

# 灌溉条件下夏玉米田根系层水分动态和田间灌溉水有效利用率的研究\*

刘红英<sup>1,2</sup>, 蔡焕杰<sup>1</sup>, 王 健<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2 杨凌职业技术学院 水利系, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 对西北农林科技大学灌溉试验站 2002 年夏玉米田根系层土壤水分消耗动态进行了研究, 分析了夏玉米生育期农田一维土壤水分动态变化过程及不同灌水处理对不同深度根系层的耗水量和不同时期日耗水强度的影响, 确定了不同灌水定额条件下田间灌溉水有效利用率与计划湿润层深度的关系, 其相关关系均大于 0.96; 通过产量分析, 确定了夏玉米作物拔节后适宜的土壤含水率为田间持水量的 80%。

[关键词] 夏玉米; 农田土壤水分动态; 土壤水利用率

[中图分类号] S513.071

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)06-0107-06

夏玉米是我国北方黄淮海地区的主要粮食作物之一, 播种面积占全国玉米种植面积的 30% 以上, 总产量占全国的 50% 左右<sup>[1]</sup>。实现夏玉米生长过程的节水灌溉, 对于北方地区的农业节水具有重要意义。根是玉米重要的营养器官之一, 其不仅固定植株, 而且吸收合成植株生长发育所需要的水分、无机盐以及某些生理活性物质。玉米根系层土壤含水量因受降水、灌溉、土壤植被、入渗及蒸发等因素的制约, 存在明显的时空差异, 即土壤水分在空间各点的值既有差异又互相影响。过去对土壤水分预测的研究较多<sup>[2-5]</sup>, 而且建立了多种预测模型, 每种模型各有其优缺点, 也各有其适用的范围和区域。本研究利用便携式土壤水分测定仪实测的土壤水分资料, 计算了夏玉米生长过程中的蒸发蒸腾情况, 详细分析了夏玉米作物根系层土壤水分消耗的动态变化, 提出了夏玉米作物根系层土壤水分消耗规律, 以期为夏玉米合理适时的灌溉提供依据。

## 1 试验区概况与试验方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2002 年在西北农林科技大学灌溉试验站进行, 试验站地形较为平整, 土层深厚, 土壤类型为重壤土, 田间持水量为 23.5%, 1 m 以内土壤平均干容重为 1.37 g/cm<sup>3</sup>, 试验作物为夏玉米。

### 1.2 试验布设与处理

试验设 5 个处理, 每处理 3 个重复, 小区面积为 4 m × 5 m, 小区之间设宽 60 cm 的保护区, 小区与保护区之间设宽为 15 cm 的畦埂; 因玉米生长期降水较多, 该试验只在 07-22 采用小畦灌溉 1 次水。每个处理的灌水定额按田间持水量的百分比确定(计划湿润层深度按 1.0 m 计), 灌水定额分别为 0, 32.5, 65.0, 97.5 和 130.0 mm (分别为实测田间持水量的 47%, 60%, 70%, 80% 和 90%); 灌水量由数字水表计量。试验期间利用 Diviner 2000 土壤水分测定仪对夏玉米根系层(0~100 cm)的含水率进行连续定位监测(测定时间为 07-20~10-08), 每 1~3 d 测定 1 次, 降水或灌水前后加测, 测得值均为体积含水率。试验区田间管理与当地大田水平一致, 2002 年生育期间的有效降水量为 270 mm。夏玉米收获后按小区测产。

### 1.3 土壤储水量的计算

在研究过程中, 对土壤水分采取土壤储水量的形式来表征<sup>[2]</sup>, 用公式(1)计算:

$$W = \sum_{i=1}^n (\theta \times \gamma) \times h \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (1)$$

式中,  $W$  为某一土层内的储水量, mm;  $\theta$  为对应土壤重量含水率, %;  $\gamma$  为对应土壤的干容重, g/cm<sup>3</sup>;

\* [收稿日期] 2004-07-26

[基金项目] 国家“863”高技术研究发展计划项目(2002AA2Z4031); 高等学校博士点基金项目(20020712020)

[作者简介] 刘红英(1977-), 女, 甘肃天水人, 在职硕士, 主要从事作物需水规律与水文水资源利用研究。

[通讯作者] 蔡焕杰(1962-), 男, 河北藁城人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理与技术及水资源高效利用研究。

$h$  为土层厚度, mm。用(1)式即可计算出某土层的土壤储水量, 根据不同深度的储水量变化可以计算各层土壤的储水量。

#### 1.4 田间灌溉水有效利用率的计算

田间灌溉水有效利用率, 是指应用某种灌水方法或某项灌水技术灌溉后, 储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量与实际灌入田间的总水量的比值<sup>[6]</sup>, 以百分比表示, 即

$$E_a = \frac{V_s}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $E_a$  为田间灌溉水有效利用率(%);  $V_s$  为灌溉后储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量( $m^3$  或 mm);  $V$  为田间实施灌水的总水量( $m^3$  或 mm)。

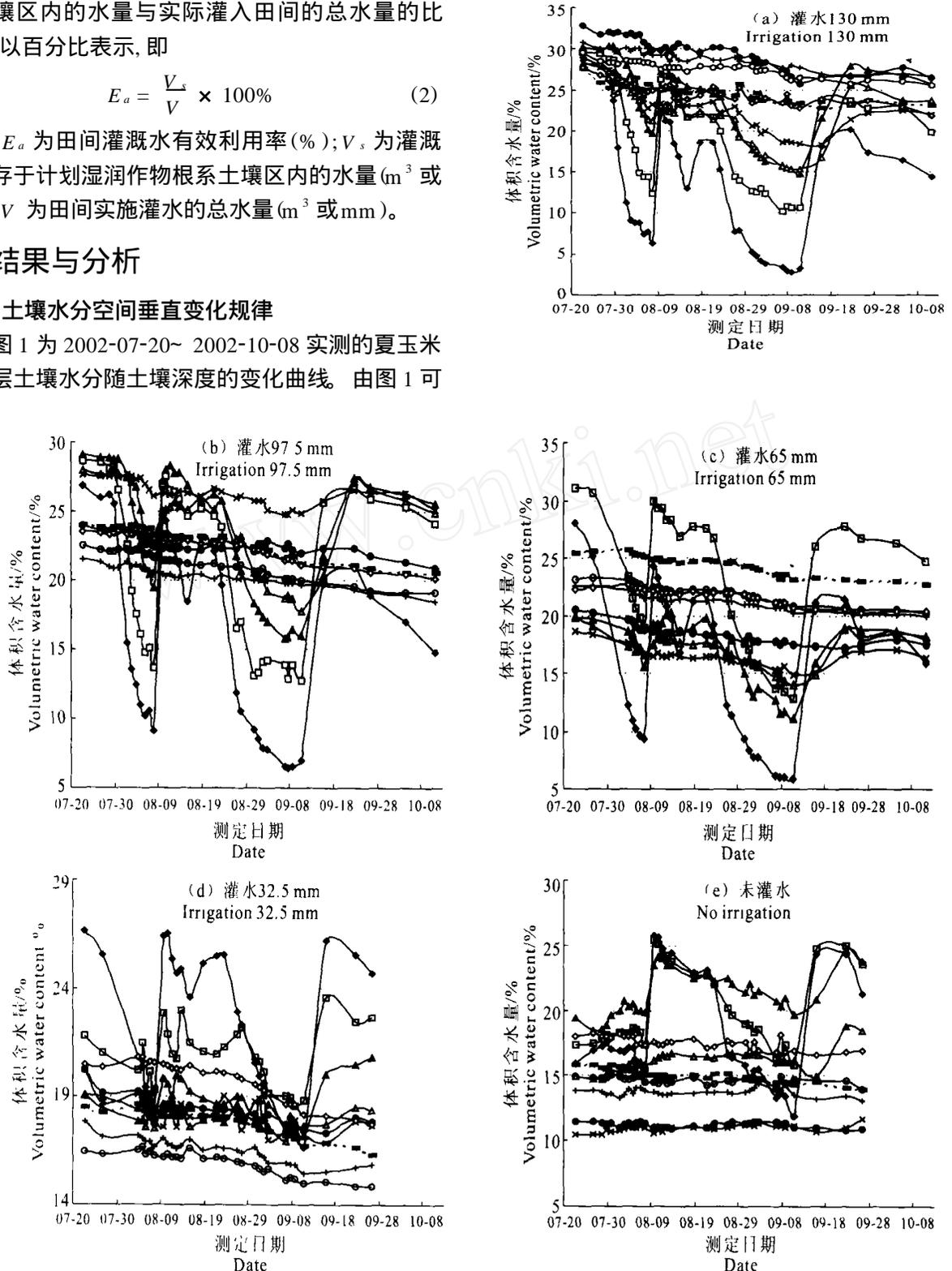
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分空间垂直变化规律

图 1 为 2002-07-20~2002-10-08 实测的夏玉米根系层土壤水分随土壤深度的变化曲线。由图 1 可

以看出, 夏玉米田根系层土壤水分在空间上的垂直变化具有以下特点:

(1) 农田土壤水分空间变异很大, 但各层间的变异表现出明显的层次性。夏玉米根层 0~40 mm 土层含水率变异幅度最大, 说明作物根系层土壤含水率的变化主要受灌溉、降水和蒸发蒸腾的影响。



(2) 夏玉米根系层土壤含水率随深度的变化呈曲线形式, 尤其是降水或灌水后, 越趋近土壤表层, 土壤含水率变化越明显。但随灌水量的不同, 剖面不同层次土壤含水率的变化具有各自的特点。从图 1-a 和图 1-b 可以看出, 灌水定额高的处理, 60~100 cm 土层土壤含水率一直保持在高水分状况(含水率达田间持水量 85% 以上), 表层 0~20 cm 土层土壤含水率变化剧烈, 这是由于大定额灌水使得夏玉米根系层深层储水量接近田间持水量, 而夏玉米根系主要集中在 0~40 cm; 由图 1-c 可以看出, 灌水定额为 65 mm 的处理, 60~100 cm 土层含水率一直保持在中等水分状况(含水率为田间持水量的 65%~85%); 表层 0~20 cm 土层土壤含水率在深层土壤含水率的上(如 90 cm 土层的含水率)、下限(如 60 cm 土层的含水率)两侧变化, 这是由于中等灌水定额并未使夏玉米根系层深层储水量接近田间持水量, 而每次降水不能入渗到夏玉米根系层的深层所致; 由图 1-d 和图 1-e 可以看出, 低灌水定额处理时, 60~100 cm 土层土壤含水率一直保持在低水分状况(含水率在田间持水量的 65% 以下), 表层土壤含水率总是在高于或接近深层土壤含水率下限(实测含水率)以上变化, 这是由于小定额灌水在夏玉米根系层的入渗范围较小所致。

综上所述, 灌水量对夏玉米根系层表层和 60~100 cm 土层土壤含水率变化的影响具有明显的规律性, 即随着灌水定额的减少, 夏玉米根系层 60 cm 以下土层土壤含水率逐渐降低; 而表层土壤含水率的变化受灌溉和降水的影响较大。

(3) 从图 1 还可以看出, 夏玉米根系层不同深度

含水率的变化有明显的规律性。由图 1-a~c 可见, 灌水量大于 65 mm 时, 40 cm 深度以上含水率变化较大, 而 40 cm 以下含水率变化较小, 这说明灌水较大时, 夏玉米根系层耗水主要发生在 40 cm 深度以上。当灌水量为 0~32.5 mm 时, 由图 1-d 和图 1-e 可见, 土壤含水率空间垂直变化较大的范围为 0~60 cm, 而 60 cm 深度以下含水率变化较小, 这说明夏玉米根系层的空间垂直变化受到灌水量的明显影响。这是由于根系层含水率较大时, 夏玉米根系始终处于高水分状况, 其大部分根系可能集中在 40 cm 深度范围以内; 而当含水率较小时, 夏玉米根系层含水率始终处于低水分状况, 夏玉米为了更好地生长, 通过自身调节使其根系向含水率相对高的深层发展, 这时大部分根系可能达到 0~60 cm 的深度范围, 但其具体的生长规律还有待进一步研究证实。

2.2 灌水量对作物耗水强度与产量的影响

从图 1-a~e 可见, 在夏玉米的生长季节内, 根系层 1 m 深处的土壤含水率均呈下降趋势, 说明土壤水分从 07-22 至收获期间无深层渗漏产生。在 07-20~10-08 夏玉米生育期内, 每次降水 10 mm 以上有 6 d, 1~10 mm 的降水有 7 d; 这期间连续 7 d 以上无降水有 3 次, 本研究选 07-29~08-07 和 08-23~09-08 两个阶段分析了不同灌水定额对夏玉米日耗水强度的影响, 其结果列于表 1。由表 1 可见, 夏玉米生育期日耗水强度随灌水量的减少而降低。在夏玉米开始拔节时, 控制灌水量为田间持水量的 80%, 可以获得高产, 单位面积产量可达 8 512.5 kg/hm<sup>2</sup>; 而灌水太多或太少均会导致减产, 无灌水时产量最低。

表 1 不同灌水定额对夏玉米日耗水强度与产量的影响

Table 1 Influence of quota of irrigation water on daily water consumption rate and yield of summer maize

灌水定额/mm Quota of irrigation water	田间持水量/% Field moisture capacity	测定日期 Date				产量/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Yield
		07-29~ 08-07		08-23~ 09-08		
		1 m 土层土壤水消耗量/mm Efficiency of storage soil water in the range of 1 m	日耗水强度/(mm · d <sup>-1</sup> ) Daily water consumption rate	1 m 土层土壤水消耗量/mm Efficiency of storage soil water in the range of 1 m	日耗水强度/(mm · d <sup>-1</sup> ) Daily water consumption rate	
130.0	90	55.2	6.13	51.7	3.23	7 950.0
97.5	80	50.1	5.57	45.4	2.84	8 512.5
65.0	70	36.2	4.02	41.9	2.62	7 331.0
32.5	60	10.0	1.11	19.4	1.21	5 756.0
0	47	4.4	0.49	15.4	0.96	4 237.5

2.3 灌水量对不同深度土壤耗水量的影响

由前面分析发现, 不同灌水量对夏玉米土壤含水率的变化影响很大。为此, 再选 07-29~08-07 和

08-23~09-08 2 个阶段, 计算不同灌水处理时夏玉米根系层 0~20、30~40、50~60、70~80 和 90~100 cm 土层土壤耗水量的变化动态, 结果列于表 2。

表 2 不同灌水条件下夏玉米根系层耗水量的变化动态

Table 2 Dynamic changes of moisture consumption in the root district of summer maize under different irrigation conditions

灌水定额/ mm Quota of irrigation water	07-29~ 08-07						08-23~ 09-08					
	0~ 20 cm	30~ 40 cm	50~ 60 cm	70~ 80 cm	90~ 100 cm	合计 Total	0~ 20 cm	30~ 40 cm	50~ 60 cm	70~ 80 cm	90~ 100 cm	合计 Total
130.0	32.17 (58%)	14.36 (26%)	5.25 (10%)	1.04 (2%)	2.40 (4%)	55.22 (100%)	22.77 (44%)	16.05 (31%)	7.55 (15%)	2.34 (5%)	2.99 (6%)	51.70 (100%)
97.5	31.13 (62%)	13.93 (28%)	2.62 (5%)	1.38 (3%)	1.04 (2%)	50.10 (100%)	23.15 (51%)	16.62 (37%)	1.43 (3%)	1.37 (3%)	2.82 (6%)	45.40 (100%)
65.0	25.12 (69%)	5.89 (16%)	2.96 (8%)	1.71 (5%)	0.52 (1%)	36.20 (100%)	26.60 (63%)	9.92 (24%)	1.59 (4%)	1.74 (4%)	2.06 (5%)	41.90 (100%)
32.5	6.88 (69%)	1.57 (16%)	1.35 (13%)	0.38 (4%)	- 0.17 (- 2%)	10.00 (100%)	11.53 (60%)	1.43 (7%)	2.03 (10%)	1.72 (9%)	2.64 (14%)	19.35 (100%)
0	3.28 (74%)	0.43 (10%)	- 0.13 (- 3%)	- 0.31 (- 7%)	1.13 (26%)	4.40 (100%)	13.40 (87%)	1.66 (11%)	- 0.17 (- 1%)	- 0.51 (- 3%)	1.04 (7%)	15.41 (100%)

注: 不同灌水定额下对应的百分数为各层耗水量占总耗水量的比例。

Note: The different quota of irrigation water correspond with it's percent which is the ratio of total water consumption rate in each layer water consumption rate

由表 2 可以看出, 夏玉米根系层不同土层深度耗水量的变化随灌水定额的减少而减小(40~ 60 cm 除外)。从根系层不同土层深度耗水量占总耗水量的比例分析发现, 不同灌水量时, 0~ 20 cm 土层耗水量均达 0~ 100 cm 土层耗水量的 44% 以上, 而且表层 0~ 20 cm 耗水量占总耗水量的比例随灌水量的

减小而增加; 反之, 30~ 100 cm 土层耗水量占总耗水量的比例随灌水量的减少而减小。当灌水小于田间持水量的 60% 时, 部分深层土层耗水量的变化呈负值, 这可能是由于田间持水量小于 60% 时, 夏玉米根系层的含水量不能维持玉米的正常生长, 其根系向深层发展使得深层水迅速向上运移的缘故。

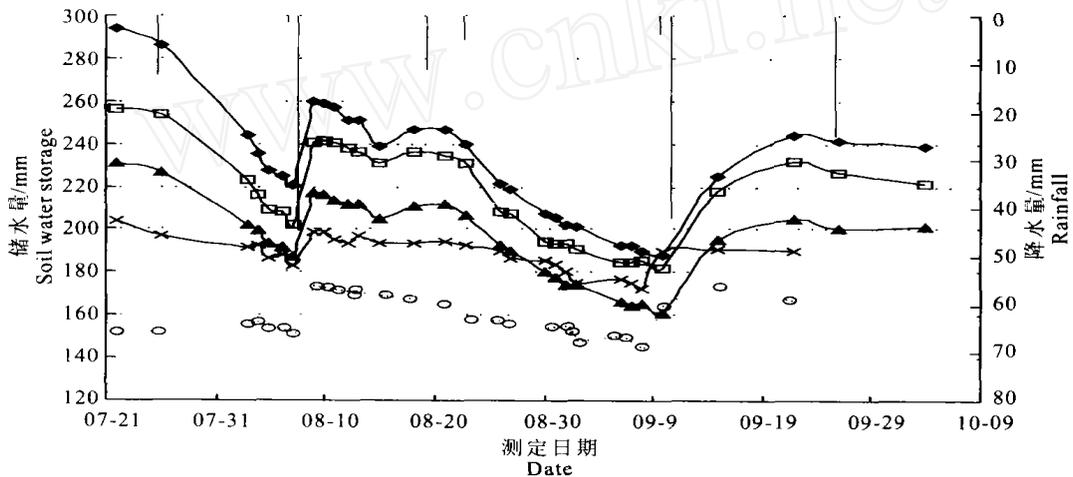


图2 不同灌水处理时玉米根系层(0~100 cm)储水量的变化

— 降水量; —◆— 灌水量130 mm; —□— 灌水量97.5 mm;  
—▲— 灌水量65 mm; —×— 灌水量32.5 mm; ○ 无灌水;

Fig.2 Change of soil water storage in the root district (0-100 cm) of maize in different irrigations

— Rainfall mm; —◆— Irrigation 130 mm; —□— Irrigation 97.5 mm;  
—▲— Irrigation 65 mm; —×— Irrigation 32.5 mm; ○ No irrigation;

图 2 为不同灌水处理时玉米根系层 0~ 100 cm 的储水量变化动态。从图 2 可以看出, 降水和蒸发蒸腾对各灌水处理的储水量有相同的影响趋势, 即降水后储水量迅速增加, 之后随着蒸发蒸腾的影响又逐渐降低。同时可看出, 不同灌水处理对夏玉米根系层储水量有较大的影响, 可影响到整个生育期, 灌水后储水量随灌水量的增加变化相对大一些, 这是由

于灌水量直接影响到夏玉米的生长。

#### 2.4 灌水量对田间灌溉水有效利用率的影响

不同深度土层的土壤水消耗量, 直接影响到计划湿润层深度的确定, 而计划湿润层深度又直接影响着灌水定额的确定, 也是影响田间灌溉水有效利用率的一个重要因素<sup>[7]</sup>。随着土壤计划湿润层深度的加深, 一部分渗漏水转化为有效水, 使得在此范围

内的土壤有效持水能力增加, 提高了田间灌溉水有效利用率。因此, 研究不同深度土壤的水分动态变化, 对田间灌溉水有效利用率的确定具有非常重要的意义。

表 3 不同灌水条件下田间灌溉水有效利用率与计划湿润层深度的关系

Table 3 Relation between water application efficiency and designed moisting layer of soil under different irrigation conditions

土层深度/cm Depth	130 mm				97.5 mm			
	灌水前 储水量/mm Soil water storage before irrigation	灌水后 储水量/mm Soil water storage after irrigation	储水 变化量/mm Change of soil water storage	田间水 利用率/% Water application efficiency	灌水前 储水量/mm Soil water storage before irrigation	灌水后 储水量/mm Soil water storage after irrigation	储水 变化量/mm Change of soil water storage	田间水 利用率/% Water application efficiency
0~ 40	75.76	116.98	41.22	32	62.12	112.72	50.60	52
0~ 60	122.34	178.02	55.68	43	90.31	164.42	74.11	76
0~ 80	158.20	238.53	80.33	62	125.00	208.53	83.53	86
0~ 100	182.30	293.74	111.44	86	166.21	256.05	89.84	92

土层深度/cm Depth	65.00 mm				32.5 mm			
	灌水前 储水量/mm Soil water storage before irrigation	灌水后 储水量/mm Soil water storage after irrigation	储水 变化量/mm Change of soil water storage	田间水 利用率/% Water application efficiency	灌水前 储水量/mm Soil water storage before irrigation	灌水后 储水量/mm Soil water storage after irrigation	储水 变化量/mm Change of soil water storage	田间水 利用率/% Water application efficiency
0~ 40	56.78	98.94	42.16	65	56.88	88.47	31.59	97
0~ 60	86.34	138.00	51.66	79	97.16	129.66	32.50	100
0~ 80	125.00	183.75	58.75	90	131.27	164.31	33.04	102
0~ 100	168.32	231.36	63.04	97	169.50	203.97	34.47	106

利用公式(2), 计算 07-22 灌水前后 2 d 不同灌水处理的作物根系层土壤水分变化动态, 结果(表 3)表明, 当计算土层深度达到 1 m 时, 不同深度土层水分动态呈规律性变化。灌水定额一定时, 田间灌溉水有效利用率随计划湿润层深度的增加而增加, 这为灌溉时计划湿润层深度的确定提供了理论依据。当灌水至田间持水量的 90% 时, 40, 60, 80 和 100 cm 土层的田间水利用率分别为 32%, 43%, 62% 和 86%, 均未达到 100%, 说明有部分水下渗或蒸发散失; 当灌水至田间持水量的 60% 时, 40, 60 cm 土层的田间水利用率分别达 97% 和 100%, 80 以下土层的计算田间水利用率均超过 100%, 这可能是 100 cm 以下土层中的水分向上运移的缘故, 因其变化比较复杂, 以后还需对其进行更为深入的研究。

用对数对表 3 田间灌溉水有效利用率与计划湿润层深度的关系进行拟合, 结果如图 3(其中,  $y$  为田间灌溉水有效利用率;  $x$  为计划湿润层深度;  $R^2$  为相关系数)所示。由图 3 可见, 田间灌溉水有效利用率与计划湿润层深度具有很好的对数相关性, 其相关系数均大于 0.96。

利用图 3, 在已知灌水定额时, 即可计算某一计划湿润层深度对应的田间灌溉水有效利用率。

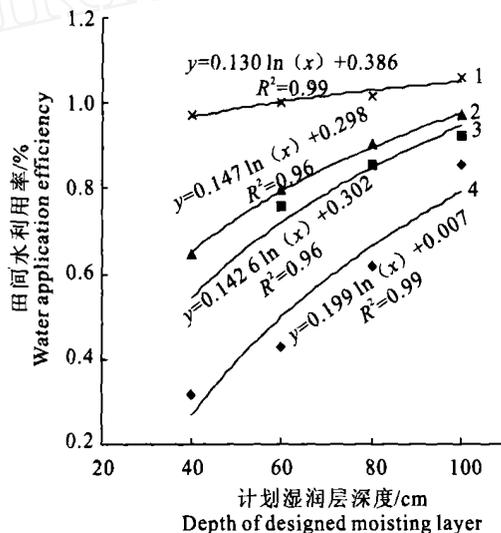


图 3 不同灌水条件下土壤有效水利用率与计划湿润层深度的关系

Fig 3 Relation of water application efficiency and the depth of designed moisting layer  
1. 32.5 mm; 2. 65 mm; 3. 97.5 mm; 4. 130 mm

### 3 结 论

(1) 农田土壤水分的变化表现出明显的层次性。本研究结果表明, 土壤根系层含水率变化幅度最

大的是 0~ 40 mm 土层,其主要受灌溉、降水和蒸散的综合影响;随灌水量增加,夏玉米根系层剖面土壤含水率的变化深度增加,当灌水至田间持水量的 90% 时,深度可达 60 cm;当灌水至田间持水量在 47% 时,土壤含水率的变化深度只在 30 cm 以内。

(2) 灌水量对作物根系层耗水强度有一定影响,不同灌水定额对夏玉米耗水强度的影响随田间

持水量的降低而减少。同时,收获后测产表明,在夏玉米开始拔节时,灌水控制在田间持水量的 80% 可以获得高产。

(3) 计划湿润层深度直接影响着灌水定额的确定。对相同灌水定额,土壤计划湿润层深度与田间灌溉水有效利用率间具有对数相关关系,相关系数均大于 0.96。

### [参考文献]

- [1] 山东农业科学院玉米研究所. 玉米生理[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [2] 罗毅, 于强, 欧阳竹, 等. 利用精确的田间实验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报, 2000, (4): 73- 80
- [3] 李红, 周连第, 侯旭峰, 等. 京郊平原区粮田深层土壤水分的预测[J]. 节水灌溉, 2002, (2): 20- 23
- [4] 罗毅, 雷志栋, 杨诗秀. 根系层储水量对随机腾发响应性的初步分析[J]. 水利学报, 1998, (5): 44- 48
- [5] 刘钰, 蔡林根, Fernando R M, 等. 作物根区底部土壤水分向上运移通量的计算方法[J]. 水利学报, 2001, (12): 19- 25
- [6] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [7] 郭元裕. 农田水利学[M]. 第 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

## Research about the dynamic changes of soil moisture consumption in the root district of summer maize and the application efficiency of soil water

L IU Hong-y ing<sup>1</sup>, CA I Huan-j ie<sup>2</sup>, WANG J ian<sup>2</sup>

(1 Department of Conservancy, Yangling Vocational and Technological College, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Key Laboratory of Agricultural Soil & Water Engineering in the Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This paper researched the dynamic changes of the soil moisture consumption in the root district of farmland of summer maize in 2002 in irrigation & experimental station of the Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, analyzed the course of the dynamic change about one-dimensional soil moisture and the influence of different irrigation treatments on water consumption in the different root layers and daily water consumption of different periods in root district of breeding time of the summer maize, confirmed the relation between the depth of designed moistening layer and water application efficiency in different quota of irrigation water, its relevant relation greater than 0.96. After analyzing the output, the suitable soil moisture content was confirmed to be 80% of the field capacity after the maize jointing period.

**Key words:** summer maize; the dynamic change of farmland soil moisture; soil water application rate