

土壤保墒性能与土壤水分有效性综述

李开元 李玉山 邵明安

(中国科学院
水利部 西北水土保持研究所)

摘 要

土壤保墒性能与土壤水分有效性多年来一直是土壤物理学领域中最活跃的研究课题之一,也是半干旱地区农业研究中迫切需要解决的问题。土壤水分是植物需水的主要来源,其保蓄和储存在一定程度上决定于土壤的保墒性能,而植物从土壤中吸水的容易程度决定于土壤水分有效性。随着SPAC理论的发展,土壤与植物水分关系的概念已发生了根本变化;本文拟将土壤保墒性能与土壤水分有效性研究进展做一综述。

关键词 土壤保墒性能 土壤水分有效性

A REVIEW OF STUDIES ON SOIL CAPABILITY OF PRESERVING MOISTURE AND SOIL WATER AVAILABILITY

Li Kaiyuan Li Yushan Shao Mingan

Abstract

Soil capability of preserving moisture and soil water availability have been the interesting topics in the area of soil physics for many years, and a problem to be needed to solve in agricultural research in the arid area as well. Soil water is the main source of the plant water demand, its preserving and saving depend on the soil capability of the preserving moisture, and the easy degree of the soil water absorption by plant is determined by the soil water availability. With the development of the SPAC theory, a fundamental change has taken place in the conception of soil-plant-water relationships, this paper gives a review of the studies.

key words: soil capability of preserving moisture
soil water availability

1 土壤保墒性能

土壤保墒性能是指土壤控制蒸发,接纳和保蓄水分的性能。一般半干旱地区地下水位较深,田间水分循环总的特征是“向下的入渗和再分布与向上的蒸腾和蒸发”。土壤保墒性能是水分的收入(入渗和再分布)和支出(蒸发)两个过程相互作用的结果。因此在评价土壤保墒性能时,不仅要考虑到水分向上蒸发移动过程对土壤保墒性能的影响。

响,还要考虑到水分向下入渗和再分布过程的影响。

1.1 土壤蒸发过程对土壤保墒性能的影响

1.1.1 土壤蒸发过程的阶段性

一般认为,在大气蒸发力比较固定的情况下,湿润土壤开始蒸发时,土面蒸发速率可依次分为三个阶段:(1)稳定速率阶段;(2)速率递减阶段;(3)扩散控制阶段。尽管在自然界严格地识别蒸发三阶段是困难的,甚至是不可能的(Hillel 1975),但在实际中仍用蒸发三阶段的理论来近似说明土壤的蒸发过程。

第一阶段土面蒸发速率由大气蒸发力决定,且保持恒定。Hanks (1979)认为,大气蒸发力强时,第一阶段持续的时间短,大气蒸发力弱持续时间长。Lemon等(1956)认为,起始速率高可以降低总的累积蒸发量。但是Gardner和Hillel (1962)却认为,起始蒸发速率高将使累积蒸发损失量增加,但在足够长的时间之后,任何起始蒸发速率下造成的总水分损失量将逐渐接近(但从不超过)起始蒸发速率很高的极端情况下的总蒸发量(Hillel 1980)。一般情况下,第一阶段可以维持几天,当表土达到风干状态时为止(Hanks 1979,袁剑舫等1964)。在外界条件相似的前提下,粘土的第一阶段较沙土长。在壤土范围内,质地越轻,第一阶段的土面蒸发速率则越大(杨文治等1985,韩仕峰、李玉山1986)。

第二阶段蒸发速率由土壤导水率控制,蒸发速率随着时间的延伸而递减。第三阶段土壤蒸发以汽态运行为特征,土壤蒸发量很少,其累积蒸发量与时间的平方根成比例(姚贤良等1986)。

土壤蒸发速率的改变与土壤含水量有关。田间持水量可能是蒸发速率显著变小的第一个转变点。随着蒸发的运行,当水分减小到某一限度时,毛管联系中断,蒸发速率又显著地减慢,这时大概相当于第二个转变点,称之为毛管联系破裂含水量(姚贤良等1986)。李玉山(1962)研究表明,当土壤湿度降到一定程度时,水分液态运行现象即行消失,除了表层因扩散蒸发继续变干外,10或20cm以下土层湿度即不随时间延长而继续降低,整个剖面水分分布出现稳定的均衡状态。这种均衡状态下的湿度值称之为“田间稳定湿度”,其相当于田间持水量的80%。这一概念与“毛管联系破裂湿度”相似。田间稳定湿度的存在使土壤能较久地保持住相当数量的水分以供植物利用。田间稳定湿度愈接近于田间持水量,土壤免于迅速蒸发的水分就愈多。

由蒸发三阶段的理论可知,蒸发对保墒性能的影响主要发生在第一和第二阶段。因此在降雨或灌溉后及时采取保墒措施尤为重要。由此也可以推论,蒸发总量和降水频率有很大关系。在总降水量相同的前提下,每次降水量越少,降水频率越大,土壤蒸发量也越大;反之土壤蒸发量越小。这一推论已有试验得到了验证(Hanks 1979, Alizal 等1970)。

1.1.2 土壤质地、结构状况对土壤水分蒸发运行的影响

水分蒸发运行的状态,蒸发各阶段开始的早晚及其持续时间的长短与土壤质地和结构密切相关。粗质土和团聚好的土壤以汽态水扩散运行为主的水分当量点高,细质土和团聚少的土壤,水分运行以液态为主,只有在凋萎含水量时才达到扩散阶段(袁剑舫1964,姚贤良等1986)质地粗和结构好的土壤,毛管联系破裂含水量接近于田间持水

量,因此蒸发速率递减阶段就可能比较短;质地细的土壤,如重壤土毛管联系破裂含水量与最小持水量相差的多,因此蒸发递减阶段就比较长(袁剑舫1964)。

Hillel和Van Bavel (1976) 模拟试验表明,土壤的水分性质不同,蒸发情况也不同,无论在蒸发力稳定或周期性变化的情况下,粗质土(沙土)的蒸发量最小,细质土(粘土)的蒸发量最大。在开始为饱和的情况下,经过一天左右的蒸发,沙土的蒸发速率很快就落后于潜在蒸发。因此在比较干燥的条件下,沙土能保持较多的水分。韩仕峰和李玉山(1986)的研究表明,轻壤土在初期的蒸发速率高于重壤土,后期则低于重壤土。这和两种土壤的导水率有关。土壤导水率是由土壤特性和流体属性一起决定的。影响导水率的土壤特性是总孔隙度、孔径分布及弯曲度(希勒尔1971,石玉洁1985)。显然导水率和质地密切相关。一般地说,粗质土导水率比粘质土大;但当吸力很高时,由于粗质土壤中绝大部分孔隙中的水被排空成为不导水空隙,此时粗质土壤的导水率反比粘质土壤的低(雷志栋1988)。而且粗质土在低吸力段导水率随着吸力上升而迅速下降,而粘质土下降比较缓慢(Hillel 1980)。

1.1.3 土壤蒸发对土壤保墒性能的影响与土壤蒸发的控制途径

水从土壤中直接蒸发是一个重要的过程。在实行夏季休耕的地区,从土壤的直接蒸发量约占降雨量的60%(汉克斯阿克洛夫特 1980)。在整个一年生作物的生长期,蒸发到大气中的水分有一半直接来自土壤蒸发(Harrold等 1959)。由此可见,土壤的蒸发过程如不加以控制,在灌溉农业和非灌溉农业中都会造成大量的水分损失。

由于各蒸发阶段蒸发机理不同,控制蒸发的措施也有所不同。第一阶段降低蒸发容易,可实行秸秆、砾石或其它材料覆盖。第二阶段控制蒸发比较困难,这一阶段土壤给蒸发供水是相当有效的。控制蒸发的途径大致如下:

(1) 覆盖。用秸秆或其它物质覆盖于土壤表面,如留茬覆盖或免耕,通过减少吸收的辐射能和减少空气的湍流以减低土表的潜在蒸发,因而降低了恒定阶段蒸发的速率,一二个星期可以节省许多水(Bond and Willis 1969)。但经过较长时间,这种效益就减少了。如果经常下雨足以使以前保存下来的水分向深处下渗时,休耕是一个成功的方法。覆盖塑料薄膜、洒沥青,铺砾石以及覆盖有反射作用的物质,都有显著控制蒸发的效果。需要指出,由覆盖层所增加的入渗量,可能比其降低蒸发更为重要。

(2) 耕作。耕作能增加土壤渗吸能力。那种实行雨后耕作,创造疏松的土壤覆盖使液态水不能传导至地表的做法是没有效果的,因为在土壤能够进行耕作以前,大量水分已经损失了。这种早先的错误观念导致了许多不必要的耕作。韩仕峰和李玉山(1986)的研究表明,表层松土的保墒效果仅发生在土壤湿润后少数几天之内,随着无雨时间延长,其累积蒸发量愈益接近不松土的农田,耕作的保墒作用在很大程度上是由于消除了杂草。

(3) 改善土壤结构状况。Burov (1954)、Holmes等(1960)和Hadas (1975)等研究表明,改善土壤结构可以抑制土壤蒸发。但应用这种办法的可能性仍在继续研究。

1.2 土壤的入渗和再分布过程对土壤保墒性能的影响

1.2.1 影响入渗和再分布过程的因素

一般影响入渗的因素有质地、土壤表面状况、土壤结构的稳定性、障碍性层次和植

物截留等。多数研究者认为,土壤表面状况是影响水分入渗的很重要的因素(Goodman 1952, Pillsbury and Richards 1954, Duley 1951, Fishbach and Duley 1951)。粗质土和团聚好的土壤有利于水分的入渗。

影响水分再分布的因素有质地、蒸发蒸腾、滞后作用、温度梯度和土壤起始湿度等因素。粗质土再分布过程较快,细质土较慢。蒸发蒸腾使再分布过程减缓。滞后作用也会使再分布过程受阻。滞后作用的大小因降水强度不同而不同;降水强度越大,滞后作用越显著,土壤水分再分布的速率则越小(Bresler 1969)。

1.2.2 入渗和再分布过程对土壤保墒性能的影响

一般说入渗和再分布性能越好,土壤保墒性能也越好。在降水之后,土壤水分向上蒸发和向下再分布两个过程同时并存。Black (1969) 和Hillel等(1970)认为这两个过程有相互作用。Gardner等(1970)、Rubin (1967) 和Remson等(1967)认为蒸发对再分布速率影响较小,可是再分布却能强烈地减少蒸发;因为它降低了表层容易蒸发消耗的土壤含水量,因而也减少了水分的总梯度和导水率。

入渗和再分布过程对土壤的作用,主要是促使水分向剖面深处运移。任何保证水分往深处流的措施都有防止水分蒸发的作用。Gred等(1970)的试验指出,在休闲地上,由于秸秆覆盖所增加的水向下流的深度可达60cm以上。同样在半干旱地区,一定数量的水流入粗质土的深度比流入细质土大,所以前者不易损失水分(Alizai and Hulbert 1970)。

总之,土壤保墒性能是土壤蒸发过程和入渗与再分布过程共同作用的结果。以往单从土壤的蒸发移动性能来评价土壤保墒性能是不全面的。

2 土壤水分有效性

土壤水分有效性的概念,从来没有清楚地用物理学的术语定义过,在不同学派的拥护者之间已进行了多年的激烈的争论(Hillel 1982)。大约在60年代之前,人们试图从土壤含水量或土水势来说明土壤水分有效性的高低;由于没有一个综合性的理论结构作为基础,以便能涉及到可能影响作为一个整体的土壤—植物—大气连续体系水分状况的各种因素,结果在认识上引起了许多分歧。进入60年代,随着人们对土壤—植物—大气这一相互作用的整体逐步认识,和土壤—植物—大气连续体(Soil—Plant—Atmosphere Continuum, 简称SPAC)概念的明确提出,以及实验技术的改进,人们对土壤水分有效性的概念给予了新的解释。人们愈来愈认识到土壤水分的有效性不只是土壤水分含量或土水势的函数,而且还依赖于土壤供水特性,植物生长特性以及气象条件等因子。新近几年,许多研究者采用数学模拟的方法,试图从土壤水分动力学的角度定量地描述土壤水分的有效性。

2.1 土壤水分有效性的经典概念

早期关于土壤水分有效性存在两种截然不同的学术观点,即等效学术和非等效学术。

2.1.1 等效学术

以Veihmeyer和Hendrikson (1927, 1949, 1950, 1955)为首的研究者认为,从

田间持水量到永久萎蔫点,土壤水分对植物同等有效。这一理论在灌溉领域中曾被广泛接受。

2.1.2 非等效学术

非等效学术又可分为两种:(1)有效性递减学术。Richards和Wadleigh(1952)等认为,在田间持水量和萎蔫湿度之间,土壤水分有效性随土壤湿度降低而减少。(2)极易有效和有效性递减学术。有许多研究者认为,在田间持水量和萎蔫湿度之间存在一个临界土壤湿度,在临界点之上,土壤水分对植物同等有效,在临界点之下,有效性递减。

经典学术一般采用相对蒸腾或蒸散来作为衡量土壤水分有效性的标志。由于各研究者所采用的土壤类型、作物类型以及测试技术的不同,因此关于相对蒸散和相对有效水含量的曲线关系,不同研究者得出了不同的研究结果(Minhas等1973)。

Stanhill(1957)对等效学术的主要代表者Veihmeyer的80个试验材料分析表明:

(1) 80%以上的试验证明植物生长和土壤有效水含量有关。一年生植物几乎所有的试验均表明其生长和土壤有效水含量有关;而证明生长和有效水含量无关的试验,主要是多年生果树。果树对土壤水分的反应,在试验中以果实产量为标准。多年生和一年生对土壤水分的反应不同,一年生植物以营养体生长为主,而多年生以生殖体为主,而生殖体具有比营养较强的竞争水分的能力。(2) 盆栽试验表明植物生长和土壤有效水含量有关,而田间果树则表现无关。其原因是盆栽土壤水分可以精确地测定。因此Stanhill认为, Veihmeyer的试验结果并不能完全解释土壤水分的等效性,而且有许多研究者的试验表明作物生长和土壤有效水含量水平有关。

Kelley(1954)认为,为什么一些研究者坚持土壤水分等效的学术观点,最重要的原因是供试土壤为粗质土壤,而粗质土壤绝大部分有效水吸持在1个大气压水吸力之下,因而不难理解土壤水分的等效性。但是对于细质土壤,由于在较高吸力段还吸持着比较多的有效水,因此很难表现出同等有效。

由上可见,土壤水分有效性并不是同等有效的。但是究竟土壤水分和植物生长间是一种什么关系,这是一个很复杂的问题。因为植物对水分的反应,除和土壤本身的含水量有关外,还和作物的生长习性、生育阶段以及所处的微气象条件有关。

很久以来,经典学术的各派皆承认土壤有效水范围在田间持水量和永久萎蔫点之间,而且企图将土壤湿度或土水势作为有效性的尺码,但都未能考虑到土壤和植物水分关系的动态性质,因而使人们对土壤水分有效性的认识一度陷入困惑。应当指出,虽然有效水范围标定为1/10或1/3bar至15bar水吸力之间的含水量,但实际上这些界限值并非适用于每种土壤、每种作物,它们只不过是平均值而已。田间持水量依土壤质地、松紧度、剖面层次和湿润深度等因子不同而波动,多数土壤水吸力变动在0.2至0.5bar之间(Richards 1941, Colaman 1944, Edlefson 1941, Hilgeman 1948, Hanks 1954, Kelly 1954, Miller 1953, Robin 1954, Simith 1947)。李玉山(1985)研究认为,黄土高原土壤田间持水量时的水吸力为:沙壤土0.1bar,轻壤土0.3bar,中壤土和重壤土为0.6bar。关于永久萎蔫湿度有的认为在10~20bar之间(Slatyer 1957)。也有认为在9~22个大气压之间(Furr and Reeve)。Slatyer(1957)认为,通常用15bar

作为有效水的下限只不过是一个大概的平均值而已(对于多数作物和土壤类型的组合),不可将15bar水吸力和作物的凋萎相联系。

2.2 土壤水分有效性的新概念

晚近的二三十年中,土壤与植物水分关系的概念已发生了根本的变化,随着SPAC理论的逐步发展和实验技术的改进,研究者们愈来愈认识到植物吸水的速率和总量并非只是土壤含水量和土水势的函数;水分吸收的总量和速率既依赖于根从它相接触的土壤中吸收水分的能力,也依赖于土壤供水和以足够速率向根系运转水分(以满足蒸腾的要求)的能力。而这些能力本身又依赖于植物特性(根系密度、根系深度、根系延伸速率以及植物为避免萎蔫需要迅速从土壤中连续地吸取水分的生理能力,即植物本身水势降低而仍然维持其生命的功能),也决定于土壤特性(导水率、扩散率、基质吸力与土壤湿度之间的相互关系)。同时在很大程度上也依赖于气象条件(它支配着植物必需的蒸腾速率,因此也支配着植物从土壤中吸收水分的速度以维持植物本身的水合作用)(希勒尔 1982)。

由此可见,植物吸收土壤水分决定于气象、植物和土壤三因素的综合作用,任何将植物吸收土壤水分只归因于土壤条件的企图是不全面的,并且会将人们引入歧途。

现在土壤水分的新概念已被人们接受和认识。但使人们感到困惑的是,用什么标准来衡量土壤水分的有效性。过去用相对蒸腾作为指标。用相对蒸腾作指标可能会出现这种情况,即蒸腾速率可能与土壤含水量关系不大,而植物的其它方面,如光合作用、干物质积累、开花结实以及种子和纤维等与土壤含水量可能有很大的不同;另外,植物对水分的反应也可能不同(Aceredo等1971)。此外,相对蒸腾也不能完全反映产量的高低。近年来,水分有效性已开始与植物吸水速率相连系(Hillel 1980)。邵明安等(1987)提出用根系吸水的相对速率作为土壤水分有效性的指标。

总之,我们认为,不管用什么标准来评价土壤水分的有效性,都应以作物生长反应为基础。水分亏缺将影响到作物生长的每一方面,其包括解剖学、形态学、生理学和生物化学。但水分亏缺显而易见的总的效应是作物的高度、叶面积和产量的下降(Kramer 1983)。

2.3 SPAC的概念及植物吸收土壤水分的影响因素

2.3.1 SPAC的概念

水流电模拟的观点最初由Huber (1924) 提出,后经Gardman (1928) 和Honert (1948) 进一步发展和补充Kramer (1983)。进入60年代,这一理论为许多研究者重视和应用(Slatyer and Taylor 1960, Cowan 1965)。1966年Phillip提出把土壤—植物—大气看作是一个连续体,简称SPAC。SPAC的水流可以用以下三个方程式描述(Stanhill and Yoash Vaadia 1967)。

$$\begin{aligned} Q_{s \rightarrow r} &= - \frac{\psi_s - \psi_r}{R_s + R_r} \\ Q_{r \rightarrow l} &= - \frac{\psi_r - \psi_l}{R_r + R_l} \\ Q_{l \rightarrow a} &= - \frac{\psi_a - \psi_l}{R_l + R_a} \end{aligned}$$

式中 Q 为水流通流, ψ 为水势, R 为水流阻力, s 代表土壤, l 代表叶片, r 代表根系, a 代表大气。

上述方程对于实际情况已进行了相当程度的简化: (1) 上述方程式是以稳态流为基础的, 而实际上植物体内很少是稳态流的(Cowan and Milthrope 1968, Kaufmann and Hall 1974)。 (2) 上述方程假设各部分水流阻力不发生变化, 而实际上水流阻力有时随水流速度变化而变化。 (3) 尽管液态水流和水势差直接成正比; 而汽态水流却和水汽压差成正比。叶片和空气的水流阻力依赖于气孔的关闭、蒸汽压差和空气的运动(Slatyer and Piehuizen 1964)。因此在讨论蒸汽阶段的水分运动时, 一般采用蒸汽压或蒸汽压浓度, 而不用水势(Kramer 1983)。

邵明安等(1986)的研究表明, SPAC中水流阻力主要存在于水分进入植物根系和水分离开植物的叶片这两个对称的连结的“链条”上。Phillip (1966)指出, 在土壤与大气之间, 总势差可达几百个巴, 在干旱气候中甚至可以超过1 000个巴。在这总势差中, 从土壤到植物之间的势差一般都是几个到几十个巴的数量级, 这样在土壤—植物—大气连续体中的总势差的主要部分就出现在叶部与大气之间。

2.3.2 植物吸收土壤水分的影响因素

2.3.2.1 土壤因子

(1) 土壤持水性能。土壤持水性能和质地、结构有关。一般说, 细质地土壤有最大的总持水量, 但中等质地的土壤持有最大的有效水。在许多土壤中有效水与粉砂和极细砂的含量有密切关系(福斯, 1978)。比水容量是反应土壤持水性能的重要标志。如果作物以相同能量来吸水, 则在不同吸力下从各种土壤中所吸收的水量会因比水容量的不同而形成很大的差别(陈志雄, 汪仁真1979)。粗质土在低吸力段的比水容量高于细质土, 在高吸力段却低于细质土。

(2) 土壤的导水性能。关于土壤导水性能和作物吸收土壤水分之间关系的研究文献还相当贫乏。斯拉维克(1974)认为, 在土壤有效水范围之内, 在含水量较低的情况下, 土壤水分的传导性是非常重要的。但Gardner (1960)的研究发现, 土壤水吸力在10bar以下时, 土壤导水性能不是非常重要的。李玉山(1990)的研究发现, 在粮食作物生长后期, 农田低湿度并不必然和低产相连系。低湿度表现出较高的有效性, 说明土壤导水率随土壤湿度减少而急剧下降这一性质并不能完全说明有效性的太小。

2.3.2.2 植物因子

作物的种类、长势、生育阶段和根系的生长特性都直接影响其对水分的吸收。根系对植物吸水起主导作用。一般在土壤水分充足时, 根系密度对其吸水速率影响较小, 随着土壤变干, 根系在吸收水分方面起着很重要的作用。这是因为发达的根系可以减少土壤水流阻力(朗格等, 1976)。根系的垂直分布深度也直接影响着土壤水分的吸收和利用。李玉山和喻宝屏(1981)研究认为, 深层储水发生效应的条件是根系的下伸。此外, 作物叶面积和叶面积指数对根系吸水有较大影响。在土壤含水量高时, 根系吸水速率与叶面积成正比(Eavis and Taylor 1979); 低含水量二者相关性甚微。叶面积指数的减小会导致作物对水分状况的敏感性下降。

2.3.2.3 气象因子

在不同的大气蒸发力条件下, 植物与土壤的水分关系也不同。大气蒸发力高时, 植物在土壤含水量较高时即表现缺水; 大气蒸发力低时, 则在土壤含水量较低时方表现缺水。

参 考 文 献

- [1] 希勒尔, D., 1982 (尉庆丰等译 1988), 《土壤物理学概论》, 陕西人民出版社, 196~197页。
- [2] 福斯, H.D. 1978 (唐耀先等译 1984), 《土壤科学原理》, 农业出版社, 62~63页。
- [3] 希勒尔, D., 1971 (华孟、叶和才译 1981), 《土壤和水——物理原理和过程》, 农业出版社, 69~99页。
- [4] 汉克斯, R.J. 和阿希克洛夫特, G.L., 1980 (杨诗秀等 1984), 《应用土壤物理——土壤水和温度的应用》, 水利电力出版社, 106~108页。
- [5] 姚贤良等, 《土壤物理学》, 农业出版社, 1986, 375~377页。
- [6] 斯拉维克, B., 1974 (张崇浩等译 1986), 《植物水分关系研究法》, 科学出版社, 199页。
- [7] 朗格, O.L. 等 1976 (樊梦康等译, 1985), 《水分与植物生活——问题与研究现状》, 科学出版社 193页。
- [8] 雷志栋等, 《土壤水分动力学》, 清华大学出版社, 1988, 30~33页。
- [9] 李玉山, 壤土水分状况与作物生长, 《土壤学报》, 1962, 第10卷第3期, 289~302页。
- [10] 李玉山等, 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究, 《土壤学报》, 1990, 第27卷第1期, 1~7页。
- [11] 李玉山, 喻宝屏, 土壤深层储水对棉花增产效应的研究, 《土壤学报》, 1981, 第17卷第1期, 43~54页。
- [12] 李玉山等, 黄土高原土壤水分性质及其分区, 《中科院西北水保所集刊》, 1985, 等2集, 1~16页。
- [13] 陈志雄, 汪仁真, 中国几种土壤的持水性质, 《土壤学报》, 1979, 第16卷, 第3期, 227~281页。
- [14] 杨文治等, 黄土高原几种土壤在非饱和条件下水分蒸发性能和抗旱力评价, 《土壤学报》, 1985, 第22卷第1期, 13~23页。
- [15] 石玉洁等, 黄土高原几种质地土壤水分的扩散率, 《中科院西北水土保持研究所集刊》, 1985 第2集, 29~37页。
- [16] 邵明安等, 土壤—植物—大气连续体中的水流阻力及相对重要性, 《水利学报》, 1986, 第9期, 8~14页。
- [17] 邵明安等, 黄土区土壤水分有效性的动力学模式, 《科学通报》, 1987, 18, 1 421~1 423。
- [18] 袁剑舫, 周月华, 水分运行与土壤质地的关系, 《土壤学报》, 1964, 第12卷, 第2期, 143~155页。
- [19] 韩仕峰、李玉山, 两种质地土壤的蒸发移动性能及表层松土的墒情效应, 《土壤通报》, 1986 第6期, 4~7页。
- [20] Acevedo, E., et al. 1971, Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water status, *Plant Physiol.* 48, 631~636.
- [21] Alizal, H.U., et al. 1979, Effect of soil texture on evaporative loss and available water in semi-arid climate. Vol. 110 326~330.
- [22] Bond, J. J. and Willis, W. O. 1969, Soil water evaporation, Surface residue rate and placement effect. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33, 445~448.
- [23] Bresler, E. et al 1969, Infiltration, redistribution, and subsequent evaporation

- of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33, 832~840.
- [24] Black, T. O. et al 1969, The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33, 655~660.
- [25] Colman, E. A. 1944, The dependence of field capacity upon the depth of wetting of field soils *Soil Sci* 58, 43~50.
- [26] Cowan, I. R., 1965, Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* 2, 221~239.
- [27] Cowan, I. R., and Milthorpe, F. L., 1968, Plant factors influencing the water status of plant tissue. In "Water Deficits and plant growth" (T. T. Kozlowski, ed.) .Vol. 1, 137~193.
- [28] Duley, F. L., 1951, Clay pan soil can absorb heavy rains. *Crops and Soils* 8 (5), 31
- [29] Denmead, O. T. Shaw, R. H., 1962, availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54, 365~390.
- [30] Edlefsen, N. E., and Bodman, G. B., 1941, Field measurement of water movement through a silt loam soil. *J. Am. Soc. Agron.* 33, 713~732.
- [31] Eavis, B. W. AND H. M. Taylor, 1979, *Agron. J.*, 71, 441~445.
- [32] Furr, J. R., and Reeve, J. O., 1945, Range of soil Moisture percentage through which plants undergo permanent wilting in some soil from semi-arid irrigated areas. *J. Agr. Reswarch*, 71, 149~179.
- [33] Fishbach, T. A. et al 1969, The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33, 655~660.
- [34] Gred, B. W., Smika, D. E., and Black, A. L., 1970, water conservation with strubble mulch fallow. *J. Soil Water Cons.* 25, 58~62.
- [35] Goodman, R. N., 1952, Orchard mulches in precipitation. *Proc. Am. Soc. Hort. Soc.* 59, 119~124.
- [36] Gardner, w. r., et al 1970, Post irrigation movement of soilwater, 1, Redistribution. *Water Resources Res.* 6 (3), 851~861.
- [37] Gardner, W. R., et al 1979, Post irrigation movement of soil water, 2, Simultaneous redistribution and evaporation. *Water Resources Res.* 6(4)1148~1153.
- [38] Gardner, W. R., Hillel, D. I., 1962, The relation of external evaporative conditions to the drying of soil. *J. Geophys Res.* 67, 4 319~4 325.
- [39] Gardner, W. R., 1960, Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* 89, 63~73.
- [40] Gardner, W. R., and M. S. Mayhugh, 1958, Solution and tests of the diffusion equation for the movement of water in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 22, 197~201.
- [41] Hillel, D., 1982, Introduction to soil physics Academic Press.
- [42] Hanks, R. J., et al 1954, Field capacity approximation based on the moisture transmitting properties of the soil. *Soi. Sci. Soc. Amer. Proc.* 18, 252~254.

- [43] Hilgeman, R. H., 1948, Changes in soil moisture in the top eight feet of a bare soil during twenty-two months after wetting. *J. Am. Soc. Agron.* 40, 919~925.
- [44] Hillel, D., 1980, *Application of soil physics*, Academic Press, New York, 217~222.
- [45] Harrold, L. L., et al, 1959, Transpiration evaluation of corn grown on a plastic covered lysimeter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23, 174~178.
- [46] Hanks, R. J., 1979, Evaporation. *The encyclopedia of soil Sci.* Part 1, p. 147.
- [47] Hillel, D., Uan Bavel, C. H. M., 1976, Dependence of profile water storage on soil hydraulic properties, A simulation model. *Soil Sci. Am. J.* 40, 807~815.
- [48] Hillel, D., 1980, *Fundamentals of soil physics*, Academic PRESS, 198~120.
- [49] Hillel, D., and Gardner, W. R., 1970, Transient infiltration into crust-topped profile. *soil sci.* 109, 69~76.
- [50] Hillel, D., 1975, Simulation of evaporation from bare soil under steady and diurnally fluctuating evaporativity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20, 120~125.
- [51] Hillel, D., 1980, *A application of soil physics*. Academic Press, New York.
- [52] Jackson, R.E., 1963, Porosity and soil water diffusivity relation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27, 123~126.
- [53] Kelley, O. I., 1954, Requirement and availability of water. *Advances in Agron.* 6, 67~94.
- [54] Kramer, P.J., 1983, Water movement in the soil plant atmosphere continuum. In "Water relation of plants" Academic Press, 187~214.
- [55] Kramer, P. J., 1983, Water deficits and plant growth. In "Water relation of plants" . 342~389.
- [56] Kaufmann, M.R., and Hall, A.E., 1974, Plant water balance-its relations to atmospheric and edaphic conditions. *Agroc. Meteorol.* 14, 85~98.
- [57] Lemon, E.R., 1956, The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20, 120~125.
- [58] Miller, R.D., and Momuradie, J. L., 1953, Field capacity in laboratory columns. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17, 191~195.
- [59] Minhas, B. S., et al 1973, Toward the construction of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water, *Water resource Res.* 384~393.
- [60] Philip, K.R., 1966, Plant water relations, Some physical aspects. *Aun. Rev.* 18, *Plant Physiol.* 17, 245~268.
- [61] Pillsbury, A. F., and Richards, S. I., 1954, Some factors affecting rates of irrigation water entry into Romona sandy loam soil. *Soil Sci.* 78, 221~217.
- [62] Robin, J.S., et al, 1954, Unsaturated flow of water in field soil and its effect on soil moisture investigation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 18, 344~347.
- [63] Richards, L.A., Uptake and retention of water by soil as determined by di

- stance to a water table J. Am. Soc. 33: 778~786.
- [64] Rubin, J., 1967, Numerical method for analyzing hysteresis-affected, post infiltration, redistribution of soil moisture, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31, 13~20.
- [65] Stanhill, G., 1957, The effect of difference in soil moisture on plant growth, A review and analysis of soil moisture regime experiments, Soil Sci., 84: 205~214.
- [66] Slatyer, R. O., 1957, The significance of the premanent wilting percentage in studies of plant and soil water relations, Bota. Rev. 23, 586~628.
- [67] Smith, R. M., and Browning, D. R., 1947, Soil moisture tention and pore space relation for several soil in the range of the "Filed Capacity". Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 12, 17~21.
- [68] Slatyer, R.O., and Taylor, S.A., 1960, Terminology in plant and soil water relations, Nature, 187: 992.
- [69] Stanhill, G., Yoach Vaadia 1967, Factors affecting plant response to soil water, In "Irrigation of agricultural lands" .
- [70] Slatyer, R. O., and Bierhuizen, I.F., 1964, A differential Psychrometer for continuous measurement of traspiration, Plant Physiol., 39, 1 051~1 056.
- [71] Unger, P.W., and Patker, J. J., 1976, Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum and cotton residues, Soil, Sci. Soc. Amer. J. 40, 938~942.
- [72] Veihmyer, F. J., and Hedrickson, A. H., 1949, Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soil, Soil Sci. 68, 75~94.
- [73] Veihmyer, F., J., and Hedrickson, A. H., 1927, Soil moisture conditions in relation to plant growth, Plant Phsiol. 2, 71~78.
- [74] Veihmyer, F. J., and Hedrickson, A. H., 1950, Soil moisture in relation to plaht, Aun. Rev. Plant physiol. 1, 285~304.
- [75] Willis, W.O, 1960, Evaporation from layered soils in the presence of a water table, Soil Soi. Soc. Amer. Proc. 24, 239~242.