

基于水量平衡原理的畦灌下渗水形状系数变化规律研究

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, 陕西 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, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 以往水量平衡模型应用中, 通常认为在同一次灌水过程中的下渗水形状系数为恒定值, 使模型精度受到一定影响。基于此, 本试验以水量平衡原理为基础, 结合量纲分析, 研究了畦灌过程中的下渗水形状系数变化规律并提出了估算其值的经验计算式。结果表明, 同一次畦灌过程中下渗水形状系数并非恒定值, 而是随灌水时间和水流推进距离等因素变化的。结合已有文献资料验证, 结果表明采用水量平衡模型模拟畦灌水流运动过程, 同时考虑动态的地表储水形状系数和下渗水形状系数取值, 可有效提高模型的计算精度。同时也表明采用本文所建经验计算式估算畦灌下渗水形状系数值是可靠的。

关键词: 畦灌; 水量平衡模型; 量纲分析; 下渗水形状系数
中图分类号: S275.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)05-0251-06

Study on variation of subsurface shape factor of border irrigation based on water balance principle

NIE Wei-bo¹, FEI Liang-jun¹, MA Xiao-yi²

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

Abstract: In the traditional water movement models of border irrigation based on the principle of water volume balance, it was usually supposed that the subsurface shape factor was a constant value in the same border irrigation, which affected the precision of models. Based on the principle of water volume balance and combined with dimensional analysis, the variation of subsurface shape factor was studied and an empirical formula that could be used to compute the value of subsurface shape factor was proposed. The results showed that the subsurface shape factor was not a constant value in the same border irrigation, but it was variable along with the change of irrigation time, water advance distance and other factors. The validity of the proposed method was verified by some existing literatures. The results showed that the precision of water volume balance model could be improved in simulating water movement process of border irrigation when the variation of surface shape factor and subsurface shape factor was considered. The results also showed that the proposed empirical formula was reliable in computing the subsurface shape factor of border irrigation.

Keywords: border irrigation; water volume balance model; dimensional analysis; subsurface shape factor

畦灌水流运动过程计算是地面灌溉评价的基本内容之一。模拟畦灌水流运动过程的数学模型主要有 4 种, 其中完全水动力学、零惯量和运动波 3 种模型模拟精度高, 但求解过程复杂, 通常情况下无法求得模型解析解; 而水量平衡模型具有严谨的物理基础, 在求解过程中通过引入一些假设条件, 便可求得模型解析解, 故被广泛使用。但水量平衡模型在应用过程中, 由于所引入的部分假设条件不尽合理, 如认为同一次灌水过程中的地表储水形状系数和下渗水形状系数为恒定值, 不随灌水时间和水流推进距

离发生变化,从而影响了该模型的精度^[1-3]。近年来,部分学者研究表明灌水过程中两个参数非恒定值,而是变量。Valiantzas^[4-5]将水量平衡模型与运动波模型相结合,并对其进行无量纲化,分别研究了地表储水形状系数和下渗水形状系数在灌水过程中的变化规律,并提出了求解其值的经验计算式,但求解过程十分繁琐。Alazba^[6]在 Valiantzas 的研究基础上,提出了下渗水形状系数的另一种经验计算式,但在模拟水流推进过程中,认为地表储水形状系数为恒定值,使其所得结果具有一定的局限性。王维汉^[7]通过大田畦灌试验,研究表明地表储水形状系数随着水流推进距离的增加而增加,并非介于 0.7~0.8 之间,且其不同取值对入渗参数的估算结果影响较大;聂卫波^[8]以水量平衡原理为基础,研究了畦灌过程中地表储水形状系数的变化规律,并提出了估算其值的经验计算式,结合实例验证,结果表明所建公式具有高的可靠性,可有效提高水量平衡模型的计算精度。由此可知,对于地表储水形状系数的研究相对较多,较为成熟;而对于下渗水形状系数的研究相对较少,且已有的经验估算式求解过程十分繁琐,应用不便。因此,如何快速准确地选取下渗水形状系数值就成为提高水量平衡模型求解精度的关键之一。基于此,本文以水量平衡原理为基础,通过量纲分析,重点研究下渗水形状系数的变化规律,试图得出可快速准确估算其值的经验计算式,为进一步提高水量平衡模型的计算精度奠定基础。

1 理论分析

1.1 畦灌水量平衡模型与地表储水形状系数的确定

畦灌灌水过程中,根据水量平衡原理,单位宽度上进入田间的流量等于地表储水量和总入渗水量,即:

$$q_0 t = \sigma_y(t) Y_0 x + \sigma_z(t) Z_0 x \tag{1}$$

式中, q_0 为进入田块单宽流量 $[\text{m}^3 \cdot /(\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})]$; t 为进水时间(s); x 为水流推进距离(m); Y_0 为灌水时畦首水深,假设为正常水深(m); Z_0 为灌水时畦首下渗水层深度(m); $\sigma_y(t)$ 为地表储水形状系数; $\sigma_z(t)$ 为下渗水形状系数。为了使研究结果具有普适性,对式(1)进行无量纲化处理,令

$$x^* = \frac{x}{x_r}; t^* = \frac{t}{t_r}; q^* = \frac{q}{q_r}; Y^* = \frac{Y}{Y_r} \tag{2}$$

式中, x^* 、 t^* 、 q^* 和 Y^* 分别为无因次的水流运动距离、时间、流量和田面水深;非零参考量 x_r 、 t_r 、 q_r

和 Y_r 按下式确定

$$q_r = q_0; Y_r = Y_0; t_r = (\frac{Y_r}{k})^{1/\alpha}; x_r = \frac{q_r t_r}{Y_r} \tag{3}$$

式中, k 、 α —Kostiakov 公式 $Z = kt^\alpha$ 中的入渗系数和入渗指数。将式(2)和式(3)代入式(1),可得

$$t^* = \sigma_y(t)x^* + \sigma_z(t)t^{*\alpha}x^* \tag{4}$$

由式(4)可知,若能确定地表储水形状系数 $\sigma_y(t)$ 和下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 的取值,则求解式(4)可得无因次水流推进距离 x^* 与进水时间 t^* 的解析关系。对于 $\sigma_y(t)$ 的取值,一般认为其值在 0.7~0.8 之间变化,且在同一次灌水过程中认为其恒定不变^[9-11]。但 Esfandiari^[12]通过田间灌水试验,研究表明 $\sigma_y(t)$ 的变化范围在 0.96~1.80 之间,虽然在试验中所选观测点是否具有代表性还有待研究,但结果表明 $\sigma_y(t)$ 的取值范围较大;Valiantzas^[5]和王维汉^[7]的研究同样表明 $\sigma_y(t)$ 值并非恒定介于 0.7~0.8 之间,而是随着水流推进时间和推进距离逐渐变化的;聂卫波等^[8]以水量平衡原理为基础,结合运动波模型,通过量纲分析,提出了畦灌过程中的估算地表储水形状系数 $\sigma_y(t)$ 的经验计算式,其公式为

$$\sigma_y(t) = 0.95 - 0.45\alpha + 0.3\alpha^{0.44}(\frac{x^*}{t^*}) \tag{5}$$

文献[8]结合已有资料对式(5)的可靠性进行了验证,结果表明采用式(5)估算畦灌过程中的地表储水形状系数具有高的可靠性。因此,本文在后面的计算过程中,对于地表储水形状系数 $\sigma_y(t)$ 的取值,采用式(5)进行估算。

1.2 畦灌下渗水形状系数的确定

水量平衡模型中另一个难以定值的参数为下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$,对于 $\sigma_z(t)$ 的取值,张新民^[13]建议 $\sigma_z(t)$ 在 0.5~1.0 之间取值;Fok 和 Bishop^[14]在假定地表水流推进过程符合幂函数规律、土壤入渗规律符合 Kostiakov 公式的基础上,推导得出下渗水形状系数的计算式为

$$\sigma_z(t) = \frac{\alpha + \gamma(1 - \alpha) + 1}{(1 + \alpha)(1 + \gamma)} \tag{6}$$

式中, γ 为地表水流推进过程幂函数表达式 $x = pt^\gamma$ 中的经验系数;其余符号意义同前。对于式(6),通常认为灌水过程中水流推进指数 γ 是恒定不变的,但当入畦流量一定的情况下,水流不能无限推进,当入流量和入渗水量达到平衡时,水流停止推进,其认为 γ 为恒定值显然是不合理的;同时,Valiantzas^[15]研究表明水流推进指数 γ 的取值随灌水时间和水流

推进距离发生变化,并非恒定不变。由此表明,采用式(6)估算 $\sigma_z(t)$ 存在一定得局限性。近年来,部分学者对地面灌溉下渗水形状系数的变化规律进行了研究,其中以 Valiantzas^[4] 和 Alazba^[6] 的研究最为典型。Valiantzas^[4] 以水量平衡模型为基础,对其进行无量纲化,研究了下渗水形状系数在灌水过程中的变化规律,并提出了求解其值的经验计算式,但求解过程十分繁琐;Alazba^[6] 在 Valiantzas 的研究基础上,提出了估算下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 的经验计算式,即

$$\sigma_z(t) = \frac{\theta + \beta \left[\sigma_y(t) \frac{x^*}{t^*} \right]}{1 + \rho \left[\sigma_y(t) \frac{x^*}{t^*} \right]} \tag{7}$$

其中

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\alpha\pi(1-\alpha)}{\sin(\alpha\pi)} \\ \beta &= 0.35\alpha\pi - \frac{3}{5\pi}(1+4\alpha^2) \\ \rho &= 0.35\alpha\pi - \frac{3}{5\pi}(1-2\alpha^2) \end{aligned} \tag{8}$$

由式(7)和式(8)可求得灌水过程中不同灌水时间和水流推进距离条件下的 $\sigma_z(t)$ 值,但其求解过程仍十分繁琐,给其公式的直接应用带来较大困难。因此,若能提出简单准确的 $\sigma_z(t)$ 取值方法,则可简化研究,故本文在下面将重点研究畦灌过程中 $\sigma_z(t)$ 的变化规律及其确定方式。对式(4)进行变形

$$\sigma_z(t) = \frac{t^* - \sigma_y(t)x^*}{t^{*\alpha}x^*} \tag{9}$$

将式(5)代入式(9),可得

$$\sigma_z(t) = \frac{t^* - 0.95 - 0.45\alpha + 0.3\alpha^{0.44} \left(\frac{x^*}{t^*} \right) x^*}{t^{*\alpha}x^*} \tag{10}$$

由式(10)可知, $\sigma_z(t)$ 的取值与无因次的水流运动距离 x^* 、时间 t^* 和入渗指数 α 有关。对于式(10)求解,需确定无因次的水流运动时间 t^* 和推进距离 x^* 之间的函数关系。采用 Alazba 和 Strelkoff^[16] 所提方法,其公式为

$$\delta x_i^* = \frac{\delta t^* - \sum_{m=1}^{i-1} \frac{t_{i-m+1}^{*\alpha} - t_{i-m-1}^{*\alpha}}{2} \delta x_m^* + \left(\frac{1}{1+\alpha} - \frac{1}{2} \right) \delta t^{*\alpha} \delta x_{i-1}^*}{1 + \frac{\delta t^{*\alpha}}{1+\alpha}} \tag{11a}$$

$$\delta x_1^* = \frac{\delta t^*}{1 + \frac{\delta t^{*\alpha}}{1+\alpha}} \quad i = 1 \tag{11b}$$

式中, δt^* 为无因次进水时间步长; δx_1^* 为第一个进

水时间 δt^* 的水流推进距离; i 和 m 为进水时间和水流推进距离的步长数;其余符号意义同前。由式(11)可得不同入渗指数 α 条件下,无因次的进水时间 t^* 与水流运动距离 x^* 之间的解析关系,将计算结果代入式(10),可得不同进水时间 t^* 条件下的下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 值,计算结果见图 1。

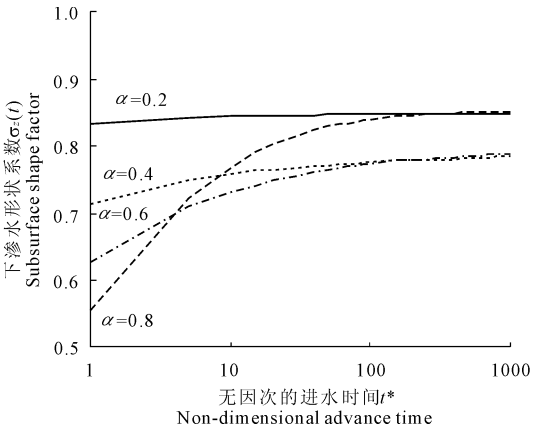


图 1 无因次进水时间 t^* 与下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 关系
Fig. 1 The relationship between non – dimensional advance time and subsurface shape factor

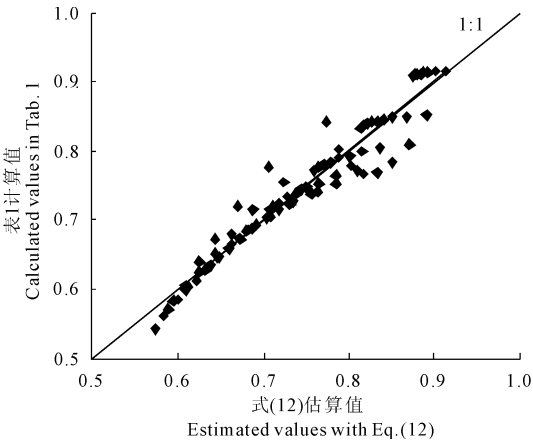


图 2 下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 估算值与计算值比较
Fig. 2 Comparison of estimated values and calculated values of subsurface shape factor

由图 1 可见,畦灌水流运动过程中不同入渗指数 α 条件下,下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 的取值有着较为明显的变化,其随着水流推进时间 t^* 的增大而逐渐增大,并最终逐渐趋于稳定,这也进一步说明了采用(6)式计算 $\sigma_z(t)$ 值的不合理性。为研究畦灌水流运动过程中下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 的变化规律,对式(11)和式(10)所得数据进一步分析,得出不同入渗参数 α 和 x^*/t^* 条件下的 $\sigma_z(t)$ 值,其具体结果见表 1。

表 1 不同入渗参数 α 和 x^*/t^* 条件下的下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 值

Table 1 The subsurface shape factor $\sigma_z(t)$ under different infiltration parameter α and x^*/t^*

x^*/t^* 值 Values of x^*/t^*	入渗参数 α Values of infiltration parameter α								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	0.914	0.852	0.810	0.783	0.768	0.766	0.779	0.803	0.842
0.2	0.914	0.850	0.804	0.771	0.753	0.741	0.745	0.755	0.776
0.3	0.913	0.848	0.799	0.764	0.739	0.722	0.715	0.714	0.720
0.4	0.912	0.845	0.793	0.753	0.726	0.705	0.687	0.679	0.673
0.5	0.910	0.843	0.789	0.747	0.714	0.688	0.666	0.652	0.638
0.6	0.910	0.841	0.783	0.739	0.702	0.672	0.647	0.624	0.607
0.7	0.910	0.839	0.780	0.733	0.693	0.659	0.627	0.603	0.582
0.8	0.910	0.837	0.777	0.725	0.683	0.646	0.614	0.586	0.561
0.9	0.909	0.833	0.772	0.719	0.674	0.634	0.600	0.570	0.542

由表 1 可知,下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 值在不同入渗参数 α 和 x^*/t^* 条件下呈现出明显的变化规律,且其取值的范围在 0.5 ~ 1.0 之间。当入渗参数 α 一定时, $\sigma_z(t)$ 值随着 x^*/t^* 值的增大呈现逐渐减小趋势,其值逐渐接近 0.5; 当 x^*/t^* 值在 0.3 ~ 0.9 之间,且一定时, $\sigma_z(t)$ 值随着入渗参数 α 的减小呈现逐渐增大趋势; 当 x^*/t^* 值在 0.1 ~ 0.2 之间, $\sigma_z(t)$ 值随着入渗参数 α 的减小呈现先减小后增大趋势,其值逐渐接近 1.0, 这与 Valiantzas^[4] 和 Alazba^[6] 的研究结果相一致。由此可知,在同一次灌水过程中, $\sigma_z(t)$ 是随着灌水时间和水流推进距离等因素变化的,并非恒定值。故在选取 $\sigma_z(t)$ 值时,若能考虑这些因素的影响,将使其取值更具合理性。对表 1 中的数据进行分析,建立估算不同入渗参数 α 和 x^*/t^* 条件下 $\sigma_z(t)$ 取值的计算式,即

$$\sigma_z(t) = 0.944 - 0.738\alpha + 0.352\alpha^{(1+\frac{x^*}{t^*})}(\frac{x^*}{t^*})^{-0.198}$$

(12)

为检验式(12)估算 $\sigma_z(t)$ 值的可靠性,将其估算结果与表 1 中的数据进行对比,其结果见图 2。由图 2 可见,采用式(12)估算的 $\sigma_z(t)$ 值与表 1 中的计算值两者接近,其均匀的分布在直线 1:1 两侧,两者最大误差为 8.97%,其中误差绝对值在 4% 以内的数据占总数的 81.50%,所有计算点的误差绝对值均值为 2.29%。采用 SPSS 软件对式(12)的估算值和表 1 中计算值两组数据进行显著性检验,结果显示两者无显著性差异(Sig. = 0.989 > 0.05),且相关度高达 0.9336。由此表明,采用式(12)估算 $\sigma_z(t)$ 值具有一定的可靠性,其计算方法也较 Alazba 法更为简便,克服了以往认为同一次灌水过程中 $\sigma_z(t)$ 恒定不变的缺陷,使得 $\sigma_z(t)$ 取值更加合理。

2 实例检验

为进一步检验式(12)估算 $\sigma_z(t)$ 值的可靠性,选取文献[6]中实例对其进行验证。畦灌基本参数为 $q_0 = 2.33 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 田面糙率 $n = 0.04$, 田面坡度 $S_0 = 0.001$, 入渗参数 $k = 23.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-\alpha} = 3.201 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-\alpha}$, $\alpha = 0.49$ 。采用式(5)和式(12)分别估算 $\sigma_y(t)$ 和 $\sigma_z(t)$ 值,在此基础上利用式(4)模拟畦灌水流推进过程,以检验式(12)估算 $\sigma_z(t)$ 值的可靠性。其计算步骤如下:

1) $Y_0 = (\frac{q_0 n}{S_0^{0.5}})^{0.6} = 0.0303 \text{ m};$

$t_r = (\frac{Y_r}{k})^{1/\alpha} = 98.27 \text{ min};$

$x_r = \frac{q_r t_r}{Y_r} = 453.59 \text{ m};$

2) 假定 $\sigma_{y0}(t) = 0.8, \sigma_{z0}(t) = 0.8$, 将其代入式(4), 计算第一个观测时间点的水流推进距离 x_{10}^* , 将 x_{10}^*/t^* 值分别代入式(5)和式(12), 得出 $\sigma_{y1}(t)$ 和 $\sigma_{z1}(t)$ 值。

3) 将所求 $\sigma_{y1}(t)$ 和 $\sigma_{z1}(t)$ 值代入式(4), 计算得出 x_{11}^* 。重复上述步骤,直到满足下面公式

$$\begin{aligned} |\sigma_{yn}(t) - \sigma_{y(n-1)}(t)| &\leq \xi \\ |\sigma_{zn}(t) - \sigma_{z(n-1)}(t)| &\leq \xi \end{aligned} \tag{13}$$

式中, ξ 为 $\sigma_y(t)$ 和 $\sigma_z(t)$ 允许计算误差,其余符号意义同前。如果 $\sigma_{yn}(t)$ 和 $\sigma_{y(n-1)}(t)$ 以及 $\sigma_{zn}(t)$ 和 $\sigma_{z(n-1)}(t)$ 之差同时满足式(13), 则将 $\sigma_{yn}(t)$ 和 $\sigma_{zn}(t)$ 代入式(4), 得出第一个观测时间点最终的无量纲化水流推进距离 x_{1n}^* 。将所求 x_{1n}^* 代入 $x_1 = x_r x_{1n}^*$, 即可得出第一个观测时间点的水流推进距

离 x_1 。采用上述步骤,可逐步求出各观测时间点的水流推进距离 x 。本文采用 $\xi \leq 0.001$ 作为允许计算误差,经计算表明,一般迭代 2-3 次即稳定。其具体计算结果见表 2。

表 2 本文方法、Alazba 法和文献[8]方法与运动波(KW)模型计算水流推进距离误差比较
Table 2 Error in computing advance distance using the methods of this paper, literature[8] and Alazba compared with kinematic wave (KW) model

水流推进时间 Water advance time /min	水流推进距离 x Advance distance/m				与运动波(KW)模型误差 Error of compare with KW model/%		
	运动波(KW) 模型 KW model	Alazba 法 Method of Alazba	文献[8]方法 Method of literature[8]	本文方法 Method of this paper	Alazba 法 Method of Alazba	文献[8]方法 Method of literature[8]	本文方法 Method of this paper
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00
10	41.6	45.1	40.9	41.0	8.41	-1.68	-1.44
20	78.8	82.7	77.2	77.2	4.95	-2.03	-2.03
30	112.6	116.6	108.9	109.6	3.55	-3.29	-2.66
40	142.9	147.9	140.7	140.2	3.50	-1.54	-1.89
50	171.6	177.2	167.9	170.0	3.26	-2.16	-0.93
60	199.6	205.0	195.1	197.4	2.71	-2.25	-1.10
70	226.0	231.4	222.3	225.2	2.39	-1.64	-0.35
80	251.4	256.8	245.0	250.5	2.15	-2.55	-0.36
90	276.1	281.1	272.2	273.3	1.81	-1.41	-1.01
100	299.5	304.6	294.9	298.7	1.70	-1.54	-0.27
110	322.3	327.4	317.6	321.7	1.58	-1.46	-0.19
120	344.9	349.4	340.2	344.0	1.30	-1.36	-0.26
130	366.2	370.9	359.3	365.8	1.28	-1.88	-0.11
140	387.8	391.8	381.1	387.3	1.03	-1.73	-0.13
150	407.8	412.1	400.6	407.2	1.05	-1.77	-0.15
160	428.4	432.0	421.9	427.4	0.84	-1.52	-0.23
170	447.4	451.4	440.0	447.2	0.89	-1.65	-0.04
180	467.0	470.4	462.7	466.6	0.73	-0.92	-0.09
190	485.5	489.1	480.9	488.3	0.74	-0.95	0.58
200	503.9	507.3	499.0	507.1	0.67	-0.97	0.64
误差绝对值均值 Mean absolute values of error/%					2.23	1.71	0.72

从表 2 可以看出,以运动波(KW)模型模拟水流推进数据为基准,采用 Alazba 法计算的结果整体偏大,最大误差为 8.41%,所有观测点误差绝对值均值为 2.23%,Alazba 法所得结果整体偏大的原因之一,为该方法在计算水流运动过程中令 $\sigma_y(t)$ 值恒等于 0.8,根据文献[8]的研究结果表明,其 $\sigma_y(t)$ 取值偏小,故导致 Alazba 法所得结果整体偏大;采用文献[8]方法的计算结果整体偏小,最大误差为 -3.29%,所有观测点误差绝对值均值为 1.71%,具体原因分析见文献[8];采用本文方法计算的水流推进过程,最大误差为 -2.66%,所有观测点误差绝对值均值为 0.72%,其主要由于地表储水形状系数 $\sigma_y(t)$ 和下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 的估算误差,导致本文方法与运动波(KW)模型模拟数据存在一定偏差。

但总体而言,采用本文方法的计算精度较 Alazba 法和文献[8]方法均有明显提高。由此表明,采用水量平衡模型模拟畦灌水流运动过程中,同时考虑灌水时间和水流推进距离等因素对地表储水形状系数 $\sigma_y(t)$ 和下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 值的影响,可有效提高模型的计算精度。同时也表明,采用式(12)估算畦灌过程中的 $\sigma_z(t)$ 值是可靠的。

3 结 论

以水量平衡原理为基础,结合量纲分析,研究畦灌过程中的下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 变化规律。在此基础上,提出了估算畦灌下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 的经验计算式。采用 SPSS 软件对本文所建经验公式估算的 $\sigma_z(t)$ 值和计算值进行显著性检验,其结果

显示两者无显著性差异($\text{Sig.} = 0.989 > 0.05$),且相关度高达 0.9336,表明采用本文所建经验计算式估算畦灌过程中的下渗水形状系数 $\sigma_z(t)$ 值是可靠的。结合已有文献资料验证,结果表明以运动波(KW)模型模拟水流推进数据为基准,采用本文方法的计算结果较 Alazba 法和文献[8]方法更优,精度更高。由此表明,在采用水量平衡模型模拟畦灌水流运动过程中,同时考虑灌水时间和水流推进距离等因素对 $\sigma_y(t)$ 和 $\sigma_z(t)$ 值的影响,可有效提高模型的计算精度。

参 考 文 献:

[1] Valiantzas J D, Aggelides S, Sasselou A. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point[J]. Agric. Water Manage., 2001,52(1):17-32.

[2] Sepaskhah A R, Afshar - Chamanabad H. Determination of infiltration rate for every - other furrow irrigation[J]. Bio. Eng., 2002,82(4): 479-484.

[3] Alvarez J A R. Estimation of advance and infiltration equations in furrow irrigation for untested discharges[J]. Agric. Water Manage., 2003,60(3):227-239.

[4] Valiantzas J D. Surface irrigation advance equation: variation of sub-surface shape factor[J]. J. of Irrig. and Drain. Eng. ASCE., 1997, 123(4):300-306.

[5] Valiantzas J D. Volume balance irrigation advance equation: variation of surface shape factor[J]. J. of Irrig. and Drain. Eng. ASCE., 1997,123(4):307-312.

[6] Alazba A A. Explicit volume balance model solution[J]. J. of Irrig. and Drain. Eng. ASCE., 1999,125(5):273-279.

[7] 王维汉,缴锡云,彭世彰,等.缓坡畦灌地表储水形状系数对入渗参数估值的影响[J].应用基础与工程科学学报,2007,15(4):483-488.

[8] 聂卫波,费良军,马孝义.畦灌地表储水形状系数的变化规律[J].农业工程学报,2011,27(2):33-37.

[9] Scaloppi E J, Merkley G P, Willardson L S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation[J]. J. of Irrig. and Drain. Eng. ASCE., 1995,121(1):57-70.

[10] Renault D, Wallender W W. Surface storage in furrow irrigation evaluation[J]. J. of Irrig. And Drain. Eng. ASCE., 1997,123(6): 415-422.

[11] Maheshwari B L, Turner A K, McMahon T A, et al. An optimization technique for estimating infiltration characteristics in border irrigation [J]. Agric. Water Manage., 1988,13(1):13-24.

[12] Esfandiari M, Maheshwari B L. Field values of the shape factor for estimating surface storage in furrows on a clay soil[J]. Irrig. Sci., 1997,17(4):157-161.

[13] 张新民,王根绪,胡想全,等.用畦灌试验资料推求土壤入渗参数的非线性回归法[J].水利学报,2005,36(1):28-34.

[14] Fok Y S, Bishop A A. Analysis of water advances in surface irrigation[J]. Irrig. and Drain. Div. ASCE., 1965,91(1):99-117.

[15] Valiantzas J D. Surface water storage independent equation for predicting furrow irrigation advance[J]. Irrig. Sci., 2000,19(3):115-123.

[16] Alazba A, Strelkoff T. Correct form of Hall technique for border irrigation advance[J]. J. of Irrig. And Drain. Eng. ASCE., 1994,120(2):292-307.

(上接第 135 页)

研究表明,辽宁各地对农业生产影响最大的农业灾害是干旱灾害,其次是风雹灾害。因此,今后急需加强辽宁干旱灾害多学科交叉高层次研究和多因子的综合研究,掌握各地灾害的发生规律和特点,加强灾害防御,提高防灾减灾能力,减少农业灾害损失,实现农民增产增收,保证农业可持续发展,

参 考 文 献:

[1] 温克刚,李 波,孟庆楠.中国气象灾害大典辽宁卷[M].北京:气象出版社,2005.

[2] 卢丽萍,程从兰,刘伟东,等.30 年来我国农业气象灾害对农业生产的影响极其空间分布特征[J].生态环境学报,2009,18(4): 1573-1578.

[3] 李伟君,王春乙,赵 蓓,等.气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):263-271.

[4] 李 娜,刘焕军.东北地区农业灾害动态监测体系研究[J].商业经济,2012,(2):24-27.

[5] 马建勇,许吟隆,潘 婕.东北地区农业气象灾害的趋势变化及

其对粮食产量的影响[J].中国农业气象,2012,33(2):283-288.

[6] 李 晶,林 蓉,张海娜,等.辽宁省农业气象灾害对农业生产的影响及评估[J].安徽农业科学,2011,39(6):3563-3566.

[7] 刘 航,王进军,陈永杰.辽宁省农业气象灾害对粮食生产影响分析[J].辽宁农业科学,2009,(1):51-52.

[8] 赵先丽,李丽光,贾庆宇,等.1988—2007 年辽宁主要农业气象灾害分析[J].气象与环境学报,2009,25(2):33-37.

[9] 赵先丽,张玉书,纪瑞鹏,等.辽宁省粮食生产中旱灾发生特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):254-259.

[10] 胡文霞.桓仁县农业灾害特点及防灾减灾保障措施[J].现代农业科技,2012,(7):194-195.

[11] 杨尚英,张梅梅,杨玉玲.近 10 年来我国农业气象灾害分析[J].江西农业学报,2007,19(7):106-108.

[12] 马雅丽,栾 青,王志伟,等.山西主要农业气象灾害变化特征及其对农作物产量的影响[J].中国农业气象,2010,(增 1): 150-154.

[13] 李凤霞,马力文,李淑珍.宁夏主要气象灾害特征分析及防御对策[J].新疆气象,2003,26(1):18-20.

[14] 黄会平.1949—2007 年我国干旱灾害特征及成因分析[J].冰川冻土,2010,32(4):659-665.