

华北平原地区春季降水渗透深度和 “透雨”的农业气象估算方法*

陶祖文 裴步祥

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文利用土壤中重力水渗透的模式, 提出华北平原降水渗透深度的计算式。根据降水量和降水前的土壤湿度计算渗透深度, 其百分误差约为 11%, 误差的平均值为 4.6 厘米。

综合作物、土壤、底墒和蒸发(散) 四方面的因素, 提出了华北平原春季的“透雨”指标。它包括必需的降水量和渗透深度, “透雨”的计算结果与实测资料是相符的。

一、引 言

降水或灌溉水在土壤中的渗透规律, 即进入土壤中的时空分布, 已有过不少研究^[1]。一般把渗透区分为渗透速度和渗透深度两个方面, 大部分有关渗透的研究结果属于渗透速度方面。威尔科克斯研究了灌水后, 在土壤表层无蒸发的情况下, 土壤排水速度和土壤湿度的函数关系。黄秉维^[2]作了详细的评述, 指出渗透速度也是土壤湿度垂直梯度的函数。

渗透深度就是降水入渗锋面所到达土层的深度。由于降水后渗透层的土壤湿度都有不同程度的增加, 所以农业气象也称它为增墒深度。渗透深度不仅与降水, 还与土壤类型和含水量等有关, 因而渗透深度的估算是一个复杂的问题, 目前这方面理论的定量研究结果还比较少。

本文利用锦州、石家庄、唐山农气站和衡水气象台的土壤水分和降水渗透观测资料, 来定量地研究讨论渗透深度问题。在分析资料的基础上, 依据水平衡公式, 得出有一定物理意义、适合农业气象工作使用的渗透深度估算公式, 并提出华北春季干旱时期中的“透雨”指标及其估算方法, 还将计算结果与实测资料作了比较。

二、降水的渗透方程和解

在华北春季, 降水量和降水强度比较小, 在地形平整无倾斜的情况下, 日降水量小于 25 毫米时, 可设地表径流 $S \approx 0$; 作物尚未完全复盖地表面, 取截留量 $N \approx 0$; 设降水时段内的蒸发 $E \approx 0$; 地下水位较深, 在降水时段内与深层的土壤水分交换 M 可忽略不计, 即

* 本文于 1980 年 8 月 26 日收到, 1982 年 1 月 23 日收到修改稿。

$M \approx 0$ 。由此,水分平衡方程

$$W_e = W_B + R + E + S + M + N \quad (1)$$

可简化为

$$W_e = W_B + R \quad (2)$$

式中 W_e ——降水后某一深度土层的含水量; W_B ——降水前同一深度土层的含水量;
 R ——降水量(以上均以毫米为单位)。式(2)表示降水量都有效地增加渗透层的土壤水分含量。

已知降水前的土壤湿度分布为 $W'_B(z)$, 降水后某一时段渗透过程结束时, 土壤湿度的分布为 $W'_e(z)$ ($W'_B(z)$ 及 $W'_e(z)$ 的意义与 W_B 、 W_e 相同, 但单位用百分数表示)。在以土壤湿度为横座标、深度为纵座标的图 2 中, $W'_e(z)$ 和 $W'_B(z)$ 二曲线所包围的面积等于渗透层水分含量的增加量, 也就是降水量 R , 二曲线的交点为实际渗透深度 Z_P (单位: 厘米)。降水在土壤中的渗透方程为

$$R = \int_0^{Z_P} (W'_e - W'_B) D \frac{0.1}{\rho} dz \quad (3)$$

式中 ρ 为水的密度(克/立方厘米); D 为土壤容重(克/立方厘米); 系数 0.1 由单位换算得出。

由于 W'_e 、 W'_B 和 D 都是深度 z 的函数, 而且其函数表示式都随具体的环境条件而改变, 因此要求得 z_P 的解析式是很困难的。

在气象部门, 土壤湿度的测定是利用取样烘干称重法, 测定结果的代表性和精确性比较高。在分层测定土壤湿度时, 对于第 i 个土层, 降水前后土壤含水量的增加量为

$$\Delta W_i = (W'_{ei} - W'_{Bi}) D_i \frac{0.1}{\rho} \Delta z_i$$

若降水渗透到第 j 层, 则有

$$R = \sum_{i=1}^j (W'_{ei} - W'_{Bi}) D_i \frac{0.1}{\rho} \Delta z_i \quad (4)$$

1. 重力水渗透

按照前述重力水渗透的模式, 则有

$$W_{ei} = W_{Hi} \quad (5)$$

式中 W_{Hi} 为 i 层的田间持水量(%)。代入式(4)得

$$\Delta W_i = (W'_{Hi} - W'_{Bi}) D_i \frac{0.1}{\rho} \Delta z_i$$

应用农业气象的土壤湿度资料, 取 $\rho = 1$, $\Delta z_i = 10$ 厘米, 降水从 $z = 0$ 的上表层逐层向下渗透, 若 $R > \Delta W_1$, 则向第二层渗透, ……直到第 m 层有

$$R < \Delta W_1 + \Delta W_2 + \cdots + \Delta W_m$$

于是 $z_g = 10(m-1) + \frac{R - [\Delta W_1 + \Delta W_2 + \cdots + \Delta W_{m-1}]}{\Delta W_m} \cdot 10 \quad (6)$

式中 z_g 即重力水的渗透深度。

2. 悬着水渗透

上述重力水渗透是当土壤湿度 $\geq$ 田间持水量时的情况。当渗透层的土壤湿度低于田

间持水量、但高于下面临近土层的湿度时,渗透层的土壤水分将通过毛细管作用继续向下渗透,这种渗透可称为悬着水渗透。在[1][3]中指出悬着水渗透量是毛管传导率和毛管水位势差的函数,水分由毛管水位势高向位势低的地方运动。毛管传导率和毛管水位势差与土壤类型、结构等因素有关。

假设悬着水渗透和重力水渗透有相类似的过程,即和土壤的物理性质及土壤湿度的垂直分布有关。降水后表层土壤湿度增大,与其下层产生湿度梯度,在毛管水位势作用下水分向下渗透,直到各层的毛管水位势相等为止,即渗透层的土壤湿度为一常数。若它可用 AW_{H_i} 表示,则渗透方程(3)为

$$R = \int_0^{z_c} (AW'_{H_i} - W'_{B_i}) D_i \frac{0.1}{\rho} dz \quad (7)$$

式中 z_c ——悬着水渗透深度; A ——比例系数,它和降水量 R 及 W_B 等参数有关。53 个例的观测资料统计分析表明:在华北春季中小雨降水量和强度条件下,渗透层的起始平均湿度 $\bar{W}_B$ 和 A 有密切的正相关(见图 1),用最小二乘法求出其关系式为

$$A = 0.0406 \bar{W}_B' + 0.153 \quad (8)$$

其相关系数 $r = 0.92$, A 值的计算标准差 $\sigma_A = 0.046$ 。

仍用分层的方法近似地计算悬着水的渗透深度 z_c , 若 $d_i = (AW'_{H_i} - W'_{B_i}) D_i$ 和式(6)相似,则

$$z_c = 10(n-1) + \frac{R - (d_1 + d_2 + \cdots + d_{n-1})}{d_n} \cdot 10 \quad (9)$$

由于在一般情况下 $A \leq 1$, 故 $z_c \geq z_g$ 。华北春季降水量小,土壤含水量低,降水在土壤中的渗透主要是悬着水渗透,所以 z_c 应与实际渗透深度相近。

三、渗透深度计算 结果与实测值比较

实际渗透深度 z_p 是比较降水前后实测各层的土壤湿度值得到的,即降水后在它以上各层的土壤湿度稳定增加的深度。而在 z_p 以下,降水前后的土壤湿度变化不大,由于烘干称重法的精度为 $\pm 1\%$,我们取土壤湿度的变化 $< \pm 1\%$ 。降水前后土壤湿度值相等的深度不一定在标准层次上,可由上、下二标准层次的土壤湿度值内插定出。

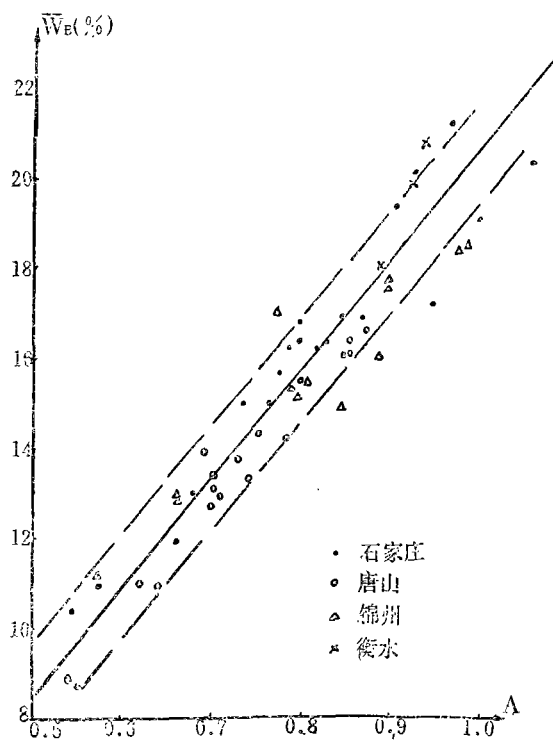


图 1 A 值和 $\bar{W}_B$ 的关系曲线

利用锦州等地的资料,我们按(6)和(9)式计算得到两种渗透深度 z_g 和 z_o ,与实际渗透深度 z_p 逐次比较,得到的53次的统计结果见表1。

表1 z_g 、 z_o 和 z_p 的比较¹⁾

渗透深度名称	渗透深度平均值 (厘米)	z_g 、 z_o 与 z_p 的偏差 $z_p - z_g$ (或 Z_{ei})		偏差的绝对值		偏差的均方差	
		用平均值 (厘米)表示 ²⁾	用%表示 ³⁾	平均值(厘米)	(%)	平均值(厘米)	(%)
z_g	22	20.0	48.1	20.9	56.1	23.9	59.4
z_o	37	4.6	11.0	6.5	18.0	8.1	22.9

¹⁾ 53次实际渗透深度的平均值 $z_p = 42$ 厘米;

²⁾ 用平均值表示即为 $\sum_{i=1}^{53} \frac{[z_{pi} - z_{gi} \text{ (或 } Z_{ei})]}{53}$;

³⁾ 用%表示为 $\sum_{i=1}^{53} \frac{[z_{pi} - z_{gi} \text{ (或 } z_{ei})]}{53 \cdot z_{pi}} \times 100$ 。

从表1可以看出重力水渗透深度 z_g 和实际渗透深度 z_p 相差较大,其误差值已接近 z_g 的计算值,故在实际应用中意义不大。悬着水渗透深度 z_o 和重力水渗透深度 z_g 比较,则接近于实际渗透深度 z_p ,其偏差平均为4.6厘米,百分误差为11%。

华北春季降水量小,53个实例中仅有一次降水后表层(0~10厘米)土壤湿度略大于田间持水量。统计资料表明:降水后渗透层的平均土壤湿度比降水前增加3.1%,其平均土壤湿度也只有19.5%,占田间持水量的80%左右。下面给出了降水后三种渗透深度的平均土壤湿度比较(表2)。

表2 降水后渗透层平均土壤湿度比较¹⁾

渗透深度名称	渗透层土壤湿度(%)		各次极值与实测平均值的偏差% 53次平均值及范围
	平均值	变化范围	
z_p	19.5	12.7—21.2	1.4(3.3—0.7)——-1.2(-3.7—1.1)
z_g	25.0	23.6—25.7	
z_o	20.1	13.4—25.1	0.6(5.0—-2.1)——-1.7(4.1—-5.2)

¹⁾ 降水前渗透层的平均土壤湿度为16.4%。

由表2可以看出:悬着水渗透深度 z_o 和实际渗透深度 z_p 内平均土壤湿度比较接近,其偏差为0.6%,已低于土壤湿度的测定误差。因此, z_o 可用来估算渗透深度。

四、“透雨”及其估算

1. “透雨”指标

“透雨”是一个农业气象术语。虽然它在农业生产中应用得相当广泛,但还没有一个确切的定义。“透雨”一般理解为:在天气比较干旱的条件下,一次降水过程可以使当地的

主要农作物在一个较长的时期内得到为维持正常生长所需要的水分，这样的一次降水过程称为“透雨”。

对华北春季，我们从以下几个方面来确定“透雨”的指标：

i) 作物对土壤水分的要求 华北春播作物有棉花、玉米、高粱和越冬作物冬小麦等。按它们对土壤湿度的要求可分为两类：对土壤水分要求较高的冬小麦拔节期和棉花播种期，以及要求较低的粗粮作物（玉米、高粱、谷子、马铃薯等）的播种期、苗期和棉花苗期。按^[4]所述结果，棉花从播种到出苗期间，在0—20厘米土层的含水量为田间持水量的70%或稍多一些为适宜；棉花苗期在30—40厘米土层的含水量为田间持水量的60%（55—70%）为宜。玉米播种时，耕作层的土壤水分为田间持水量的60%左右就能满足发芽和出苗的需要^[5]。冬小麦在春季拔节抽穗的需水临界期，土壤湿度低于田间持水量的65%将影响产量^[6]。因此，降水后的土壤湿度在上述生长期内不低于上述要求。

ii) 土壤水分运动和作物对土壤水分的吸收

从作物对土壤水分吸收的角度分析，它可以不同程度地从土壤中吸收从田间持水量到稳定凋萎点的那部分有效水分，但当土壤湿度低于毛管断裂湿度（约占田间持水量的65—70%）时，土壤水分的活动性就显著降低^[7]。作物从根毛附近的土壤中吸取水分后，若那里的水分得不到适当的补充，则它吸收的水分将逐渐减少，从而不能满足作物蒸腾的需要，以致影响作物的正常生长。

iii) 和土壤深层的“接墒” 华北春季耕作层以下的土层中，土壤含水量一般变化较小（0.6—0.8 W_H ），而耕作层受气象因素影响较大。为满足耕作层与其下层的水分交换，要求耕作层以下临近土层的湿度接近耕作层在降水后的湿度，假如耕作层（0—20厘米）与其下层（20—50厘米）在降水后都能保持在田间持水量的65—70%以上，可以认为耕作层与整个土层接上了墒。

iv) 蒸发（散）的水分消耗 春季从播种到出苗期间（玉米约为5—10天，棉花为10—15天），冬小麦在拔节后较长的时期中，蒸发（散）主要从耕作层及其邻近的下层消耗水分，可以根据^[8]定量估算蒸发（散）的数值：春播作物10天的蒸发（散）量为10—20毫米，而拔节期的冬小麦则为30—40毫米，约占该土层田间持水量的10—15%。

综合以上四方面的因素，可以把“透雨”指标归结为满足以下两个条件：甲) 降水量必须超过某一深度范围内使土壤湿度达到作物的适宜土壤湿度的不足量 $\sum d_i$ (必要条件)；2) 渗透深度 $\geq$ 作物所要求的适宜土壤湿度的深度 (充分条件)。在华北地区北部以玉米

表3 “透雨”的土壤湿度(占田间持水量的%)和渗透深度(厘米)指标

作物名称	土 壤 湿 度			渗 透 深 度
	耕作层 (0—20厘米)	20—30厘米	20—50厘米	
玉米(播种)	70	65	—	30或 ≥ 20 ，当20—30厘米的土壤湿度 ≥ 65 时
棉花(播种)	80	70	—	30或 ≥ 20 ，当20—30厘米的土壤湿度 ≥ 70 时
冬小麦(拔节)	80	—	70	50或 ≥ 20 ，当20—50厘米的土壤湿度 ≥ 70 时

为代表作物、南部以棉花或冬小麦为代表作物,它们对不同深度土层所要求的土壤湿度和渗透深度见表 3。

2. “透雨”的实际估算及举例

利用渗透方程(7),在已知逐层的初始土壤湿度 W'_{bi} 的条件下,根据上述“透雨”指标,就可以计算出达到“透雨”所需的降水量。渗透深度按前述悬着水渗透深度的计算方法得出。

以锦州为例计算 1956—1962,1964—1969 年春季(四、五月)逐旬达到第一次(场)“透雨”所需的降水量,也即是该深度各层土壤水分不足量之和 $d_{0-20} + d_{20-30} + \dots$ 和渗透深度,并和该旬内实测降水量及所要求的渗透深度进行比较(表 4),说明是否“透雨”。在干旱的年份,四、五月未下“透雨”的,计算到六月份第一场“透雨”出现为止。

表 4 锦州春季逐旬降水量、旬悬着水渗透深度和“透雨”指标比较(单位:毫米)

年 份	日 期 比较 要素	8/4	18/4	28/4	8/5	18/5	28/5	8/6	18/6	28/6	8/7
1958	d_{0-20}	18.9	17.1	—	3.8	—	3.0	—	3.1	16.8	—
	d_{20-30}	0.3	2.0	—	—	—	—	—	—	7.3	—
	旬降水量	9.7	49.0 [△]		11.3	14.1	23.5	20.5	4.9	30.0	
	Z_0	10	70		17	28	50	31	8	40	
1959	d_{0-20}	21.8	5.8	6.8	7.1	12.8	18.0	20.4	25.0	17.1	2.6
	d_{20-30}	4.8	2.8	2.1	1.9	3.1	5.4	4.0	9.4	9.9	—
	旬降水量	22.9*		10.1	0.1	2.5	5.1	17.8	14.6+ 27.1	63.4 [△]	
	Z_0	29		16	—	4	7	14	17 24	100	

[△] 为第一场“透雨”, — 为实测土壤水分大于表 3 中所示“透雨”指标; * 为降雪。

锦州 13 年中,1957,1962,1964 和 1969 四年春季都较湿润;1956,1960,1961,1965,1966,1967,1968 七年耕作层较干旱,而下层较湿润,一般只要中雨或几次小雨就可以达到“透雨”,而不至于影响出苗。只有 1958,1959 年春季,耕作层干旱严重,而下层也比较干旱,因而不能向耕作层输送一定量的水分,所以中、小降水量不足以成为“透雨”,要有大雨以上的降水过程才能解除旱象。如表 4 所示:1958 年 4 月 24—25 日 49.0 毫米和 1959 年 7 月 1—6 日 63.4 毫米的降水才是解除旱象的“透雨”。1958 年 4 月下旬“透雨”后土壤墒情一直比较好。1959 年 5 月上旬和 6 月中、下旬虽有 4 次中、小雨过程,但由于较深的土层都比较干旱,加上 5,6 月份蒸发量大,所以都不是“透雨”。

由表 4 可知计算结果与实测资料是比较一致的。如果仅耕作层(0—20 厘米)干旱,一般中雨或连续几次小雨可以达到满足春播需要的“透雨”,但当深层(20—30 或 20—50 厘米)土壤也较干旱时,则要求大雨或更大的雨量。

五、讨 论

前面我们给出了华北平原降水的两种渗透深度的计算公式,经过与实测资料比较,悬

着水渗透深度接近实际渗透深度。

为了得到清楚的概念,我们用图解方法来讨论一个实例,图2为石家庄1956年5月20—23日降水量14.4毫米的渗透结果,图中分别给出降水前后和按公式计算得出的曲线。

从图2和表2我们还可以提出这样一个问题,即不论是重力水还是悬着水所得到的降水后土壤湿度分布曲线和实测结果还有差别,也就是在渗透层中,土壤湿度还是维持一定的梯度,即 $\frac{dw}{dz}=K \neq 0$ 。由表2可得到梯度为 $K=1.4+1.2/z_p$,也就是降水后土壤湿度分布曲线的平均斜率。华北春季多中雨和小雨,渗透深度是有限的,而且由于土壤表面的蒸发,以及深层土壤向上层的毛管水的传输,观测到如图2所示的直线3,4即渗透层内含水量上下层相等的情况是少见的。

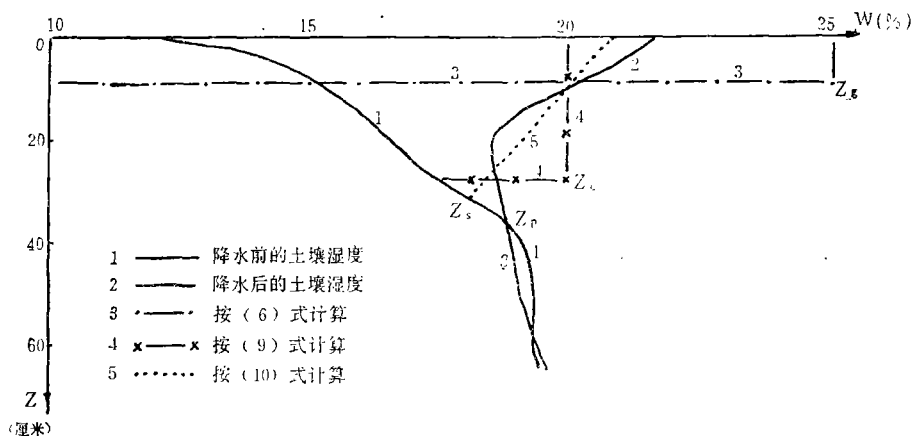


图2 石家庄1956年5月20—23日降水14.4毫米前后的土壤湿度变化

降水后渗透层的平均土壤湿度小于悬着水、重力水渗透深度内的土壤湿度,如表2所示,呈 $W_H > AW_H > \bar{W}_e$, AW_H 与 $\bar{W}_e$ 的平均差值为 $\sum_{53} (AW_H - \bar{W}_e) / n = 0.6\%$,即在图2中

降水前和降水后土壤湿度曲线1—2所包围的面积 $\leq$ 降水量,其原因可能是降水前和降水后测定土壤湿度的时段内有少量的蒸发,以及由于可能的截留和迳流等因素的影响,使得实际渗入土壤中的水分小于降水量。

整理53次降水后的土壤湿度随深度的分布,可以近似地假设为一直线方程。设降水后渗透层的土壤湿度为 $W'_e(z)$,则有

$$W'_e(z) = (W'_e)_0 - Kz$$

式中 $(W'_e)_0$ 为降水后最上边土层的湿度。由表2可得到的极值和实测平均值的偏差为1.4%,以及 AW_H 较平均值偏高0.6%,故

$$(W'_e)_0 = AW_H + 1.4 - 0.6 = AW_H + 0.8$$

可求得 $W'_e(z)$ 的近似直线方程:

$$W'_e = AW_H + 0.8 - \frac{2.6}{z_e} z \quad (10)$$

以式(10)作直线 5, 从图 2 可看出它和实测土壤湿度分布曲线进一步接近了, 而且也可用以求解方程(3)。

式(10)中 z_e 是一个待定参数, 必须由式(9)求得。当 z_e 已知时, 由式(10)求得直线 $W'_e(z)$ 和实测 $W'_s(z)$ 的相交点, 其纵坐标为 z_s , 可以定名为悬着水二次近似渗透深度。很明显 z_s 较 z_e 更接近于 z_p 。从图 2 可看出 z_s 与实测值的差值仅有 $z_e - z_p$ 之半。

另外, 我们将上述 53 个实例按 R , $\bar{W}'_s$ 和 z_p 制成点聚图 3。对于华北地区土壤性质属砂质壤土而又缺少当地土壤水文物理常数的台站, 在春季距测定土壤湿度时间不长, 且土壤表层较干和土壤湿度变化不大时, 由图 3 可简便地查出降水渗透深度, 其误差一般不超过 10 厘米, 同时从图 3 可以得到, 在 0—30 厘米土层较干(约为田间持水量的 45—65%)的情况下, 10 毫米的降水量仅湿润 10—20 厘米的耕作层; 10—15 毫米的降水量一般才能满足春播出苗的需要; 在土壤湿度很低(约为田间持水量的 30—50%)时, 则需要降水量为 25 毫米以上的大雨降水过程。

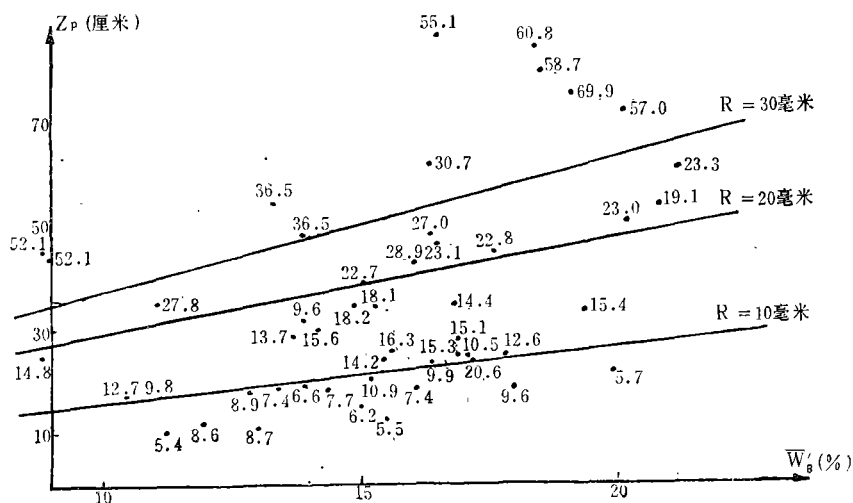


图 3 根据降水前土壤湿度 $\bar{W}'_s$ 和降水量 R 查算 z_p

六、结 语

利用土壤中重力水渗透的模式, 提出了华北春季降水的重力水和悬着水渗透深度的计算式。给出根据降水量和降水前土壤湿度计算渗透深度的方法, 其百分误差为 11%, 误差平均值为 4.6 厘米, 基本上能满足气象台站实际工作的需要。

综合作物、土壤、底墒和蒸发(散)四方面的因素, 试提出华北平原春季的“透雨”指标, 它包括必需的降水量和足够的渗透深度, 计算和实测结果是比较一致的。

最后讨论了降水后渗透层的土壤湿度分布和查算降水渗透深度的近似方法, 可供实际服务工作试用。

参 考 文 献

- [1] David H Miller, Water at the Surface of the Earth, An introduction to ecosystem hydrodynamics. Academic press Newyork San Francisco London 1977.
- [2] 黄秉维, 从自然地理学、土壤水分平衡谈到 J. C. 威尔科克斯的四篇论文, 地理学报第 29 卷第四期, 1963.
- [3] Ф. Е 阔略谢夫编, 饱和土壤和不饱和土壤中水分的运动(文摘), 农业物理研究方法仪器和措施 第 76—77 页, 北京农业大学农业物理和气象系译, 人民教育出版社, 1960.
- [4] 中国农科院棉花研究所编, 中国棉花栽培学, 上海科学技术出版社, 1959.
- [5] 山东省农科院主编, 中国玉米栽培, 上海科学技术出版社, 1962.
- [6] 金善宝主编, 中国小麦栽培学, 农业出版社, 1960.
- [7] A. A. 罗杰, 土壤水分状况的研究方法, 中国工业出版社, 1965.
- [8] **陶祖文**、裴步祥, 农田蒸散和土壤水分变化的计算方法, 气象学报第 37 卷 No 4, 1979.

AN AGROMETEOROLOGICAL METHOD FOR ESTIMATING THE INFILTRATION DEPTH AND SOAKING RAIN IN SPRING FOR NORTH CHINA PLAIN

Tao Zuwen

Pei Buxiang

(Academy of Meteorological Sciences of National
Meteorological Bureau)

Abstract

Using the conception of the infiltration of gravity moisture, a model for estimating infiltration depth is presented, by means of the rainfall and the soil moisture before rain. Comparison with observations made in four stations shows an error of about 11% and average error of 4.6 centimeters.

From four factors (characteristics of the soil, the kind of crop, soil moisture storage and evapotranspiration) an index for estimating the amount of soaking rain is presented. Here "soaking" means enough rainfall for adequate growth of the major crop concerned and an infiltration depth to provide adequate soil moisture. Results of calculation are tested with actual determinations.