

基于土壤入渗参数空间变异性的畦灌灌水质量评价

聂卫波¹, 费良军¹, 马孝义²

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘 要: 畦灌灌水质量的客观评价是制定合理灌水方案的重要基础。该文假定土壤空间变异性主要体现在入渗系数的变化上, 以在杨凌区一级阶地和三级阶地上进行的大田畦灌试验为例, 分析土壤空间变异性对畦灌灌水质量的影响, 并揭示畦灌灌水质量变化规律。结果表明灌水效率、灌水均匀度和储水效率随入渗系数的变异系数增大均呈现下降趋势, 其中灌水效率和储水效率下降幅度较小, 而灌水均匀度下降幅度较大。由此说明土壤入渗系数的变异性对灌水均匀度影响最大, 而对灌水效率和储水效率影响相对较小。该文的研究方法对畦灌灌水质量评价结果可更好地反映客观实际, 从而为制定合理的灌水方案提供依据和技术支持。

关键词: 灌溉, 土壤, 入渗, 畦灌, 空间变异性, 灌水质量评价

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.019

中图分类号: S 275.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0100-06

聂卫波, 费良军, 马孝义. 基于土壤入渗参数空间变异性的畦灌灌水质量评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 100—105.

Nie Weibo, Fei Liangjun, Ma Xiaoyi. Evaluation of border irrigation performance based on spatial variability of infiltration parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 100—105. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

畦灌是密植作物广泛采用的灌水方法, 其灌水质量评价一直是灌溉领域关注的热点问题之一^[1-3]。国内外学者对该问题进行了大量研究, 提出了灌水质量的诸多影响因素, 并从多个角度分析了不同因素对灌水质量的影响。Oyonarte 等^[4]以理论分析和大田沟灌试验研究相结合的方法, 分析了引起土壤入渗深度空间变异的主要因素, 结果表明在第一次灌水过程中土壤入渗参数的空间变异性是主要因素, 对其贡献率在 45%~75%之间, 其次为入渗时间, 而在第二次灌水过程中土壤入渗参数的空间变异性对其贡献率超过了 76%, 有时可达 95%以上; 在此研究的基础上, Oyonarte 等^[5]分析了考虑土壤入渗特性空间变异性和不考虑其空间变异性条件下连续沟灌和波涌沟灌的灌水质量, 研究表明考虑土壤入渗特性空间变异性的评价结果更加符合实际情况, 且土壤入渗特性空间变异性对灌水均匀度的影响最为敏感; Mateos 等^[6]在 Oyonarte 等人的研究基础上, 分析了土壤稳渗率对沟灌灌水质量的影响, 结果表明考虑土壤稳渗率空间变异性的灌水均匀度低于未考虑其变异性评价结果的 20%以上; 白美健等^[7]利用随机理论模拟了田面微地形分布, 并分析分布差异性对畦灌性能的影响, 研究结果表明同一

畦面相对高程标准偏差值等于或大于 3 cm 以上的微地形对畦灌性能影响显著, 而小于 3 cm 时对畦灌性能影响相对较小; 缴锡云等^[8]分析了畦灌土壤入渗参数空间变异性对灌水质量的影响, 结果表明入渗参数的空间变异性显著地降低了畦灌灌水质量, 灌水均匀度降低趋势较灌水效率更为显著; 朱霞等^[9]分析了田面微地形及沟断面形状变异性对沟灌灌水质量的影响, 结果表明灌水均匀度和灌水效率均随沟底高程标准差的增大而减小; 王维汉等^[10]分析了畦灌田面糙率系数的变异规律, 并评价了其对于灌水质量的影响, 结果表明采用平均糙率系数模拟灌水效果评价指标时, 与采用各畦田实际糙率系数相比, 灌水效率最大相对误差达 6.48%, 灌水均匀度最大相差 66.67%; 朱艳等^[11]研究了 Kostikov 模型中入渗参数的空间变异性及其对灌水质量的影响, 结果表明当其它灌水技术要素相同时, 灌水均匀度和灌水效率对入渗参数的响应关系均为的单峰型二次曲线; 王维汉等^[12]研究了畦灌改水成数的控制误差, 并分析了其对灌水质量的影响, 结果表明改水成数控制误差具有较强的变异性, 改水成数对灌水均匀度的影响大于灌水效率; 白美健^[13]分析了不同微地形空间变异程度、入畦单宽流量和坡度条件下入渗空间变异对畦灌灌水效率和灌水均匀度的影响, 并讨论了其影响程度与入渗和微地形空间变异程度、入畦单宽流量和坡度之间的关系。由以上分析可知, 土壤的空间变异性对灌水质量的影响显著, 在实际的应用中不容忽视, 应在地面灌溉灌水质量评价和灌水方案设计时充分考虑土壤的空间变异性。基于此, 本文以杨凌区进行的大田畦灌试验为基础, 试图分析土壤入渗参数空间变异性对畦灌灌水质量的影响, 并揭示灌水质量变化规律, 为畦灌灌水质量评价和灌水方案设计提供依据和技

收稿日期: 2011-05-25 修订日期: 2011-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51079121); 陕西省自然科学基金项目 (2010JQ7010); 陕西省教育厅科研计划项目 (11JK0640); 西安理工大学博士科研启动金; 中国博士后科学基金资助项目。

作者简介: 聂卫波 (1981—), 男, 陕西周至人, 博士, 讲师, 主要从事农业水土工程方面研究。西安 西安理工大学水资源研究所, 710048。

Email: nwbo2000@163.com

术支持。

1 理论分析

1.1 畦灌入渗时间的变异性

根据大量学者的研究表明^[14-16]，畦灌过程中的水流推进过程可用幂函数表示

$$t_a = px^r \quad (1)$$

式中， x 为水流距畦首的距离， m ； t_a 水流推进至各点的时间， $\min$ ； p 和 r 为经验系数，可根据水流推进资料，采用多点回归的方法得到。

根据费良军等^[17]研究表明采用一元二次函数可较好的模拟膜孔畦灌的水流消退过程，故本文同样采用该函数模拟畦灌的水流消退过程

$$t_r = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

式中， t_r 水流消退至各点的时间， $\min$ ； a 、 b 和 c 为经验系数，可根据水流消退资料回归得到。结合式 (1) 和式 (2)，可得畦灌过程中田面各点的入渗时间

$$t = ax^2 + bx + c - px^r \quad (3)$$

式中， t 为田面各点的入渗时间， $\min$ 。在式 (3) 的基础上可得畦灌过程中整个田面平均入渗时间，即

$$\begin{aligned} \mu_t &= \frac{1}{L} \int_0^L (ax^2 + bx + c - px^r) dx \\ &= \frac{a}{3} L^2 + \frac{b}{2} L + c - \frac{p}{r+1} L^r \end{aligned} \quad (4)$$

式中， μ_t 为整个田面的平均入渗时间， $\min$ ； L 为畦灌田块的长度， m 。畦灌过程中整个田面入渗时间方差可采用下式计算

$$\begin{aligned} \sigma_t^2 &= \frac{1}{L} \int_0^L (ax^2 + bx + c - px^r - \mu_t)^2 dx \\ &= \frac{4a^2}{45} L^4 + \frac{ab}{6} L^3 + \frac{b^2}{12} L^2 - \\ &\quad \frac{4apr}{3(r+1)(r+3)} L^{(r+2)} - \frac{bpr}{(r+1)(r+2)} L^{(r+1)} + \\ &\quad \frac{p^2 r^2}{(r+1)^2 (2r+1)} L^{2r} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， σ_t^2 为整个田面入渗时间方差。

1.2 畦灌累计入渗量的变异性

畦灌土壤入渗公式采用 Kostiakov 公式描述，即

$$Z = kt^\alpha \quad (6)$$

式中， Z 为单位面积上的累计入渗量， mm ； k 和 α 分别为入渗系数和入渗指数，其参数可通过田间入渗试验或利用水流运动资料推求。众多学者的研究表明土壤入渗参数具有较为显著的空间变异性，Zapata 等^[18]分析了同一田块内的 2 次入渗试验资料，结果表明第 1 次试验中入渗参数 k 和 α 的空间变异性分别为 0.55 和 0.27，第 2 次试验中分别为 0.81 和 0.24；缴锡云等^[8]的研究表明农田尺度条件下入渗参数 k 和 α 的变异性分别为 0.451 和 0.167，且均服从正态分布；朱艳等^[11]研究发现入渗参数 k 和 α 的变异性分别为 0.19 和 0.15。由此可看出，入渗系数 k 对于土壤空间变异性的响应大于入渗指数 α 。为了

简化研究，本文假定：在一次灌水过程中入渗指数 α 为定值，而入渗系数 k 存在空间变异，且服从正态分布，田块土壤入渗特性差异由入渗系数 k 的空间变异系数表征。设畦灌过程中整个田面上的入渗系数均值为 μ_k ，其变异系数为 C_v ，则入渗系数 k 的方差为

$$\sigma_k^2 = (\mu_k C_v)^2 \quad (7)$$

式中， σ_k^2 为畦灌灌水过程中整个田面入渗系数 k 的方差。

由式 (4) 可得畦灌过程中整个田面平均入渗时间为 μ_t ，结合本文的假定条件可知整个田面上的入渗系数均值为 μ_k ，将其参数代入式 (6)，可得未考虑土壤空间变异条件下整个田面的平均累计入渗量，即

$$\bar{Z} = \mu_k \mu_t^\alpha \quad (8)$$

式中， $\bar{Z}$ 为整个田面的平均累计入渗量， mm 。根据 Oyonarte 等^[4-5]的研究成果结合本文的实际，可得考虑土壤空间变异条件下整个田面累计入渗量的方差，即

$$\sigma^2(Z) = \sigma^2(Z)_k + \sigma^2(Z)_t \quad (9)$$

式中， $\sigma^2(Z)$ 为整个田面累计入渗量的方差， mm^2 ； $\sigma^2(Z)_k$ 和 $\sigma^2(Z)_t$ 分别为土壤入渗系数和入渗时间变异性对累计入渗量的影响。结合式 (5) 和式 (7)，对式 (9) 进行变换，可得

$$\sigma^2(Z) = \mu_k^2 \sigma_t^{2\alpha} + \mu_t^{2\alpha} \sigma_k^2 \quad (10)$$

1.3 畦灌灌水质量评价指标

畦灌的灌水质量评价指标通常包括：灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 和储水效率 E_s ，其中 E_a 是指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比值， D_u 是指田间灌溉水入渗的均匀程度， E_s 是灌后储存在计划湿润层中的水量与计划灌水量的比值，其可采用以下公式进行计算

$$E_a = \frac{A}{A+B+D} \quad (11)$$

$$E_s = \frac{A}{A+C} \quad (12)$$

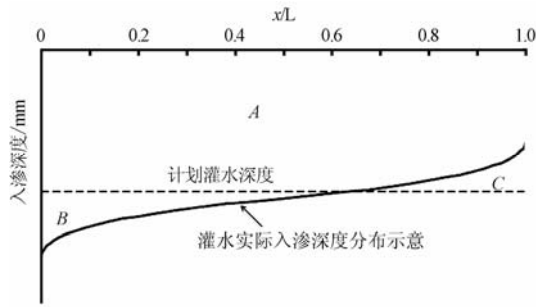
式中， A 为储存在计划湿润层中的水量，用水深表示， mm ； B 为灌水过程中的深层渗漏量， mm ； C 为计划湿润层中亏缺水量， mm ； D 为畦尾弃水量， mm ；若畦尾闭合，则 $D=0$ 。对于灌水均匀度 D_u 采用 Warrick 等^[19]提出的计算公式

$$D_u = 1 - 1.3 \frac{\sigma(Z)}{\bar{Z}} \quad (13)$$

式中， $\sigma(Z)$ 为整个田面累计入渗量的标准差。 A 、 B 和 C 所代表的区域可参见图 1。

由上文可知入渗系数对灌水过程中土壤入渗深度有着重要的影响，且入渗系数的变化服从正态分布，故认为土壤入渗深度的变化同样服从正态分布。在此基础上， A 、 B 和 C 所代表的区域值可根据 Mateos 等^[6]所提方法，分别采用以下公式计算

$$\begin{aligned} A &= \bar{Z} + Fu_r \sigma(Z) - e^{-u_r^2/2} \frac{\sigma(Z)}{\sqrt{2\pi}} \\ B &= e^{-u_r^2/2} \frac{\sigma(Z)}{\sqrt{2\pi}} - Fu_r \sigma(Z) \\ C &= (1-F) u_r \sigma(Z) + e^{-u_r^2/2} \frac{\sigma(Z)}{\sqrt{2\pi}} \end{aligned} \quad (14)$$



注：图中 A 表示储存在计划湿润层中的水量，mm； B 表示深层渗漏量，mm； C 表示计划湿润层中亏缺水量，mm； x 为水流距畦首的距离，m； L 为畦灌田块的长度，m。下同。

图 1 土壤入渗湿润剖面

Fig.1 Section of the soil water infiltration

式中， u_r 为标准正态分布条件下的计划灌水量，mm； $e^{-u_r^2/2}$ 为自然指数函数， F 为入渗水量大于 u_r 时的累计概率密度函数，其分别可采用下式计算

$$u_r = \frac{Z_r - \bar{Z}}{\sigma(Z)} \quad (15)$$

$$F = \int_{u_r}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \quad (16)$$

表 1 畦田试验参数

Table 1 Parameters of experimental treatment in border irrigation

畦田编号	单宽流量 $q/(\text{m}^3 \cdot (\text{min} \cdot \text{m})^{-1})$	畦长/m	畦宽/m	停水距离 x/m	田面坡度 $J_0/\%$	计划灌水量 Z_r/mm	土壤质地	种植作物	畦尾条件
1-1	0.192	75	1.5	68	1.50	100	黏壤土	苹果树	闭合
1-2	0.132	75	1.7	72					
3-1	0.246	70	3.5	60	1.46	80	砂壤土	小麦	
3-2	0.120	70	3.0	65					

注：畦田 1-1 表示一级阶地第 1 块畦田，其余类推。

2.2 灌水质量评价

利用水流推进数据和水流消退数据分别确定式 (1) 和式 (2) 中经验系数值，并结合表 1 数据，以水量平衡原理为基础反推畦灌过程中的土壤入渗参数和田面糙率值，其值为整个田面均值，具体求解过程详见文献[20]，

式中， Z_r 为计划灌水量，mm； u 为标准正态分布条件下的累计入渗量，mm；可采用下式计算

$$u = \frac{Z - \bar{Z}}{\sigma(Z)} \quad (17)$$

2 实例应用

2.1 试验设计

大田畦灌试验于 2005 年春季在陕西省杨凌区的一级阶地和三级阶地上进行。为了保证以水量平衡原理为基础，利用水流运动过程推求土壤入渗参数和田面糙率的可靠性，其中一级阶地土壤质地为砂壤土，种植作物为冬小麦，两块畦田相邻；三级阶地土壤质地为黏壤土，种植作物为多年生长的苹果树，两块畦田为同一果树地；试验前测定畦田坡降；入畦单宽流量用三角薄壁堰测定求得，为保证入畦流量的稳定性，在每个田块入口前修筑一临时储水槽；畦田中每隔 5 或 10 m 设立观测点并记录水流推进和消退时间；由于畦田尾部闭合，为保证高的灌水质量，选择不同的停水距离（改水成数），畦田各项基本参数见表 1。

其计算结果见表 2。由表 2 可知，畦灌水流消退过程采用一元二次函数拟合，其相关系数均高于 0.96，采用 SPSS 软件对式 (2) 的估算值和水流消退数据实测值进行显著性检验 ($\alpha=0.05$)，结果显示两者无显著性差异，表明采用畦灌水流消退过程较好的符合一元二次函数。

表 2 畦田水流运动过程参数

Table 2 Parameters of water movement process in border irrigation

畦田编号	水流推进过程			水流消退过程				土壤入渗参数		田面糙率 n
	P	r	R^2	a	b	c	R^2	$k/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-a})$	α	
1-1	0.0762	1.4693	0.9997	0.0020	0.2511	57.978	0.9863	1.33	0.529	0.102
1-2	0.1240	1.4789	0.9930	-0.0031	0.5749	84.752	0.9695			
3-1	0.0867	1.4585	0.9925	0.0033	0.8810	56.833	0.9868	3.43	0.292	0.147
3-2	0.2568	1.3515	0.9974	-0.0029	1.0839	104.790	0.9637			

注： p 和 r 为公式 (1) 中的经验系数； a 、 b 和 c 为公式 (2) 中的经验系数； k 和 α 分别为入渗系数和入渗指数。

现以畦田 1-1 为例，分析土壤入渗系数 k 空间变异性对畦灌灌水质量的影响，步骤如下：

1) 将表 2 中所求畦田 1-1 水流推进函数中经验系数 p 和 r ，以及水流消退函数中经验系数 a 、 b 和 c 代入式 (4) 和式 (5)，其中畦长 L 采用实测值 75 m，可得 $\mu_t=53.58 \text{ min}$ ， $\sigma_t^2=18.45 \text{ min}^2$ 。

2) 令畦田 1-1 的入渗系数均值 $\mu_k=1.33 \text{ cm/min}^\alpha$ ， $\alpha=0.529$ ，将其代入式 (8)，可得 $\bar{Z}=109.3 \text{ mm}$ ；参考 Mateos 等人的研究资料^[6]结合试验区实际情况，对入渗系数的变异系数 C_v 设置不同的水平 (0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6)，将其代入式 (7)，可得入渗系数不同变异程度下的方差 σ_k^2 。

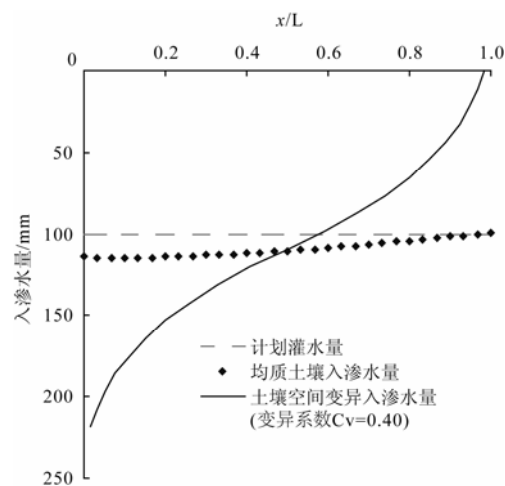
3) 将所求参数值代入式 (10), 可得入渗系数不同变异程度下整个田面累计入渗量的方差 $\sigma^2(Z)$ 。

4) 将上述所求参数和畦田基本参数代入式 (14) ~ (17), 可求得参数 A 、 B 和 C 值。其中 $Z_r=100$ mm; 累计入渗量 Z 由式 (6) 计算; 入渗时间 t 根据式 (3) 确定; 入渗参数 k 和 α 如表 2 所示。

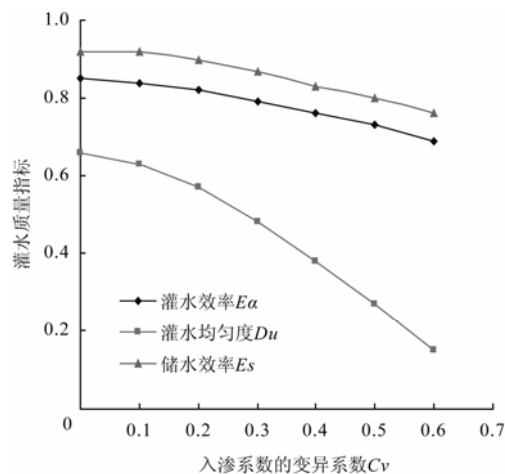
5) 将所求参数 A 、 B 和 C 值代入式 (11) 和 (12) 中, 可得灌水效率 E_a 和储水效率 E_s ; 采用式 (13) 可得灌水均匀度 D_u 。

采用上述步骤计算所得畦田 1-1 入渗系数不同变异程度下入渗水量分布曲线和灌水质量指标变化趋势见图 2。

由图 2 可见, 考虑土壤入渗系数 k 空间变异性 ($C_v > 0$) 的入渗水量分布曲线和均质土壤 ($C_v = 0$) 的分布曲线有着明显的差异, 在计划灌水量 Z_r 一定的条件下, 当土壤入渗系数的变异系数 $C_v = 0$ (均质土壤) 时, 其灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 和储水效率 E_s 分别为 0.85、0.66 和 0.92, 表明灌水过程中较少发生深层渗漏, 且有着相对较高的灌水均匀度; 当入渗系数的变异系数 $C_v > 0$ 时, 灌水过程中的灌水质量指标逐渐下降, 其中灌水效率 E_a 和储水效率 E_s 随变异系数 C_v 的增大呈现下降趋势, 但下降幅度较小, 而灌水均匀度 D_u 随变异系数 C_v 的增大呈现明显的下降趋势, 且下降幅度较大。当 $C_v = 0.60$ 时, 灌水效率 E_a 、灌水均匀度 D_u 和储水效率 E_s 分别为 0.69、0.15 和 0.76, 由此说明土壤入渗系数 k 的变异性对灌水均匀度 D_u 的影响最大, 而对灌水效率 E_a 和储水效率 E_s 的影响相对较小。采用相同方法计算了畦田入渗系数 k 的变异系数 C_v 分别为 0 (均质土壤)、0.10、0.20、0.30 和 0.40 条件下的灌水质量指标, 结果见表 3。



a. 入渗系数不同变异程度下土壤入渗水量分布曲线



b. 入渗系数不同变异程度下灌水质量指标变化

图 2 土壤入渗水量分布曲线和灌水质量指标变化 (畦田 1-1)

Fig.2 Results of irrigation quality and soil infiltration water distribution (border 1-1)

表 3 畦田灌水质量评价结果

Table 3 Results of irrigation quality in border irrigation

畦田 编号	土壤入渗系数 k 的变异系数 C_v 设置水平														
	$C_v=0$ (均质土壤)			$C_v=0.10$			$C_v=0.20$			$C_v=0.30$			$C_v=0.40$		
	E_a	D_u	E_s	E_a	D_u	E_s	E_a	D_u	E_s	E_a	D_u	E_s	E_a	D_u	E_s
1-1	0.85	0.66	0.92	0.84	0.63	0.92	0.82	0.57	0.9	0.79	0.48	0.87	0.76	0.38	0.83
1-2	0.70	0.43	0.88	0.69	0.41	0.88	0.68	0.37	0.86	0.66	0.31	0.84	0.64	0.23	0.81
3-1	0.57	0.28	0.86	0.56	0.27	0.86	0.55	0.24	0.84	0.54	0.18	0.82	0.52	0.11	0.79
3-2	0.55	0.41	0.92	0.55	0.40	0.92	0.54	0.36	0.90	0.53	0.29	0.88	0.51	0.21	0.84

注: C_v 为土壤入渗系数 k 的变异系数; E_a 为灌水效率; D_u 为灌水均匀度; E_s 为储水效率。

由表 3 可知, 各畦田的灌水质量指标变化规律相似, 即未考虑土壤空间变异性的畦灌灌水质量指标均高于考虑其变异性评价结果, 且土壤入渗系数 k 的变异性对灌水均匀度 D_u 的影响最大, 而对灌水效率 E_a 和储水效率 E_s 的影响相对较小。但生产实际中田间土壤具有明显的空间变异性, 若不考虑其变异将导致灌水质量的评价结果偏大, 从而影响合理的灌水技术要素组合选取。因此, 在灌水质量的评价过程中应充分考虑土壤的空间变异性, 使灌水质量的评价结果能更好地反映客观实际, 从而为制定合理的灌水方案提供理论依据和技术支持。

3 结 论

本文假定土壤空间变异性主要体现在入渗系数的变化上, 以在杨凌区一级阶地和三级阶地上进行的大田畦灌试验为例, 分析土壤空间变异性对畦灌灌水质量的影响, 并揭示畦灌灌水质量变化规律。研究结果表明灌水效率和储水效率随入渗系数的变异系数增大呈现下降趋势, 但下降幅度较小; 而灌水均匀度随入渗系数的变异系数增大呈现明显的下降趋势, 且下降幅度较大; 由此说明土壤入渗系数的变异性对灌水均匀度的影响最大, 而对灌水效率和储水效率的影响相对较小。故在灌水质

量的评价过程中应充分考虑土壤的空间变异性,使灌水质量的评价结果能更好地反映客观实际,从而为制定合理的灌水方案提供理论依据和技术支持。但本文研究中忽略了田面微地形和土壤空间变异性对入渗指数和田面糙率的影响,因此如何综合考虑田面微地形,以及入渗指数和田面糙率等因素变异性对灌水质量的影响还有待进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] Zerihun D, Feyen J, Reddy J M. Empirical functions for dependent furrow irrigation variables: 1. Methodology and equations[J]. *Irrig Sci*, 1997, 17(3): 111—120.
- [2] Zerihun D, Wang Z, Feyen J, et al. Empirical functions for dependent furrow irrigation variables: 2. Application[J]. *Irrig Sci*, 1997, 17(3): 121—126.
- [3] 郑和祥, 史海滨, 程满金, 等. 畦田灌水质量评价及水分利用效率分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 1—6.
Zheng Hexiang, Shi Haibin, Cheng Manjin, et al. Analysis of irrigation efficiency and water use efficiency of border irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [4] Oyonarte N A, Mateos L, Palomo M J. Infiltration variability in furrow irrigation[J]. *J Irrig Drain Eng*, 2002, 128(1): 26—33.
- [5] Oyonarte N A, Mateos L. Accounting for soil variability in the evaluation of furrow irrigation[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(1): 85—94.
- [6] Mateos L, Oyonarte N A. A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability[J]. *Agric Water Manage*, 2005, 76(1): 62—75.
- [7] 白美健, 许迪, 李益农, 等. 地面灌溉土壤入渗参数时空变异性试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 120—123, 151.
Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong, et al. Evaluating spatial and temporal variability of infiltration on field scale under surface irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 120—123, 151. (in Chinese with English abstract)
- [8] 缴锡云, 王维汉, 王颖聪, 等. 入渗参数空间变异规律及其对畦田灌水质量的影响[J/OL]. <http://www.paper.edu.cn>. 2007-12-28.
Jiao Xiyun, Wang Wenhan, Wang Yingcong, et al. Spatial variability of infiltration parameters and its impacts on irrigation performance[J/OL]. <http://www.paper.edu.cn>. 2007-12-28.
- [9] 朱霞, 缴锡云, 王维汉, 等. 微地形及沟断面形状变异性对沟灌性能影响的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(1): 1—4.
Zhu Xia, Jiao Xiyun, Wang Weiha, et al. Influences of spatial variability of micro-topography and section shape on furrow irrigation performance[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(1): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王维汉, 缴锡云, 朱艳, 等. 畦灌糙率系数的变异规律及其对灌水质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(16): 288—293.
Wang Weiha, Jiao Xiyun, Zhu Yan, et al. Variability of roughness coefficient and its effect on border irrigation performance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(16): 288—293. (in Chinese with English abstract)
- [11] 朱艳, 缴锡云, 王维汉, 等. 畦灌土壤入渗参数的空间变异性及其对灌水质量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(3): 46—49.
Zhu Yan, Jiao Xiyun, Wang Weiha, et al. Spatial variability of infiltration parameters and its influences on border irrigation performance[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王维汉, 缴锡云, 朱艳, 等. 畦灌改水成数的控制误差及其对灌水质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(2): 291—294.
Wang Weiha, Jiao Xiyun, Zhu Yan, et al. Control error of inflow cutoff and its effect on border irrigation performance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(2): 291—294. (in Chinese with English abstract)
- [13] 白美健, 许迪, 李益农. 不同微地形条件下入渗空间变异对畦灌性能影响分析[J]. *水利学报*, 2010, 41(6): 732—738.
Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong. Effects of spatial variability of infiltration on basin irrigation performance under different microtopography conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(6): 732—738. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王全九, 王文焰, 张江辉. 根据畦田水流推进过程水力因素确定 Philip 入渗参数和田面平均糙率[J]. *水利学报*, 2005, 36(1): 125—128.
Wang Quanjiu, Wang Wenyan, Zhang Jianghui, et al. Determination of Philip infiltration parameter and Manning roughness according to hydraulic factors in the advance of irrigation water[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(1): 125—128. (in Chinese with English abstract)
- [15] Moravejalahkama B, Mostafazadeh-Farda B, Heidarpoura M, et al. Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach[J]. *Biosystems engineering*, 2009, 103(3): 374—371.
- [16] Amer A M. Effects of water infiltration and storage in cultivated soil on surface irrigation[J]. *Agric Water Manage*, 2011, 98(5): 815—822.
- [17] 费良军, 程东娟, 赵新宇. 由膜孔灌田面灌水参数推求基于 Kostiakov 模型的点源入渗参数[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 88—90.
Fei Liangjun, Cheng Dongjuan, Zhao Xinyu. Determination of point source infiltration parameters based on Kostiakov model with filed irrigation data in film hole irrigation[J]. *Transactions of CSAE*, 2007, 23(3): 88—90. (in Chinese with English abstract)
- [18] Zapata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin. I. Characterizing variability[J]. *Irrig Sci*, 2000, 19(4): 155—164.
- [19] Warrick A.W. Interrelationships of irrigation uniformity terms [J]. *J Irrig Drain Eng*, 1983, 109(3): 317—332.
- [20] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 根据水流运动过程推求土壤入渗参数和田面糙率的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 48—52.
Nie Weibo, Fei Liangjun, Ma Xiaoyi. Determination of infiltration parameters and Manning roughness according to process of water flow in border irrigation[J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 48—52. (in Chinese with English abstract)

Evaluation of border irrigation performance based on spatial variability of infiltration parameters

Nie Weibo^{1,2}, Fei Liangjun¹, Ma Xiaoyi²

(1. *Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China*)

Abstract: Objective evaluation on border irrigation performance is an essential basis to set up a proper irrigation scheme. Assumed that the soil characteristics spatial variability can be directly reflected from the changes of infiltration coefficient, taken the border irrigation experiments conducted in Yangling District with the clay loam and sandy loam as study objects, the effects of the soil characteristics spatial variability to irrigation performance were analyzed and the changes of irrigation performance of border irrigation were revealed. Results showed that irrigation efficiency, distribution uniformity and storage efficiency decreased with the infiltration variation coefficient increased. The decrease range of the irrigation application efficiency and storage efficiency was smaller respectively compared with that of distribution uniformity. Therefore the spatial variability of soil infiltration coefficient has greater effect on distribution uniformity than the irrigation application efficiency and storage efficiency. The method proposed in this paper can much better reflect the actual irrigation performance of border irrigation and provide a proper irrigation scheme with theoretical foundation and technological support.

Key words: irrigation, soil, infiltration, border irrigation, spatial variability, evaluation of irrigation performance