

局部控制地下浸润灌溉土壤入渗特性研究^{*}

郑 健¹, 胡笑涛¹, 蔡焕杰¹, 康绍忠^{1,2}, 王 磊¹

(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 中国农业大学 农业水问题研究中心, 北京 100083)

[摘 要] 通过室内试验, 对局部控制地下浸润灌溉不同处理下的土壤水分运动进行了观测分析, 并用幂函数对不同处理下湿润锋入渗距离及入渗速率与入渗时间之间的关系进行了拟合, 用 Kostiakov 入渗模型建立了局部控制地下浸润灌溉中累计入渗量与累计入渗时间之间的关系, 同时确定了局部控制地下浸润灌溉合理的技术要素组合范围。结果表明, 所有处理条件下湿润锋的推移及土壤入渗速率与入渗时间均呈显著或较显著的幂函数关系; Kostiakov 入渗模型能准确地描述局部控制地下浸润灌溉中累计入渗量与累计入渗时间之间的关系; 局部控水浸润灌溉合理的技术要素组合为: 淹没高度为 7~9 cm, 适宜开孔率为 14% 左右, 灌水下限不低于 70% 田间持水率。

[关键词] 局部控制地下浸润灌溉; 湿润锋入渗速率; 累计入渗量; 技术要素

[中图分类号] S275.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)03-0227-06

Experiment on soil infiltration properties under water-controlled partial wetting irrigation

ZHENG Jian¹, HU Xiao-tao¹, CAI Huan-jie¹, KANG Shao-zhong^{1,2}, WANG Lei¹

(1 The Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Center for Agricultural Water Research in China, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Through laboratory experiment, we analyzed the soil water movement under different treatments of water-controlled partial wetting irrigation, fitting analyzed the relationship between the infiltration distance of wetting front and infiltration time and infiltration rate under different treatments by using power function, and established the relationship between the cumulative infiltration and cumulative time with Kostiakov infiltration model. Meanwhile, we obtained the technique parameters assembly range of water-controlled partial wetting irrigation. The results indicated that, we can use Kostiakov infiltration model to describe the relationship between the cumulative infiltration and cumulative time accurately; the technique parameters assembly range of water-controlled partial wetting irrigation was: the suitable perforation ratio is about 14%, the submergence height is 7-9 cm, and the irrigation low limit is above 70%.

Key words: water-controlled partial wetting irrigation; wetting front; infiltration rate; cumulative infiltration; technique parameters

我国设施农业发展很快, 为广大消费者提供了丰富的反季节蔬菜、花卉和水果等, 但其绝大多数仍

* [收稿日期] 2006-06-13

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50479051)

[作者简介] 郑 健(1981-), 男, 新疆阿克苏人, 在读硕士, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: zhj16822@163.com

[通讯作者] 胡笑涛(1972-), 男, 河南南阳人, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: whuxiaotao@tom.com

采用传统的灌溉方式如畦灌等, 水的利用率只有 40% 左右^[1]。由于灌水技术落后, 设施内的作物生长环境差, 病虫害严重, 因此作物产量低、品质差, 严重制约了设施农业的进一步发展。近年来, 国内外有关科学家对设施农业节水灌溉技术进行了大量研究, 并取得了很多成果^[2], 如地下滴灌、膜下滴灌、渗灌等等。

局部控制地下浸润灌溉, 是参考现有相似灌溉技术提出的, 具有较高节水潜力的、适合于设施农业栽培系统的节水灌溉技术, 它是利用地下水浸润灌溉的方式, 即将底部开孔的种植槽放置在一定深度的水槽中, 利用土壤的毛细管作用, 通过调控水土接触面积和供水压力大小, 使水进入作物根系层进行主动浸润灌溉的一种灌水技术。局部控制地下浸润灌溉属于地下灌溉的范畴, 它总是湿润土体的下部且灌水前后表层土壤总处于相对干燥状态。根据其自身所具有的特点, 局部控制地下浸润灌溉技术可以节约水资源、降低栽培设施的室内湿度、提高作物的产量并形成优良的品质。在目前国内外设施农业采用的灌溉方式中, 仅发现一些类似灌水技术的应用, 如王泽南等^[3]采用节水吸灌技术, 即采用吸水管依靠作物根区的土壤吸力进行灌溉; 雷廷武等^[4]、陈新明等^[5]、Daniel^[6]提出的无压或负压灌溉技术都是利用土壤的水吸力进行被动灌溉, 依靠埋设在土壤

下面的灌溉管进行供水。除此之外, 尚未找到完全相同的灌水技术研究资料。

但作为一种新的设施农业灌溉方法, 要将其有效地应用于生产实践, 就需要研究不同技术要素组合条件下湿润锋、入渗速率、累计入渗量的变化, 找到一个较好的灌水技术参数组合, 从而在快速有效地对作物进行灌溉的同时提高水的利用效率。为此, 本研究通过室内试验, 对局部控制地下浸润灌溉的土壤水分运动规律进行了研究, 分析了湿润锋推移、累积入渗量、土壤入渗速率和入渗时间的关系, 探寻了该灌溉方式合理的技术要素组合范围, 以期为局部控水浸润灌溉技术的完善及其在实际中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室进行。试验用土为农田栽培土, 自然风干, 过 2 mm 筛后利用沉降法对土壤进行颗粒分析, 结果如表 1。按照国际制土壤质地分类标准, 供试土壤为粉壤土。试验时按容重为 1.3 g/cm^3 分层 (5 cm) 填土, 层间打毛。初始含水率均控制在体积分数为 2.3% 左右。

表 1 试验土壤的粒径分布

Table 1 Particle size distribution of tested soil

粒径/mm Particle size	成分 Ingredient	比例/% Proportion	粒径/mm Particle size	成分 Ingredient	比例/% Proportion
1~0.25	中砂, 粗砂 Medium sand, coarse sand	1.07	0.01~0.005	中粉砂 Medium-silty sand	8.00
0.25~0.05	细砂 Fine sand	14.1	0.005~0.001	细粉砂 Fine-silty sand	26.7
0.05~0.01	粗砂粉 Silt	50.4	<0.001	粗细粘粒, 胶粒 Coarse and fine clay, colloidal particle	4.90

1.2 试验装置及试验设计

试验装置由有机玻璃土箱、水槽和电子称重仪 3 部分组成。有机玻璃土箱规格为 $30 \text{ cm} \times 26.8 \text{ cm} \times 26.8 \text{ cm}$ (高 $\times$ 长 $\times$ 宽), 其底部共开孔 25 个 (其中有 9 个孔径为 2.2 cm 的小孔, 16 个孔径为 3.0 cm 的大孔) (图 1)。

试验用水为自来水, 通过开启或封闭底孔孔塞以控制开孔率; 通过给水槽持续供水以使试验期间设计的淹没高度保持恒定; 土壤含水率由试验用土加水混合拌匀来调节。

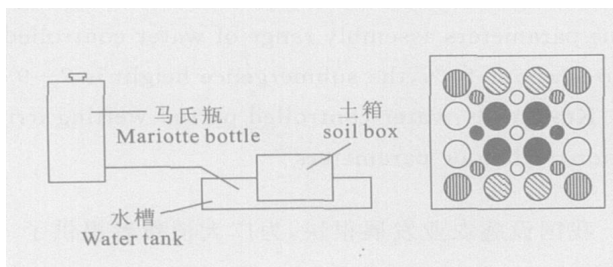


图 1 试验装置及土箱底部孔径分布示意图

Fig. 1 Testing equipment and aperture distribution in base

本试验共设淹没高度 (h)、开孔率 (指开孔面积

占总面积之比, P)、土壤初始含水率(θ) 3 个处理, 其中淹没高度设 3, 5, 7 和 9 cm 4 个水平; 开孔率设 5%, 9%, 14%, 20% 4 个水平; 土壤初始含水率设 8.53%, 12.64%, 16.78% 3 个水平。如图 1 所示, 布置底孔时以底部中间小孔为中心对称均匀开孔, 开孔率为 5% 时开启图 1 中填充黑色的孔, 开孔率为 9% 时开启填充黑色和填充斜纹的孔, 开孔率为 14% 时开启除白色孔外的所有孔, 开孔率为 20% 时开启除中间密闭小孔外的所有孔。

通过预试验观察, 当开孔率为 5% 时, 由于开启的小孔距离有机玻璃槽侧面仅 4.8 cm, 且有向上水压力的存在, 湿润锋能够较快侧渗到边壁, 对湿润锋向上运移的观测影响较小。试验设计时, 设定淹没高度为 5 cm, 研究不同开孔率与湿润锋、入渗速率及累计入渗量的关系; 设定开孔率为 14%, 研究不同淹没高度对湿润锋、入渗速率及累计入渗量的影响; 设定淹没高度为 5 cm, 开孔率为 14%, 研究不同土壤初始含水率对湿润锋、入渗速率及累计入渗量的影响。

1.3 试验方法及观测内容

将试验用土风干过筛后, 按预定容重 (1.3

g/cm^3) 分层 (5 cm) 均匀装入有机玻璃箱内, 装土高度为 25 cm, 将有机玻璃箱放置到不同水深的水槽中进行试验。入渗开始后, 用秒表计时并按照先密后疏的原则, 观测土壤湿润锋在不同处理时随时间在垂直方向上的变化过程。累计入渗量在不同处理下随时间的变化规律及土壤入渗速率在不同处理下随时间的变化规律。每组试验重复 3 次, 取其平均值作为试验结果。试验期间利用马氏瓶供水以保持规定的淹没高度。根据计算, 当土壤入渗水量使土壤的含水率达到田间持水率时, 试验结束。

2 结果与分析

2.1 湿润锋与淹没高度、开孔率、初始含水率的关系

局部控制地下浸润灌溉的湿润锋垂向入渗距离 $H(t)$ 是湿润体的一个重要特征值, 掌握特定土壤在不同处理下入渗距离与入渗时间的关系, 是确定灌溉时间和淹没高度的重要依据^[7-8]。本试验在连续供水条件下对不同淹没高度、不同开孔率、不同土壤初始含水率处理时的垂向入渗距离 $H(t)$ 随入渗时间 t 的变化情况进行了观测, 其结果如图 2 所示。

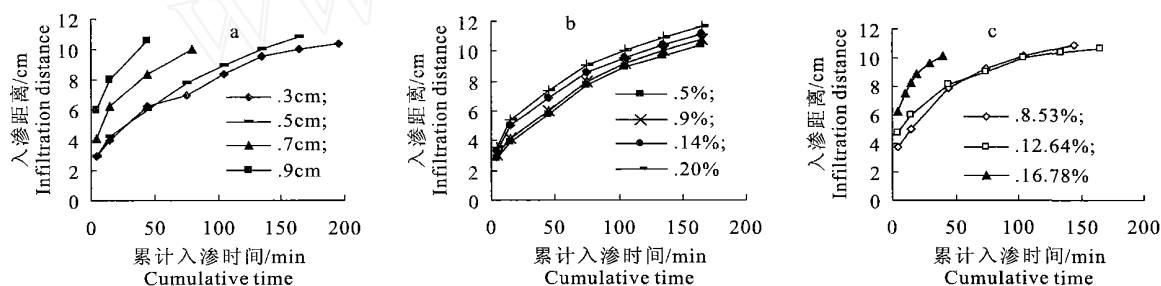


图 2 淹没高度、开孔率、初始含水率对湿润锋的影响

a 淹没高度; b 开孔率; c 初始含水率

Fig. 2 Effect of the wetting front under submergence depth, perforation ratio and initial water content condition

a Submergence height; b Perforation ratio; c Initial water content

由图 2 可以看出: (1) 较高淹没高度下的湿润锋运移速度较低淹没高度下的快, 这主要是因为较高的淹没高度下, 渗孔周围饱和区的供水压力增大而产生了更大的水分入渗驱动力。(2) 开孔率的大小对局部控水浸润灌溉湿润锋运移的影响表现为: 初始阶段, 开孔率越大, 湿润锋的运移也越快; 当达到稳定入渗后, 湿润锋的变化具有一致性。这主要是因为随着开孔率的增大, 土壤接触水面的面积也在增加, 淹没高度形成一个向上的水压力, 在入渗初始阶段即形成了较大的土壤水势差; 但随着入渗时间的

推移, 向下的重力势不断增大, 使入渗稳定后的湿润锋变化趋于一致。(3) 初始含水率较高土壤的湿润锋运移速度较初始含水率低的土壤快。这是因为水势梯度是影响入渗速率大小的主要原因^[9], 且湿润锋的运移速度还受到土壤因素的影响^[10], 因此初始含水率越低的土壤需要更多的累计水量填充土壤孔隙, 从而延缓了湿润锋的前进^[11]。

为进一步揭示不同处理下湿润锋垂向入渗距离与入渗时间之间的关系, 用幂函数关系对试验结果进行了回归分析, 拟合结果为:

$$H(t) = at^b. \quad (1)$$

式中: $H(t)$ 为垂向入渗距离; t 为累计入渗时间; a 、 b 为拟合系数。

拟合结果(表 2)表明, 幂函数能够准确地描述连续供水条件下, 不同淹没高度、开孔率、土壤初始含水率处理时湿润峰与入渗时间之间的关系, 相关

系数 R^2 均在 0.98 以上, 且拟合方程中的指数 b 小于 1, 说明当时间趋于无穷大时, $H(t)$ 对 t 的导数为零, 表明 $H(t)$ 值随时间的推移将趋于稳定。这是由于随着灌溉时间的延长, 湿润锋进一步远离入渗孔, 张力梯度的驱动力随之降低造成的。

表 2 不同处理下湿润锋垂向入渗距离与入渗时间关系的拟合

Table 2 Fitted result of the infiltration distance of wetting front and infiltration time in different treatments

h/cm	a	b	R^2	P/cm	a	b	R^2	θ/cm	a	b	R^2
3	3.958 8	0.259	1	5	1.405 7	0.390 2	0.992 7	8.53	2.187	0.328 3	0.991 9
5	2.518 4	0.317 6	0.994 7	9	1.558 6	0.371 6	0.991 2	12.64	3.248 4	0.236 4	0.996
7	1.552 7	0.3	0.99	14	1.903 2	0.345 9	0.998 3	16.78	4.394 2	0.230 3	0.996 3
9	1.625 4	0.351 9	0.992 8	20	2.133 8	0.332 6	0.998 7				

2.2 入渗速率与淹没高度、开孔率、初始含水率的关系

在局部控制地下浸润灌溉的土壤入渗开始阶段, 由于土壤湿润体的体积很小, 在入渗锋面存在较高的基质势梯度和稳定的水头压力, 土壤入渗速率

较高; 随着湿润体体积的增加, 入渗距离增大, 基质势梯度明显减小, 重力势逐步增加, 导致土壤入渗速率随入渗时间的延长而逐渐减小, 最终将趋于 0。在连续供水条件下淹没高度、开孔率、土壤初始含水率与土壤入渗速率的关系如图 3 所示。

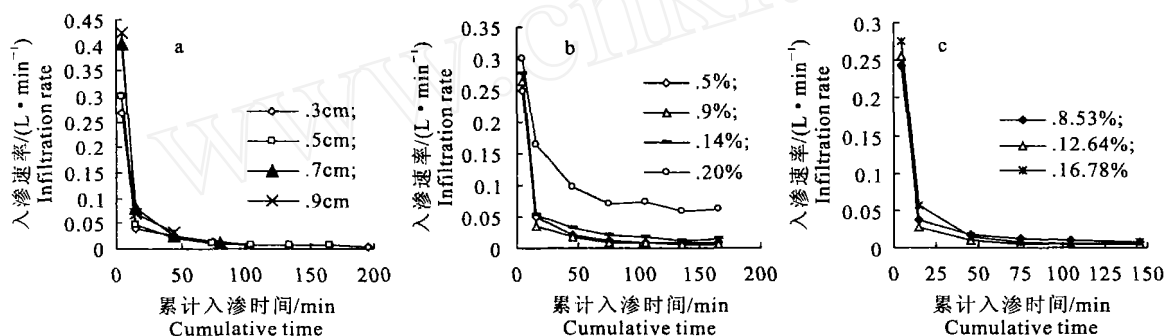


图 3 淹没高度、开孔率、初始含水率对入渗速率的影响

a 淹没高度; b 开孔率; c 初始含水率

Fig. 3 Effect of the infiltration rate under submergence depth, perforation ratio and initial water content condition

a Submergence height; b Perforation ratio; c Initial water content

从图 3 可以看出, (1) 不同淹没高度处理下, 在入渗初始阶段, 随着淹没高度的增加, 向上的水压力增大, 高淹没高度下的入渗速率较低淹没高度的入渗速率快; 在入渗后期, 各处理的入渗速率降低。(2) 不同开孔率处理下, 土壤入渗速率随灌水时间的变化规律基本相似, 当开孔率提高到 20% 时, 土壤入渗速率显著提高。这主要是因为开孔率较小时入渗孔周围的土壤含水率容易达到饱和, 从而在入渗孔周围形成饱和区, 使入渗速率的变化较小; 当开孔率突然增大时, 土体接触水的面积突然增大, 初始入渗水量增加, 导致初始入渗速率明显增大。(3) 不同土壤初始含水率处理下, 在入渗初期, 较高初始含水

率处理的入渗速率较低初始含水率的处理快^[12-13], 随入渗时间的延长, 土壤初始含水率高的入渗速率有下降趋势, 这是因为土壤含水率低的土水势小, 水势梯度变大。

为了更深入地揭示不同处理下入渗速率与入渗时间的关系, 用幂函数关系对试验结果进行回归分析拟合, 可得:

$$V(t) = at^b. \quad (2)$$

式中: $V(t)$ 为入渗速率, t 为累计入渗时间, a 、 b 为拟合系数。

拟合结果(表 2)表明, 在连续供水条件下, 不同淹没高度、开孔率、土壤初始含水率处理时的入渗速

率与入渗时间之间的关系能够用幂函数进行较为准确地描述。这种规律形成的主要原因是: 由于供水压力的存在, 水分到达土壤时具有一定的微小流速, 使土壤发生水合作用, 膨胀的粘粒将随着水分的运移而堵塞土壤孔隙, 从而增大了水分运移的阻力, 并且毛管水的上升运动还要克服重力势的存在, 因此随着时间的延长, 土壤水势梯度降低, 从而导致入渗速率降低。

表 3 不同处理下入渗速率与入渗时间关系的拟合

Table 3 Fitted result of infiltration rate and infiltration time in different treatments											
h/cm	a	b	R^2	P/cm	a	b	R^2	θ/cm	a	b	R^2
3	1 008 8	- 1	0 964 6	5	0 835 5	- 0 933 1	0 965 9	8 53	0 823 9	- 0 975 3	0 953 2
5	1 300 1	- 1 008 7	0 970 6	9	0 953 6	- 1 030 6	0 954 5	12 64	1 557	- 1 206 8	0 941 4
7	2 853 1	- 1 266 7	0 995 1	14	0 759 5	- 0 819 9	0 954 6	16 78	1 439	- 1 168 4	0 964
9	2 396 2	- 1 185	0 946 9	20	0 598 8	- 0 451	0 985 1				

2 3 累计入渗量与淹没高度、开孔率、初始含水率的关系

累计入渗量随着时间的变化是判断灌溉效果的重要参考指标, 掌握土壤在不同处理下累积入渗量与

时间的关系, 是确定灌溉时长的重要依据。本试验在连续供水条件下对不同开孔率、不同淹没高度、不同土壤初始含水率处理时土壤累计入渗量变化情况进行了观测, 结果如图 4 所示。

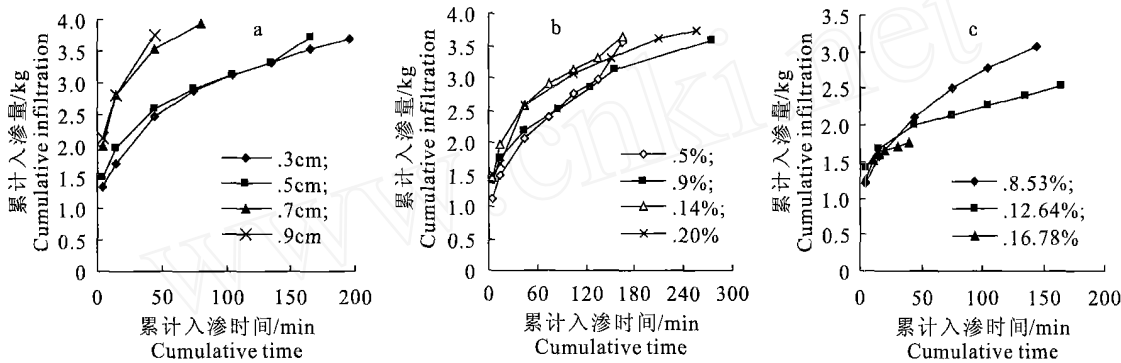


图 4 淹没高度、开孔率、初始含水率对累计入渗量的影响
a 淹没高度; b 开孔率; c 初始含水率

Fig. 4 Effect of the cumulative infiltration under initial water content, perforation ratio and submergence depth condition
a Submergence height; b Perforation ratio; c Initial water content

从图 4 可以看出, (1) 在不同淹没高度处理时, 淹没高度越高, 初始阶段累计入渗量就越大, 且较高淹没高度(7 和 9 cm)处理间和较低淹没高度(3 和 5 cm)处理间分别具有一致性。(2) 在不同开孔率处理时, 入渗初始阶段的开孔率越大, 土体接触的正压力水头的面积增大, 单位时间内入渗量增大, 但最终总累计入渗量近似相等。(3) 在不同土壤初始含水率处理时, 当开孔率相等、淹没高度一定时, 土壤初始含水率越高, 累计入渗量就越小。这是因为土壤含水率较低时, 水势梯度大, 入渗速率高, 而随着土壤含水率的升高入渗速率变慢。

为进一步准确描述不同处理下累积入渗量与入渗时间的关系, 采用参数确定简单、精度较高且有较广泛适应性的 Kostiakov 土壤入渗经验模型^[14-15], 建立了局部控制地下浸润灌溉条件下累计入渗量与

时间的关系模型, 即

$$Z = K_0 t^{1-\alpha} \tag{3}$$

式中: K_0 为经验入渗系数, 在数值上等于第 1 个单位时段内的土壤平均入渗速率; t 为累计入渗时间; α 为经验入渗指数。

经过对试验结果的分析, 可知当 K_0 取第 1 个单位时段内的土壤平均入渗速率, α 取 0.51 时, Kostiakov 土壤入渗经验模型能准确地描述局部控制地下浸润灌溉中累计入渗量与累计入渗时间之间的关系。

3 结 论

局部控制地下浸润灌溉主要利用毛管上升水进入作物根系层进行灌水, 水分运动主要依靠基质势

与重力势差值形成的水势梯度提供驱动力; 采用一定的开孔率控制水土接触面积, 可以防止饱和土层的快速形成及土壤颗粒水化、土粒高度分散等对土壤结构的影响。本试验表明, 淹没高度对入渗速率的影响表现出明显的范围, 从试验结果看, 较高淹没高度(如 7 和 9 cm)和较低淹没高度(如 3 和 5 cm)时的入渗速率和累积入渗量的变化规律分别具有一致性; 当开孔率大于 14% 时, 初始入渗速率和累计入渗量明显增大, 湿润锋运移速度加快; 增加淹没高度可以增加水分向上运动的正压力, 从而有利于减少灌水时间; 土壤初始含水率高时的湿润锋运移速率快, 因此采用该方法进行灌溉时适宜采用较高的灌水下限。

根据试验结果, 初步推荐适宜采用局部控制地下浸润灌溉技术参数的范围为: 淹没高度为 7~9 cm, 开孔率为 14% 左右, 灌水下限不低于 70% 田间持水率。在此条件下采用该技术可以实现对种植槽进行快速有效的灌溉。

本研究获得的初步结论仅仅是基于土壤水分运动规律提出的, 如何提高该项技术的水分利用效率, 还需要进一步研究栽培作物条件与灌溉水量之间的关系。

[参考文献]

- [1] 杨培岭, 任树海. 发展我国设施农业节水灌溉技术的对策研究[J]. 节水灌溉, 2001(2): 7-9
- [2] 康绍忠, 蔡焕杰. 作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002
- [3] 王泽南. 节水吸灌技术探讨与实践[J]. 湖南水利水电, 2002(6): 43-44
- [4] 雷廷武, 江培福, Vincent F B, 等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究[J]. 水利学报, 2005(3): 298-302
- [5] 陈新明, 蔡焕杰, 王占兵, 等. 无压根区地下灌溉技术实验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 76-79
- [6] Daniel I L. Root and shoot modification by irrigation[J]. Hort Technology, 1998, 8(4): 510-514
- [7] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 870-875
- [8] 张振华, 蔡焕杰, 王健, 等. 间歇供水条件下点源入渗规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 50-53
- [9] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [10] 解文艳, 樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(4): 272-275
- [11] 刘玉林. 波涌灌入渗机理的研究[J]. 排灌机械, 2002, 20(4): 18-20
- [12] 李道西, 罗金耀, 彭世章. 地下滴灌土壤水分运动室内实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(1): 26-28
- [13] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 水利学报, 2000(6): 39-44
- [14] 马娟娟, 孙西欢, 李占斌. 入渗水头对土壤入渗参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5): 53-55
- [15] Hartley. Interpretation of kostiakov infiltration parameters for borders [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 1992, 118(1): 156-165