

土壤物理学的发展与研究趋势

张 佳 宝

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

作者在较详细地介绍与分析现阶段土壤物理学研究动态及其前沿的基础上,对我国土壤物理学所面临的任务、发展方向提出了见解。其中特别强调了对水平衡、节水农业、土壤结构及全球变化等问题进行系统研究的重要性。

土壤物理学是土壤学最早的6个分支学科之一^[1],然而在一个相当长的时期内,除了饱和和土壤水分问题能通过Darcy定律做定量研究外,其他研究领域主要是采用形态学的观点定性地描述或分析土壤中发生的物理现象和过程。随着科学技术的进步,特别是计算机的推广应用和各学科间的相互渗透,土壤物理学研究正在出现由经验到理论,从定性到定量的深刻变化,并自觉不自觉地朝着为人类享有适当食物和清洁环境而奋斗的目标迈进^[2, 3]。

一、现阶段土壤物理学的发展与研究趋势

(一)研究动态

来自《土壤与肥料文摘》的信息表明,自1981年至1990年10年间共有6541篇土壤物理学研究论文公布于世,平均每年为654篇。从数量的变化趋势分析,近3年来正在逐步上升,特别是在1990年,发表的论文总数已达978篇。很显然,土壤物理学研究正在从过去的稳步发展向将来的迅速发展过渡。信息同时表明,土壤物理学中的各个研究领域的发展是极端不平衡的,这种不平衡既反映了各个研究领域在土壤物理学中的相对重要性,同时也指出了现阶段土壤物理学研究热点。历年来,有关土壤水分的研究论文占50%以上,是当今土壤物理学中最为活跃的研究领域;土壤力学性质的研究逐年上升,1990年发表的论文已达总数的24%,名列第二;而土壤结构的研究则一直稳定在11%左右,位居第三;其他研究领域如空气、温度、质地、电磁等一般都不超过总数的5%。很明显,这种分布与全球范围内的资源不足,以及大规模地推行集约化农业所引起的土壤和环境问题等密切相关的。

(二)研究前沿

分析和总结当前土壤物理学研究内容,其研究前沿可归纳为下列几个方面:

1. 土壤水分动力学的研究。土壤水分动力学是指那些以土壤中水分的能态为基础,来研究非饱和土壤水、溶质和热量运移问题的部分^[4]。整个80年代,土壤水分动力学的研究非常活跃,其热点主要集中在下列4个方面:(1)土壤水分的入渗;(2)土壤—植物—大气连续体中水流的运动;(3)土壤水分运动参数的测定;(4)土壤水分运动的数值(或计算机)模拟。

* 本文承蒙姚贤良、徐富安先生的指正,谨致谢意。

土壤水分入渗的研究内容主要是关于Green—Ampt模型的修正以及Philip和 Parlange入渗方程的求解。经过修正的Green—Ampt模型能较好地说明非均质土壤的降雨入渗以及波浪灌溉入渗过程。波浪灌溉是近年来发展起来的一种新的灌溉技术，它比一般连续灌溉在畦上的水流流得更远。目前Green—Ampt模型应用的主要困难是湿润锋处土壤水分势的测定。

近年来，农田水分循环倾向于通过土壤—植物—大气连续体(SPAC)来研究，然而由于水分在SPAC系统的各个环节中的运动和变化的物理机制还有许多尚不清楚的地方。如干土层和大气中的水汽扩散，液态水到气态水的相变，土面蒸发和叶面蒸腾等，因此，许多学者正致力于研究这些过程。根据目前的研究进展，SPAC系统中的水流运动过程还不能精确地用数学模式进行描述，只是在半理论半经验的阶段。

对测定土壤水分运动参数的方法之所以如此重视，是因为无论是田间法或实验室法，还是直接法或间接法都始终存在着精度和速度的问题。评价测定方法的精度和速度以及建立新的方法使其达到更高的精度和速度是目前研究的主要目的。已经证实，田间实测水分运动参数(如零通量法)能使土壤水分运动的计算获得更可靠的结果^[5]。对区域性土壤水分的研究，通过建立土壤水分运动参数与土壤基本性质的关系来推算某地区的水分运动参数是当前所关注的内容^[6]，尽管这种方法被认为是粗糙的，但是在估计区域性水平衡时具有积极的作用。

土壤水分运动方程的求解问题，如果不顾具体条件而直接求出它的解析解和准解析解，可能使所得结果与实际不符。目前最有效的方法是通过数值计算，即有限差分法和有限单元法^[4]。但是利用数值计算法所要处理的数据及运算工作量相当惊人，特别是对那些由几个数学方程联同一组表示定解条件的表达式，形成一个具体的土壤水分运动问题的数学模型。因此，计算机模拟是当今土壤水分运动研究最感兴趣的方法。

2. 土壤物理过程的数学建模的研究。土壤物理学的研究存在着二个基本问题：(1) 如何认识发生在一个复杂的动态体系中的某一特殊过程；(2) 如何将那些特殊过程综合起来考虑总体。已经发现，研究这两个问题的最有效方法是数学建模，不过从目前的研究进展来分析，似乎更侧重于对后一个问题的建模。这是因为，孤立地讨论单个过程而忽视各个过程之间的相互作用，可能会导致错误的结论^[7, 8]。目前简化而又综合的数学模型正在迅速发展^[9]。

传统的数学建模方法都包涵着这样一个假设：土壤是各向均一的，试验的数据服从确定性序列。然而这种确定性模型(点模型)只能从土柱里得到验证，基本上不能适用于具有较大空间变异的田间土壤。目前已经发现，解决这个问题的途径是建立随机性模型^[8, 9]。这一新的研究动向在1990年第14届国际土壤学大会上已得到了充分的反映。随机模型的最大特点是考虑了田间土壤物理性质的空间变异性，输出的结果是宏观特征随时间的变化。

3. 土壤物理性质的空间变异性的研究。土壤物理性质的时空变异严重地影响着土壤物理的研究和发展，研究空间变异性已经成了土壤物理学主要内容之一。在过去的研究中，主要根据统计学的原理设置采样点，测定土壤变异性的某些指标，如标准差、变异系数等，然后再考虑土壤变异对试验的影响。但是这方法的局限性是很明显的。多元统计学的发展，特别是趋势分析的应用，可以将土壤物理性质的系统变化、局部异常和随机变异区分开来，然而由于土壤物理性质的变化太复杂，有时与地理坐标间没有明显的函数关系。若把时间序列分析改用于空间序列分析，以自相关和空间相关系数来估测和表征土壤物理性质的变异特性，用频谱分析来研究土壤物理性质的空间分布，确实是可行的，但由于空间协方差对数据的要求过高，在实践中一般不易办到。

Matheron把地学方法与统计学方法相结合，形成了完整的公式系统的地统计学^[10]。它

可用于对既具有随机性又具有结构性的各种变量在空间的分布进行研究。美国在70年代应用地统计学理论来研究土壤物理性质的空间变异性，到了80年代，已是土壤物理学的研究热点。空间变异性的研究至少已有3方面的用途被发现：(1) 观察土壤物理性质的分布；(2) 确定土壤物理性质变异的空间尺度和型式；(3) 标定模型的参数，使模型变得实用化。这个目前正在研究和发展的标定理论在理论和实践上都有重要意义。

4. 土壤耕作和压板的研究。在土壤力学性质研究方面，目前最感兴趣的是压板机制及其有效防治途径，这是因为土壤压板是土壤物理退化的最主要原因。据估计，美国由于压板造成的经济损失达11.8亿美元^[11]。目前已经明确，建立模型是研究压板机制最有效的方法。基本的压板模型可分为实验室模型和田间模型，前者是通过室内三轴剪力仪的测定来建立；而后者则是根据田间实际的应力或应变分布获得。Gupta(1987)指出：现有的土壤压板模型已经够用，问题在于缺乏实际的关键性的参数，如压板临界值，各种土壤类型和作物种类的限制值以及特别区域内的土壤含水量的分配机率等^[11]。

保护性耕作(少、免耕)在过去的10年里曾是一个主要研究内容，但随之而来的一系列问题得不到解决，如草荒、病虫害、漏水漏肥、播种与施肥困难等。目前正在重新评价这种耕作方式的效果。一个新的耕作制度——轮耕(轮作、耕作和免耕三者合理的结合)已经提出，并且正在受到重视。

5. 土壤结构及其调节的研究。结构形成机理的研究逐步向分子水平发展，但距分子水平仍甚远^[12]。初步认为，植物分解的中间产物多糖和无机颗粒的相互作用而形成稳定性团聚体，但不同土壤类型与不同分子量及功能团的聚合物间的相互作用仍不清楚，需要进一步研究。

目前研究者们更感兴趣的是将最基本的矿物结构与土粒、团聚体、土体以及土被加以密切联系，进行综合和整体地研究，并通过对不同的调节措施的测试和评价来探索土壤结构管理的优化模式^[13, 14]。土壤结构的概念性模型发展充分体现了这个研究动向。

6. 新的测试技术的探索。当今土壤物理学的发展愈来愈依赖于测试手段的进步。当前除了广泛推广中子仪测水外，其他新的测试方法也正在探索，如应用激光散射法测定土壤的质地和有效含水量；应用计算机控层状X—光照相技术，CAT (Computed Assisted Tomography)来研究多孔介质中的水分分布；应用光导纤维技术观察研究地下和土壤根际的微形态变化等^[15, 16]。尽管这些新技术还很不完善，但反映了近代高技术可能对土壤物理学有着较大的推动。

二、我国土壤物理学所面临的任务

回顾过去40年我国土壤物理的发展^[16]，我们已经取得了令人满意的成就：土壤水分能量概念及测试技术已基本普及并在节水农业中得到应用；土壤结构研究领域正在逐渐扩大；土壤力学性质研究紧密联系当前的耕作制度的改革(少、免耕，轮耕，半旱式整作和虚实并存)已经作出了贡献；我国水稻土物理性质及其管理的研究取得了较大的优势，并且引起了国际上的广泛重视，土壤质地研究已拟出了一个我国暂行的质地分类系统；土壤磁学研究及磁肥即将有所突破。然而，我们也应该看到所存在的问题，特别是基础研究方面，我们不但落后于世界先进国家的行列，而且也不能满足于社会发展的需要。

我国人口众多，在90年代所面临的“粮食—资源—环境”的问题与其他国家相比将更加突

出。土壤物理学也面临着更严峻的挑战。首先,在我国北方干旱、半干旱地区存在着严重的水资源不足,即使在水热资源丰富的热带亚热带地区也存在着严重的季节性干旱(伏、秋旱),因此如何合理地利用土壤水资源是一项十分迫切的首要任务。其次,由于耕地面积的不断缩小,生产潜力将主要依靠集约化程度的进一步提高,以及中低产田的综合治理,为了保证这一战略措施的顺利推进,如何获得或保持具有较高生产力的土壤结构将是一个亟待解决的重要问题。第三,随着土壤资源开发利用的重点向热带亚热带地区转移,控制我国南方丘陵山区的水分、土壤和养分的流失;研究该地区的水平衡将是当务之急。

三、90年代我国土壤物理学的发展方向

综上所述,90年代我国土壤物理学必须在为人类享有适当的食物和清洁的环境而奋斗这一总目标下发展,一方面要跟踪世界发展前沿,切实搞好基础研究,另一方面又要从本国的实际出发,满足社会发展的需要。因此,90年代土壤物理学发展的总方向应该是研究土壤圈及其边界(土壤—水;土壤—大气;土壤—植物)环境中的物质(水、气、溶质)和能量(热量)的转化和移动及其在合理利用土壤水资源、改善生态环境和保持土壤结构方面的作用。根据这一方向,我们必须重视下列几个方面的研究:

(一)土壤水分动力学与不同生态条件下的水分平衡的研究

水分平衡在生产上,大者如对水资源的规划利用,小者对农田的灌溉排水,都有意义,为了减少工作上的盲目性,即使它的计算不甚精确,也是相当必要的。水平衡的计算以质量守恒定律为依据,即土壤水分的增加是由于降水、灌溉和地下补给的结果,而水分的减少则是由于地面蒸发、植物蒸腾和土体内排水的结果。因此,在水平衡研究中,土壤物理学方面的内容主要是土壤水分动力学的内容,这就使我们必须注意以下几个方面:(1)土壤水动态变化的长期监测;(2)水分运动参数的测定与标定,水分平衡分量的测算与建模;(3)不同生态条件下的土壤水分动态变化的宏观预测预报。

(二)土壤水分动力学与农田节水的研究

农田水分的消耗可分为3个部分:作物蒸腾;土壤蒸发及土体内排水,前者是进行光合作用所必须付出的代价,应该予以满足,而后二者一般为无效的消耗,应该加以限制。所以农田节水实质上是维持蒸腾,限制蒸发,降低内排。这就导致了在不同调节措施下蒸腾、蒸发和土体排水的研究,最终鉴别出良好的节水措施,优化出最佳的灌溉模型。

(三)坡地土壤水分动力学与土壤侵蚀的研究

南方丘陵山区的土壤侵蚀严重,研究该地区的水分运动规律将特别重要。过去,水文学家主要注意集水区内的地表径流和地下水流的研究,土壤物理学家则主要注意农田非饱和带一维垂直水流的研究,而对于坡地土壤水分动力学的研究几乎是空白。由于坡度的介入,使得坡地土壤水分动力学与农田水分动力学相比有其不同的特点,除了土壤水分的运动必须考虑是在三维的复杂体系中外,坡度与径流、入渗的关系,侧渗与土壤水分的补给关系也将必须研究。

(四) 溶质移动与物质循环、环境保护以及盐碱土改良的研究

无论是土壤圈中的物质循环, 还是有害物质对环境造成的污染或次生盐渍化的形成, 它们都经历着一个重要过程, 即溶质移动。如果我们过分强调物质的化学转化, 而忽视导致土壤养分损失和污染物扩散的过程, 就很难改善我们的环境。因此, 90年代我们必须特别注意土壤中的元素迁移, 水盐运移以及污染物的移动、扩散和弥散等的研究。

(五) 土壤结构与集约化种植的研究

集约化种植的面积越来越大, 由于高度集约化所引起的土壤退化, 对农业生产的发展已构成了威胁。就土壤物理学的研究而言, 节源高效持续农业的土壤结构条件将是主要研究内容, 其中包括不同承载力的土壤结构性质; 不同集约化程度下的土壤结构管理; 发展土壤结构的概念性模型。

(六) 土壤空气动力学与全球变化的研究

由于人们对“全球变化”的日益重视, 一度受冷落的土壤空气研究将可能成为90年代土壤物理学研究的一个新的生长点。据报道, 来自土壤的5种温室痕量气体, 近百年来在温室效应中的贡献率是: CO_2 为50%; CH_4 为20%; O_3 为8%; N_2O 为4%; 氟氯烃化合物为15%^[17]。因此, 人们将把注意力从原来的对 O_2 的扩散和还原气体对作物生长的影响的研究转移到对 CO_2 , CH_4 等气体的扩散、与大气的平衡以及它们的通量等土壤空气动力学研究方面来。

(七) 土壤压板与农业机械化的研究

尽管我国目前的土壤压板问题还不明显, 然而机械化发展是必然趋势。进行压板机理方面的专题研究将可能为农机具的设计和压板的防治提供依据。

参 考 文 献

- [1] Cassel, D. K., Soil Sci. Soc. Am. J., 50: 1093-1094, 1986.
- [2] Gardner, W. H., Advance in soil science, 4: 1-101, 1987.
- [3] Lctey, J., Future development in soil science research, p. 3, 1987.
- [4] 雷志栋等, 土壤水分动力学, 清华大学出版社, 1988.
- [5] Hillel, D., Soil science, 151: 30-34, 1991.
- [6] Wösten, J. H. M., Transactions of 14th international congress of soil science, Volume I, 34-39, 1990.
- [7] Hillel, D., Future development in soil science research, p. 35-42, 1987.
- [8] Mantog ou, A., et al., Transactions of 14th international congress of soil science, Volume I 10-15, 1990.
- [9] Sharma, M. L., Transactions of 14th international congress of soil science, Volume I, 28-33, 1990.
- [10] Webstar, R., Advance in soil science, 3: 2-70, 1985.
- [11] Gupta, S. C., et al., Advance in soil science, 6: 65-98, 1987.
- [12] 姚贤良, 土壤物理学的研究动态及展望, 土壤, 17: 281-289, 1985.
- [13] Gibbs, R. J., and J. B. Reid, Advance in soil science, 8: 123-149, 1988.
- [14] Kay, B. D., Advance in soil science, 12: 1-52, 1989.
- [15] Keng, J. C. W. et al., Soil technology, 1: 157-167, 1988.
- [16] 姚贤良, 四十年来国际土壤物理学的发展及其对我国土壤物理学的影响, 土壤学进展, 17: 23-27, 1989.
- [17] 赵其国, 为人类生存及改善环境不断加强土壤科学研究, 土壤, 22: 281-289, 1990.