

节水农业中的土壤水研究

王 艳,任秀娟,杨剑虹

(西南农业大学资源环境学院 重庆 400716)

摘要 概述节水农业的概念、现状及土壤水的相关研究成果。农田水循环是以降水—地表水—土壤水—地下水“四水”转化为主要形式的农田水的大循环;土壤—植物—大气连续体是农田水的小循环,土壤水在其中发挥了水量和水势贮存转运站的作用;土壤水是“四水”转化和土壤—植物—大气连续体的中心环节和联系纽带。初步探讨了以节水高产为目标的田间土壤水分的最优调节问题。

关键词 节水农业;土壤水;最优调节;SPAC;FWC

中图分类号 S152.7

文献标识码 A

文章编号 1006-764X(2004)07-0044-04

为了搞好节水农业,有必要对有关土壤水的某些基础性问题进行分析与研究。农田土壤系统的动态功能主要在农田水循环(farmland water cycle,简称 FWC)和土壤—植物—大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum,简称 SPAC)中实现的。FWC 是农田水的大循环,SPAC 是农田水的小循环,前者是整个节水研究的大背景和基础,也是节水潜力最大的领域。作物对水分的利用,主要是通过作物根系吸收土壤水分来实现的,而降水、地表水、地下水也只有转化成土壤水才能被作物吸收利用。因此,土壤水是“四水”(大气水—地表水—土壤水—地下水)转化过程的中心环节,是 FWC 和 SPAC 联系的纽带,是节水农业研究中的重要组成部分,具有深化研究的必要性。深入研究土壤水和土壤水的最优调节问题,对节水农业研究具有重要的现实意义。

1 节水农业概述

节水农业是以节水为中心的农业类型,也就是充分利用降水和可利用的地表、地下水资源,采取农业和水利措施,合理开发利用与管理农业水资源,提高水分利用效率和效益;同时通过治水、改土、调整农业生态结构,改革耕作制度与种植制度,发展节水高产优质高效农业,最终实现农业持续发展。发展节水农业的关键在于控制从水源到作物产量形成过程中的水分无效损失,包括工程输水损失、田间储水损失和作物蒸腾损失三部分,在充分利用降水的基础上,采取农业和水利措施,合理开发利用与管理农业水资源,提高区域水资源的整体效率^[1]。围绕发展节

水农业的工程输水、田间储水和作物蒸腾三大关键环节,节水农业形成了工程节水、农艺节水和管理节水三大基本节水技术系统^[2]。

我国的节水农业技术应用开始于 20 世纪 70 年代,80 年代以来受到我国政府和社会各界的普遍关注。实践表明,节水农业在全国各地产生了十分显著的节水增产效果。自流灌区搞渠道衬砌,减少输水损失;田间进行土地平整,划小畦块;提水灌区推广低压管道输水灌溉;丘陵干旱山区近年喷、微灌发展迅速。目前全国渠道防渗长度已超过 55 万 km,北方地区低压管道输水面积 333 万 hm² 以上,滴灌面积 1.33 万 hm² 以上。在节水灌溉技术、节水灌溉制度和节水灌溉管理等方面取得新进展的同时,节水农业的研究正在朝综合方向发展,研究工程节水技术同农艺节水技术(水肥耦合、耕作措施、作物结构与布局、地面覆盖)和化学节水技术的综合、组装,把节水农业从试区向面上推进^[3,4]。

2 土壤水研究

土壤水指的是由地面向下至地下水面(潜水面)以上土壤层中的水分,亦称土壤中非饱和带水分。Jacob Bear 将非饱和带(有译称为充气带、包气带)又区分为三个亚带,即土壤水带、中间带(或称渗水带)和毛细管带。我国学术界习惯地将土壤水研究包括了整个非饱和带^[5]。

2.1 土壤—植物—大气连续体

水分经由土壤到达植物根表皮进入根系后,通过植物茎到达叶片,再由叶气孔扩散到宁静空气层,

最后参与大气的湍流交换,形成一个统一的、动态的相互反馈连续系统,即土壤-植物-大气连续体。Philp 于 1996 年提出了较完整的关于 SPAC 的概念(图 1),认为尽管介质不同,界面不一,但在物理上都是一个统一的连续体,水在该系统中的各种流程就像连环一样,互相衔接,而且完全可以应用统一的能量指标——“水势”来定量研究整个系统中各个环节能量水平的变化,计算出水流量[6,7]。

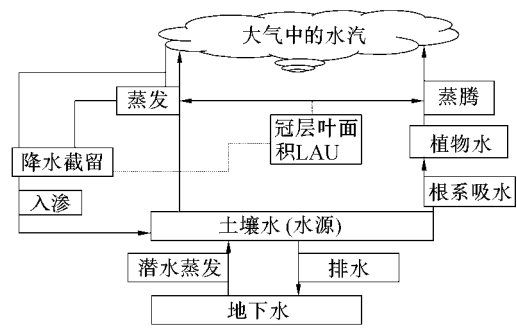


图 1 土壤-植物-大气连续体水流路径

SPAC 理论在农田灌溉中的应用,在模拟预测田间土壤水分动态变化和作物蒸发蒸腾动态变化进行灌水预报,以及模拟灌层叶温或叶水水势、气孔阻力的动态变化等的研究已有一定进展,但在田间水分转化效率、节水灌溉指标体系、作物缺水信息及诊断和节水高产为目标的农田水分管理与调控方面尚需探索和不断深入。

2.2 田间土壤水量平衡

土壤水是自然界水分循环的一个重要分支。大气降水或灌溉水进入地面,一部分可能通过地表径流汇入江河湖泊,另一部分则入渗成为土壤水。入渗进入土壤的水分经再分布,从而形成土壤含水剖面。土壤水可能进一步下渗,补充地下水(即所谓内排水),另外在有植被的块地,根层周围的土壤水被作物根系吸收并由叶面蒸腾,或通过地面水分蒸发等途径又回到大气中。因此,土壤水在自然环境中有着收支水流过程,为农业生产管理提供依据。

下面着重讨论田间土壤水分平衡。大气降水、地表水、地下水及各种形式供水,都要经过土壤被植物吸收利用,变为植物水,然后再以水汽形式扩散到大气中。水在 SPAC 循环中,尽管过程错综复杂,但仍遵循质量守恒定律。田间土壤水分平衡,是指对于一定面积和厚度的土体,在一段时间内,其土壤含水量的变化应等于其来水项与去水项之差,正值表示土壤贮水增加,负值表示减少。据图 2 可列出其土壤水分平衡的数学表达式[8]:

$$\Delta W = R + I + K_r - ET_a - (A_a - A_z) - D \quad (1)$$

式中: ΔW 表示计算时段末与时段初土体贮水量之

差, mm; R 为计算时段内降水量, mm; I 为计算时段内灌水量, mm; K_r 为计算时段内上行水总量, mm; ET_a 为计算时段内土面蒸发量和植物叶面蒸腾量, mm; A_z 为计算时段内地面进流量, mm; A_a 表示计算时段内地面出流量, mm; D 为计算时段内下渗水量, mm。

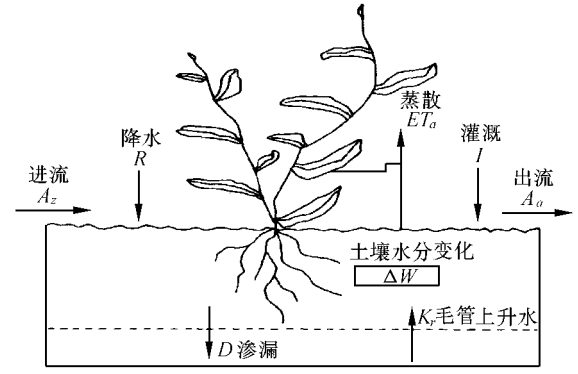


图 2 田间土壤水分平衡示意

根据式(1),用已知项可以求得某一未知项(如蒸散量等),这就是所谓的土壤水量平衡法。在研究土体水分状况周年变化、确定农田灌溉时间以及研究 SPAC 中的水分行为时常用到此式。

2.3 土壤水的有效性及其对作物的影响

a. 用土水势界定土壤水的有效性。土壤水的有效性通常以田间持水量 θ_f 为上限,凋萎系数 θ_{wp} 为下限,从而以灌溉允许的土壤最大含水量 θ_{max} 为田间持水量,以允许土壤最小含水量 θ_{min} 为凋萎系数。由于各种土壤的 θ_f , θ_p , θ_{max} 等水分参数差异很大,所以近年来一般用土水势来界定土壤水的有效性[8]。

b. 土壤水对作物的影响。作物对土壤含水量的要求,随作物种类和品种特征、生长发育阶段、土壤质地与结构、农业技术措施以及气象条件的不同而有差异[9,10]。西北农业大学康绍忠研究发现,黄土区土壤相对有效含水率降低到 50% 以下时,作物蒸腾蒸发才开始明显下降,在大量节水的同时获得中等以上产量。宁夏吴忠、甘肃武威等地的结果也表明,在土壤含水率降低到 40% 田间持水量时作物仍能获得较高的产量。

3 土壤水在水循环中的地位和作用

土壤层是陆地水分循环的纽带,土壤水是非饱和和水体,是水分循环不可缺少的环节。这是因为:①土壤层是接纳降水的主要场所,只有当蓄满或者出现超渗现象时,才会产生其他转化形式(冬季积雪和冰盖例外);②土壤的状况(渗透性、湿度、植被、粗糙度)是决定地表径流形成的重要因子,通过土壤的降雨入渗是地下水的主要补给形式;③土壤水是陆

地植物蒸腾和土壤蒸发的基本水源,它在保证植物生长发育需水的同时,积极参与水分循环,是水分循环最活跃的一环。

3.1 FWC 中的土壤水

水是生命赖以生存和发展的最宝贵资源,可以更新、永续利用,进行水文循环,形成了大气水—地表水—土壤水—地下水,构成“四水”水文水资源系统。“四水”在全球水文循环过程中,水以其不同的形态和能态,相对地存在于大气圈、岩石圈、生物圈等环境,每个阶段形成的“四水”,可以各自独立,自成体系,又相互关联、相互依存、相互转化、相互制约,共同处于一个“四水”相互转化系统,进行着明确而有序的“四水”相互转化。

大气水主要指大气降水,它是地表水、土壤水、地下水的总来源,又普遍而深刻地控制着地表水、土壤水、地下水。地表水主要指地表径流,受地形、地貌、土壤、植被等下垫面条件的共同作用。大气降水一部分转化为地表径流,绝大部分被土壤拦蓄,入渗转化为土壤水,在重力作用下,其中一部分下渗转化为地下水。

土壤水是贮存于多孔介质土壤中的那部分水,为非饱和状态,接受大气降水、地表水、地下水及灌溉水的多重补给,主要消耗于陆地表面蒸发和植物蒸腾,在有作物的农田,为作物生长所需的实际腾发(含棵间蒸发和作物蒸腾),又将土壤水转化为大气水,显然,非饱和状态土壤是“四水”相互转化的核心场所。

地下水是贮存于多孔介质含水层中的那部分水,为饱和状态,它不仅被开采作为城乡生活用水和工农业供水的水源,而且可借土壤毛细管上升补给土壤水。地下水的人为开采、渗流涌出,使地下水转化为河川基流,河川地表水径流入渗又转化为地下水。

3.2 SPAC 中的土壤水

尽管 SPAC 介质不同,界面不一,但水在它们之间的流动可用“水势”联系起来。土壤水被植物吸收转化为植物水,然后经叶片气孔以水汽形式扩散到大气中去,水的整个流动过程靠水势驱动,即从高势能向势能低处运动,气流动速率与水势梯度成正比,与水流阻力成反比。由于土水势大于根水势,根水势大于叶水势^[11],使 SPAC 水循环这一动态过程连续不断地进行。土壤水在 SPAC 中发挥了水量和水势贮存转运站的作用^[12]。

3.3 土壤水是“四水”转化与 SPAC 的联系纽带

FWC 是整个节水农业研究中的重要组成部分:前者是整个节水研究的大背景和基础,是节水潜力最大的领域。作物对水分的利用,主要是通过作物根

系吸收土壤水分来实现的,而降水、地表水、地下水也只有转化为土壤水才能被作物吸收利用,因此,土壤水在“四水”转化过程中是中心环节,是“四水”转化和 SPAC 的联系纽带^[13,14]。

4 田间土壤水分最优调节问题

以节水高产为目标的田间土壤水分最优调节问题,总的来说有蓄、保、调、用 4 个方面。“蓄”是充分利用土壤“水库”；“保”是防止无效蒸发；“调”是对时空分布不均匀的降水进行调控；“用”是合理使用,提高降水和灌溉水进入土壤各个环节时对作物的供给能力。

4.1 土壤“水库”的开发利用

土壤水作为一种重要水资源,已被人们逐渐认识,并在节水农业研究中占有举足轻重的地位。土壤水在“四水”转化和 SPAC 中成为可以更新的动态资源。非饱和带土壤具有较大调蓄水的能力,故有土壤“水库”之称。如北京农业大学王树安、蓝林旺在河北吴桥 400 hm² 小麦示范区,采用以播前浇足底墒水为中心、辅以耐旱品种、集中施磷肥等 8 项关键技术,实现了小麦春灌一水,平均产量为 6 037.5 kg/hm²,较传统春灌三水,节水 1 500 m³/hm²,水分生产率提高 13.7%,开创了小麦生育期以耗灌溉水为主转变为耗土壤水为主的新型耗水结构^[5]。

4.2 保住土壤水

保住土壤水的含义是防止无效蒸发、渗漏和地下径流,其中主要是防止蒸发。降低无效蒸发是提高农业用水效率的重要技术途径,具体是减少土壤蒸发和作物蒸腾。据估算,半干旱区蒸发量占降水量的 56%~65%,相当于作物总耗水量的 1/4~1/2,所以,减少土壤蒸发成为提高农业用水效率的重要途径^[16]。

为了减少土壤蒸发,目前比较成熟的技术是采用地膜覆盖和秸秆覆盖。实践表明,地膜覆盖不仅具有增湿保湿、保墒提墒、改善土壤理化性质的作用,而且可以促进种子萌发,促进作物早出苗、出壮苗且早熟高产。地膜覆盖的作物同不覆盖的相比,一般增产 20%~50% 左右,而且产品的质量也有一定的提高。秸秆覆盖是一种资源丰富、发展前景广阔、效益明显的节水技术,它具有改土培肥、保持水土和增产效果明显的特点。据有关实验,砂壤质和中壤质连续覆盖后,土壤有机质由 0.88% 和 0.94% 逐渐增至 1.06% 和 1.17%,农田冬闲期秸秆覆盖减少土壤蒸发 48%,冬小麦夏闲期秸秆覆盖一般增产 10%~20%,干旱年份达 50% 以上,水分利用效率提高 0.48~0.85 kg/m³。为了减少蒸腾,在干旱时叶面喷洒黄腐酸可使小麦水分生产率提高 15.5%^[17]。农田果园地膜秸秆覆盖在我国发展很快,到 1996 年全国

覆盖面积已达 533.33 万 hm^2 ,居世界首位.地膜秸秆覆盖改变了土壤、植物、大气间的能量交换和水分传输过程,改善了农田小气候,创造了作物适宜的水分和温度环境,不仅保墒增温节水增产,而且提高了水分生产率.

4.3 调用土壤水

调节土壤水的方法有工程调节和生物调节两种.除前述措施具有不同程度的调节利用水分的功能外,还有^[18]:①区域调水,实行节水型的灌溉农业,以弥补土壤水分之不足;②间隙休闲;③轮作调水,即把需水需肥量不同的作物前后合理配置,有利于土壤水肥的经济高效利用;④以肥调水,即通过施肥,培育壮苗,使之形成强大的根系,扩大吸水深度而增加作物根系吸收的水量,达到以肥调水的目的;⑤带状间作套种调水;⑥耕作与培肥结合调水;⑦节水灌溉,以水调水.

参考文献：

[1] 许越先. 节水农业研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
[2] 董修桥. 节水灌溉的三个体系 [J]. 节水灌溉, 1999(1): 7 ~ 10.
[3] 吴景社. 国外节水灌溉技术发展现状与趋势 [J]. 世界农业, 1994, 5(6): 20 ~ 22, 5(7): 29 ~ 30.
[4] 水利部农田灌溉研究所. 我国节水农业发展模式研究 [J]. 节水灌溉, 1998(2): 7 ~ 12.
[5] 陈志栋, 胡和平, 等. 土壤水研究进展与评述 [J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311 ~ 318.

[6] 康绍忠, 等. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
[7] J. R. Plant water relations: some physical aspects [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1966, 17: 245 ~ 268.
[8] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
[9] Mitchell P D, Jerie P H, Chalmers D J. Effects of regulated water deficit on pear tree growth, flowering, fruit growth, flowth and yield [J]. Amer Soc Hort Sci. 1984, 109: 604 ~ 606.
[10] Ebel R C, Proebting E L, Evans R G. Deficit irrigation to control regetative growth in apple and monitoring fruit growth schedule irrigantion [J]. Hortscience. 1995, 30(6): 1229 ~ 1232.
[11] 李锡录, 聂俊华. 土壤水研究及在作物需水灌溉中的应用 [J]. 山东农业大学学报, 1997, 28(2): 178 ~ 186.
[12] 刘昌明, 于沪宁. 土壤—植物—大气系统水分运行实验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1997, 1 ~ 195.
[13] 龚元石, 李宝国. 华北平原节水农业应用研究战略节水农业应用基础研究进展 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
[14] 石元春, 等. 节水农业应用基础研究进展 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
[15] 灌排信息. 北京农大攻下小麦节水高产技术 [J]. 灌溉排水, 1996.
[16] 张信宝. 减少地面蒸发 充分利用降雨资源——黄土旱坡地农业的思考 [J]. 水土保持通报, 1997, 17(1): 57 ~ 62.
[17] 贾大林, 姜文来. 试论提高农业用水效率 [J]. 节水灌溉, 2000(5): 18 ~ 21.
[18] 康绍忠, 李永杰. 21 世纪我国节水农业发展趋势及其对策 [J]. 农业工程学报, 1997, 12: 1 ~ 7.

(收稿日期 2004-05-25 编辑: 马敏峰)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》是河海大学主办的以技术性为主, 兼顾学术性和管理性的技术性期刊. 本刊 1985 年创刊, 国内统一连续出版物号: CN32-1356/TV, 现为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和江苏省一级期刊, 国内外公开发行. 本刊主要刊登与水资源保护有关的科技政策、综述述评、研究探讨、工程技术及措施、成果推广及经验交流, 专题讲座、国外动态、书刊评介、科技简讯, 水资源管理、评价、监测、优化配置, 节水技术, 水环境污染控制以及水环境监测仪器研制等方面的文章. 2005 年本刊将重点关注与水有关的生态环境和生态城市建设领域中的研究方向, 新增设水处理技术、清洁生产、防治技术、环境工程、生态环境、城市水环境治理等栏目. 本刊主要读者对象为: 全国从事水资源保护工作的水利界、环保界、相关科研设计单位, 有关工程技术、科研人员、管理干部以及大专院校的师生. 本刊为双月刊, 由邮局发行, 邮发代号: 28-298, 2005 年每期定价 6 元, 全年 36 元. 欲订本刊者, 请径向当地邮局订购. 若无法从邮局订阅, 亦可与编辑部联系索取征订单. 编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号 河海大学, 联系电话: 025-83786642, 电子信箱: bh@hhu.edu.cn