

入渗水头对土壤水平一维入渗影响初探

马娟娟^{1,2}, 孙西欢², 李占斌¹

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

摘要: 蓄水坑灌法是一种适用于我国北方山丘区果林灌溉的新方法。蓄水坑灌条件下的土壤水分入渗是在变水头条件下进行的。本文着眼于研究蓄水坑的侧向水平入渗, 通过室内试验, 对水平土柱在不同水头作用下的土壤入渗状况进行研究, 结果表明入渗水头对入渗系数有较为显著的影响, 对入渗指数有一定的影响, 入渗系数和入渗指数均随入渗水头的变化呈现出相对平稳与显著性变化的交替变化趋势。这一研究成果对进一步研究蓄水坑灌条件下的变水头入渗及土壤水分运动特性具有重要价值。

关键词: 蓄水坑灌法; 入渗水头; 水平入渗; 入渗参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)02-0020-03

中图分类号: S152.72

Effect of Infiltration Head on Soil Horizontal 1D Infiltration

MA Juan-juan^{1,2}, SUN Xi-huan², LI Zhan-bin¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China;

2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China)

Abstract: Water storage pit irrigation method is a new method suitable for orchard irrigation in gully area in the North China. Water infiltration is under varying-head condition. Considering the study lateral horizontal infiltration of water storage pit, the experiments of infiltration in different heads were studied by horizontal column. The results are shown that infiltration head has significant effect on infiltrate coefficient, and has smaller effect on infiltration index, and the infiltration coefficients and infiltration indexes both vary alternately between relative-stable and obvious variation as infiltration head increasing. The research results will have an important value for studying further varying-head infiltration and soil moisture characteristic of water storage pit irrigation.

Keywords: water storage pit irrigation; infiltration heads; horizontal infiltration; infiltration parameters

蓄水坑灌法是一种适于我国北方干旱地区果林灌溉的新型节水灌溉方法^[1]。该方法不仅具有节水、保水、抗旱的特点, 而且能充分利用当地降雨径流、减小水土流失。

蓄水坑灌这一方法在我国经济条件较差、水资源紧缺且水土流失十分严重的北方地区应用前景十分广阔。然而, 在目前其应用理论基础的研究诸如蓄水坑灌条件下的土壤水分运动特性等理论方面的问题尚未完全解决。其中变水头、复杂边界条件下的蓄水坑入渗的研究是蓄水坑灌条件下土壤水分运动特性研究的关键问题之一。因而, 对蓄水坑入渗状况的研究具有重要意义。

土壤入渗时主要受土壤的初始含水率、土壤容重、土壤质地、入渗水头等因素的影响。其中, 关于土壤的初始含水率、土壤容重、土壤质地等因素对土壤入渗的影响方面已有较多的试验研究^[2-4], 而目前入渗水头对土壤入渗的影响研究报道却很少^[5]。在

蓄水坑灌条件下, 随坑内水位的不断下降, 作用于入渗界面的入渗水头也在不断减小, 而且变幅较大(60~0 cm)。这一入渗特点使得入渗水头成为影响蓄水坑入渗的一个重要因素^[6]。本文根据蓄水坑灌侧向水平入渗的特点, 通过室内试验就入渗水头对土壤水平入渗的影响进行初步研究, 分析不同入渗水头对(5~60 cm)水平土柱入渗参数的影响, 旨在为蓄水坑灌法的变水头入渗及土壤水分运动的进一步研究提供依据。

1 试验简介

1.1 试验土样

本试验土样取自山西省太谷县梨园, 土壤质地为砂壤土。土样取回后, 经过风干、碾碎、过 2 mm 土壤筛, 备用。本试验采用均质扰动土进行室内试验, 土壤容重 γ 为 1.345 g/cm³, 土壤初始含水量 θ_g 为 2.12%。

收稿日期: 2004-11-22

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(50379031); 山西省青年科技研究基金资助项目(20031053)

作者简介: 马娟娟(1970—), 女(汉族), 山西闻喜人, 讲师, 硕士, 博士生, 主要从事节水灌溉及水土保持方面的研究。E-mail: mjjty@263.net。

1.2 试验方案的设计

以入渗水头作为试验方案的控制因子, 进行不同水头的水平土柱入渗试验。水头的控制分为 12 级: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 cm。每个水头至少重复 3 次。

1.3 主要仪器设备

试验所用的主要仪器设备有: 马氏筒, 自加工的特制水平土筒(见图 1)等。马氏筒的作用是以恒定水头为土筒供水。土筒内径为 10 cm, 初始注水及水位观测管的内径为 2 cm, 这样可使入渗水量的计量精度提高 25 倍。

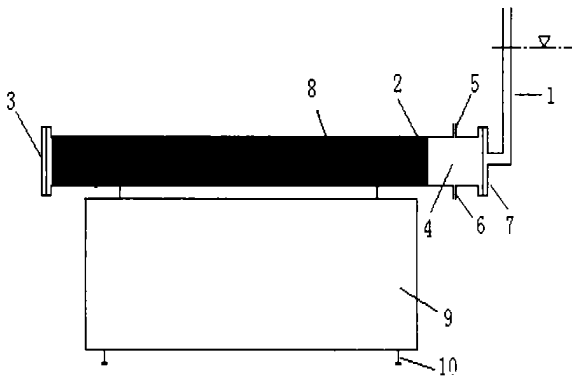


图 1 水平土柱实验装置

- 1. 初始注水及水位观测管
- 2. 铜网
- 3. 法兰盘式透气底板
- 4. 水室
- 5. 排气孔
- 6. 排水孔
- 7. 法兰盘式密封盖
- 8. 土样
- 9. 水平土柱支架
- 10. 调平支脚

1.4 试验过程简介

将备好的试验土样按 1.345 g/cm 的容重分层装

入水平土柱至设计高度, 形成均质土柱。再根据试验设计入渗水头注入初始水量于水平土柱的水室中, 同时开启马氏筒进气阀和进水阀以控制恒定水头, 用秒表记时, 按先密后疏的时间间隔观测并记录马氏筒的水位变化。按试验方案设计进行试验, 试验的入渗历时均为 90 min。

2 试验结果与分析

2.1 试验数据的处理

根据试验观测数据按式(1)计算入渗率。

$$i_f = \frac{(h_i - h_{i-1}) \times A_1}{A_2 \times \Delta t_i} \quad (1)$$

式中: i_f —— 第 i 时刻的土壤入渗率($\text{cm}^3/\text{min} \cdot \text{cm}^2$); h_i, h_{i-1} —— 第 i 和第 $i-1$ 时刻的马氏筒水位高度 (cm); A_1 —— 马氏筒的断面面积 (cm^2); A_2 —— 土筒的断面面积 (cm^2); Δt_i —— 第 i 时刻和第 $i-1$ 时刻的时间差 (min)。

土壤入渗率与时间的变化关系按 Kostiakov 入渗模型进行数学拟合

$$i_f = kt^\alpha \quad (2)$$

式中: k —— 入渗系数 (cm/min); α —— 入渗指数; 其它符号意义同前。

经对 40 组不同入渗水头的土壤入渗率变化过程进行拟合, 求出相应的土壤入渗系数 k 和入渗指数 α , 拟合相关系数均在 0.95 以上。取同一入渗水头作用下的土壤入渗系数 k 和入渗指数 α 的平均值, 试验结果见表 1 和图 2。

表 1 不同入渗水头下的 k, α 拟合值

水头/cm	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$K/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.374	0.377	0.539	0.518	0.447	0.526	0.535	0.545	0.461	0.532	0.737	0.697
α	-0.591	-0.602	-0.623	-0.621	-0.614	-0.651	-0.654	-0.637	-0.605	-0.636	-0.621	-0.655

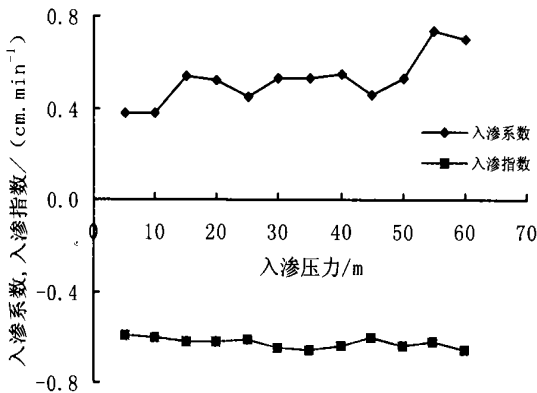


图 2 入渗水头 h 对入渗参数 k 及 α 值的影响

2.2 入渗水头 h 对入渗系数 k 的影响

由图 2 可以看出, 入渗系数 k 随入渗水头 h 的增加呈基本不变—上升—下降—再上升的变化趋势, 说明入渗水头对入渗系数有不同程度的影响。由表 1 的数据可以对这一变化趋势的显著性水平进行分析:

$$\Delta k_i = k_i - k_{i-1} \quad (3)$$

$$k_{ri} = (\Delta k_i / k_{i-1}) \times 100\% \quad (4)$$

式中: Δk_i —— 第 i 个入渗水头作用下入渗系数 k_i 与其相邻的前一个入渗水头作用下的入渗系数 k_{i-1} 的差; k_{ri} —— 两相邻入渗水头作用下的入渗系数相对增量 (%)。两相邻入渗水头作用下的入渗系数增量和相对增量见表 2。

表 2 入渗系数 k 随入渗水头 h 变化的显著性分析表

两相邻入渗水头/cm	5~ 10	10~ 15	15~ 20	20~ 25	25~ 30	30~ 35	35~ 40	40~ 45	45~ 50	50~ 55	55~ 60
$\Delta k_i / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.003	0.162	- 0.021	- 0.071	0.079	0.009	0.010	- 0.084	0.071	0.206	- 0.040
$k_{ri} / \%$	0.830	43.100	- 3.850	- 13.700	17.570	1.650	1.930	- 15.470	15.370	38.740	- 5.480

若设两相邻入渗水头入渗系数的相对增量其绝对值大于 5% 为入渗系数随入渗水头显著变化的判据, 则由表 2 可知: 入渗水头在 10~ 15, 20~ 30, 40~ 60 cm 的范围内, 入渗系数随入渗水头的增加有明显的变化, 而在其它范围的入渗水头作用下, 入渗系数的变化相对平稳。

入渗系数的物理意义是入渗第一单位时段末的入渗率, 因此入渗水头对入渗系数的影响, 实际上是对入渗初始第一单位时段末入渗率的影响。入渗率实际上是入渗界面处的水分运动通量, 由非饱和土壤的达西定律可知, 水分运动通量与导水率和势梯度成正比, 因此, 影响入渗系数的主要因素是入渗界面处的导水率和势梯度。对于入渗界面处的土壤, 在任何入渗水头作用下, 都是处于饱和状态, 因而其导水率为饱和导水率。但随着入渗水头的增加, 入渗界面的土壤逐渐密实, 孔隙率逐渐减小, 饱和导水率也随之减小, 这是入渗系数随着入渗水头增加而减小的原因。对于入渗界面处的势梯度则是随着入渗水头的增加而增加, 这是入渗系数随着入渗水头增加而增大的原因。

由表 2 可以看出, 入渗水头(即入渗界面的压力势)不同, 入渗界面的通量在变化。入渗水头在 5~ 10 cm 范围内, 入渗系数变化很小, 说明在入渗水头范围内饱和导水率对入渗系数的减小作用与势梯度对入渗系数的增加作用基本上互相抵消。在入渗水头 10~ 15 cm 范围内, 入渗系数明显增加, 这说明入渗水头增加所产生的势梯度作用强于饱和导水率的减小作用。入渗水头在 15~ 25 cm 范围内, 入渗系数有所减小, 这表明随入渗水头的增加, 饱和导水率减小的作用强于势梯度增加的作用。如图 2 所示, 随着入渗水头的增加, 入渗系数呈波浪式的上升趋势。

由上述分析可以看出, 随着入渗水头的增加, 入渗界面势梯度增大, 有增大入渗系数的作用; 同时, 入渗水头的增加又使得入渗界面土壤骨架变形而不断地密实, 导水率减小, 有减小入渗系数的作用。入渗系数随入渗水头的变化, 正是在 2 种作用互相消长之下, 呈现出相对平稳与显著性变化的交替变化趋势。

2.3 入渗水头 h 对入渗指数 α 的影响

由表 1 和图 2 可以看出, 随着入渗水头的增加, 入渗指数也有不同程度的变化, 即入渗水头在 10~ 15, 25~ 30, 45~ 50, 55~ 60 cm 的范围内, 入渗指数随入渗水头增加有明显减小趋势, 而在其它范围的入渗水头作用下, 入渗指数的变化相对平稳。

从入渗指数的物理意义来看, 它反映的是入渗过程的时效性。入渗指数的大小取决于土壤质地、土壤结构和初始含水量。在土壤质地、初始含水量一定的情况下, 入渗指数的变化和土壤结构有密切关系。入渗水头在 10~ 15, 25~ 30, 45~ 50, 55~ 60 cm 的范围内, 随着入渗水头的增加, 入渗界面压力势增大, 入渗界面土壤颗粒进一步分散, 土壤骨架发生一定的变形, 微细颗粒随入渗水流向入渗界面以下消散, 使得入渗界面的土壤结构有所改变, 因而随入渗水头的增加, 入渗过程的时效性降低, 入渗指数明显减小。而在其它范围的入渗水头作用下, 入渗界面及其下的局部区域土壤结构相对稳定或变化较小, 所以入渗指数的变化也相对平稳。

3 结 语

为了探讨入渗水头对蓄水坑侧向水平入渗的影响, 本文通过试验对 12 个不同入渗水头作用下的 40 组水平土柱入渗进行了初步研究与分析, 结果表明, 入渗水头对入渗系数有较为显著的影响。随着入渗水头的增加, 入渗界面的势梯度将会增加, 有增大入渗系数的趋势; 同时入渗水头的增加, 将会引起入渗界面及其下的局部区域的土壤逐渐密实, 有减小入渗系数的趋势。在这两种作用的相互消长之下, 入渗系数随入渗水头的变化呈现出相对平稳与显著性变化的交替变化趋势。入渗水头对入渗指数也有不同程度的影响。随着入渗水头的增加, 入渗界面压力势增大, 使得入渗界面的土壤结构有不同程度的改变, 因而入渗指数随入渗水头的变化也呈现出相对平稳与显著性变化的交替变化趋势。本文的研究成果为进一步研究变水头入渗及蓄水坑灌条件下的土壤水分运动特性奠定了基础。

(下转第 26 页)

改造农田过程中,经常补充磷肥所致。相比之下,由于林草地没有肥料补充或补充不足,并且植物根系对下层土壤中磷吸收后又以有机物的形式累积在土壤表面,同时由于磷的迁移率小,不易从剖面上层向下层淋溶迁移,从而使林草地含量有所降低。而且,水平梯田与坡耕地等农田磷素养分在整个剖面上 20 cm 以下含量大小相近,林草地的含量大小相近。刺槐林地与坡耕地的速效磷含量在整个剖面上几乎没有变化。

(3) 剖面上全钾含量变化幅度较小,表层最大,40 cm 以下不同地类的含量大小趋于一致。在同一土层,不同地类全钾含量的大小变化次序为:刺槐林地>水平梯田>坡耕地>自然草地。在 20 cm 以下坡耕地和自然草地的全钾含量基本相等。剖面上,林草地的速效钾含量变化幅度较大,在 40 cm 以下趋于一致,农田的变化幅度小,水平梯田和坡耕地的含量大小几乎相等。同一土层速效钾含量的大小变化次序为:水平梯田>坡耕地>刺槐林地>自然草地。

4 结 论

综合分析可知,由于林地通常分布在坡度较缓处,改良土壤作用明显;天然草地一般坡度陡,且地面破碎,重力侵蚀活跃,不利于物质积累;而农田由于人们重收轻养,导致土壤养分含量明显不足。不同土地利用土壤养分含量不同,基本呈现林草地高于农地的特色。

在相同土层,林草地氮素养分含量比农田氮素高,尤以表层为甚。而磷素和钾素的含量则农田大于林草地,以表层以下表现最为明显。在土壤剖面上,表层土壤养分含量最高,并呈现出随着剖面深度的增加,养分含量降低的规律。农田养分在剖面上降幅小,林草地养分含量的变幅较大。

由于泥河沟流域地形比较复杂,我们在土地利用与经营管理上应该因地制宜,发展多种经营,既有利于改良土壤又可增加农民的经济收入。除此外,由

于土壤养分循环属开放系统,自我恢复缓慢,从环境改良和发展生产的要求出发,还需要加大物质、能量的输出,使土壤质量跃上一个新水平。

因而,发展多种经营,增加农民经济收入,是“山川秀美”和西部大开发需要解决的重大课题。

[参 考 文 献]

- [1] 朱显谟. 黄土高原区的自然保护[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 2—40.
- [2] 洪岭, 梁一民, 等. 不同牧草对黄土丘陵区土壤培肥效果的研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(4): 12—15.
- [3] 刘明义, 张德元, 等. 林地带状混作沙打旺对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 1990, 4(2): 89—92.
- [4] 王进鑫, 余清珠, 等. 人工刺槐改造更新林地土壤理化性质的变化及肥力评价[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(S1): 47—52.
- [5] 朱显谟. 径河流域土壤侵蚀情况的区划[J]. 土壤专报, 1995, (28): 45—56.
- [6] 李瑞雪, 薛泉宏, 等. 黄土高原沙棘、刺槐人工林对土壤的培肥效应及其模型[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 14—21.
- [7] 沈慧, 姜凤岐, 等. 水土保持林土壤肥力及其评价指标[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 60—65.
- [8] 刘方, 黄昌勇, 等. 黄壤旱坡地梯化对土壤磷素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 75—78.
- [9] 王百群, 刘国彬, 张成娥. 黄土丘陵区坡地土壤养分及其生产力的空间变异性[J]. 水土保持通报, 2000, 20(7): 70—73.
- [10] Stone J. R., Gilliam J W., Casse D K, et al. Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1985, 49(4): 987—991.
- [11] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1—5.
- [12] 张春霞, 郝明德, 王旭刚, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分分布特征[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 78—80.

(上接第 22 页)

[参 考 文 献]

- [1] 孙西欢. 蓄水坑灌法及其水土保持作用[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 130—131.
- [2] Warrick, A. W. and Yeh, T. - C. J., 1991. One dimensional, steady vertical flow in a layered soil profile. Adv. Water Resour., 13: 207—210.
- [3] Lakshman Nandagiri and Rama Prasad, 1997. Relative performances of textural models in estimating soil moisture characteristic, J. Irrig. Drain. Engrg., 123(3), 211—214.
- [4] 王晓燕, 高煊文, 杜兵, 等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(6): 42—47.
- [5] 沈晋, 王文焰, 沈冰. 动力水文实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社. 1991. 7.
- [6] 马娟娟, 孙西欢. 均质土非恒定水位单坑入渗的分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 132—134.