

黄土高原南部土壤水分有效性研究*

郭庆荣** 李玉山

(中国科学院
西北水土保持研究所, 712100)
水利部

摘 要

本文采用田间模拟土柱试验方法,利用作物产量-水分关系的数学模型和植物根系吸收土壤水分的数学模型,定量地研究了黄土高原南部土壤水分对植物有效性的动态规律,两种模拟方法得到了相同的结果,即在田间持水量的 95% 到 55% 的土壤湿度范围内,随着土壤湿度的不断减小,土壤水分对植物的有效性按抛物线规律递减,而且下降的速度越来越快;同时还简析了不同土壤水分有效性观点存在的原因,以及土壤水分有效性与土壤水分易吸性相一致或相似的条件。

关键词 土壤水分有效性,土壤水分易吸性,数学模型,根系吸水,田间持水量,黄土高原南部

纵观土壤水分对植物有效性的研究进展,由于对土壤水分有效性一直未曾用严格的概念来定义过,同时对土壤水分有效性规律的研究方法和评判标准互不相同,研究环境和试验条件亦相差甚远,因而这一问题是多年来土壤物理学及其它相关学科一直关心和争论的主要问题之一。

早期形成的观点可概括为等效说和非等效说两种。等效说观点认为在土壤有效水范围内土壤水分对植物同等有效,等效说观点是建立在多年生果树的田间小区灌溉试验基础上;非等效说观点则认为其有效性随土壤湿度降低而递减,该观点大多是建立在一年生作物的盆栽试验结果之上^[1]。这些学说是从静态出发,用特定的、有时甚至是在不明确条件下进行的有限实验得出的概括性结论^[2]。60 年代,随着人们对土壤-植物-大气连续体(简称 SPAC)^[3]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,植物生长特性及气象条件等因子。近几年,许多研究者采用数学模拟的方法,从土壤水分的动力学角度来定量研究土壤水分的有效性规律。

关于黄土高原区域土壤水分有效性研究迄今尚少。邵明安等^[3]在全面考察了 SPAC 中各种影响因素下,通过人工气候箱和人工试验土柱的试验手段,建立了黄土区植物根系吸收土壤水分的数学模型,第一次从理论上定量地提出黄土区土壤水分有效性的动力学模式^[4]。但在田间试验条件下定量研究黄土高原土壤水分有效性规律,迄今尚未见报道。

在过去的土壤水分有效性研究中,从来没有把土壤水分有效性与土壤水分易吸性区

* 系李玉山研究员主持的国家自然科学基金资助项目。

** 现在广东省土壤研究所工作。

分开来,也没有说明在什么条件下,两者是相似或一致的,在何种条件下,两者则大相迥庭。我们认为从植物根系吸水、植物蒸腾强度等方面来研究土壤水分有效性,其实质是研究土壤水分被植物吸取的难易程度,即土壤水分的易吸性,而把土壤水分有效性定义为决定于产品质量和作物产量的生物有效性,只有在一定条件下,两者才是相似或一致的。而且许多研究表明,黄土高原农田全年中大部分时段都处于中、低土水势状态下(—0.1—1.0MPa),却又表现出很高的有效性,高产常和低水势相伴随^[5-9]。针对上述种种争议和不足,本文将采用作物产量-水分关系模型和植物根系吸水的数学模型来定量分析黄土高原南部土壤水分有效性与易吸性规律。

一、研究方法

(一) 试验方法

采用田间遮雨棚下模拟土柱的试验方法,在养分充足供应水平下进行不同水分水平处理的研究。试验布置在陕西渭北旱塬长武塬区,该地常年平均气温为 9.1℃,年平均降雨量 548.1mm,属暖温带半湿润大陆性季风气候,土壤为中壤质黑垆土,含有机质 0.992%,全氮 0.079%,全磷 0.157%,全钾 1.920%。供试作物为春玉米。试验区四周开阔,周围 50m 内均为相同作物,能代表大田气候条件,且试验区临近就有中国科学院长武农业生态试验站布设的气象观测站。

田间小区试验虽能准确地反映田间实际生产情况,但由于植物根系不断向纵深伸展,深层土壤水库里的水分在水势梯度力的作用下不断地向根层土壤运动;在根层土壤中,由于根系分布不均匀,在根与根之间亦会存在水势的差异,则很难控制根系分布空间土壤湿度的剖面均匀性,也很难确定根系吸取深层土壤水库里的水量,因此在试验中我们选择植物根系、土壤湿度剖面分布较均匀的有限深度,即采用有多处加水管的 1.0m 深的人工试验土柱。

以往的盆栽试验大都是孤立地暴露于周围无保护区的试验环境之中,由于周围强热辐射的高温的影响,试验所得植物的蒸腾强度不可避免地大于大田的情况,从而得出的土壤水分有效性规律无疑是夸大了实际生产情况。所以,为了不破坏试验的大田条件,而使实验结果能够反映实际生产情况,我们采取了设置直接置身于大田之中且相互分散的小地下室的试验办法,来注意试验的群体效应和杜绝试验出现晒衣效应。

实验设计为:人工试验土柱(直径 0.2m,高 1.0m)放在五个分散的小地下室(长×宽×深=1.40×0.70×1.0m³)中,各地下室之间种有保护作物。人工土柱采用塑料圆筒,按 1.35 的容重分层装土夯实而成,土柱表层覆盖蛭石以防土壤物理蒸发。筒壁有小孔供测试土柱土壤湿度用。土柱上端周围用厚木板覆盖,木板上亦覆有土层,以减弱温度对土壤水分运动及其有效性影响。

试验设置五个土壤湿度水平,分别是田间持水量的 95%、85%、75%、65%和 55%,每个湿度水平设置四个重复,五个土壤湿度水平从春玉米播种时开始设置,保持到收获时为止。为了控制降雨对土柱土壤水分的影响,设置遮雨棚。

土壤含水量采用侧孔取土烘干经感量 0.001 克的电子天平称量而测得。叶水势和根木质部水势采用 ZLZ-4 型植物水分状况测定仪测定,每周测定一次,测定时间为 13:00 点,另在全生育期各阶段选择代表性天气测定叶水势的日变化。蒸腾速率用最大称量为 500 千克、感量为 10 克的吊秤称重测得,从播种到出苗测定土柱土壤物理蒸发,而以此判断土柱表层蛭石覆盖的严密程度,从出苗后测定植物的蒸腾强度,测定时间是每五天测定一次,生育关键期每天测定一次。根系分布、经济产量和生物产量的测定在收获后立即进行,根系用孔径为 0.05mm 的筛子冲洗而测得,作物的生物产量和经济产量在同等条件下晒干经感量为 0.001 克的电子天平称重而得。常规气象资料从临近气象站获得。

土壤水分特征曲线 $\psi_{m(\theta)}$ 是在恒温条件下用压力膜测得, 土壤导水参数 $K_{(\theta)}$ 和 $D_{(\theta)}$, 当土壤湿度 $\theta \geq 0.176$ 时, 用水平土柱法测定, 当 $\theta \leq 0.176$ 时, 用邵明安提出的根据土壤水分再分布过程确定土壤导水参数的方法测定^[10]。按邵明安的研究表明, 这两种方法都具有较高的准确度, 且最佳适用范围也能互相插补延长^[12]。

(二) 数学模型

1. 作物产量-水分关系模型 作物由播种到收获, 生长于各种影响因素的环境中, 其最后的产量是许多参数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ 的函数, 所有这些因子可分为四组: L —光, T —热, R —水分, N —养料。在每一个特定农业地区, 在某段时期内, 每类作物都有一组适宜的 L_0, T_0, R_0, N_0 , 以保证获得最高产量 Y_m :

$$Y_m = f(L_0, T_0, R_0, N_0)$$

任意一组 L, T, R, N 值所对应的作物产量为 $Y = f(L, T, R, N)$, 则有:

$$RY = Y/Y_m = \frac{1}{Y_m} f(L, T, R, N) \quad (1)$$

式中 RY 是由四维闭联集所确定的函数, 在 $L = L_0, T = T_0, R = R_0, N = N_0$ 时具有最大值, 等于 1; 在某些极值情况下, 即使其中一个因素等于零, 也具有最小值。

据研究表明^[22], L, T, R 和 N 单个因子的 $RY = Y/Y_m$ 变化曲线族非常相似, 意即 RY 纯粹随 L 变化的一维几何曲线族, RY 单纯随 T 变化的一维几何曲线族, RY 单纯随 R 变化的一维几何曲线族, RY 单纯随 N 变化的一维几何曲线族非常相似, 而且可以用同一形式的函数来对四曲线族进行回归, 则各个因子的影响规律相似或相同。因此, 在一般情况下, 在通常允许的范围内, 当生产条件没有任何一个因子降到破坏其它因子正常反应的水平, 即不破坏曲线的一维几何相似性, 由相似性原理可知, 函数 $RY = \frac{1}{Y_m} Y(L, T, R, N)$ 可以用单产量函数的乘积形式来表示:

$$RY = \frac{1}{Y_m} Y(L, T, R, N) = \frac{1}{Y_m} Y(L) \cdot \frac{1}{Y_m} Y(T) \cdot \frac{1}{Y_m} Y(R) \cdot \frac{1}{Y_m} Y(N) \quad (2)$$

由于试验中各处理都同样按最佳施肥量施肥, 则可以认为 $Y(N)/Y_m$ 等于 1; 同样试验中各处理所在的微气象条件相同, 在作物的整个生育期内, 没有出现对作物生长不利的微气象条件, 则可认为 $Y(L)/Y_m, Y(T)/Y_m$ 均为 1, 则有:

$$RY = \frac{1}{Y_m} Y(L, T, R, N) = \frac{1}{Y_m} Y(R) \quad (3)$$

又有:

$$\begin{cases} Y(R)/Y_m = Ar^2 + Br + D \\ r = \frac{W - W_{PWP}}{W_{FC} - W_{PWP}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 W 为土壤的重量含水量, W_{PWP} 为凋萎湿度, W_{FC} 为田间持水量, A, B, C 为特定常数。因此我们得到作物产量-水分关系模型为:

$$RY = \frac{1}{Y_m} Y(L, T, R, N) = \frac{1}{Y_m} Y(R) = Ar^2 + Br + C \quad (5)$$

2. 植物根系吸收土壤水分的数学模型 在不计温度、溶质和滞后效应的情况下, 有根系吸收的土壤水分一维垂直流动方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K_{(\theta)}}{\partial z} - S \quad (6)$$

式中 θ 为土壤容积湿度, t 为时间, z 表示深度, $K(\theta), D(\theta)$ 为土壤的导水率和扩散系数, S 为根系吸收项, 代表单位时间内根系从单位土体中吸收的水量, 原则上吸水函数 S 是土壤、植物和大气因素的综合函数, 但终究可归结为时间和空间的函数, 即 $S = S(x, y, z, t)$, 一维情况下则为 $S = S(z, t)$ 。

国外对吸水速率 S 进行了许多的研究^[12, 15-18], 邵明安等也首次提出了黄土区植物根系吸收土壤水分的数学模型^[1]。在他们的研究基础上, 我们分析了植物根系吸水的物理过程和影响因素, 提出了如下的吸水函数模型:

$$S(z, t) = \frac{T(z) \cdot r(\theta) \cdot i(L_0) L_0(z, t) \cdot (\psi_s - \psi_r) / R_A}{\int_0^{V(z)} r(\theta) \cdot i(L_0) L_0(z, t) \cdot (\psi_s - \psi_r) / R_A dz} \quad (7)$$

式中 $T(z)$ 为植物的蒸腾速率, $r(\theta) = \frac{\theta - \theta_{PWP}}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}}$, θ_{PWP} 为凋萎湿度, θ_{FC} 为田间持水量, ψ_s 为土壤水势, ψ_r 为植物根系木质部水势, $R_A = R_s + R_p + R_{rs}$, R_s 为土壤阻力, R_p 为植物根系阻力, R_{rs} 为土根接触阻力^[13]。 $i(L_0) L_0(z, t)$ 为植物的有效根密度, $i(L_0)$ 为依据根系生长特性联系实际根密度 $L_0(z, t)$ 与有效根密度的特征函数, $0.05 \leq i(L_0) \leq 0.20$ ^[13, 20], $V(z)$ 是指植物根系所存在的空间。

将(7)式代入(6)式, 即得植物根系吸收土壤水分的数学模型。在相应的定解条件下用数值方法求解。

上述两个数学模型的求解和可靠性检验, 我们已在另文中进行了研究, 其结果是数学模型的可靠性程度非常高。

二、结果与讨论

(一) 由作物产量-水分关系模型来分析黄土高原南部土壤水分有效性的动态规律

由于作物生物学产量、经济产量两者随 $r(w)$ 的变化规律相同, 而且对于粮食作物, 人们关心的是经济产量, 因此本文只讨论作物经济产量-水分关系模型。不同水分水平作物的经济产量值列于表 1, 把 $W = 0.209$ 下的作物产量作为最大产量, 其它条件的产量与其相比即得不同水分水平的 RY 值。由表 1 可知, 随着土壤湿度的减小, 玉米产量和相对产量均随之减少。将 $RY = Y/Y_m$ 与 $r(w)$ 进行回归分析, 得回归方程为:

$$RY = Y/Y_m = 0.1318 + 1.3123r(w) - 0.3907r^2(w) \quad (8)$$

方差分析表明, 回归关系达到极显著水平, 相关系数 $r = 0.9993$, F 值检验为 $\alpha = 0.01$

表 1 不同水分处理作物产量反应

Table 1 Yield response of crop to different treatments of water supply

供水处理 Treatment of water supply			玉米产量 Yield of spring corn	
W	SRWC %	$r(w)$	Y 平均产量(克/柱) Average yield (g/column)	$RY = Y/Y_m$
0.209	95	0.9153	196.450	1
0.187	85	0.7461	177.960	0.9059
0.165	75	0.5769	148.667	0.7568
0.143	65	0.4077	116.387	0.5925
0.121	55	0.2385	84.020	0.4277

注: SRWC % 为土壤湿度相对于田间持水量的百分数。

水平下极显著。由回归方程可知回归曲线为开口向下的抛物线的一支。将回归方程式

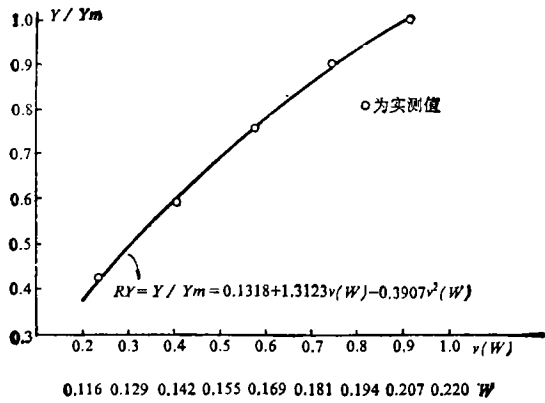


图 1 土壤水分有效性动态曲线

Fig. 1 The dynamic curve of soil water availability

(8)与所建立的作物产量-水分关系模型(5)进行比较,可以验证所建立的模型是正确的,可靠性是非常满意的。

把实测的 RY 值与 $\gamma_{(W)}$ 的 5 对数据,及模拟曲线分别绘于图 1。图 1 实际上是从作物的相对产量来分析土壤水分的生物有效性,因此我们把这条曲线称为土壤水分对植物有效性的动态曲线。由图 1 可知,黄土高原南部土壤水分有效性随土壤湿度减小而按抛物线规律下降。

对式(8)两边求关于 $\gamma_{(W)}$ 的一阶导数得:

$$RY' = \frac{d(Y/Y_m)}{d\gamma_{(W)}} = 1.3123 - 0.7814\gamma_{(W)} \tag{9}$$

很显然, $RY' = 1.3123 - 0.7814\gamma_{(W)}$ 是一线性递减函数,则有,随着 $\gamma_{(W)}$ 减少, RY' 增大,土壤水分有效性动态曲线递减的速率越来越快。由式(9)求得各 $\gamma_{(W)}$ 值处的一阶导数值为:

$$\begin{aligned} RY' |_{\gamma_{(W)}=0.9154} &= 0.5970, & RY' |_{\gamma_{(W)}=0.7462} &= 0.7292 \\ RY' |_{\gamma_{(W)}=0.5769} &= 0.8615, & RY' |_{\gamma_{(W)}=0.4077} &= 0.9937 \\ RY' |_{\gamma_{(W)}=0.2385} &= 1.1260 \end{aligned}$$

比较上述各值得: $RY' |_{\gamma_{(W)}=0.4077} < RY' |_{\gamma_{(W)}=0.2385}$, 则土壤水分有效性动态曲线递减速率随 $\gamma_{(W)}$ 由 0.9154 减小到 0.2385 依次变快,意即土壤水分有效性随 $\gamma_{(W)}$ 的减小而下降得越来越快。

综上所述,黄土高原南部土壤水分有效性动态规律为:在田间持水量 95% 到 55% 的土壤湿度范围内,随着土壤湿度的不断减小,土壤水分有效性按抛物线规律递减,而且土壤水分有效性下降的速率随土壤湿度减小越来越快。

(二) 由根系吸水数学模型推求黄土高原南部土壤水分有效性的动态规律

通过求解方程式 (6), 可求出不同土壤含水量下植物根系整个生育期的累计吸水速率,选取 $W = 0.209$ 土壤湿度下的吸水速率作为参考,即可求出不同含水量下根系吸水的相对速率,分别绘于图 2。图 2 实际描述的是不同水分水平下植物吸取土壤水分的能力,因此其反映了土壤水分易吸性动态曲线,也可把其称为土壤水分有效性动态曲线。由图 2 看出土壤水分易吸性随土壤湿度的减小而降低。

比较图 1 和图 2 可知,采用植物根系吸水数学模型来分析黄土高原南部土壤水分有效性动态规律,所得结论与采用作物产量-水分关系模型而得到的结论相同,因此在实验条件下土壤水分有效性与土壤水分易吸性是相一致的。

以上我们采用两种方法推求了黄土高原南部土壤水分有效性动态规律,所得到的结

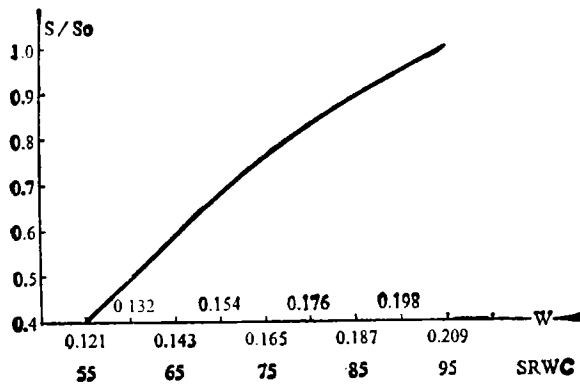


图2 土壤水分易吸性动态曲线(为了与图1比较,我们将 θ 换算成 W)

Fig. 2 The dynamic curve of soil water easy-absorbability

论非常相同。而且验证了在我们所采用的实验条件下,土壤水分有效性与土壤水分易吸性是一致的。

(三) 简析不同土壤水分有效性观点间争议的原因

以前建立在田间小区灌溉试验基础上的土壤水分等效说观点的研究,由于其实验本身的缺陷,且是利用多年生果树来进行研究,植物根系能分布到地面以下5m深的空间吸取深层土壤水库里的储水。而土壤水分等效说观点的研究中很少考虑深层土壤水库里水分对植物的作用,仅根据土壤集中根层有限深度的土壤湿度,或者仅考虑人工灌水量,与果硕产量的关系,因而无形之中缩小了植物的耗水量。因而其得出的土壤水分等效说观点是不够精确的,其夸大了土壤水分的有效性。这就是等效说观点局限性之所在。

盆栽试验能准确控制土壤水分的均匀分布,能准确测定土壤含水量和计算植物的耗水量,但是其植物的生长条件往往与大田情况有较大差异,植物根系生长不可避免地受到限制,植物蒸腾强度肯定要大于田间情况,则植物的生长强烈地受制于有限容积空间里的土壤含水量,所以建立在盆栽试验基础上的非等效说观点,一般是降低了土壤水分对植物的有效性,而夸大了实际的生产情况。

研究土壤水分有效性规律的试验对象有根系分布深而广的多年生果树,有一年生的作物,有些试验是从作物或果树产量来分析土壤水分有效性规律,有些是从植物苗期的蒸腾强度来分析,有些是从植物根系吸水来分析,有些是从植物某一性状来分析。所以而得出了许多相互间有争议的土壤水分有效性观点。

Stanhill^[21]分析了Veihmeyer等借以建立等效说的80个试验材料,发现:(1)证明生长与含水量多少无关的试验,主要是用多年生果树进行的,生长情况主要依果实产量而定。而用一年生作物做的试验,极大部分都表明生长与含水量有关。多年生果树所以表现出生长与含水量无关,主要原因可能是果实部分能从营养体部分继续不断地夺取水分。(2)盆栽试验都表明生长与含水量正相关,田间试验有一部分表现负相关。另外,田间试验中根系能继续向下生长,所以深层根系吸取的水分不易计算进去。

如何把试验条件、试验对象和土壤水分有效性规律统一起来,而得出普遍适用的规

律,这一问题我们已在另文中进行了研究。

我们还发现,土壤水分对植物的有效性与土壤水分被植物吸取的易吸性,在不同的实验条件下两者相似性程度是有差异的。在盆栽试验条件或有深层土壤储水的田间小区试验条件下,两者的相似性均有差异,而且,一般情况下有深层土壤储水的田间小区试验条件下,有效性与易吸性差异较大,尤其是对多年生果树的田间小区试验条件,则两者的差异性更大;但对于食叶类植物(如白菜等),两者的相似性较强。一般是在采用对水分敏感性愈强的植物的试验条件下,土壤水分对植物的有效性与土壤水分的易吸性则愈相一致。关于具体实验和详细结论我们已在另文中进行了研究。

参 考 文 献

1. 姚贤良等,1986: 土壤物理学。农业出版社。
2. 希勒尔 D. 著(尉庆丰等译)1988: 土壤物理学概论。196—197页,陕西人民出版社。
3. 邵明安等,1987: 植物根系吸收土壤水分的数学模型。土壤学报,第24卷4期,295—305页。
4. 邵明安等,1987: 黄土区土壤水分有效性的动力学模式。科学通报,第24卷4期,295—305页。
5. 李玉山等,1965: 土壤深层储水对作物稳产增产的作用。中国农业科学,第3期,40—43页。
6. 李玉山等,1980: 土壤深层储水对小麦的增产效应的研究。土壤学报,第17卷1期,43—54页。
7. 李玉山等,1981: 土壤深层储水对棉花的增产效应的研究。土壤学报,第18卷4期,383—388页。
8. 李玉山,1982: 土壤水库及其农业利用。农业现代化探讨,第13期,1—8页。
9. 李玉山等,1990: 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究。土壤学报,第27卷1期,1—7页。
10. 邵明安,1985: 根据土壤水分再分布过程确定土壤的导水参数。中国科学院西北水土保持研究所集刊,第2期,47—53页。
11. 邵明安,1985: 四种方法推求土壤导水参数的差别及其准确性。中国科学院西北水土保持研究所集刊,第2期,54—62页。
12. 邵明安,1986: 植物根系吸收土壤水分的数学模型(综述)。土壤学进展,第3期,6—15页。
13. 邵明安等,1996: 土壤—植物—大气连接体中的水流阻力及相对重要性。水利学报,第9期,8—14页。
14. Philip K. P., 1966: Plant water relations: Some Physical aspects, *Aun. Rev. 18: Plant Physiol.*, 17, 245—268.
15. Belmans C., Feyen J. and Hillel D., 1979: An attempt at experimental validation of macroscopic-scale models of soil moisture extraction by roots. *Soil Sci.*, 127: 174—186.
16. Hillel D., H. Talpaz and H. Van Keulen, 1976: A macroscopic-scale model of water uptake by a nonuniform root system and salt movement in the soil profile. *Soil Sci.*, 121: 242—255.
17. Molz F. J. and I. Remson, 1970: Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.*, 6, 1346—1356.
18. Molz F. J., 1981: Models of water transport in the soil-plant system: A review. *Water Resour. Res.*, 17, 1245—1260.
19. Ponsana P., 1975: Drainage and water uptake terms in the water balance. Ph. D. Thesis. Adelaide, Australia.
20. Walter C. J., Bariey K. R., 1974: The depletion of soil water by wheat at low, intermediate and high rates of seeding. *Proc. 10th. Intern. Congr. Soil Sci. (Moscow)*, 1, 150—158.
21. Stanhill G., 1957: The effect of difference in soil moisture on plant growth: A review and analysis of soil moisture regime experiment. *Soil Sci.*, 84, 205—214.
22. Схалабан В. Д., 1982: Метерол. и Гилрол., №. 4, 90—98.

SOIL MOISTURE AVAILABILITY TO PLANT IN THE SOUTHERN THE LOESS PLATEAU

Guo Qingrong and Li Yushan

*(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica
and Ministry of Water Conservancy, 712100)*

Summary

The field simulation column method was employed to study quantitatively the dynamic law of soil moisture availability to plant in the southern Loess Plateau, by using a mathematical model on the relation between crop yield and soil moisture and a mathematical model of soil moisture absorption by plant roots. The same results were achieved by the above-mentioned mathematical models, i. e., when the soil moisture changes from 95% to 55% of the field capacity, with the soil moisture decreasing gradually, the soil moisture availability to plant decreased parabolically, dropping faster and faster. Meanwhile, the reasons resulting in different viewpoints on the soil moisture availability and the condition in which the soil moisture availability is in agreement with the soil moisture easy-absorbability are discussed briefly.

Key words Soil moisture availability, Soil moisture easy-absorbability, Mathematical model, Water uptake by roots, Field capacity, the south of the Loess Plateau