μm 以上的孔隙空间结构图;小角中子散射、小角 X 射线散射以及激光散射技术能够得到微米以下尺度粒子大小分布、土壤颗粒表面粗糙度、孔隙空间关联度等结构信息;AFM(原子力显微镜)能得到单个原子尺度的电荷分布和表面静电势能,从而可以用来测量土壤矿物表面吸附其他分子、原子的相互作用力大小;SEM 能得到最小 10 nm 的三维孔隙结构;利用 CT 图像重构可以得到 10 μm 以上三维孔隙空间结构。过去 20 年中,时域反射技术(TDR)、频率域反射技术(FDR)和时域传输技术(TDT)等的出现,不仅实现了土壤含水量和电导率的精确定位观测,而且使土壤水力特性的田间测定成为可能;X 射线、超声和核磁共振成像技术可以直接应用于土壤中各相体积的定量测定、优势流的检测以及生物体运移的观测;近来出现的 X 射

线探测器和高强度磁场生成技术、高速图像组接技术以及大型数据采集技术等微观研究技术,实现了对土壤进行微米级二维或三维研究。在宏观尺度方面,遥感(RS)与遥测(如 GPR、EM)技术则可获取田间、流域或区域土壤物理性质^[13]。

2.3 中国土壤物理学研究现状^[5,6,19,20]

近代土壤物理学在我国起步较晚。20 世纪 30 年代开展了土壤质地分类、水稻土结构以及土壤水对植物生长的影响等研究。新中国成立后,土壤物理学研究主要围绕国家建设和农业生产发展进行。研究内容集中在土壤质地、结构、孔隙、水分参数、电磁学性质等基本物理性状以及土壤物理性质与植物生长、水分利用的关系,土壤结构与肥力、水土流失和结构退化的关系等方面。20 世纪 70 年代以来,随着水分能量概念的引进(朱祖祥、叶和才、华孟、张蔚榛等)和一些比较先进的测试手段的应用,土壤物理学在水分和溶质运移、SPAC 系统水分循环、土壤结构及其演变等方面取得了长足的进展。《土壤物理学》(姚贤良、程云生等)、《土壤水动力学》(雷志栋、杨诗秀等)、《地下水与土壤水动力学》(张蔚榛等)、《土壤-植物-大气连续体水分传输机理》(康绍忠等)、《土壤溶质运移》(李韵珠、李保国等)、《多孔介质中水分及溶质运移的随机理论》(杨金忠等)、《土壤水分通量法实验研究》(荆恩春等)、《土-根系统水动力学》(邵明安、黄明斌)、《土壤-作物-大气系统水分实验研究》(刘昌明等)、《农田土壤水的动态模型及应用》(李保国等)、《冻土物理学》(徐学祖等)、《空间变异理论与应用》(张仁铎)等一系列专著集中体现了我国土壤物理学近来的发展和成就。

3 新形势下土壤物理学面临的挑战

3.1 中国社会、经济发展对土壤物理学的要求

进入 21 世纪,中国农业面临着人口基数大、粮食消费水平不断增加、耕地面积不断减少、土壤退化和水资源严重不足等诸多问题。保证粮食安全、实现农业可持续发展问题给土壤学提出了前所未有的挑战。土壤物理学必须在改善耕地质量、提高农田生态系统的资源利用率方面做出应有的贡献。通过研究土壤结构演化对农田投入及农田管理措施响应,揭示改善土壤质量、提高土壤水肥利用率和降低水土侵蚀的内在机制;通过研究土壤内部、土壤与其环境(大气、地下水、岩石圈等)的能量

转化和物质循环过程,促进土壤生态系统的健康良性循环;通过应用遥感技术、成像技术以及随机模型和统计模型,实现不同尺度研究结果的科学转化,使土壤物理学研究成果真正服务于现代农业(精准农业)、可持续农业生产中。

3.2 中国生态环境建设对土壤物理学的要求

随着人口、资源和环境问题的日趋突出,土壤物理学研究应当密切关注我国生态环境建设中的土壤水分、土壤污染、土壤侵蚀、土壤退化和荒漠化问题^[5]。例如,西北主要农区和草地土壤侵蚀严重,荒漠化已经发生并有加剧趋势;华北地区水资源日趋紧缺,灌溉水渗漏、养分淋失严重,土壤及地下水污染面积扩大;东北黑土地结构退化,持水力降低,土壤侵蚀加剧,面临着荒漠化的威胁;长江中下游地区季节性干旱明显,土壤和水污染问题加重。应当针对性地加强土地利用方式与土壤性状演化、污染物迁移动力学过程、水肥利用效率、水土流失规律等方面的研究。

3.3 国际环境对中国土壤物理学的要求

我国主要温室气体(CH_4 、 CO_2 和 N_2O 等)的排放已经位于世界前列。土壤既是温室气体重要的源,也是温室气体重要的汇。准确估计温室气体的排放量不仅是有效降低温室气体排放的必需,也是我国在《联合国气候变化框架公约》活动中争取主动的前提,而相关土壤物理学的研究能够对土壤中温室气体运动过程给予定量化的描述。

3.4 中国土壤物理学发展与国际先进水平的优势与差距

我国幅员广大,气候、地势、土壤和植被复杂多变,既给土壤物理学研究提供了得天独厚的研究场所,也对土壤物理学家在选择研究方向、确定关键因子、设计研究方案和总结研究结果等方面提出了挑战。与国际先进水平和发展趋势相比,我国在土壤物理领域的研究还有较大差距。(1)研究基础薄弱,缺乏达到国际领先水平的创新性研究,总体上处于跟踪国际水平的状态,还没有出现我国学者独立提出的描述土壤物理性状或过程的理论或方法。(2)不少研究领域,如土壤中的多相流问题和土壤微生物在土壤中的迁移问题,刚刚起步甚至处于空白状态。(3)研究过程不够系统,严重影响了研究结果的权威性。尽管我国已有几千年的农业历史,却找不到几个20年以上的长期定位实验,也缺乏典型地区土壤基本性状、结构演变、水热动态等方面的长期观测资料。(4)研究手段落后,目前土壤物

理学研究的先进仪器设备(数据采集仪、压力平板仪、TDR系统、蒸渗仪等)主要从发达国家引进。大多数研究单位难以承担昂贵的进口费用。由于技术、管理和维护等原因,很多已购置的设备也未能得到充分利用。(5)研究队伍小,研究人员专业范围窄,缺乏不同专业之间的合作。从发表论文的情况分析,目前从事土壤物理学研究的单位主要集中在清华大学、武汉大学、中国农业大学、南京农业大学、西北农林科技大学、西安理工大学、中国科学院南京土壤研究所、中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所以及中国农业科学院等少数国家重点大学和重点科研单位。由于大多数研究人员以土壤学和农学为专业背景,在设计和从事高水平的土壤物理学研究、利用数学方法将研究结果定量化、利用物理学理论将研究成果上升到理论高度等方面存在较大困难。另外,土壤物理学研究缺乏与有关相关学科(如数学、多孔介质传热传质学和现代物理学等)之间的合作,限制了我国土壤物理学研究的深度和广度。

4 中国土壤物理学未来10年的主要任务

4.1 社会发展需求

中国土壤物理在近期的应用基础研究应当针对我国可持续发展中严峻的人口(粮食)、资源(水、土)和环境问题。

加强土壤结构稳定性和非均质性对土壤物理、化学和生物过程影响机理研究。必需强调长期定位条件下土壤有机质—土壤结构—土壤质量—土壤生产力的演化关系,使农业可持续发展建立在良好的土壤结构基础上。

土壤水分、养分运移过程与水分、养分高效利用。继续深入探讨不同地区田间水分(灌溉水和降水)过程,解决农田水分平衡研究中渗漏和蒸发过程的动态监测和模拟问题,为灌区提高灌溉水利用率、雨养区提高降水利用率提供科学依据。

土壤和地下水的面源污染。土壤中有毒物质(化肥、农药、重金属等)的研究必须重视优势流的作用和运移参数的现场动态测定,必须综合考虑溶质运移过程中的物理、化学和生物学过程。

土壤物理过程中,土壤气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)与全球气候变化的研究直接相关,一定要定量

回答不同土地利用和管理措施这些气体在土壤中的运移与大气交换的机制。

4.2 土壤物理学的理论研究在未来的引导作用

土壤物理学研究中的尺度问题。关于物理过程的实验研究大都局限于一定的取样范围或测定规模,而人们往往利用这些结果来描述或预测其他尺度(更宏观或更微观)下的土壤物理状态或过程。由于土壤物理参数和状态变量都存在着时间和空间变异性,这些研究结果的科学价值已经受到质疑。利用随机理论和统计学(经典统计学和地学统计学等)理论研究土壤物理参数和变量的时空变化规律,将确定性模型与随机模型结合起来,科学地实现不同研究尺度(点—面—区域)结果的相互转换,是土壤物理学研究中需要解决的关键问题。

土壤中的迁移和转化过程和机理。土壤物理学已经在一定程度上实现了对土壤通透性和扩散性能的观测和定量描述,不少模型已经具有一定的预测土壤中能量和物质传输的功能,但我们对现实土壤中各种迁移和转化规律的认识还远远不够。例如,土壤中水热耦合运移中水汽的地位和作用仍存在争论,土壤导水率的观测值并不能真正告诉我们土壤中死孔隙的数量和分布、孔隙弯曲度,以及土壤溶液在某些孔隙中的驻留时间。在微观尺度(孔隙)上研究土壤中的迁移和转化过程已经受到了国际上的广泛关注,应当是今后一段时期研究的热点问题。化学物质(化肥、农药、重金属等)在农田迁移的规律及模拟仍有待进一步发展,应当将物理过程与这些物质迁移中发生的生物和化学过程(根系吸收、表面挥发、降解、生物化学反应、溶解与沉淀、CO₂的固定与释放等)结合起来,开展综合研究^[6]。冻土中有相变界面移动的水热盐耦合迁移的物理过程及机理尚待进一步探索。

土壤物理研究中的数学建模问题。计算机技术的日新月异,使得土壤物理状态和过程的模拟研究在近年来得到了较大发展,尽管所建立的模型在特定环境下具有一定的预测功能,真正能够用于预测土壤系统对复杂环境条件响应的却很少。这是因为:(1)土壤中的物理、化学和生物过程往往是非线性的,存在着复杂的耦合作用,这些过程特别是生物过程对土壤环境存在反馈作用,而我们对现实土壤中这些非线性关系及相互耦合作用还缺乏深入了解^[15,21,22]。(2)难以准确获得建模所需要的、适宜尺度下的各种土壤物理参数。应当尽可能地

要强调土壤物理学家与土壤学其他学科的合作,而且需要吸收利用力学、化学、生物学、地质学、水文学等学科在多孔介质研究中的理论和成果。土壤物理模型不仅要能够验证实验结果,更要成为认识和预测土壤状态和物理过程的手段。

土壤力学本构关系。土壤力学应是土壤物理学的研究范畴,随着科学技术和工程建设的发展,土的本构关系研究亦得到长足的发展。有关非饱和土壤的本构关系、土壤冻融条件下的本构关系较传统的土的本构关系研究更为复杂,但由于是土工工程(坝、堤等)与基础工程(建筑物、道路、桥梁等)设计的理论基础,需要进一步研究和探索。

4.3 与国际前沿的衔接程度

土壤物理结构一直是土壤物理研究的基础问题。土壤结构及其稳定性和非均质性在很大程度上影响着土壤中所有的物理、化学和生物过程。土壤结构的形成过程、稳定机制及其与植物、微生物、农田管理(如土壤耕作)的相互作用是土壤物理学探讨甚多但仍然面临巨大挑战的课题。尽管对土壤结构与孔隙,特别是仅几年来对大孔隙(裂隙、生物孔隙等)的研究也引起了国内的广泛关注,但农田尺度上土壤结构与土壤物理性状和过程,以及相关土壤行为的相互作用机理远没有搞清楚,我国在这方面与国际高水平比较有较大的差距。

土壤物理性状和过程的观测与定量化。近年来,电子技术的发展,对土壤物理性状和过程的测定出现了两个明显的发展趋势—非接触性观测(土壤孔隙、结构、优先流等)和多参数的同步定位测定。例如,CT技术已经成功应用于土壤结构、孔隙的观测和结皮形成的研究,便携式CT已开始应用于田间土壤、水分和植物的观测研究。TDR、FDR、TDT和热脉冲—TDR等多功能探头实现了土壤含水量、电导率、温度、导热率、热容量的连续定位测定,并可间接获得土壤容重、孔隙度等特性的动态,为深入研究土壤中水、热和溶质的耦合机理提供了条件^[13]。科学有效地利用这些先进的监测技术,有利于对土壤性状和物理过程的定量化描述,是我国土壤物理学研究今后应当重视的问题。

土壤物理性状和过程信息库的建立。计算机技术的发展为建立大型的综合模型奠定了基础。目前我国最缺乏的是建模所需的各种参数和能够充分验证模型的实验数据。必须加强土壤物理性状和过程的长期定位监测,建立系统、可靠的田间土壤物理性状和物理过程的信息库。

4.4 主要任务与科学问题

(1) 农业可持续发展中的土壤物理问题。研究不同耕作制度下土壤结构演变、水热动态、溶质运移和气体交换 (CH_4 、 CO_2 、 N_2O) 过程的, 探讨“保护性耕作技术提高土壤质量的机理”; 研究不同灌溉和施肥条件下土壤水分动态、农田水分平衡、肥料利用率与土壤结构、持水力和入渗性能的关系, 探讨“提高作物水肥利用率、降低地下水污染、减少施肥导致的温室气体释放的机理和途径”; 研究土壤风蚀、水蚀过程, 探讨“山地丘陵区土壤侵蚀的机理和治理途径”。

(2) 土壤结构形成过程及其稳定性。利用非破坏性 (如成像技术、多功能探头定位观测等) 技术, 进行土壤结构的定量描述及重建, 深入探讨土壤含水量—水分能量状态关系的定量化问题, 研究田间条件下土壤结构及不同类型孔隙的形成过程及其稳定性以及植物根系、土壤微生物、水热过程 (如胀缩作用和冻融作用) 和农田管理措施 (耕作、施肥、灌溉等) 对土壤结构形成过程和稳定性的影响机制, 探讨“农田尺度上土壤结构是如何演变的”、“土壤结构的稳定机制”、“土壤结构与力学特性”等科学问题。研究土壤非饱和条件下、冻融条件下土的本构关系 (受力与变形), 为土工工程 (土坝、堤防等)、基础工程 (建筑物、道路、桥梁等) 的设计提供理论基础。

(3) 土壤中物质运移过程。水、热和溶质非稳定耦合运移, 斥水土壤中水热盐的耦合运移问题^[16, 23]; 土壤非均质性 (地表状态、分层、团聚体、裂隙、生物孔洞等) 对土壤持水力、蒸发和渗漏过程, 以及盐分与养分 (特别是 $\text{NO}_3\text{-N}$)、重金属、化学农药 (除草剂和杀虫剂等)、微生物群体和气体在土壤中迁移过程的影响定量化, 回答“土壤非均质性对农田能量和物质传输的影响机制”问题。另外, 需要研究溶质在各相间的平衡及分配系数和有机流体 (如石油及其他活性污染物) 在土壤中的滞留、降解和迁移规律, 建立包括气体、水和有机流体 (惰性) 与可挥发性) 在内的土壤多相流理论和模型。

(4) 土壤物理过程与土壤生物过程的耦合。研究根层土壤中细菌、真菌和植物根系构成的复杂动态环境降解、矿化、稳定有毒化学物质和其他有害废弃物有关的物理过程; 探讨研究发生在土壤矿物、细胞和非混合流体界面上的力学、热力学现象, 以及它们对微生物、生物变性、传输过程的影响; 物理条件和化学组分的异质性、外部水文动态对微生物

物数量、群落结构及活性的影响; 不同时空尺度下土壤结构与土壤有机质周转等土壤生物过程的耦合机制^[15, 21, 22]; 以土壤—植物—大气连续体的理论为基础, 结合作物生长模型, 建立主要农作物生长季节土壤水分动态变化的数学模型, 为合理灌溉提供理论指导; 定量描述和模拟根土互作过程, 研究其对土壤力学性质的影响, 为依靠植被治理山体滑坡和土壤侵蚀的生态工程提供理论指导。

(5) 土壤性状及过程的时空变异与尺度转化。利用微观与宏观相结合、实验和模拟相结合、确定性模型与随机模型结合的方法, 研究微观尺度 (团聚体或孔隙水平) 和宏观尺度 (小区、农田、区域) 土壤物理性状及过程的变异性和相关性, 用试验与模拟结果确定不同尺度水流和物质通量的方法; 研究描述和解释土壤理化性质、景观性质和格局的时间、空间分布的模型; 发展应用遥感、地理信息系统将小尺度过程的监测、试验与景观尺度模型连接的技术。回答“如何实现不同尺度土壤物理参数和过程相互转换”的科学问题。

致谢 本文在完成的过程中, 罗远培教授和雷志栋教授给予指导并提出了许多宝贵的建议, 在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] Jury W, Horton R. Soil Physics 6th Ed. New York: John Wiley & Sons, NC, 2004
- [2] Warrick W. Soil Physics Companion. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001
- [3] Wilding L P, Lin H. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. Geoderma, 2006, 131 (3-4): 257 ~ 274
- [4] 陈杰, 骆国保等译. Sposito G, Reginato R J, Luxmoore R J 编. 基础土壤科学研究的契机. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. Chen J, Luo G B, *et al* transl Sposito G, Reginato R J, Luxmoore R J. eds. Opportunities in Basic Soil Science Research (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995
- [5] 国家自然科学基金委员会. 自然科学学科发展战略调研报告: 土壤学. 北京: 科学出版社, 1996. National Natural Science Foundation of China. Development Strategies in Natural Sciences in China—Soil Sciences (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996
- [6] 李保国, 黄元仿, 吕贻忠. 绿色的根基—21世纪学科发展丛书—土壤学. 济南: 山东科学技术出版社, 2001. Li B G, Huang Y F, Lv Y Z. The Base of Green—Book Series for 21 Century Science Development—Soil Sciences (In Chinese). Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2001
- [7] Ahuja L R, Ma L, Timlin D J. Trans-Disciplinary Soil Physics Research Critical to Synthesis and Modeling of Agricultural

- Systems Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 311 ~ 326
- [8] Dane J H, Topp G C. Methods of Soil Analysis: Physical Methods Soil Science Society of America Book Series, Vol 5. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of American Inc , 2002
- [9] Dexter A R, Young I M. Soil physics towards 2000. Soil & Tillage Research, 1992, 24: 101 ~ 106
- [10] Raats P A C. Developments in soil-water physics since the mid 1960s Geodema, 2001, 100: 355 ~ 387
- [11] Hillel D. Environmental Soil Physics San Diego: Academic Press, 1998
- [12] Pachepsky Y, Radcliffe D, Selim H. Scaling Methods in Soil Physics Boca Raton, FL: CRC Press, 2003
- [13] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, *et al* Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review, Vadose Zone J., 2003, 7 (1): 358 ~ 389
- [14] 中国土壤物理学学会译. 德国物理学会著. 新世纪物理学. 济南: 山东教育出版社, 2005. China Physics Society transl Deutsche Physikalische Gesellschaft Physics Physics Research: Topics, Significance and Prospects: A report to Society, Policy-makers and Industry (In Chinese). Jinan: Shandong Education Press, 2005
- [15] Young I M, Crawford J W. Interactions and self-organizations in the soil-microbe complex Science, 2004, 304: 1 634 ~ 1 637
- [16] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance Earth-Sciences Reviews, 2000, 51: 33 ~ 165
- [17] Sposito G The " physics " of soil water physics Water Resources Research, 1986, 22(9): 83S ~ 88S
- [18] Memut A R, Eswaran H. Some major developments in soil science since the mid-1960s Geodema, 2001, 100: 403 ~ 426
- [19] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. 水科学进展, 1999, 10(3): 311 ~ 317. Lei Z D, Hu H P, Yang S X. A review of soil water research (In Chinese). Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311 ~ 317
- [20] 姚贤良, 程运生等. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1986. Yao X L, Cheng Y S, *et al* Soil Physics (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [21] Sugden A, Stone R, Ash C. Ecology in the underworld Science, 2004, 304: 1 613
- [22] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al* Ecological linkages between aboveground and belowground biota Science, 2004, 304: 1 629 ~ 1 633
- [23] Meyer L D, Skaggs R W, Howell T A. Challenges in soil and water research Transactions of ASAE 1989, 32(3): 887 ~ 893

CURRENT STATUS, CHALLENGES, AND MISSIONS IN SOIL PHYSICS

Li Baoguo Ren Tusheng

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Zhang Jiabao

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Soil physics is an essential discipline of natural sciences, and it plays important roles in sustainable agriculture and environmental protection. In this review, we briefly examined the current status and trends of soil physics in terms of new theories, new technologies, and research focuses at different scales. We also brought up the significant challenges facing current soil physics researches. Finally we proposed five major topics for soil physics research in China in the next decade: The role of soil physics in sustainable agricultural development, soil structure formation and stability, mass transport and energy transfer in soil, spatial and temporal variation and scaling of soil physical properties and processes, and the coupling mechanisms of soil physical, chemical, and biological processes.

Key words Soil Physics; Processes; Modeling; Measures technology; Scaling