

地面灌溉水流特性及水分利用率的田间试验研究

李久生¹, 饶敏杰²

(1. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100094; 2. 中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081)

摘 要: 在内蒙古风沙区一种砂土和壤质砂土的春小麦生育期内进行了畦田规格和灌水技术要素对水流推进和消退过程、田间水利用系数、灌水效率及灌水均匀系数影响的田间试验。试验中畦田坡度基本一致, 畦长均为 60 m, 畦宽变化范围为 1~4 m, 单宽流量为 3.8~15.2 L/(s·m)。结果表明, 畦田水流推进曲线可用幂函数表示。在所研究的畦田中, 1m 宽度的畦田灌水效率最低, 宽度 2m 和 3m 的畦田灌水效率相近, 畦宽由 3m 增加到 4m 时, 灌水效率呈降低趋势, 因此试验条件下的畦田适宜宽度为 2~3m。对所研究的土壤来说, 春小麦生育期内平均灌水效率(田间水利用系数)仅为 0.5 左右, 与规范规定值(0.90 以上)尚有很大差距。利用水量平衡法求出的土壤入渗参数和观测的入渗时间, 计算了入渗水深均匀系数。结果表明, 入渗水深均匀系数随畦宽的变化趋势与灌水效率相同, 但可以达到 0.8 以上。对地面灌溉来说, 高均匀系数并不意味着高灌水效率(田间水利用系数)。

关键词: 地面灌溉; 水流特性; 灌水效率

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0054-05

1 引言

地面灌溉灌水质量的评价一直是灌溉科技工作者关注的课题之一。针对不同的评价目的, 提出了不同的评价指标^[1], 常见的有

$$\text{灌水效率 } E_a = \frac{\text{储存在根区的平均水深}}{\text{平均灌水深度 } D_{ave}} \quad (1)$$

$$\text{储水效率 } E_s = \frac{\text{储存在根区的水深}}{\text{作物根区需水深}} \quad (2)$$

$$\text{均匀系数 } DU = \frac{\text{最小 } 1/4 \text{ 面积上的平均灌水深度 } D_{1/4}}{\text{平均灌水深度 } D_{ave}} \quad (3)$$

上述指标各有局限性, 灌水效率没有考虑灌水对作物需水的满足程度; 储水效率仅提供了水量损失方面的信息; 均匀系数只给出了入渗水深的均匀程度, 未考虑灌水对作物需水的满足程度和灌水效率。Wang 等^[2] (1996)提出了通用灌水效率 E_g (General Efficiency) 的概念

$$E_g = \frac{\text{作物蒸腾}}{\text{灌水量} + \text{根区水分亏缺量}} \quad (4)$$

通用灌水效率的进步在于把灌溉水量中供给作物蒸腾的部分视为有效水量, 并考虑了水分亏缺的影响, 但是由于作物蒸腾和水分亏缺量确定起来相当困难, 故在实际中很难应用。

国家行业标准《节水灌溉技术规范》(SL 207-98)^[3] 规定, 用田间水利用系数 η 评价地面灌溉田间灌水质量, 可采用实测法求得

$$\eta = \frac{100(\beta_2 - \beta_1) \gamma H A}{W} \quad (5)$$

式中 β_1, β_2 ——分别为灌水前后计划湿润层的土壤含水率(以干土质量 % 表示); γ ——土壤干容重, t/m^3 ; H ——计划湿润层深度, m; A ——末级渠道控制的实灌面积, hm^2 ; W ——末级固定渠道放出的总水量, m^3 。

地面灌溉灌水质量评价指标[式(1)~(3)、(5)]的计算都需要知道根系层深度(或计划湿润层深度), 因此根系层深度的确定将直接影响评价指标的计算结果。国内外关于根系层深度对灌水质量评价指标计算结果影响的研究均较少。同时, 地面灌溉作为我国最主要的灌水方式, 虽然对地面灌溉质量评价指标进行了长期试验研究和数学模拟^[4~7], 但地面灌溉水分利用率(如田间水利用系数)方面的实测数据仍感缺乏。

本文的目的是通过畦灌水流推进、消退过程和灌水前后土壤含水率的田间试验观测, 研究畦田规格和灌水技术要素对田间水利用系数、灌水效率及灌水均匀系数的影响, 比较不同计划湿润层深度条件下灌水质量评价指标的计算结果, 为地面灌溉技术参数的优化选择提供参考。

2 材料与方法

2.1 土壤与作物

试验在水利部牧区水利科学研究所内蒙古达拉特旗试验基地春小麦灌溉季节进行。试验田块不同深度土壤的颗粒分析结果列于表 1, 质地为砂土及壤质砂土

表 1 土壤机械组成分析结果(5 个剖面的平均值)

Table 1 Particle-size distributions for the studied soil at different depths

深度 /cm	不同粒径所占比例/%			土壤质地名称 (国际制)
	2.0~ 0.02 mm	0.02~ 0.002 mm	< 0.002 mm	
10~20	94.8	2.4	2.8	砂土及壤质砂土
20~40	96.8	1.0	2.2	砂土及壤质砂土
40~60	92.8	2.6	4.6	砂土及壤质砂土
60~80	89.8	5.6	4.6	砂土及壤质砂土

收稿日期: 2002-11-05 修订日期: 2003-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50179037); 科技部公益性研究项目

作者简介: 李久生(1962-), 农学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。北京市车公庄西路 20 号 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 100044

(国际制)。土壤干容重沿深度方向变化很小, 1 m 土层平均干容重为 1.46 g/cm^3 , 实测田间持水量为 $0.17 \sim 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ [8], 双环法测得的土壤稳定入渗率为 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm/min}$ 。

春小麦 2002 年 4 月 15 日播种, 行距 14 cm, 播种量 41.25 g/cm^2 , 7 月 29 日收获。畦田水流方向与播种方向一致。

2.2 畦田规格与坡度

对井灌区来说, 井的出水量一定, 主要通过选择合理的畦田规格和平整土地来提高灌水效率, 因此本文仅对畦田规格对水利用率的影响进行了研究。试验田块水井出水量为 $54 \sim 56 \text{ m}^3/\text{h}$, 在灌溉季节内略有波动。供试畦田 8 个, 长度均为 60 m, 宽度分别为 1、2、3 和 4 m, 每个宽度设置 2 个畦田。试验前对田块进行了平整, 使畦田沿畦宽方向保持水平, 沿畦长方向坡度均一。灌发芽水后, 对个畦田沿畦长方向的微地形变化进行了测量, 地面相对高程的变化情况绘于图 1。从图中可以看出, 各畦在距入口 35 m 范围内坡度基本一致, 为 $0.68\% \sim 0.76\%$, 超过 35 m 后坡度变缓, 1# ~ 4# 畦呈现轻微反坡 ($0.04\% \sim 0.16\%$)。各畦田的规格、坡度、微地形起伏程度和单宽流量列于表 2。

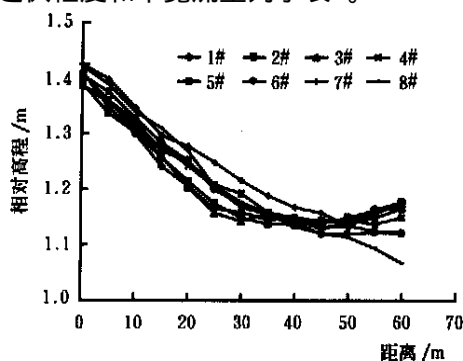


图 1 畦田地面相对高程沿畦长方向的变化

Fig. 1 Variations of relative elevations along the length for the experimental border strips

表 2 供试畦田的规格、坡度及微地形起伏程度

Table 2 Size, slope and of stilded border

畦编号	畦长/m	畦宽/m	平均坡度/%			单宽流量** $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$
			0~35 m	35~60 m	$\Delta y/\%$ *	
1	60	1	0.76	-0.12	0.12	15.11 ± 0.23
2	60	1	0.72	-0.16	0.12	15.22 ± 0.23
3	60	2	0.66	-0.04	0.12	7.67 ± 0.22
4	60	2	0.66	-0.04	0.12	7.63 ± 0.19
5	60	3	0.71	0.36	0.13	5.08 ± 0.13
6	60	3	0.72	0.14	0.15	5.11 ± 0.13
7	60	4	0.68	0.26	0.14	3.86 ± 0.05
8	60	4	0.76	0.36	0.17	3.80 ± 0.06

*: $\Delta y = \frac{100}{nL} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|$, 式中 y_i 为沿畦长方向观测点的高程值; \bar{y} 为高程均值; n 为观测点数; L 为畦长。

** : 均值; \pm : 标准差。

2.3 水流推进与消退过程观测

每一畦田内沿畦长方向均匀布置 5 个土壤含水率取样点, 每周测定一次土壤含水率, 取样深度为 100 cm, 监测土壤水分的变化, 当 0~60 cm 土层平均土壤含水率消耗至田间持水量的 60% 左右时即进行灌溉。春小麦生育期内共灌水 5 次 (不包括发芽水), 灌水日期分别为 5 月 25 日、6 月 11 日、6 月 13 日、7 月 3 日和 7 月 8 日。每次灌水前和灌水 1 d 后均对各畦田进行土壤含水率测定, 以确定灌水质量评价指标。对 5 月 25 日和 7 月 8 日灌水进行了水流推进和消退过程观测。入畦流量和灌水量由安装在水泵出水口处并经过体积法标定的水表测定。灌水时, 自畦田入口始每隔 5 m 设置 1 个观测点, 记录水流推进和消退时间。对于宽度大于 2 m 的畦田, 沿畦长方向均匀布置两条水流推进与消退观测线, 取两条线的平均值作为水流推进与消退过程。

研究与实践均表明, 改口成数 (断流时水流推进距离与畦长之比) 会对灌水质量产生一定影响。本试验中, 5 月 25 日和 7 月 8 日灌水所有畦田的改口成数均为 1.0; 其余 3 次灌水, 宽度为 1 m 畦田的改口成数为 0.83, 宽度 2 m 畦田的改口成数为 0.92, 宽度 3 m 和 4 m 畦田的改口成数为 1.0。

2.4 土壤入渗参数的估算

畦田水流入渗可用 Kostikov 公式描述

$$Z = K\tau^\alpha = K(t_{re} - t_{ad})^\alpha \quad (6)$$

式中 Z ——累计入渗深度, mm; τ ——入渗时间, min; t_{ad} ——推进时间, min; t_{re} ——消退时间, min; K , α ——入渗参数。

由式 (6) 知, 为了确定沿畦长不同位置处的入渗深度, 需要知道入渗参数。获取入渗参数的方法有多种, 如田间双环入渗实测法、池田入渗法、模型反求法 [7,9]、水量平衡法等。水量平衡法由 Walk 和 Skogerboe [10] (1987) 提出, 其核心是利用水流推进过程观测结果估算入渗参数, 他们认为, 水量平衡法求出的入渗参数反映了畦田的平均状况, 可在一定程度上减轻土壤空间变异对入渗参数的影响。最近刘群昌等 [11] 利用该方法估算连续灌和波涌灌条件下的土壤入渗参数, 取得了满意的结果。本文拟采用水量平衡法估算土壤入渗参数。

3 结果与分析

3.1 水流推进过程

图 2 绘出了 5 月 25 日和 7 月 8 日灌水各畦田的水流推进过程线。图中清楚地显示出, 水泵出水量一定时, 水流推进速度随畦宽的增大而降低, 即随单宽流量的减小而减小。从图 2 还可以看出, 相同宽度 (单宽流量) 畦田的水流推进速度之间也存在一定差异, 例如, 5 月 25 日灌水, 7# 畦水流总推进时间为 38.37 min, 而宽度相同的 8# 畦的水流总推进时间仅为 28.24 min, 前者是后者的 1.35 倍, 这主要是两畦田的微地形差异造成的, 8# 畦田平均坡度 (0.59%) 是 7# 畦田 (0.50%) 的 1.18 倍 (表 1)。另外, 土壤入渗特性的空间变异也是造成这种差异的主要原因。

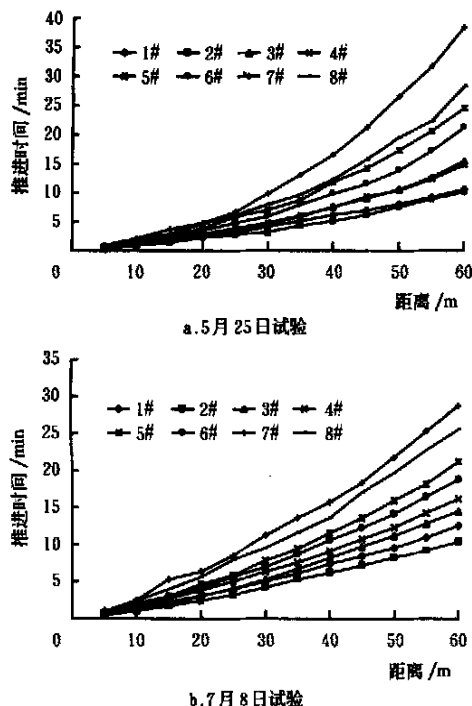


图2 畦田水流推进过程线

Fig. 2 Advance time as a function of distance from the inlet for the irrigation events of May 25 and July 8, 2002

许多研究表明,畦灌水流推进过程可用幂函数来描述^[6]

$$X = at_{ad}^b \quad (7)$$

式中 X ——推进距离, m; t_{ad} ——推进时间, min; a , b ——回归参数。

5月25日和7月8日两次灌水的推进曲线回归参数 a , b 列于表3。 a , b 值均表现出随畦宽增大而减小的趋势。

表3 水流推进曲线参数拟合结果

Table 3 Summary of regression parameters for flow advance curves

畦编号	5月25日试验			7月8日试验		
	a	b	r^2	a	b	r^2
1	8.72	0.844	0.99	6.31	0.929	0.98
2	10.85	0.769	0.99	9.71	0.781	0.99
3	10.83	0.644	1.00	7.71	0.788	0.98
4	8.24	0.772	0.99	6.41	0.823	0.99
5	7.14	0.695	0.99	6.09	0.767	0.99
6	7.56	0.721	0.98	6.33	0.782	0.99
7	6.25	0.651	0.98	4.88	0.753	0.99
8	6.71	0.691	0.99	5.14	0.769	0.99
平均	8.29	0.723		6.57	0.799	

3.2 灌水效率与田间水利用系数

3.2.1 计划湿润层深度对田间水利用系数计算结果的影响

取灌水上限为田间持水量 ($\beta_2 = \beta_{田} = 0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 计划湿润层深度为 60 cm 的田间水利用系数

(η_{60}) 与计划湿润层深度为 100 cm 时的田间水利用系数 (η_{100}) 之间的关系绘于图3。回归分析得

$$\eta_{100} = 1.25\eta_{60} \quad (n = 40, r^2 = 0.75) \quad (8)$$

上式说明, 同样灌水量情况下, 计划湿润层深度为 60 cm 时的田间水利用系数仅为计划湿润层深度为 100 cm 时的 80%。 t 检验结果表明, 计划湿润层深度对田间水利用系数的影响达到极显著水平。这一结果从一个侧面说明, 田间水利用系数是与计划湿润层深度相对应的, 采用的计划湿润层深度过大或过小, 都会造成田间水利用系数计算结果的不准确。

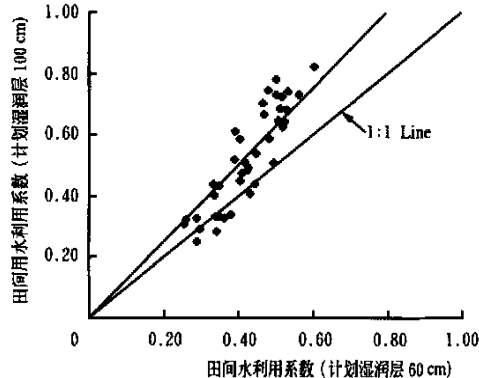


图3 计划湿润层深度 60 和 100 cm 时田间水利用系数计算结果之间的关系

Fig. 3 Application efficiency for a target wetted depth of 100 cm vs application efficiency for a target wetted depth of 60 cm

3.2.2 畦宽(单宽流量)对灌水效率的影响

为了便于比较, 采用两种方法计算灌水效率

$$\text{方法 1: } A E_1 = \frac{\text{根区灌溉需水量 } D_{req}}{\text{平均灌水深度 } D_{ave}} = \frac{(\beta_2 - \beta_1) RD}{10D_{ave}} \quad (9)$$

$$\text{方法 2: } A E_2 = \frac{\text{灌水 1 d 后根区储水量 } D_{sto}}{\text{平均灌水深度 } D_{ave}} = \frac{(\beta_2 - \beta_1) RD}{10D_{ave}} \quad (10)$$

式中 RD ——作物根系层深度, 取为 100 cm; D_{ave} ——平均灌水深度, mm; 按方法 1 计算时, 取 $\beta_2 = \beta_{田} = 0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

图 4a、4b 分别给出了春小麦生育期内 5 次灌水按方法 1 和方法 2 计算出的灌水效率与畦宽的关系。由图中可见, 按方法 1、方法 2 计算出的灌水效率的变化范围分别为 0.25~0.82 和 0.22~0.72, 总的说来灌水效率很低。图 4 还显示出, 对同一畦田来说, 生育期内各次灌水的灌水效率差别较大, 产生这一结果的原因主要是随着灌溉次数的增多, 畦田的微地形会不断发生变化, 同时随着作物生长, 作物对水流的阻力也在发生变化, 进而对水流推进速度产生影响, 造成灌水效率不同。

春小麦生育期内平均灌水效率与畦宽的关系也示于图 4 中。无论是按方法 1 还是按方法 2 计算出的灌水效率, 当畦宽从 1 m 增加到 2 m 时, 灌水效率均呈上升趋势; 而畦宽在 2~3 m 时, 灌水效率差别不大; 当畦宽

从 3 m 增加到 4 m 时, AE_1 明显下降。因此可得出:
(1) 不一定畦越窄灌水效率越高; (2) 对试验土壤和井的

出水量($55\text{ m}^3/\text{h}$)来说, 综合考虑获得较高的灌水效率和减少畦埂占地两方面因素, 畦宽以 2~ 3 m 为宜。

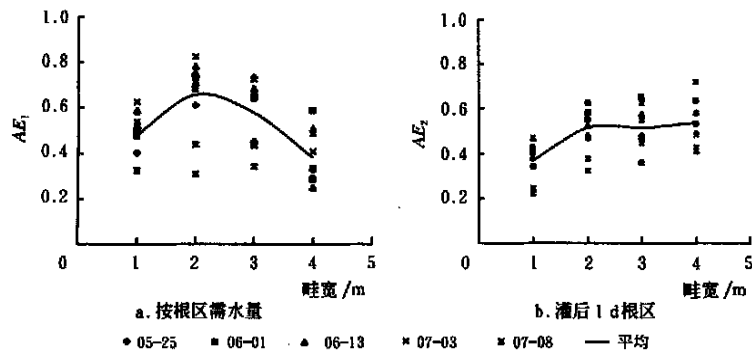


图 4 (a)按根区需水量和(b)灌后 1 d 根区储水量计算出的灌水效率与畦田宽度的关系
Fig 4 Application efficiency detemined by (a) irrigation requirement within the root zone and (b) water storage within the root zone 1 d after irrigation as a function of border width

为了比较 2 种计算灌水效率的方法的差异, 对它们的计算结果进行回归分析后得

$$AE_2 = 0.884 AE_1 \quad (11)$$

上式表明, 按灌水后 1 d 根区储水量计算出的灌溉效率一般小于按根区灌溉需水量计算出的灌水效率, 也就是说, 灌水 1 d 后根区平均土壤含水率小于田间持水量。这是由于所研究土壤的砂粒含量很大(90% 以上), 灌溉后重力水很快排到根区以下, 同时, 作物耗水和灌

溉过程中的水面蒸发, 也是造成这一结果的原因之一。

3.2.3 灌水均匀系数

利用水量平衡法求出的土壤入渗参数 K 和 α 列于表 4。计算过程中糙率 n 参考华北地区冬小麦田块上的试验结果取为 0.12~ 0.15^[11]。根据求得的入渗参数和水流推进消退过程计算出的平均入渗深度和均匀系数也列于表 4。

表 4 水量平衡法求得入渗参数 (K, α) 及灌水均匀系数 DU

Table 4 Infiltration parameters (K, α) for Kostakov's equation estimated from volume balance approach and distribution uniformity DU

畦编号	5月25日灌水					7月8日灌水				
	$K/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	α	Z_{ave}/mm	D_{ave}	DU	$K/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	α	Z_{ave}/mm	D_{ave}	DU
1	490.1	0.917	168.7	163.7	0.72	309.3	0.518	194.0	185.8	0.77
2	490.1	0.917	—	158.8	—	329.9	0.688	171.3	155.5	0.71
3	305.0	0.858	135.9	120.8	0.88	263.5	0.808	135.0	109.3	0.70
4	305.0	0.858	126.5	114.8	0.93	198.2	0.612	121.6	121.6	0.81
5	274.9	0.948	123.4	125.8	0.80	167.9	0.617	104.4	106.8	0.88
6	274.9	0.948	115.6	109.2	0.93	165.1	0.677	96.2	95.2	0.84
7	219.8	0.738	147.6	147.2	0.80	131.3	0.437	98.7	108.2	0.92
8	207.5	0.913	101.4	108.3	0.80	132.0	0.542	88.2	95.8	0.89
均值	320.9	0.890	131.3	131.1	0.84	212.2	0.612	126.2	122.3	0.81
CV	0.344	0.078	0.168	0.170	0.094	0.371	0.188	0.304	0.262	0.099

从表 4 可以看出, 按入渗参数计算出的平均入渗水深 Z_{ave} 与实际灌水深度 D_{ave} 相当接近, $D_{\text{ave}}/Z_{\text{ave}}$ 为 0.91~ 1.09(3# 畦田除外), 这说明, 用水量平衡法计算出的入渗参数较好地反映了试验田块畦灌的入渗情况。
由表 4 可知, 5 月 25 日和 7 月 8 日灌水的平均灌水均匀系数 DU 分别为 0.84 和 0.81, 达到了较高值。畦宽对灌水均匀系数 DU 的影响绘于图 5。畦宽 1 m 时的 DU 值最低; 畦宽由 2 m 增加到 3 m 时, DU 略有增加, 而当畦宽从 3 m 增加到 4 m 时, DU 值略有降低。从便于管理和获得较高的 DU 值两方面综合考虑, 畦宽仍以 2~ 3 m 为宜。从前面的分析知, 所研究畦田的灌水效率(田间水利用系数)较低(平均值约为 0.5)而灌水均匀系数

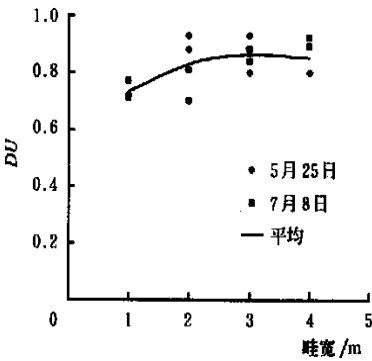


图 5 灌水均匀系数 DU 与畦宽度的关系
Fig 5 Distribution uniformity as a function of border width

较高,这说明尽管入渗水深分布比较均匀,但实际灌水量(122~133 mm)已大大超过灌溉需水量(50~70 mm)。

4 结论与讨论

1) 采用根区需水量(方法1)和灌后根区储水量(方法2)计算灌水效率得出的结果会有些差异,这种差异与土壤特性有关,建议通过进一步研究给出灌水效率的计算标准;

2) 畦田规格和灌水技术要素对田间水利用系数、灌水效率和灌水均匀系数具有明显影响,对所研究的砂土和壤质砂土来说,在井的出水量和畦长一定时,不一定是畦田越窄越有利于提高灌水质量,从获得较好的灌水质量和便于管理两方面综合考虑,畦宽以2~3 m为宜;

3) 试验结果表明,在地面平整程度较好、机井出水量中等的条件下,灌水效率(田间水利用系数)在生育期内的平均值仅为0.5左右,与规范要求(0.90以上)仍有相当差距;

4) 灌水均匀系数不宜单独用来评价地面灌水质量,因为在灌水量远超过灌溉需水量时,即使均匀系数很高,灌水效率和田间水利用系数仍然会很低。

致谢:中国农业科学院农田灌溉研究所刘祖贵副研究员、张寄阳助理研究员以及水利部牧区水利科学研究所杨燕山高级工程师为田间试验提供了诸多帮助,谨致谢意。

[参 考 文 献]

- [1] Burt C M, Clemmens A J, Strelkoff T S, et al. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1997, 123(6): 423~442.
- [2] Wang Z, Zerihun D, Feyen J. General irrigation efficiency for field water management [J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 30: 123~132.
- [3] 节水灌溉技术规范编制组. 节水灌溉技术规范(SL 207-98) [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2000.
- [4] 刘 钰, 惠士博. 畦田最优灌水技术参数的确定 [J]. *水利学报*, 1986, (1): 9~22.
- [5] 刘 钰, 惠士博. 畦田水流运动的数学模型及其数值计算 [J]. *水利学报*, 1987, (3): 1~10.
- [6] 王文焰, 等. 波涌灌溉试验研究与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- [7] Li Y. Basin irrigation in north China: evaluation, modeling and design for improvement [D]. Universidade Tecnica De Lisboa, 1999.
- [8] 李久生, 饶敏杰, 张建君. 土壤及喷灌水量不均匀性对干旱区春小麦影响的试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 15~21.
- [9] 许 迪, 蔡林根, 王少丽, 等. 农业持续发展的农田水管理研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [10] Walk R W, Skogerboe G V. Surface irrigation: Theory and Practice [M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1987.
- [11] 刘群昌, 许 迪, 李益农, 等. 应用水量平衡法确定波涌灌溉下土壤入渗参数 [J]. *灌溉排水*, 2001, 20(1): 10~15.

Field evaluation of water flow performance and application efficiency for border irrigation

Li Jiusheng¹, Rao Minjie²

(1. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100044, China;

2. Agronomy Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Field experiments were conducted in a sandy soil in the arid region to investigate the influences of border dimensions and irrigation variables on the performance of water advance and recession, application efficiency and distribution uniformity (DU). In the experiments, all the borders studied had an approximately equal slope and constant length of 60 m, while the width of the border strips was varied from 1 to 4 m and the inflow rate was varied from 3.8 to 15.2 L/(s·m). Results showed that the relationship between advance distance and time could be represented by a power function. Of the borders studied, 1 m wide borders gave the lowest application efficiency, while borders with 2 and 3 m in width gave an approximate similar efficiency. Application efficiency showed a decreasing tendency as the border width increased from 3 m to 4 m. All the borders produced relatively low application efficiency, with an average value of about 0.5 for the whole irrigation season. Infiltration parameters (K and α) for Kostiaikov's equation were estimated by a volume balance approach and distribution uniformity (DU) for infiltrated depth was calculated. It was found that DU varied with border width in a similar pattern to application efficiency. A high DU of greater than 0.75 was observed for most of the borders. The results suggest that a high DU value does not necessarily mean a high application efficiency for surface irrigation.

Key words: surface irrigation; water flow performance; application efficiency