

土壤水研究的进程和展望

李宝庆

(中国科学院 地理研究所
国家计划委员会)

提 要: 本文评述了近年来土壤水的理论研究及其方法、应用性研究的进展情况

主题词: 土壤水

土壤水是陆地水体的重要组成部分。根据Korzoun 1974年计算,在全球储水量中,包气带土壤水约有16,500立方公里,比河槽蓄水多5000立方公里^[1];刘昌明计算的我国土壤水分总通量为3355立方公里^[2];由懋正、袁小良计算的海滦河流域土壤水资源为1380亿立方米¹⁾。土壤水不但数量大,而且与人类环境和人们生活有密切关系:土壤水供给作物生长,是农业生产的必要条件;土壤水是水文循环的枢纽性环节,在四水转换和水资源评价中具有重要地位;在各种污染物质大量存在的人类社会环境中,土壤水又起着传输媒介的作用,污染物质随土壤水的向下运移,会污染土壤和地下水流;向上运移供给作物吸收,会污染蔬菜或粮食等等。因此,研究土壤水的运移,对掌握水循环机理、正确评价水资源有重要意义,对于确保人类环境的优化也将起重要作用。因此,水文学、水文地质学、农林土壤学等专业学者越来越重视对土壤水分运动的研究,土壤水文学也将作为新型学科在逐渐形成,并将在生产建设中发挥积极作用。

(一) 基本理论研究

土壤水及其运移规律的研究,在近二、三十年来,特别在我国有了明显的进展。就水文学领域而论,六十年代初期,还只是把土壤水作为水量平衡推演公式中的蓄存变量,在更多的情况下则是当作0项处理的。在与土壤蓄水直接有关系的防洪、除涝的暴雨径流计算中,也很少去分析水分在土壤中的储存状况和入渗机理,多半只给出一个常数,作为降雨扣损而简化处理了。但是,随着水文学的发展和水资源开发的需要,七十年代以来,已在多处建室设站,专门进行土壤水分运动规律的试验研究了。再就农学来说,过去只把土壤水分含量作为研究作物生长的一个固定条件,主要为农田灌溉服务,在确定土壤水分常数上开展工作。而今,要把土壤水作为环境因子之一,纳入到大气—植物—土壤水(乃至地下水)的系统中来,研究它的输通和调节功能,从适应现代化农业发展的需要。就连水文地质系统也把包气带土壤水从传统的地下水范围中分离出来,添置大量仪器设备,投入大量人力、物力,就土壤水分运动的基本理论问题,进行专门的试验研究。总之,土壤水的动态变化、运动机理及其与人类环境的关系,已为越来越多的学者所重视,并做了大量有成效的工作。

本文1987年2月27日收到,1988年1月13日收到修改稿。

1) 由懋正等:土壤水,1984年。

从土壤水分研究的发展进程来看,特别是与其它学科相比并不显得十分迅速。土壤水分运动的基本理论,对于饱水带来说,达西早于1856年就确定了断面比流速与其水力坡度成正比的达西定律,成为地下水动力学的基础方程式之一;而对于非饱和带即包气带的土壤水分运动来说,直到1907年才由Beckingham提出土壤水势场的概念,但测量问题一直没有得到解决^[3]。1931年Richards提出了毛管理论,他还发明了土壤水分张力计,用以量测土壤水势,从而进一步深化了人们对土壤水分性质及其运动机理的认识^[4]。Richards的毛管理论及包气带水分运动方程式,其实质是论证了达西定律在非饱和带中的适用性,但是达西定律本身只适用于层流运动,比流速过大或过小都将受到局限。土壤水分含量太小或动水比降太小,不符合达西定律边界条件的情况,在土壤包气带中是大量存在的。因此毛管理论并不为研究学者们满意。后来,有人在毛管理论的基础上引入了扩散系数,1952年Klute建立了扩散方程^[5],并把毛管势变成了土壤含水量,扩展了土壤含水量在土壤水分运动研究中的作用,但实质上只不过是Richards毛管理论的数学演绎。与此同时,Philip等人也曾试图用热力学理论去描述土壤水分运动的问题,并于1957年提出了水分运动的热扩散方程式^[6]。由于水蒸气-水-土粒子是相互关连的,而土壤空隙中的温度梯度和全土层的湿度梯度又不一致,其公式只能是近似的,不具备完善的理论基础。此后,许多学者仍在探求土壤水分运动的真实机理,为归纳描述这一运动的完整理论而在继续努力。

(二) 研究途径和方法的发展

对于土壤水分的研究,五十年代前后,苏联学者走实验研究的道路,把土壤水的研究与土壤的性质和结构密切联系起来,通过观察研究土粒子和水分间发生的现象,究其根源,归纳规律,特别是把引起土壤水分性质明显变化时的土壤含水量,概化为土壤水文学常数。并把这一系列的常数值、确定方法及对作物生长的作用等做为主要的研究内容,在这些常数中,最重要的有饱和含水量、田间持水量、毛管断裂含水量、初期凋萎含水量和永久凋萎含水量等等。知道了这些特征值,把它与实测土壤含水量进行比较,就可以判断土壤水分状况对作物生长的保证程度,从而为宜采取的灌溉或排水等土壤改良对策服务。这种研究方法和指导思想,一直对我国学者有着深远的影响。

鉴于作用于土壤水的内外力场及其变化的复杂性,五十年代后期开始,美国的许多学者采取与苏联学者不同的研究方法。他们首先研究了作用于土壤水的各种力的合力的表示法,进而分析合力和土壤含水量之间的关系,发展了由能量观点-土壤水势研究土壤水分运动的数学解析法。根据这种方法,可以把各种不同的力,都用同一单位给予定量表示,就连上述各种水分常数也不例外,这是一个很大的突破性进展。但是,此种研究方法,除了在理论和技术上需要进一步发展和完善之外,土壤水分的运动及其测量反应,较之势场变化的滞后现象是其主要难点之一。因为即使相同的含水量,如果土壤处于不同状态,所反映出来的吸引压力值也不一样。而且自然界的土壤水分状况,特别是湿润地区和受地下水影响较大的地区,土壤的干燥和湿润过程经常是频繁交替的。因此,未来土壤水文学的发展将是上述两种研究途径的相互渗透与结合。

在土壤水分运动的应用研究中,比如推求土壤的蒸发蒸腾量,降雨入渗对地下水的补给量等,水量平衡法被广泛应用着,而且成为解决实际问题的有效手段之一。问题在于,这种

方法不去或很少触及土壤水分运动的机理,对许多现象的认识就不充分、比如降雨会引起地下水位的抬升,实际观测和水量平衡计算都可以得到相同的结论。但是这种抬升与降水之间的相关关系如何?这是与土壤水分运动密切有关的。结果证明,实际观测到的抬升过程,远比用水量平衡法推算的时间要来的快得多!道理何在?引起地下水位上升的补给水源究竟是土壤水还是雨水?土壤水的运移起了什么作用?这些问题都是水量平衡法顾及不到的。再如,所谓土壤水的运动,究竟是紊流、层流、还是大孔隙流?不同性质土壤水,也即和土粒子结合程度不同的水,是否都参与土壤水流的运动等等,这类问题也是难以用水量平衡法进行深入研究的。

六十年代以来,用同位素示踪的方法研究水流运动问题得到发展,并逐步形成了同位素水文学这一专门学科。在土壤水分运动的研究中应用最多的是碳、氢、氧等的环境同位素。德国、美国、加拿大及澳大利亚的一些学者都用重水(D_2O 、 T_2O)、氘(3H)作为追踪剂对土壤水的入渗规律及“真实速度”进行了实验研究,并取得很好效果^[7,8]。日本也开展了这方面工作,得到了大体相近的认识^[9]。试验表明,在入渗过程中,追踪剂(如重水)浓度在土壤中沿深向的分布,基本上符合高斯误差曲线的分布规律,而且随着时间的延续,越向深层,浓度的分散程度越大。这就表明,降雨入渗的水流基本上是新入渗的水分呈层状的叠压在先前入渗的水流上面,把原有的土壤水分向下挤压,而没有超越的现象。人们把这种水流模式称之为活塞流(Piston flow)。在水流的入渗过程中,水分的横向扩散也是存在的,但数量很少。据在日本火山灰壤土质农田中取样,进行了不同深度、不同含水率状况下的 3H 浓度的分析,并定性地得到如下结论^[10]:首先,在同一部位,不同性质的土壤水(包括结合水、半结合水、自由水等)中,所含有的 3H 浓度并没有明显的差别;不同部位间,埋藏深度越大,包含的 3H 浓度越高。因此他否定了“只有自由水在重力作用下移动,而结合水和半结合水都不参与土壤水运动”的说法。但是毕竟结合水所含有的 3H 浓度比半结合水和自由水相对低,这就说明自由水的交替周期较短,比较易于移动^[11]。总之,同位素的应用,揭示了土壤水分运动中的一些很有意思的现象,丰富了土壤水分运动研究的内容。这种研究还在继续和发展。

除了应用环境性同位素作为追踪剂研究土壤水分运动之外,继 γ 射线之后,中子水分仪也得到了广泛的应用,并成为研究土壤水分运动中优越于其它量测手段的仪器。

(三) 我国的应用性研究

土壤水分运动研究的进展,除了在研究方法和量测仪器方面有所反应之外,研究成果的应用范围和研究领域也扩展了。近年来,国内外学者,通过土壤水势的实测资料,研究土壤水分零通量面的变化规律,并结合土壤水分含量变化过程的测定,推求土壤水分蒸发量的方法取得了一定成效^[12]。此种方法往往被简称为零通量面法。不但可以计算任意时段的蒸发总量,也可通过零通量面的位移,了解蒸发过程和蒸发影响的土层厚度,加深了对蒸发机理的认识。在计算处理上,与其它利用水势梯度的求算方法相比,避开了非饱和导水率这样的土壤水分特征系数所带来的麻烦,提高了成果精度。

从七十年代后期开始,许多科研单位和大专院校,对土壤水分运动参数做了大量的研究和测定工作,包括土壤水分特性曲线($S \sim \theta$)、降雨入渗补给系数 α 、土层给水度 μ 、潜水蒸

发系数 C 以及非饱和导水率 K 、扩散率 D 等。其中对 α 、 μ 和 C 的认识取得了较大的进展。以往这些参数被认为是反映土壤岩性的物理常数,近年来的研究表明,这些参数除了与土壤质地结构有关外,还随地下水位埋深、气象条件的不同而变化,从而为水资源的分区评价提供了科学依据。为解决土壤空间变异性问题,清华大学还对华北平原的几种主要土壤的水分运动参数进行了模糊聚类 and 标定分析,得出了标定水分特性曲线,标定导水率曲线及相应的标定因子的概率分布,为用数学物理方法定量研究土壤水分运动及无资料地区提供了方便。他们对土壤水分运动一维流数学模型,用电算手段进行数值解,输入降雨、蒸发、灌溉等数据,即可输出不同时间段的土壤水分变化过程和分布状况,为开展土壤水分预报和指导灌溉作业提供了可能。

通过入渗水流在包气带土层中运移规律的研究,推求降雨入渗对地下水的补给过程和补给量,已成为计算地下水资源量、分析地表水和地下水相互转换关系、评价地区水资源的重要手段之一。通过对入渗和蒸发(包括潜水蒸发)机制的分析,对确定使地下水的无效蒸发损失最小,入渗补给量最大的地下水调控,以及为防止土壤盐碱化而进行的地下水埋深限制水位的确定等,都取得了积极作用。包气带土壤水分运动规律的研究,在分析暴雨径流关系,土壤对水分的调蓄过程,以及挖掘土壤水在农业供水的潜力和缓解水资源供需矛盾中,都得到了实际应用,并在继续深入开展这方面的研究工作。

(四) 观测设备

包气带土壤水分运动,除了和气象条件有密切关系之外,和地下水的埋藏深浅也有直接关系,它们兼为土壤水的补给来源和排泄通道。降雨时,土壤从上部接受补给,多余的重力水向下排泄给地下水;无雨日,土壤水通过蒸散发向大气排泄,同时又接受地下水的毛管水上升补给或称潜水蒸发补给。因此,建立不同地下水位埋深条件的实体模型,开展包气带土壤水分运动的研究是十分必要的。它不但可以进行物理机制的专题试验研究,还为数字模拟积累资料,提供比较。目前国内外普遍应用的观测设备是蒸渗仪(Lysimeter)大体有两种不同的型式:一种是专供测定土壤蒸发量的称重式蒸渗仪,土体面积和深度各异,称重方法和量测精度也不相同。我国规模最大的要算中国科学院禹城实验站1985年设置的蒸渗仪¹⁾。这种蒸渗仪隔断了和地下水的联系,只能量测自然降雨状态下的土体蒸发和入渗的出流量。另一种则是水文地质系统使用的ГГН3000型地中蒸渗仪。主要功能是量测不同地下水位埋深条件下的潜水蒸发量和降雨入渗流出量。为了测定不同地下水埋深和不同土质乃至不同植被覆盖条件下的潜水蒸发量,一个测站往往要设置数十个蒸渗桶。上述两种型式的蒸渗仪是世界公认的标准性仪器,积累了大量的测验数据,是研究土壤水分运动不可缺少的基础设施。主要缺点是,它们都只能测定全土体的时段蒸、渗总量,而不能监测土体中土壤水分和水势的分布及其变化过程,对于研究土壤水分运动机理有较大的局限性。如何进一步完善和改进是共同瞩目的问题之一。中国科学院禹城试验站,1984年专门设置了一套包气带土壤水分运动综合测定装置,就是一种新的尝试。其主体仍为蒸渗仪,但可以人为设定地下水位,使整个土体构成包气带和饱水带相连系的土壤实体模型。并附设中子水分仪器测管,测定土壤水分含

1) 参看《地理研究》1985年第4期报道。

量及运移过程;不同埋深的负压计,供测定水势剖面而用;自动洒水系统,供模拟降雨用。以及潜水蒸发和地下出流的量测系统。主要开展降雨入渗、土壤和潜水蒸发以及土壤中污染物迁移运动规律的实验研究。

土壤水分运动研究工作的发展,还在于科研和生产部门的共同努力,广泛积累资料并使试验研究成果在大范围上实际应用。特别要注意在发展农业生产和正确评价水资源以及解决水资源供需矛盾上发挥它应有的作用。为此,有人提出土壤水资源的概念。这对在学术上完善对水资源系统的全面认识,在生产上重视对土壤水的有效利用有重要意义。但是,对土壤水资源的确切定义、评价方法以及开发利用措施等问题的研究还很不成熟,吁请专家学者们进行深入探讨。除此之外,有关测量设备的研制和改进,也是急待解决的问题之一,中子水分仪,D系列电测土壤湿度计,量测土壤水势的负压计等无论在测示范围,制造工艺和质量鉴定上还需做大量工作,希望有关部门予以重视。

(五) 土壤水的调节和利用研究

土壤水具有非重力水的性质,主要以毛管水的形式供给作物吸收和利用。另外,土壤水处于不停地水文循环运动之中,即使不被作物吸收,也会因自然蒸散发而消耗。因此,增加土壤水以毛管形式的蓄积量和减少它的非生产性消耗,是实现土壤水调节和有效利用的两个主要方面。多年来我国科学工作者结合土壤水分运动规律研究,在调节和利用土壤水途径和措施方面,做了大量的试验研究工作,为农业节约灌溉用水,缓解水资源供需矛盾开阔了思路,在生产建设中发挥了积极作用。

提高土壤的蓄水能力,是提高农业利用有效降雨的重要环节,主要措施是修建梯田,平整土地和改良土壤的团粒结构。在地下水埋藏较浅的地区,降低地下水位以扩大包气带土层厚度,也会减少降雨所产生的地表径流量而增加土壤对雨水的蓄积,根据德州地区试验¹⁾,在多年平均降水量为600毫米的条件下,把6—9月的地下水位埋深从0.5米降低到2米,土壤蓄水对降水量的蓄积比例可由0.58提高到0.70;北京农业工程大学采用ILSA-80型松土暗沟犁开沟松土,在沟深50—60厘米,沟距1.5米情况下,可使0—50厘米土层提高23%左右的贮蓄水量²⁾。

在抑制和减少土壤水的非生产性消耗方面,以研究施用物理的和化学的地表复盖为主。据山西省临汾地区农科所试验,棉田实行塑料地膜复盖,可减少田间总耗水量10.4%,中科院地理所试制的化学覆盖物,对0—40厘米土壤水分的抑制蒸发率可达40%左右,而且具有脱盐增温、增肥的效果^[18];在土壤水分比较充足的秋末冬初覆盖地膜,可以使翌年春季0—10厘米土壤平均含水量保持在14%以上,不需播前灌溉即可取得棉花丰收的效果³⁾。采用稻秆和苜蓿等复盖,也可起到蓄水保墒的作用,还可转化成有机肥料,增强地力。

加强田间管理,改进耕作制度,更是传统的蓄水保墒措施,这方面经验很多,因为不是本文重点,故不再赘述。

总之,土壤水的调节和有效利用,宜于采取多种措施,综合治理;同时,每种措施又都

1) 于增光等,德州地区三水转化的试验研究,1984年。

2) 北京农业工程大学:提高土壤蓄水能力的研究,1987年。

3) 张兴权:隔年土壤水分动态及保蓄利用研究,1986年。

能起到调节水分、增强地力, 防治盐碱, 提高地温等多种效用, 达到节水增产的目地。在水资源短缺的北方地区, 深入开展此项研究, 是实现农业供水合理化, 缓解水资源供需矛盾的重要课题。

参 考 文 献

- 〔1〕 Korzoun V.I.: World Water Balance and Water Resources of the Earth, Leningrad, 1974.
- 〔2〕 刘昌明: 中国水量平衡与水资源储量的分析, 中国地理学会第三次全国水文学术会议论文集, 科学出版社, 1986年
- 〔3〕 Buckingham, E.: Studies on the movement of soil moisture, U. S. Department of Agriculture, 1907.
- 〔4〕 Richards, L.A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics. I, 1931.
- 〔5〕 Klute, A.: A numerical method of solving the flow equation for water in unsaturated materials, Soil Sci., 73, 1952.
- 〔6〕 Philip, J.R., de Vries, D.A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Am. Geophys. Union, Trans., 1957.
- 〔7〕 Zimmermann, U., Ehlig, D. and Munnich, K.O.: Soil-Water movement and evapotranspiration; Changes in the isotopic composition of the Water. Isotopes in Hydrology, IAEA, Vienna, 1967.
- 〔8〕 Ligon, J.T. et al. (1977). Tracing vertical translocation of soil moisture. J. Hydraul. Div., Am. Soc. civil Eng., 103.
- 〔9〕 榎根勇、田中正、嶋田纯: 環境トリチウムで追跡した関東ローム層中の土壌水の移動, 地理学评论, 第53卷, 第4号, 1980.
- 〔10〕 Andersen, L.J. and Sevel, T.: Six years environmental tritium profiles in the unsaturated and saturated zones, Isotope Techniques in Groundwater Hydrology Vol. 1, IAEA, 1974.
- 〔11〕 榎根勇: 地下水力かえ弁と不飽和流, 土と基礎, Vol. 29, 1981.
- 〔12〕 李宝庆, 杨克定, 张道帅: 用实测土壤势值推求土壤水分蒸发量, 水利学报, 第3期, 1987年。
- 〔13〕 中国科学院地理研究所抑制蒸发组: 土面增温剂及其在农林业上的应用, 科学出版社, 1981年。

THE DEVELOPMENT AND PROSPECT OF SOIL WATER STUDY

Li Baoqing

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences and State Planning
Commission of The People's Republic of China)

Subject terms: Soil water

Abstract

The research work of soil water movement is based on the capillary theory, which will be important continually in the future.

In the view of the research method, we know that mathematical model and digital analysis are becoming the most important upsurge, besides the traditional observative experiment, practical measurement and physical simulation. The use of isotopic trace has shown up many new problems and widen the field of soil water movement research work.

Recently, many kinds of lysimeters have been established and many active monitoring works have been done in our country. We can say that the research of soil water motion develops rapidly.

At the same time, indoor simulation work begins now. In fact, the combination of the two ways gives us a very deep understanding on soil hydrology factors and its variation system.

We have also achieved some new results in evaporation and infiltration by analyzing the fundamental theory of soil water movement, which enhanced the explanation of water transposition system and founded the base of water resource evaluation.

The research work of soil water regulation and its effective use, which we did in order to meet the need of production, has opened up a new way to save the insufficiency of water resources.

Otherwise, the soil water motion is a very complicated problem, affected factors are numerous, time and space vary highly indeed. It is very necessary for us researchers to continue to deal with the basic theory of soil water movement, exploit the new apparatus and research methods, solve the practical problems effectively. Our task is very heavy and far-reaching.