

毛管入口流量估算方法与验证

段晓辉, 牛文全

(西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为便捷估算特定压力下的毛管入口流量值, 选择了毛管长度、毛管铺设坡度、毛管管径、滴头间距、流量系数和流态指数等 6 个影响因素, 采用计算机模拟计算和实测验证相结合的方法, 确定了毛管入口流量估算模型和参数估算方法。结果表明, 毛管长度、毛管铺设坡度、滴头间距和流量系数显著影响毛管入口流量系数 a , 毛管铺设坡度和流态指数显著影响毛管入口流量系数 b ; 确定了系数 a 和 b 的计算式, 与退步法计算结果比较, 平均相对误差分别为 2.30% 和 0.70%; 当毛管入口工作水头分别为 4、6 m 和 8 m 时, 毛管入口流量估算模型计算结果与实测值的平均相对误差为 3.79%, 精度较高, 在微灌系统设计中, 可以采用本文建立的模型估算毛管入口流量。

关键词:滴灌; 水力学解析; 毛管; 压力; 入口流量

中图分类号: S275.6 文献标志码: A

Capillary inlet flow estimation method and its verification

DUAN Xiao-hui, NIU Wen-quan

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to conveniently estimate the capillary inlet flow rate at a given pressure, we selected six factors including capillary length, capillary slope, capillary diameter, dripper spacing, flow coefficient, and flow index to determine the capillary inlet flow estimation model and parameter estimation method by using computer simulation and experimental verification. The results showed that the capillary length, capillary slope, dripper spacing, and flow coefficient significantly affected the capillary flow coefficient a ; the capillary slope and flow index significantly affected the capillary flow coefficient b . Thus, the calculation equations of coefficients a and b were determined. Comparing the results of the regression method, the average relative errors were 2.30% and 0.70%, respectively. When the capillary inlet working head were 4, 6, and 8 m, the average relative error between the calculated and measured values of the capillary inlet flow estimation model was 3.79% and the precision was high. In the design of the micro-irrigation system, the capillary inlet flow estimation model in this study can be used to estimate the capillary inlet flow.

Keywords: drip irrigation; hydraulic analysis; capillary; pressure; inlet flow

滴灌系统管网水力学计算是滴灌工程设计的基础。近年来, 对滴灌系统水力学解析进行了大量的研究, 但不同研究采用的计算方法不同, 考虑的影响因素差异较大。如 Myers 等^[1]和 Wu 等^[2]利用 Bernoulli 方程和 Darcy-Weisbach 公式, 采用多孔系数等方法对管道水力学解析进行近似简化计算。Warrick^[3]提出了一种选择处理的滴灌毛管水力计算设计方法。Valiantzas J D^[4-7]以分析逼近的方法

模拟毛管进口水头与平均水头的关系及水头损失与能耗的关系, 进行了毛管的优化设计。魏秀菊^[8]分析了平坦地形微灌田间管网设计中单元内允许压差在支、毛管中合理分配理论。张林等^[9]通过分析不同坡度条件下, 毛管水头损失变化规律, 推导出了考虑地面坡度及水力偏差的单毛管流量偏差率计算公式。张国祥等^[10-12]通过研究提出适应田面地形的滴灌系统滴头设计水头计算公式。郑

收稿日期: 2018-06-11

修回日期: 2019-03-29

基金项目: “十二五”国家支撑计划课题“规模化农业综合节水技术集成与示范”(2015BAD24B00)

作者简介: 段晓辉(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: xinxn920310@126.com

通信作者: 牛文全(1971-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用与节水灌溉技术研究。E-mail: nwq@nwfu.edu.cn

纯辉^[13]提出了利用有限元法,设计出符合灌水器平均相对流量和灌水均匀度要求的相应支管单元操作压力水头。鞠学良^[14]应用微灌管网水力学知识及数学方法,构建了均匀坡毛管和灌水小区及非均匀坡毛管的水力解析模型。张志新^[15-16]通过对滴灌毛管进行水力学解析时发现,有限元法计算结果准确,但是计算量和存储量大。王新坤^[17-18]以微灌系统田间管网水力解析与节约成本的优化设计为目标,提出利用遗传算法理论进行微灌系统田间管网水力解析方法。白丹和党志良^[19]提出了不规则田面微灌管网优化设计方法。上述这些方法虽然都基本可以确定滴灌管网系统的水力参数,但计算过程普遍比较复杂,需要多次试算才能确定近似值。康跃虎^[20]通过研究提出了利用多项式表示毛管入口压力与入口流量的关系,并将其命名为毛管流量公式。利用多项式表示毛管入口压力与入口流量的关系,虽然计算结果精度较高,但拟合过程较为复杂。熊国武^[21]研究发现,毛管入口水头和入口压力的关系可以用幂函数表示,这种表示方法拟合的毛管入口水头和入口流量关系式拟合度高,误差较小,计算方便,但是对于参数 a 、 b 的影响因素和确定方法缺乏进一步的研究。

$$Q = aH^b \quad (1)$$

式中 Q 为毛管入口流量 ($L \cdot h^{-1}$); H 为毛管入口工作水头 (m); a 、 b 为拟合系数。

以往研究中所采用的毛管流量计算方法较为复杂且计算量大,不便于实施。本研究以毛管结构参数为基础,考虑各影响因素的综合作用,建立毛管入口流量估算模型,以期为简化滴灌系统管网水力学解析过程,为简化滴灌设计提供理论依据和参考。

1 材料与方 法

1.1 试验设计与方法

1.1.1 毛管水力参数的试验测定方法与装置 试验装置如图 1 所示,试验仪器设备主要包括水泵、水箱、压力调节装置、精密压力表(0.2 级)、秒表、雨量筒、电子天平等。水泵为系统提供额定的工作压力,试验采用内镶式滴灌带,铺设长度为 60 m,滴头间距为 0.3 m,外径为 16 mm,额定流量为 $2.1 L \cdot h^{-1}$ 。经测定滴头流量系数及流态指数分别为 0.5035 和 0.5880,滴灌带固定在试验台上,沿试验台水平铺设。

毛管入口工作水头设置为 1、2、3、4 m 和 5 m。试验开始,通过调节入口处的球阀门控制毛管入口

工作水头值,待压力稳定后,沿毛管入口等距选取 20 个滴头,利用量杯收集相应滴头出水,最后用称重法计算滴头流量。每次试验进行 15 min,重复 2 次,随后调节毛管入口工作水头,并重复上述试验步骤。

1.1.2 毛管水力性能的计算方法 毛管水力性能参数采用退步法确定,如图 2 所示,沿毛管末端滴头开始编号,图中: ΔH_n 为毛管各管段的水头损失 (m); Q_n 为毛管各管段流量 ($L \cdot h^{-1}$); s 为滴头间距 (m); h_n 为各滴头的工作水头 (m); q_n 为各滴头的流量 ($L \cdot h^{-1}$)。

根据质量守恒定律,毛管各管段流量由式 (2) 计算:

$$q_i = Q_{i+1} - Q_i \quad (2)$$

式中 q_i 为第 i 个滴头流量 ($L \cdot h^{-1}$); Q_i 、 Q_{i+1} 为第 i 、 $i+1$ 管段流量 ($L \cdot h^{-1}$)。

毛管各管段的总水头损失由式 (3) 计算^[22-23]:

$$\Delta H_i = afQ_i^m s/d^b \quad (3)$$

式中 ΔH_i 为毛管第 i 个管段总水头损失 (m); a 为水头损失扩大系数; Q_i 为毛管第 i 个管段的流量值 ($L \cdot h^{-1}$); s 为滴头间距 (m); d 为毛管直径 (mm); f 、 m 、 b 分别为摩擦系数、流量指数、管径指数; 其余符号意义同上。

由压力递推原理,毛管各滴头工作水头由式 (4) 计算:

$$h_i = h_{i-1} + \Delta H_i \quad (4)$$

式中 h_i 、 h_{i-1} 分别为毛管第 i 个和第 $i-1$ 个滴头的工作水头 (m); 其余符号意义同上。



图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

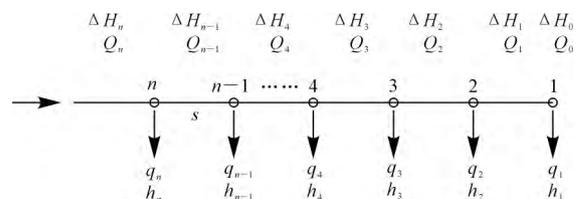


图 2 毛管水力计算模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of capillary hydraulic calculation

毛管入口工作水头及入口流量分别由式(5)和式(6)计算:

$$H = h_n + \Delta H_n \quad (5)$$

$$Q = Q_{n-1} + q_n \quad (6)$$

式中 H 为毛管入口工作水头(m); Q 为毛管入口流量($L \cdot h^{-1}$); 其余符号意义同上。

1.1.3 毛管入口流量估算模型的建立 利用 Excel RAND 函数,在给定毛管各参数范围内随机各生成 300 组随机数,即每个毛管结构参数为 300 个水平,采用随机组合方式作为特定毛管结构参数,毛管各结构参数具体范围如表 1 所示。获取每组毛管入口工作水头与入口流量时将毛管入口工作水头 H 设置为 1、1.5、2、...、14.5 m 和 15 m 等共 30 个水平,利用退步法毛管水力学解析原理计算不同毛管结构参数所对应的毛管入口工作水头与入口流量值,最后利用最小二乘法计算拟合系数 a 和拟合系数 b 。

1.1.4 毛管入口流量估算模型的验证 验证试验共

设置 8 个处理,每个处理下毛管入口工作水头设置为 4.6 m 和 8m,毛管沿试验台水平铺设($i=0$),具体试验处理如表 2 所示,利用上述 1.1.1 试验方法对给定毛管及毛管入口工作水头下的毛管入口流量进行测定。

1.2 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件处理数据,用 SPSS 22.0 统计软件对拟合系数与毛管结构参数进行相关性分析及方程拟合,用 Origin 8.0 软件绘图。

表 1 模拟参数输入列表

参数 Parameter	数值 Value
毛管长度 Capillary length/m	60.0~120.0
毛管坡度 Capillary slope/%	-3.0~3.0
滴头间距 Dripper spacing/m	0.3~1.0
毛管管径 Capillary diameter/mm	12.0~32.0
流量系数 Discharge coefficient	0.5~1.0
流态指数 Flow index	0.4~0.9

表 2 试验处理

Table 2 Experiment settings

组别 Group	毛管长度/m Capillary length	滴头间距/m Dripper spacing	毛管管径/mm Capillary diameter	流量系数 Discharge coefficient	流态指数 Flow index
T1	60	0.3	16	0.5035	0.5880
T2	60	0.5	16	0.7478	0.4725
T3	60	0.3	20	0.6096	0.4921
T4	60	0.5	20	0.9838	0.5777
T5	80	0.3	16	0.5035	0.5880
T6	80	0.5	16	0.7478	0.4725
T7	80	0.3	20	0.6096	0.4921
T8	80	0.5	20	0.9838	0.5777

2 结果与分析

2.1 毛管入口流量退步法计算结果的检验

当毛管入口工作水头 $H=1、2、3、4$ m 和 5m 时,毛管入口流量实测值与利用退步法毛管水力学解析方法计算结果如表 3 所示。可以看出,不同毛管入口工作水头下,毛管入口流量实测值与利用退步法毛管水力学解析方法计算值的最大相对误差为 11.09%,最小相对误差仅为 0.04%,平均相对误差为 3.35%。由于在使用退步法毛管水力学解析方法计算毛管入口流量时,没有考虑灌水器制造偏差、滴头堵塞等因素,导致毛管入口流量实测值与计算值会产生一定的误差,经过验证发现两者之间平均相对误差较小。因此,当毛管入口工作水头一定时,利用退步法毛管水力学解析原理计算毛管入口流量具有较高的精度。

2.2 毛管入口流量估算方法

对随机生成的 300 组不同结构参数毛管与相对应计算得到的拟合系数 a 和拟合系数 b 分别进行 Pearson 相关性分析(表 4),可以看出,毛管长度、毛管铺设坡度、滴头间距和流量系数显著影响拟合系数 a ,而毛管管径和流量指数与拟合系数 a 没有显著的相关性;毛管铺设坡度和流态指数显著影响拟合系数 b ,而毛管长度、滴头间距、毛管管径和流量系数与拟合系数 b 没有显著的相关性。其中,滴头间距与拟合系数 a 的相关性最高,相关系数达到 -0.726,流量系数、毛管长度和毛管铺设坡度次之,说明滴头间距是影响拟合系数 a 最为重要的因素;毛管铺设坡度与拟合系数 b 的相关性最高,相关系数达到 0.840,流态指数次之,说明毛管铺设坡度为影响拟合系数 b 最为重要的因素。

利用模拟生成的 300 组毛管结构参数分别与毛管流量公式中拟合系数 a 和拟合系数 b 进行回归拟合,可分别建立相应毛管结构参数与拟合系数 a 和 b 的关系式,即毛管入口流量估算模型为:

$$\begin{cases} Q = aH^b \\ a = e^{tem} \\ tem = -1.1872 + 0.9513\ln l/s + 0.9622\ln k \\ \quad - 0.0939li + 0.6364\ln d \\ \quad - 0.0238d - 0.006l \\ b = 0.0202 + 0.0283li + 0.9704x + 0.0001l \\ \quad - 0.0030\ln d \end{cases}$$

式中 l 为毛管长度 (m); s 为滴头间距 (m); k 为流量系数; i 为毛管铺设坡度; d 为毛管管径 (mm); x 为流

态指数; 其余符号意义同上。

由方差分析结果可知 $F_a = 9436.17 > F_{0.01(6, 293)} = 2.80$ $F_b = 7203.99 > F_{0.01(4, 295)} = 3.32$, 回归方程均达到极显著水平。拟合系数 a 和拟合系数 b 采用退步法拟合值与模型估算值散点图(图 3)显示,拟合系数 a 和拟合系数 b 的理论值与模拟值决定系数 R^2 分别为 0.9949 和 0.9899, 其理论值与模拟值平均相对误差分别为 2.30% 和 0.70%, 相对误差较小,表明拟合方程的拟合效果较好。

2.3 毛管入口流量估算模型的检验

为了检验毛管流量估算模型参数的适应性,通过检验分析得到拟合系数 a 和拟合系数 b 实测值与估算值,其误差如表 5 所示。拟合系数 a 的平均相

表 3 不同毛管入口工作水头下入口流量实测值与计算值

Table 3 Measured and calculated values of inlet flow under different capillary inlet pressure

毛管入口工作水头/m Capillary inlet pressure	毛管入口流量 Capillary inlet flow/(L·h ⁻¹)		相对误差/% Relative error
	实测值 Measured value	退步法计算值 The calculated value from regress method	
1.0	97.89	97.35	0.55
2.0	151.87	146.24	3.80
3.0	206.12	185.54	11.09
4.0	222.34	219.67	1.22
5.0	250.31	250.42	0.04

表 4 拟合系数 a 、 b 与毛管各参数的相关性

Table 4 Correlation coefficients of a and b with capillary fitting variables

拟合系数 Fitting coefficient	毛管长度 Capillary length	毛管铺设坡度 Field slope along the lateral	滴头间距 Dripper spacing	毛管管径 Capillary diameter	流量系数 Discharge coefficient	流态指数 Flow index
Pearson 相关性 a	0.318**	-0.294**	-0.726**	0.103	0.393**	-0.079
Pearson 相关性 b	0.032	0.840**	-0.002	0.007	-0.001	0.507**

注: **表示相关性在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

Note: ** indicates that the correlation is significant at $P < 0.01$ level.

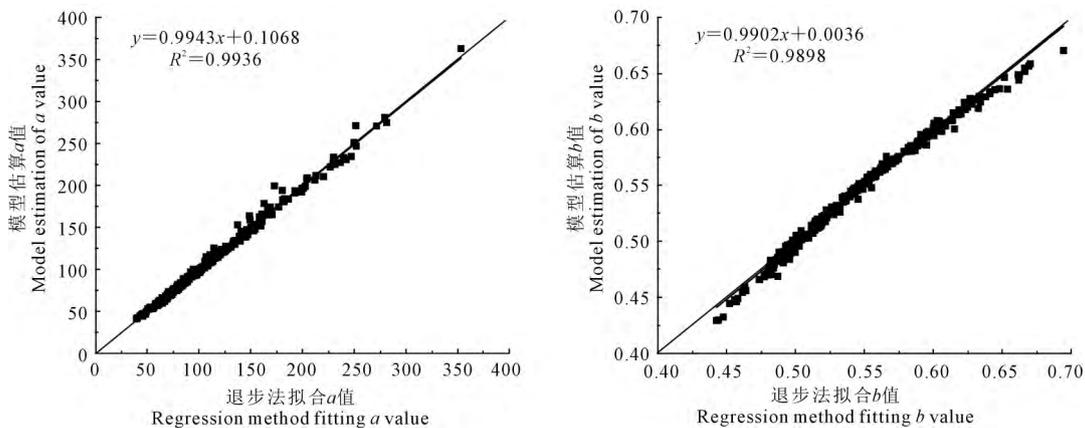


图 3 拟合系数 a 和拟合系数 b 退步法拟合值与模型估算值散点图

Fig.3 Plots of regression coefficient fitting values and model estimation values of fitting coefficients a and b

对误差为 5.97% ,拟合系数 b 的平均相对误差为 0.30%。拟合系数 a 的平均相对误差有所增大,拟合系数 b 的平均相对误差有所减小,这是由于在利用最小二乘法拟合毛管流量公式时,拟合系数 a 和拟合系数 b 随毛管入口工作水头范围的变化会发生波动,当毛管入口工作水头范围普遍较大时,拟合系数 a 值会明显的增大,导致模型的拟合误差偏大,因此,选择合理的毛管入口工作水头范围进行拟合分析,可以有效地降低模型误差。

当毛管入口工作水头为 4、6 m 和 8 m 时,毛管入口流量实测值与毛管流量估算方法的估算值误差如表 6 所示。毛管入口流量实测值与估算值最大相对误差为 11.65% ,平均相对误差为 3.79% ,误差较小,说明本文建立的毛管流量估算模型具有较高的精度及适应性。

3 结 论

不同毛管入口工作水头下,毛管入口流量实测值与利用退步法毛管水力学解析方法计算值的最大相对误差为 11.09% ,最小相对误差仅为 0.04% ,平均相对误差为 3.35%。毛管长度、毛管铺设坡度、滴头间距和流量系数显著影响拟合系数 a ,毛管铺设坡度和流态指数显著影响拟合系数 b 。

经过拟合分析建立相应毛管结构参数与拟合系数 a 、拟合系数 b 的回归方程。通过验证发现,当毛管入口工作水头为 4、6 m 和 8 m 时,通过实测得到的毛管入口流量值与本文建立的毛管流量估算模型计算毛管入口流量值平均相对误差为 3.79% ,说明本文建立的毛管入口流量估算模型具有较高精度及较强的适应性。

表 5 拟合系数 a 和拟合系数 b 实测值与估算值误差表

Table 5 Errors of measured and estimated values of fitting coefficients a and b

组别 Group	拟合系数 a Fitting coefficient a			拟合系数 b Fitting coefficient b		
	实测值	估算值	误差 Relative error/%	实测值	估算值	误差 Relative error/%
	Measured values	Estimated values		Measured values	Estimated values	
T1	100.6626	93.7405	6.88	0.5870	0.5885	0.26
T2	89.9086	84.3675	6.16	0.4751	0.4764	0.27
T3	129.5910	118.0762	8.89	0.4935	0.4947	0.24
T4	117.9213	115.1125	2.38	0.5775	0.5778	0.05
T5	133.2706	121.7783	8.62	0.5860	0.5905	0.77
T6	118.8816	109.6018	7.81	0.4781	0.4784	0.06
T7	160.3890	153.3928	4.36	0.4951	0.4967	0.32
T8	153.6708	149.5426	2.69	0.5773	0.5798	0.43

表 6 毛管入口流量实测值与估算值误差表

Table 6 Errors of measured and estimated values of capillary inlet flow

组别 Group	毛管入口工作水头 /m Capillary inlet pressure	毛管入口流量 Capillary inlet flow/($L \cdot h^{-1}$)		误差 /% Relative error
		实测值	模型估算值	
		Measured values	Estimated values	
T1	4	212.98	211.95	0.48
	6	262.82	269.07	2.38
	8	311.03	318.71	2.47
T2	4	155.80	163.30	4.82
	6	191.09	198.10	3.67
	8	238.97	227.20	4.92
T3	4	222.07	234.42	5.56
	6	273.98	286.49	4.57
	8	346.43	330.31	4.65
T4	4	261.08	256.44	1.78
	6	329.53	324.14	1.63
	8	404.25	382.76	5.32
T5	4	270.98	276.11	1.89
	6	347.79	350.81	0.87
	8	436.57	415.76	4.77
T6	4	240.78	212.74	11.65
	6	254.36	258.28	1.54
	8	302.89	296.38	2.15
T7	4	327.95	305.39	6.88
	6	391.16	373.52	4.51
	8	435.47	430.89	1.05
T8	4	354.28	334.07	5.70
	6	438.74	422.61	3.68
	8	520.75	499.32	4.12

- 其空间差异分析[J].干旱区研究 2011 28(5):789-794.
- [15] 李夏子, 郭春燕, 杨晶, 等. 气候变化对内蒙古牧草生产潜力的影响[J]. 中国农学通报 2018, 34(16): 106-114.
- [16] 孙慧兰, 李卫红, 徐远杰, 等. 新疆伊犁河流域牧草气候生产潜力的时空变化特征分析[J]. 草业学报 2010, 19(6): 555-61.
- [17] 窦立宝, 郭玉刚. 基于 GIS 的石羊河流域气候生产潜力估算[J]. 人民黄河 2011, 33(7): 56-58.
- [18] 程曼, 王让会, 薛红喜, 等. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J]. 干旱区资源与环境 2012, 26(6): 1-7.
- [19] 马甜, 王俊波, 张治华, 等. 宁夏中部干旱带天然草地气候生产潜力研究[J]. 草地学报 2013, 21(2): 237-242.
- [20] 李子龙, 田明静. 银川市气候资源生产潜力研究[J]. 农业科学研究 2017, 38(1): 53-56.
- [21] 孙成明, 陈瑛瑛, 武威, 等. 基于气候生产力模型的中国南方草地 NPP 空间分布格局研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2013, 34(4): 56-61.
- [22] 郭志华, 李琼婵. 广东省植被潜在生产力的估算及其分布[J]. 热带亚热带植物学报 1997, 5(1): 45-52.
- [23] 牛叔文. 甘肃第一性生产潜力的地区分布及开发利用初探[J]. 甘肃科学学报 1994, 4(4): 6-10.
- [24] 康西言, 马辉杰. 河北省气候生产潜力的估算与区划[J]. 中国农业气象 2008, 29(1): 37-41.
- [25] 孙善磊, 周锁铨, 石建红, 等. 应用三种模型对浙江省植被净第一性生产力(NPP)的模拟与比较[J]. 中国农业气象 2010, 31(2): 271-276.
- [26] 李军玲, 邵春辉, 刘忠阳, 等. 河南省陆地植被净第一性生产力估算及其时空分布[J]. 草业科学 2011, 28(10): 1839-1844.
- [27] 仓生海. 青海省天然草地植被净初级生产力分析——基于 Miami 模型[J]. 安徽农业科学 2011, 39(11): 6409-6410.
- [28] 于智媛, 梁书民. 基于 Miami 模型的西北干旱半干旱地区灌溉用水效果评价——以甘宁蒙为例[J]. 干旱区资源与环境 2017, 31(9): 49-55.
- [29] 梁书民, 于智媛. 用经验径流系数推算全球径流深度分布场[J]. 干旱区研究 2018, 35(1): 1-11.
- [30] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1965-1978.
- [31] Trabucco A, Zomer R J. Global Aridity Index (Global-Aridity) and global potential evapo-transpiration (Global-PET) geospatial database [DB/OL] // CGIAR Consortium for Spatial Information Published Online, 2009, CGIAR-CSI GeoPortal at <http://www.csi.cgiar.org/>.
- [32] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe version 4 [DB/OL]. 2008, CGIAR - CSI SRTM 90m Database at <http://srtm.csi.cgiar.org>.

(上接第 95 页)

参考文献:

- [1] Myers L E, Bucks D A. Uniform irrigation with low-pressure trickle systems [J]. Journal of Irrigation & Drainage Division, 1972, 98(3): 341-346.
- [2] Wu I P, Gitlin H M. Hydraulic and uniformity for drip irrigation [J]. Journal of the Irrigation & Drainage Division, 1973, 99(2): 157-168.
- [3] Warrick A W, Yitayew M. Trickle lateral hydraulics. I: Analytical solution [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1988, 114(2): 281-288.
- [4] Valiantzas J D. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1998, 124(6): 300-305.
- [5] Valiantzas J D. Hydraulic analysis and optimum design of multidiameter irrigation laterals [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2002, 128(2): 78-86.
- [6] Valiantzas J D. Inlet pressure, energy cost, and economic design of tapered irrigation submains [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(2): 100-107.
- [7] Valiantzas J D. Explicit hydraulic design of micro-irrigation submain units with tapered manifold and laterals [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(4): 227-236.
- [8] 魏秀菊. 平坦地形时微灌设计单元内允许压差在支、毛管上的合理分配[J]. 灌溉技术 1995, 3(1): 16-18.
- [9] 张林, 吴普特, 牛文全, 等. 均匀坡度下滴灌系统流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报 2007, 23(8): 40-44.
- [10] 张国祥, 吴普特. 滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J]. 农业工程学报 2005, 21(9): 20-22.
- [11] 张国祥. 微灌毛管水力学研究: 微灌水力设计计算方法探讨之一[J]. 灌溉技术 1990, 2(2): 9-16, 64.
- [12] 张国祥. 微灌毛管水力学设计的经验系数法: 微灌水力设计计算方法探讨之三[J]. 灌溉技术 1991, 1(1): 4-8, 64.
- [13] 郑纯辉, 康跃虎, 王丹. 满足灌水器平均流量和灌水均匀度的微灌系统优化设计方法[J]. 干旱地区农业研究 2005, 23(1): 28-33.
- [14] 鞠学良. 微灌系统田间管网水力解析模型与优化设计方法研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学 2017.
- [15] 张志新, 王建东, 李鑫, 赵月芬. 虚拟节点有限元法解析滴灌支管水力学计算[J]. 农业机械学报 2009, 40(3): 99-102.
- [16] 张志新, 王建东, 徐锁军, 等. 虚拟节点有限元法解析滴灌毛管水力学特性[J]. 农业机械学报 2009, 40(2): 68-70, 36.
- [17] 王新坤. 微灌系统遗传算法优化设计理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2010.
- [18] 王新坤, 蔡焕杰. 微灌毛管水力解析及优化设计的遗传算法研究[J]. 农业机械学报 2005, 36(8): 55-58.
- [19] 白丹, 党志良. 不规则微灌田间管网的优化[J]. 农业机械学报, 1997, 28(1): 53-57.
- [20] 康跃虎. 微灌系统水力学解析和设计[M]. 西安: 陕西科学技术出版社 1999: 9-42.
- [21] 熊国武. 基于 MATLAB 的微灌系统水力计算程序设计及工程应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学 2006.
- [22] 中华人民共和国水利部. GB/T50485-2009 微灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社 2009.
- [23] 王新坤. 微灌管网水力解析及优化设计研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学 2004.