



土壤物理学发展现状与展望*

文 / 李保国¹ 任图生¹ 刘刚¹ 周虎² 商建英¹ 沈重阳¹ 黄峰¹ 王钢¹ 李贵桐¹

1 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193

2 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008

【摘要】 文章论述了近年来国际土壤学界在土壤物理学领域的一些新的定位和发展,并就与土壤安全密切相关的几个关键土壤物理研究热点进行了简要回顾,包括:土壤结构、土壤水分监测与运动模拟、农田水文过程与水分生产力、土壤中污染物和胶体的运移、土壤生物物理、生物质炭对土壤物理性质作用机制与效应6个方面。最后从土壤物理学科发展和我国耕地建设的需求展望了土壤物理学的发展前景。

【关键词】 土壤物理,水土资源,土壤安全,关键带

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.Z1.013

从2008年发表“土壤物理学研究的现状、挑战与任务”一文到今天^[1],又过去了7年。这期间,全球所面临的人类生存与粮食安全、资源与环境问题越趋紧迫和严重(FAO)^[2],土壤学的研究越来越受到重视^[3,4]。在此大背景下,加上互联网给各国土壤学科的研究人员提供了及时沟通、交流信息的平台,使土壤学和相关学科呈现日新月异的发展态势。2011年美国土壤学会开展了纪念成立75周年活动,并在美国土壤学会会刊(SSSAJ)发表了数篇土壤学科回顾和展

望的论文。2014年国际土壤学会在韩国济州岛召开第20届世界土壤学大会,隆重开展了纪念其成立90周年的活动,大会安排了“土壤与和平”和“土壤安全”^[5]两场主题报告会。2015年是联合国倡议的国际土壤年,也是中国土壤学会成立70周年,全球土壤安全学术会议也将于2015年5月在美国召开^[6]。我们要以此为契机,面向我国粮食安全、生态文明和建设美丽中国的重大需求,与土壤学科的同仁一道把土壤物理学的研究推向一个新的高度,为我国乃至全球的

* 基金项目:农业部农业科研杰出人才及创新团队(2012)

修改稿收到日期:2015年6月3日



中国科学院

土壤安全做出新的贡献。本文在论述了近年来国际土壤学界在土壤物理学方向的一些新的定位和发展,并就与土壤安全密切相关的几个关键土壤物理研究热点和进展做简要回顾,最后结合学科发展需求和我国的迫切需求(土壤质量退化、水资源短缺、生态环境保护)展望了土壤物理学的发展前景。

1 土壤物理学的定位与发展

1.1 国际土壤学联合会的土壤物理学

近年来,国际土壤学联合会(IUSS)对下设机构进行了较大的调整,并对每一个分委员会的工作领域进行了说明。分委员会 2.1 为土壤物理学,在其官方网站中,对土壤物理学定义如下^[7]:“土壤物理学就是研究土壤的物理性质,重点针对土壤中物质和能量的运输过程。主要内容包括无机、有机和微生物污染物的运输,用分形数学、空间变异性、地统计学、计算机断层成像、遥感的方法来表征土壤物理性质”。该定义强调了土壤物理的基础地位,对其研究内容高度概括化,但特别强调学科的交叉性和现代数理方法和测试手段的应用。

在新的 IUSS 下还有几个新设分委会和工作组与土壤物理学研究密切相关。这些分委员会与工作组近年来国际学术交流活跃,研究成果颇丰。分委员会 1.5——计量土壤学,是应用统计学、分形数学、遥感技术等方法来研究从土体到景观、流域、国家尺度上土壤性质的时空分布,是土壤物理、土壤地理和空间信息技术交叉的一个新兴领域。分委员会 2.5——土壤化学、物理和生物界面反应,是研究从分子到景观水平上,土壤发生的各种生物与非生物的过程中,物理-化学-生物界面系统作用机制。这个领域的研究特别强调现代物理、化学和生物分子水平上技术的应用和交叉。分委员会 3.6——盐渍土,基于近年来全球变化导致的明显的干旱化趋势,全球土壤干旱区高产灌溉农田受到盐渍化的威胁,水土资源盐渍化问题趋重且不可逆转^[8]等问题和需求,盐渍土由

IUSS 中的一个工作组转变为一个分委员会,除对原来灌溉排水改良盐渍土等研究外,强调对盐渍生态系统、盐生植物多样性及其利用、咸水或排水的再利用研究。

在新设的工作组中,与土壤物理十分密切的有:水文土壤学、土壤与景观演化建模、土壤近感、土壤监测等,这些研究领域都强调原位监测并获取数据,进一步发展建立相关的模型。这里特别指出的是水文土壤学的发展。这是 Lin 等^[9]提出的一个水文学与土壤学科交叉的新兴领域,主要研究在异质性的景观中,从孔隙到景观不同尺度土壤结构对水文过程的调控及其生物地球化学与生态效应,以及在不同时空尺度上景观水文学影响土壤发生、变异和功能的机制。最近 SSSAJ 发表专辑论文,论述了此领域的研究现状和展望。

1.2 美国土壤学会中的土壤物理

现代土壤物理学的发展,离不开美国土壤物理学家的开创性工作。美国土壤物理学家不但是美国土壤学会会员的主要组成部分,而且活跃在美国地球物理学会、美国地质学会等主要地球科学的学术团体组织中。从美国土壤学会成立至今,土壤物理学分会一直是该机构核心部门之一。2014 年有学者提议把此分会的名称由土壤物理改为土壤物理与水文学,按照学会章程,最后通过了此提议,因此从 2015 年开始,美国土壤学会中,土壤物理学分会就改为土壤物理与水文学分会。之所以改名,并不是要改变土壤物理的内涵,而是要使土壤物理学的发展更加面向社会,需进一步被社会所认可,突出自己能解决问题的优势领域,即土壤物理应用研究除针对土壤安全外,最主要的就是要在水安全问题上做出应有的贡献。

美国土壤学会土壤物理和水文学分会给出的土壤物理的定义和介绍如下^[10]:“土壤物理学研究土壤的物理、水力和热力学特性和过程,这些过程与自然和人工生态系统密切相关,并可应用于农业和环境科学的众多方面。土壤物理学研究对象针对土壤物理的组分和它们的三相系统(固、液、

气)。当其应用到地表和大气界面时,通过基于和整合物理、物理化学、工程、流体力学和气象学的原理,土壤物理学就成为一个使人着迷和有趣的研究领域。面对当今复杂的问题、需要多学科方法来协同解决时,对土壤物理过程的认识就越发重要。在广义的地球科学中,水文学家、生物地球化学家、大气科学家和工程师应该具备土壤物理学的知识。土壤物理学下设的专业研究方向,包括土壤的物理性质和过程、水分运动和保持、土壤结构和团聚体、溶质运移、物理性质和过程的空间变异性、蒸散以及水和溶质运移的数学建模”。

美国土壤物理学界十分强调通过土壤物理与水文过程研究的结合来解决日益突出的环境保护与农业生产中出现的问题。美国土壤学会于2002年创刊的《非饱和带杂志(VZJ)》,就是由土壤物理学家发起的。经过15年的发展^[11],其学术影响力显著提升,已成为土壤物理和地球关键带过程研究的权威性学术期刊^[12]。

1.3 当代土壤物理研究面临的挑战

2008年,在谈及土壤物理学挑战时,我们主要是依据我国的需求提出问题,包括我国社会经济发展对土壤物理学的要求、我国生态环境建设对土壤物理学的要求、全球气候变化对中国土壤物理学的要求^[1],这些内容涵盖了我国土壤安全对土壤物理研究的全部要求。该文也论述了我国土壤物理学发展与国际先进水平的优势与差距。如今我国的土壤物理研究队伍和发表状况有所改善,总体学术水平与国际先进水平的差距也有所减小^[13],但远达不到我国土壤、环境和生态对土壤物理学的迫切需求。

2011年,在纪念美国土壤学会成立75周年SSSAJ的专辑论文中,由美国科学院院士Jury领衔的、国际土壤物理学界最高奖项

“Don和Betty Kirkham”获得者集体撰写了“Kirkham的遗产和当代土壤物理研究的挑战”一文^[14]。该文指出,在讨论土壤物理研究当代和未来所面临的挑战时,必须与当今世界所面临的重大社会问题——全球变化、粮食安全、土壤和水资源约束紧密联系起来。现代土壤物理学家所掌握或可用的测量和分析工具还十分有限,远远不够充分描述土壤环境和生物地球化学作用的复杂性。我们必须提高在不同关联时空尺度上的预测能力,解决在社会发展中农业和环境中的问题。作为土壤和地球科学团体的成员,我们要积极参与多学科间的合作,寻求解决全球资源紧缺和环境退化问题的方案。土壤物理学(和土壤学)在解决全球问题一些研究领域中大有所作为,如在水文循环和粮食生产中对土壤-植物互作关系的表征、土壤作为生态基础设施及其相应的生态系统服务价值估计与保护。

2 近年来土壤物理学几个关键领域的研究进展

结合土壤安全的主题,对几个土壤物理研究热点领域进行论述。

2.1 土壤结构的研究

土壤结构的定量表征和土壤结构与功能的关系是土壤物理最为核心的研究内容之一。以X-射线CT为代表的探测技术的快速发展促进了有机无机复合体、团聚体、土块乃至土体等各个尺度三维土壤结构的研究^[15]。基于三维孔隙结构,定量分析和模拟土壤水、气运动是传统土壤物理学研究的重要课题^[16,17]。由于土壤结构对水、气运动的决定性作用,土壤结构对温室气体排放的影响不容忽视^[18];利用孔隙尺度模型,将会有助于理解温室气体排放的机理和传输、释放过程^[19]。土壤结构的形成机制及其对土



中国科学院

地利用方式的响应仍是土壤结构研究的主要内容^[20,21]。土壤结构动态同土壤有机质周转密切相关,这方面的研究主要集中在团聚体尺度^[22]。利用CT技术可以原位、动态研究土壤结构与根系的互作过程^[23]。土壤结构决定了根系穿插的阻力,同时也影响根系对水分和养分的获取^[24]。因而可以通过调控土壤结构来获取需要的三维根系构型^[25],并且选择适当的根系类型来改良土壤结构^[26]。微生物在土壤中的分布受到土壤孔隙的控制^[27],而微生物对土壤结构的影响也逐渐受到重视^[28]。

然而,土壤物理学目前仍然缺乏田间原位监测土壤结构时空变异特征的手段和技术,现有描述土壤水分运动、热量传输、溶质运移和气体扩散的方程仍将土壤表层作为刚性介质,往往利用扰动土或田间一次性测定的参数来预测土壤中能量交换和物质传输过程,导致结果误差很大。过去10多年来,利用热脉冲-时域反射仪(Thermo-TDR)技术实现了土壤含水量、温度、电导率、热容量、热导率和热扩散系数的连续定位测定^[29]并完成了土壤容重和孔隙度的连续定位测定^[30],为研究田间土壤结构和水热参数的时空变异提供了可靠技术。

2.2 土壤水分监测与运动模拟

土壤水分含量及变化是区域干旱和农田及生态系统监测的主要参数,也是研究地表水分平衡和能量平衡的关键指标。关于土壤水分测量方法研究进展,已有综述性文章中给出了全面具体的介绍^[31,32]。近年来,随着热脉冲方法的发展^[29],特别是能用于测定土壤表层毫米量级深度的热特性和含水量的理论和探针设计的出现^[33,34],以及能自我矫正双针间距的理论和探针设计的发展^[35,36],加上其空间分辨率高、测量准确及原位实时监测的优点,双针热脉冲方法有望成为研究地表水热平衡和能量平衡最有前途的研究方法。

大尺度水分含量监测是指利用单个传感器探测 $>1\text{ m}^2$ 的面积,或者多个传感器扩展到 $>10\ 000\text{ km}^2$ 范围内的土壤水分^[37,38]。近年来,大尺度土壤

水分监测技术得到了迅速发展。主要出现了如下所述3种新的技术:宇宙射线中子水分测量、L波段卫星遥感和分布式光纤传感器。

2008年以来出现的宇宙射线土壤水分监测系统(COSMOS)为一种基于近地面环境宇宙射线中快中子浓度与土壤含水量关系的土壤水分测量系统^[39]。大量野外实验证明,该方法是一种精度较高的大尺度土壤水分含量监测系统^[40],具有无危害、无破坏、不受土壤质地和盐分影响、测量范围大(半径300—600 m)的特点。

遥感水分测量近年来的发展主要集中在L波段的卫星信号和P波段的雷达信号。人们把GPS卫星的L波段信号用于监测土壤表层5 cm左右的水分含量^[41]。在地表,可以通过对GPS信号和反射信号之间的干涉得到水分含量^[42],其相应水分测量装置即为GPS-IRS。欧洲的SMOS计划通过对卫星信号的L波段进行无线电波段干涉,并结合数据分析处理的新方法来得到全球范围地表水分含量图^[43]。美国NASA在2014年开始的SMAP计划选用了卫星L波段的主动和被动信号来得到表层土壤水分含量^[42]。

关于大尺度土壤水分含量的准确测量,近年来提出了一种有希望的新方法,即通过加热分布式光纤(DTS)外层的金属铠甲,让千米尺度的DTS转变为一个空间分辨率为1 m、温度分辨率为 0.05°C 左右的热脉冲探针^[43],通过建立经验公式来预测水分含量^[44]。

关于土壤水分非饱和流的模拟,最近有学者对现今的土壤非饱和和水力学特性的基本假定提出了质疑,认为我们广泛应用的水分特征曲线模型是基于假定土壤孔隙是由一束不同直径毛细管所组成,据此推导出的土壤非饱和和导水特性与观测值存在较大差异,建议基于土壤孔隙复杂的网络体系,应用逾渗理论来建立土壤非饱和流理论和模型^[45]。对于土壤水分的非稳定流,最近有研究建立了一个四阶偏微分方程的相流模型。在特定的条件下,这个模型转化为我们熟知的Richards



方程。新的模型对非稳定流中的优先流——指流能够很好地模拟与表征^[46,47]。

2.3 农田水文过程与水分生产力

土壤水是最关键的农田调控因子,全球粮食安全和生态安全问题主要是由于缺水干旱引起的。在全球变化下,未来农业水资源越发紧缺,必须大幅度提高水分生产力才能满足全球的粮食安全^[2],而这只能通过农田土壤水分的调控来实现^[48]。近年来,国际上对绿水(土壤水或蒸散耗水)和蓝水(传统意义上的灌溉水)在农业生产、绿水在陆地生态系统中流动特征的研究日益活跃。有研究综合了全球农田水平衡数据,对92个发展中国家实现联合国千年发展目标(MDG)的农田绿水潜力和作物水分生产力进行了评估^[49]。随后,很多同类研究都试图从全球^[50,51]、大洲^[52]、国家^[53,54]和区域的宏观水平评价蓝水和绿水资源量^[55],回答农业生产中蓝水和绿水流的特征,以及提高蓝水和绿水的水分生产力的发生机理和调控机制等科学问题。

最近有研究应用WATERSIM水文模型估算了全球蓝水和绿水资源^[50],应用动态全球植被和水平衡模型LPJmL估算了全球陆地生态系统和农业生态系统中蓝水和绿水的来源、使用和消耗^[51]。研究中基于水文、植被、作物模型以及部分和一般均衡经济模型耦合水文模块来模拟全球和区域尺度作物生产中蕴含的蓝水和绿水量^[50,56,57]。结果均证实了全球尺度上绿水在农田作物生产中发挥的主导作用:全球作物平均虚拟水含量中绿水含量为1 100 m³/t,蓝水含量为291 m³/t,绿水:蓝水=8:2。因此,深入研究各个空间尺度(全球、大洲、国家、区域和田块)的农田绿水和蓝水流特征,集成各个尺度的研究结果,对从整体上优化农田绿水和蓝水流动,提高绿水和蓝水的消耗率和提高水分生

产力具有重要的科学价值和实践意义。在蓝水和绿水的研究对象上,已经从粮食作物扩展到能源作物^[58]。

2.4 土壤中污染物和胶体运移

土壤污染和修复是近10年来国际上的研究热点。由于微观科技的迅猛发展和测试仪器的不断改进,土壤微观结构、尺度效应、生物因素、地质化学因素、微小颗粒等对反应性污染物运移过程的影响受到普遍关注。在重金属、类重金属、放射性核素运移方面,更加关注复杂的生物地质化学因素对运移的影响,例如有机质、根系分泌物和营养物质、氧化还原反应、微生物、土壤非均质性、微观结构等^[59,60]。新涌现的有机污染物、激素、抗生素和持久性有机污染物在土壤环境中的运移行为和影响运移的因素,例如有机污染物的分子结构、大小、水溶性、种类、疏水性、土壤类型、有机质、pH值等,也是当今关注的热点^[61,62]。在研究尺度上,污染物运移向着多尺度方向发展,从分子、微观、孔隙、中尺度、田间尺度等不同尺度上研究污染物在土壤中运移机理,为研究尺度转换问题提供了途径,可以揭示不同迁移参数的尺度依赖性,如地球化学反应速率、吸附系数和滞后系数等,为应用实验室尺度的运移参数来预测田间尺度的污染风险提供了理论基础。微观尺度上的研究更是从机理上反映了反应性污染物在土壤复杂微观结构和气水界面上动态释放和运移过程^[63]。

由于胶体在土壤环境中的行为尚不清楚,胶体运移过程一直是近些年的研究热点之一。这些过程包括病原性微生物在水土环境中的行为、纳米材料和微生物修复受污染的土壤、风化物的运移与再沉积、胶体携带重金属和放射性核素等污染物的运移、河岸带过滤等^[64]。从胶体和污染物运移的影响因素上,许多物理、化学和生物因素影响

胶体和污染物的运移,例如胶体的类型、土壤介质、水流条件、溶液的离子强度和阳离子成份、疏水性、共存胶体、表面活性剂、营养物质、胞外多聚物等^[65]。由于界面力、接触角、土壤含水量等的影响,胶体和胶体协同的污染物在非饱和介质中的运移过程更加复杂^[66]。在研究手段上,将传统的土柱和批处理方法与一些先进的实验手段进行了结合来研究胶体的运移,包括原子力显微镜被用于研究胶体和土壤表面之间的相互作用力^[67],扫描电子显微镜检测胶体在土壤表面的吸附形态^[68],共聚焦显微镜^[69]、激光扫描细胞仪和全内反射显微镜等实时检测胶体在多孔介质中的迁移^[70,71],X-射线CT和同步辐射技术研究胶体在实际土壤中的吸附^[72,73]等。

2.5 土壤生物物理

土壤物理过程与生物过程之间的内在关联及其交互作用已成为现代土壤学的热点研究领域之一,现代微观探测技术与计算机技术的进步则进一步促进了土壤生物物理的发展^[74-76]。例如,X-射线CT技术的应用使得在不破坏土壤结构的情况下获得土壤微孔三维结构信息成为可能;利用纳米二次离子质谱技术能够准确识别土壤样品中生物细胞的生理生态特征信息及其系统分类信息,对于认识微生物介导的元素生物地球化学循环机制具有重要意义^[77,78];而结合荧光原位杂交技术^[77]、基因探针技术^[79]等则能够同时观测和定位土壤生物分子水平的生理生态特征信息以及元素空间分布等物理化学信息^[74]。现代精细工程技术的进步也促进了土壤生物物理学的发展。研究人员利用透明的微细颗粒模拟构建三维可视化的土壤结构,结合上述分析检测技术能够实现土壤空间生物、物理和化学过程的实时原位监测和定位计量^[80]。已有研究创建了可供实时原位观测和可控水文物理条件的模拟土壤实验系统,并成功观测和解析了微生物在不饱和土壤表面的运动和种群扩张过程^[81];通过荧光显微成像等技术从机理层面揭示了植物根系、真菌和细菌等在土壤介质、水、

气等界面交互反应和影响机制^[82]。

在土壤生物物理的理论研究方面,强调从机理层面开展土壤生物物理学研究的必要途径是构建能够模拟土壤物理和生命过程及其交互反应过程的量化模型^[76]。有学者开发建立的基于个体的土壤生物物理模型^[83-85],从细胞和分子尺度模拟解析土壤介质的孔隙特征和水分含量及其分布变化对微生物能动性和营养物质扩散传输的影响和作用机制。另外,随着分子生物学和相关领域大数据的蓬勃发展,得以把土壤生产力水平^[86]、全球气候变化、元素地球化学循环等宏观地球物理化学过程和性状、分子、基因等微观生物物理化学过程直接关联^[87,88]。

2.6 生物质炭对土壤物理性质的作用机制与效应

生物质炭呈黑色,质地轻,疏松多孔,富含官能团,这些特性在根本上决定了其对土壤性质和过程可能有深刻的影响,是近年来国际上热点的研究领域。目前,大部分生物质炭对土壤物理性质与过程影响的研究集中在表观观测方面。这些观测研究结果存在较大分歧。一是认为生物质炭可以显著改变土壤物理性质,如降低土壤容重^[89,90],增强粘质土壤的团聚度^[91,92],提高田间持水量和有效水含量^[90,92,93],提高土壤饱和导水率^[94,95],降低粘质土壤张力、线胀系数和可塑指数^[89,96];另一种观点认为生物质炭的影响并不显著^[95,97]。这种情形充分说明目前人们对生物质炭的认识尚不全面,尤其缺乏机理性研究。

在机理性研究方面,目前涉及到的研究:生物质炭对土壤孔隙连接性和分形维数的影响^[98,99],生物质炭改变土壤总介电常数和介电损失率^[100],生物质炭颗粒与水分子的作用^[9,101,102]等。当然,这些研究还远远不够,不足以构建生物质炭影响土壤物理性质与过程完整而清晰的机理。

3 展望

从全球范围来讲,过去50年内农业产能递增了2.5—3倍。然而,全球范围的增产却在一些地



区导致了水土资源退化以及相关生态产品和服务的恶化。与 2009 年的水平相比, 2050 年全球范围内的粮食产量预计需要再增加 70%, 某些粮食需求增长迅速的国家同时也是水土资源极度匮乏的国家^[2]。这可能造成土壤安全、水安全乃至粮食安全受到严重威胁, 生态环境质量进一步恶化。粮食生产和经济发展达不到预计水平, 从而引发某些国际或地区出现严重的社会问题或冲突, 这也是 2014 年第 20 届世界土壤学大会把土壤安全与和平问题作为主题研讨的出发点。中国过去 30 余年的高速发展, 农业生产和经济发展取得了人类发展史上的奇迹, 但所带来的生态环境问题也引世人瞩目。耕地质量下降、水资源短缺、大气、水土环境污染等问题日趋严重, 使我国土壤安全处于一个十分严峻的时期。土壤物理学学科的研究对象为土壤, 针对的研究过程几乎全部与水过程有关。所以土壤物理学未来在解决土壤安全所面临的问题时, 要针对水土资源和环境问题, 在不同尺度开展研究, 提高人类对水土资源和环境演变趋势的预测能力, 从而实现对其质量的保护与调控。

以下从学科发展需求和我国土壤质量迫切需求来展望土壤物理学的发展前景。

3.1 土壤物理学学科发展的要求

2009 年, 由美国科学院等召集土壤学研究前沿会议, 对土壤学未来研究内容进行了研讨, 正式出版了相应报告^[103], 其中, 许多挑战性的研究内容都与土壤物理学密切相关。2011 年, 国际知名土壤物理学家从土壤物理能解决全球发展所遇到的问题出发, 梳理出了困扰土壤物理学界 8 个长期或涌现的研究问题^[13]。前 3 个领域为田间尺度上土壤水分特性研究的课题, 包括尺度转化、有效水力特性、土壤的结构和功能之间关系的研究; 另 2 个领域为表面张力-粘滞流偏离问

题, 包括土壤中的不稳定流和土壤斥水性的表征研究; 再有 2 个土壤物理与土壤生物整合研究领域, 包括植物-土壤连续体中水流与物质运输, 土壤微生物多样性的物理与生态起源; 最后 1 个领域为对土壤作为生态系统一个组分的研究, 主要是提高对土壤作为生态基础设施及其生态系统服务方面功能重要性的认识。这些问题是今后土壤物理学界相当一段时期内需要重点突破的领域方向, 建议从事土壤物理研究的科研人员关注该文。最近有学者把生态服务的研究提升扩展到地表关键带服务研究^[104], 也值得土壤科学工作者关注。但无论如何, 土壤物理特性和过程都是其中的核心内容。

3.2 我国耕地质量与土壤安全的需求

我国发展面临着粮食安全与生态环境保护的迫切需求。粮食安全的根基在于耕地质量, 即农作物用地的土壤安全问题。当前东北黑土区的土壤退化(土壤有机质下降和土壤侵蚀)、华北地区水资源短缺造成土壤干旱化、南方地区土壤酸化、西北旱作区土壤贫瘠化(土壤侵蚀和养分耗竭)与绿洲地区土壤盐渍化所造成的土壤安全问题, 严重影响到了我国的粮食安全。过去 30 多年的快速发展, 造成我国的湖泊河流水体和部分农区土壤的重金属或有机物污染, 也严重影响到我国生态环境安全与食品安全。我国土壤物理研究应针对上述资源和环境问题开展工作, 发展完善土壤水、盐分、污染物运移与转化的理论和模型, 建立不同尺度土壤结构与水碳氮循环过程的模型, 为我国的土壤安全、水安全、粮食安全和生态安全做出应有的贡献。

参考文献

- 1 李保国, 任图生, 张佳宝. 土壤物理学研究的现状、挑战与任务. 土壤学报, 2008, 45(5): 810-816.
- 2 FAO(联合国粮食及农业组织), 张慧新等(译). 世界粮

食和农业领域土地及水资源状况——濒危系统的管理. 北京: 中国农业出版社, 地球瞭望出版社, 2012.

3 Janzen H H, Fixen P E, Franzluebbers A J. Global prospects rooted in soil science. *Soil Sci Soc Am J*, 2011, 75: 1-8.

4 Baveye P C, Rangel D, Jacobson A R. From dust bowl to dust bowl: soils are still very much a frontier of science. *Soil Sci Soc Am J*, 2011, 75: 2037-2048.

5 张学雷. 从20届世界土壤学大会主题发言看土壤学某些重要问题. *土壤通报*, 2015, 46(1): 1-3.

6 Global Soil Security Symposium. [2015-04-10]. <https://www.soils.org/meetings/global-soil-security>.

7 International Union of Soil Sciences. [2015-04-10]. http://iuss.boku.ac.at/index.php?article_id=40.

8 Rozema J, T Flowers. Crops for a Salinized World. *Science*, 2008, 322: 1478-1479.

9 Lin H, Drohan P, Green T R. Hydropedology: The Last Decade and the Next Decade. *Soil Sci Soc Am J*, 2015, 79: 357-361.

10 SSSA Soil Physics and Hydrology Division. [2015-04-10]. <https://www.soils.org/membership/divisions/soil-physics-and-hydrology>.

11 van Genuchten R. Welcome to vadose zone journal. *Vadose Zone Journal*, 2002, 1: 1-2.

12 About VZJ. [2015-04-10]. <https://www.soils.org/publications/vzj/about>.

13 Kirkham M B. Internationalization of soil physics from an American perspective. *Int Agrophys*, 2012, 26: 181-185.

14 Jury W A, Or D, Pachepsky Y, et al. Kirkham's Legacy and Contemporary Challenges in Soil Physics Research. *Soil Sci Soc Am J*, 2011, 75: 1589-1601.

15 Peng X, Horn R, Hallett P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 1-3.

16 Elliot T R, Reynolds W D, Heck R J. Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity. *Geoderma*, 2010, 156: 133-142.

17 Dohnal M, Jelinkova V, Snehota M, et al. Tree-dimensional numerical analysis of water flow affected by entrapped air: application of noninvasive imaging techniques. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12.

doi:10.2136/vzj2012.0078.

18 Ball B C. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64: 357-373.

19 Laudone G M, Matthews G P, Bird N R A, et al. A model to predict the effects of soil structure on denitrification and N₂O emission. *Journal of Hydrology*, 2011, 409: 283-290.

20 Rabbi S M F, Wilson B R, Lockwood P V, et al. Aggregate hierarchy and carbon mineralization in two Oxisols of New South Wales, Australia. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 193-203.

21 Schlüter S, Weller U, Vogel H J. Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174: 395-403.

22 Ananyeva K, Wang W, Smucker A J M, et al. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon? *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 868-875.

23 Ahmed S, Klassen T, Keyes S, et al. Imaging the interaction of roots and phosphate fertiliser granules using 4D X-ray tomography. *Plant and Soil*, 2015, doi: 10.1007/s11104-015-2425-5.

24 Chapman N, Miller A J, Lindsey K, et al. Roots, water, and nutrient acquisition: let's get physical. *Trends in Plant Science*, 2012, 17: 701-710.

25 Tracy S, Black C, Roberts J, et al. Quantifying the effect of soil compaction on three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) using X-ray Micro Computed Tomography (CT). *Plant and Soil*, 2012, 353: 195-208.

26 Haling R E, Brown L K, Bengough A G, et al. Root hairs improve root penetration, root-soil contact, and phosphorus acquisition in soils of different strength. *Journal of Experimental Botany*, 2013, doi: 10.1093/jxb/ert200.

27 Bailey V L, McCue L A, Fansler S J, et al. Micrometer-scale physical structure and microbial composition of soil macroaggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 60-68.

28 Helliwell J R, Miller A J, Whalley W R, et al. Quantifying the impact of microbes on soil structural development and behaviour in wet soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 138-147.

29 Ren T S, Ju Z Q, Gong Y S, et al. Comparing heat-pulse and time



domain reflectometry soil water contents from thermo-time domain reflectometry probes. *Vadose Zone J*, 2005, 4: 1080-1086.

30 Liu X, Sen L, Robert H, et al. In situ monitoring of soil bulk density with a thermo-TDR Sensor. *Soil Sci Soc Am J*, 2014, 78: 400-407.

31 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*, 2008, 7: 358-389.

32 Dobriyal P, Qureshi A, Badola R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *J. Hydrol*, 2012, 458: 110-117.

33 Liu G, Wen M M, Chang X P, et al. A self-calibrated dual probe heat pulse sensor for in situ calibrating the probe spacing. *Soil Sci Soc Am J*, 2013, 77: 417-421.

34 Liu G, Zhao L J, Wen M M, et al. An adiabatic boundary condition solution for improved accuracy of heat-pulse measurement analysis near the soil-atmosphere interface. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 2013, 77: 422-426.

35 Zhang X, Lu S, Heitman J L, et al. Measuring soil-water evaporation time and depth dynamics with an improved heat-pulse sensor. *Soil Sci Soc Am J*, 2012, 76: 876-879.

36 Wen M M, Liu G, L B G, et al. Evaluation of a self-correcting dual probe heat pulse sensor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 203-208.

37 Crow W T, Berg A A, Cosh M H, et al. Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Rev Geophys*, 2012, 50: RG2002. Doi:10.1029/2011RG000372]

38 Ochsner T E, Cosh M H, Cuenca R H, et al. State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Sci Soc Am J*, 2013, 77: 1888-1919.

39 Zreda M, Desilets D, Ferre T P A, et al. Measuring soil moisture content noninvasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons, *Geophys Res Lett*, 2008. 35:

L21402, Doi:10.1029/2008GL035655.

40 Franz T E, Zreda M, Rosolem R, et al. Field validation of a cosmic-ray neutron sensor using a distributed sensor network. *Vadose Zone J*, 2012, 11 (4). Doi:10.2136/vzj2012.0046.

41 Entekhabi D, Njoku E G, O' Neill P E, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proc. IEEE*, 2010, 98: 704-716. Doi:10.1109/JPROC.2010.2043918

42 Rodriguez-Alvarez N, Bosch-Lluis X, Camps A, et al. Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: Experimental results over a bare soil field. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 3616-3624.

43 Sayde C, Gregory C, Gil-Rodriguez M, et al. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resour Res*, 2010, 6: W06201, DOI:10.1029/2009WR007846.

44 Sayde C, Benitez Buelga J, Rodriguez-Sinobas L, et al. Mapping variability of soil water content and flux across 1-1000 m scales using the actively heated fiber optic method, *Water Resour Res*, 2014: DOI: 10.1002/2013WR014983.

45 Hunt A, Ewing G R P, and Hortn R. What's wrong with soil physics, *Soil Sci Soc Am J*, 2013, 77: 1877-1887.

46 Cueto-Felgueroso L, and Juanes R, A phase field model of unsaturated flow, *Water Resour Res*, 2009, 45: W10409, doi:10.1029/2009WR007945.

47 Cueto-Felgueroso L, and Juanes R. Stability analysis of a phase field model of gravity-driven unsaturated flow through porous media. *Phys Rev*, 2009, E 79: 036301. DOI: 10.1103/PhysRevE.79.036301.

48 Li BG, Huang F. China's food security and soil water management- a green and blue water approach. *Soil Water and Agronomic Productivity*. R. Lal and B.A. Stewart ed. *Advances in Soil Science*, CRC Press. Taylor and Francis. 2012, 19: 325-346.

49 Rockstrom J, Lannerstad M, & Falkenmark M, Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. *Proceedings of the National Academy of*

- Sciences of the United States of America, 2007, 104 (15) : 6253-6260.
- 50 de Fraiture C, Integrated water and food analysis at the global and basin level. An application of WATERSIM. Water Resources Management, 2007, 21(1) : 185-198.
- 51 Rost S, Gerten D, Bondeau A, et al, Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. Water Resources Research, 2008, 44: W09405, DOI:10.1029/2007WR006331.
- 52 Schuol J, Abbaspour K C, Yang H, et al, Modeling blue and green water availability in Africa. Water Resources Research, 2008, 44(7). Doi: 10.1029/2007wr006609.
- 53 Faramarzi M, Abbaspour K C, Schulin R, et al, Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological Processes, 2009, 23(3) : 486-501.
- 54 Chiu Y W, Wu M, Assessing County-Level Water Footprints of Different Cellulosic-Biofuel Feedstock Pathways. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16) : 9155-9162.
- 55 Hoff H, Falkenmark M, Gerten D, et al, Greening the global water system. Journal of Hydrology, 2010, 384(3-4) : 177-186.
- 56 Hanasaki N, Kanae S, Oki T, et al, An integrated model for the assessment of global water resources Part 2: Applications and assessments. Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 12 (4) : 1027-1037.
- 57 Liu J G, Yang H. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: Green and blue water. Journal of Hydrology, 2010, 384(3-4) : 187-197.
- 58 Gerbens-Leenes W, Hoekstra A Y, & van der Meer T H. The water footprint of bioenergy . Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106 (25) : 10219-10223.
- 59 Shang J, Liu C, Wang Z, et al. Effect of grain size on uranium (VI) surface complexation kinetics and adsorption additivity. Environmental science & technology, 2011, 45(14) : 6025-6031.
- 60 Borch T, Kretzschmar R, Kappler A, et al. Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics. Environmental science & technology, 2009, 44(1) : 15-23.
- 61 Muir D C G, Howard P H. Are there other persistent organic pollutants? A challenge for environmental chemists. Environmental science & technology, 2006, 40(23) : 7157-7166.
- 62 Goeppert N, Dror I, Berkowitz B. Detection, fate and transport of estrogen family hormones in soil. Chemosphere, 2014, 95 : 336-345.
- 63 Liu C, Shang J, Kerisit S, et al. Scale-dependent rates of uranyl surface complexation reaction in sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 105 : 326-341.
- 64 Schijven J F, Hassanizadeh S M. Removal of viruses by soil passage: Overview of modeling, processes and parameters. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2000, 30 (1) : 49-127.
- 65 Jiang X, Wang X, Tong M, et al. Initial transport and retention behaviors of ZnO nanoparticles in quartz sand porous media coated with Escherichia coli biofilm. Environmental Pollution, 2013, 174 : 38-49.
- 66 Shang J, Flury M, Chen G, et al. Impact of flow rate, water content, and capillary forces on in situ colloid mobilization during infiltration in unsaturated sediments. Water Resources Research, 2008, 44(6) : w06411.
- 67 Acuna S M, Toledo P G. Short-range forces between glass surfaces in aqueous solutions. Langmuir, 2008, 24 : 4881-4887.
- 68 Tong M, Ma H, Johnson W P. Funneling of flow into grain-to-grain contacts drives colloid-colloid aggregation in the presence of an energy barrier. Environmental Science and Technology, 2008, 42 : 2826-2832.
- 69 Wang C, Fuller M E, Schaefer C, et al. Dissolution of explosive compounds TNT, RDX, and HMX under continuous flow conditions. Journal of Hazardous Materials, 2012, 217 : 187-193.
- 70 May R, Akbariyeh S, Li Y. Pore-scale investigation of nanoparticle transport in saturated porous media using laser scanning cytometry. Environmental Science and Technology, 2012, 46 : 9980-9986.
- 71 Biggs S, Prieve D, Dagastine R. Direct comparison of atomic force microscopic and total internal reflection microscopic measurements in the presence of nonadsorbing polyelectrolytes. Langmuir, 2005, 21 : 5421-5428.
- 72 Li Z, Zhang D, Li X. Tracking colloid transport in real pore struc-



tures: Comparisons with correlation equations and experimental observations. *Water Resources Research*, 2012, 48: WR011847.

73 Tsao T, Chen Y, Sheu H, et al. Separation and identification of soil nanoparticles by conventional and synchrotron X-ray diffraction. *Applied Clay Science*, 2013, 85: 1-17.

74 Vos M, Wolf A B, Jennings S J, Kowalchuk G A. Micro-scale determinants of bacterial diversity in soil. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, 37: 936-954.

75 O'Donnell A G, Young I M, Rushton S P, Shirley M D, Crawford J D. Visualization, modelling and prediction in soil microbiology. *Nature Review Microbiology*, 2007, 5: 689-699.

76 Prosser J I, Bohannon B J M, Curtis T P, et al. The role of ecological theory in microbial ecology. *Nature*, 2007, 5: 384-392.

77 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正. 纳米二次离子质谱技术 (NanoSIMS) 在微生物生态学研究中的应用. *生态学报*, 2013, 33(2): 348-357.

78 Remusat L, Hatton P J, Nico P S, et al. NanoSIMS study of organic matter associated with soil aggregates: advantages, limitations, and combination with STXM. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 3943-3949.

79 Ehrhardt C J, Haymon R M, Sievert S M, et al. An improved method for nanogold in situ hybridization visualized with environmental scanning electron microscopy. *Journal of Microscopy*, 2009, 236: 5-10.

80 Leis A P, Schlicher S, Franke H, et al. Optically transparent porous medium for nondestructive studies of microbial biofilm architecture and transport dynamics. *Applied Environmental Microbiology*, 2005, 71: 4801-4808.

81 Dechesne A, Wang G, Güleza G, et al. Hydration-controlled bacterial motility and dispersal on surfaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107: 14369-14372.

82 Fester T, Giebler J, Wick L Y, et al. Plant-microbe interactions as drivers of ecosystem functions relevant for the

biodegradation of organic contaminants. *Current Opinion in Biotechnology*, 2014, 27: 168-175.

83 Long T, Or D. Aquatic habitats and diffusion constraints affecting microbial coexistence in unsaturated porous media. *Water Resource Research*, 2005, 41: W08408.

84 Wang G, Or D. Aqueous films limit bacterial cell motility and colony expansion on partially saturated rough surfaces. *Environmental Microbiology*, 2010, 12: 1363-1373.

85 Wang G, Or D. Hydration dynamics promote bacterial coexistence on rough surfaces. *The ISME Journal*, 2013, 7: 395-404.

86 van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, 11: 296-310.

87 Bardgett R D, Freeman C, Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2008, 2: 805-814.

88 Schimel J P, Schaeffer S M. Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 348.

89 Chan K Y, Zwieten L V, Meszaros I, et al. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45: 629-634.

90 Peake L R, Reid J, Tang X Y. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*, 2014, 235: 182-190.

91 Jien Shih-Hao, Wang Chien-Sheng. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 2013, 110: 225-233.

92 Liu Z X, Chen X M, Jing Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena*, 2014, 123: 45-51.

93 Brockhoff S R, Christians N E, Killorn R J, et al. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with Biochar. *Agron. J.* 2010, 102: 1627-1631.

- 94 Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 2013, 209: 188-197.
- 95 Bayabil H K, Stoof C R, Lehmann J C, et al. Assessing the potential of biochar and charcoal to improve soil hydraulic properties in the humid Ethiopian Highlands: The Anjeni watershed. *Geoderma*, 2015, 243: 115-123.
- 96 Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, 2014, 114: 37-44.
- 97 Ojeda G, Mattana S, Avila A, et al. Are soil-water functions affected by biochar application? *Geoderma*, 2015, 249: 1-11.
- 98 Gray M, Johnson M G, Dragila M I, et al. Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 61: 196-205.
- 99 Quin P R, Cowie A L, Flavel R J, et al. Oil mallee biochar improves soil structural properties—A study with x-ray micro-CT. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191: 142-149.
- 100 Renukappa N M, Siddaramaiah, Sudhaker Samuel R D, et al. Dielectric properties of carbon black: SBR composites. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2009, 20: 648-656.
- 101 Arthur E, Tuller M, Moldrup P, et al. Effects of biochar and manure amendments on water vapor sorption in a sandy loam soil. *Geoderma*, 2015, 243: 175-182.
- 102 Conte P, Nestle N. Water dynamics in different biochar fractions. *Magn. Reson. Chem*, 2015. DOI: 10.1002/mrc.4204
- 103 Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research, National Research Council, *Frontiers in Soil Science Research: Report of a Workshop*, The National Academies Press, 2009.
- 104 Field J, David P, Breshears D, et al. Critical Zone Services: Expanding Context, Constraints, and Currency beyond Ecosystem Services. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14: DOI:10.2136/vzj2014.10.0142.

Soil Physics: Present and Future

Li Baoguo¹ Ren Tusheng¹ Liu Gang¹ Zhou Hu² Shang Jianying¹ Shen Chongyang¹ Huang Feng¹
Wang Gang¹ Li Guitong¹

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

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

Abstract The problems related to human living conditions, food security, resources, and environments are facing great challenges and attracting a lot of interest. Soil science and soil physics research is becoming more and more important. This paper attempts to introduce the new definition, directions, and trends of soil physics at international soil science in the recent years, including the new developments and relevant theme extensions according to International and America Soil Science Society. Those trends show that soil physics development must be related to the current relative environmental and ecological problems and topics, including food security, hydrology, soil and water contamination and prevention, and ecological issues. The hot issues and promising areas related to soil security and several critical soil physics questions are also discussed. The primary focus is on the following six longstanding or emerging aspects in soil physics that contain key unsolved problems: (1) soil structure, in which the new research methods of soil structure characterization are reviewed from aggregates to field scales; (2) soil water monitoring and movement simulation, in which different scale of soil water monitoring methods (containing heat-pulse method, cosmic-ray neutrons sensor, GNSS-R remote techniques, and actively heated fiber optic method), soil-water unsteady flow theory, and related modeling issues are summarized; (3) farmland hydrology and water productivity, in which agricultural

green and blue water characteristics and the mechanisms of regulating and promoting green and blue water productivity are described at various agricultural field scales; (4) contaminant and colloid fate and transport in soils, in which the trends and developments of contaminant (such as microbes, radionuclide, persistent organic pollutants, antibiotics, and facilitated colloids) transport under micro, batch, column, and field scales are showed; (5) soil biophysics, in which the interaction mechanisms, new methods, and developed models between soil physical process and soil livings are laid out; (6) biochar effect on soil physical property and its related mechanism of lowering soil bulk density, and increasing aggregates, soil water retention capability, soil saturated conductivity, and so on. In summary, the future perspectives of soil physics are looked over from the points of science development and the greatest national demands. To contribute to soil, water, food, and ecology security in the nation and society, it is very important for soil physicists to promote and develop the relevant theories and models of soil-water, solute, and contaminant transport and transformation, and to build the coupling models between soil structure, and water movement and solute cycling (such as carbon and nitrogen) at different spatial and temporal scales.

Keywords soil physics, soil and water resources, soil security, critical zone



李保国 中国农业大学资源与环境学院教授, 博士, “长江学者”特聘教授, 美国土壤学会和农学会会士, 中国土壤学会副理事长。从事土壤和水过程的定量化、土壤作物系统建模、土水资源利用领域研究。主持承担了国家攻关(支撑)、国家自然科学基金重大项目课题、“973”、“863”等各类课题20余项。发表论文400余篇, 其中SCI收录论文80余篇, EI收录论文60余篇, 出版专编著10余部。E-mail: libg@cau.edu.cn

Li Baoguo, A distinguished Professor at the Soil and Water Science Department, College of Natural Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University. He is a fellow of SSSA and ASA. Dr. Li's program focuses mainly on identifying and quantifying soil and water processes at and across multiple scales. He pioneers in investigating soil water movement and salt transport by simulation models. He conducts basic study on modeling and applications of soil water-crop growth. E-mail: libg@cau.edu.cn

中国科学院