

doi: 10.11707/j.1001-7488.20130604

滴灌条件下杨树人工林土壤的水分运移*

傅建平¹ 兰再平¹ 孙尚伟¹ 刘俊琴¹ 张 勇²

(1. 中国林业科学研究院世界银行项目办公室 北京 100091; 2. 大兴区林场 北京 102602)

摘 要: 采用田间土壤剖面观测法,对北京永定河故道沙地上地表滴灌栽培的杨树人工林的土壤水分运移规律进行研究,在滴头流量恒定为 $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下,试验和测定不同滴灌时长和停灌后土壤湿润锋的运移距离和土壤湿润体的形态。结果表明:土壤湿润锋随着滴灌时长的增加在垂直和水平方向上的运移距离逐渐增大,每增加 1 h 滴灌时长,土壤湿润锋的垂直运移距离的增幅逐渐减小,水平运移距离的增幅则大小不一;在各时长滴灌停灌后,土壤湿润锋将继续在垂直方向和水平方向上运移 1~3 h,在垂直方向上的继续运移距离为 2~10 cm,除在土壤最深处的水平继续运移距离明显较大外,在各土壤深处水平方向上的继续运移距离为 1~10 cm;在持续滴灌 1~6 h 后,土壤湿润锋最终可以垂直运移到 36~69 cm,水平运移到 32~57 cm,持续滴灌 3~4 h 后即可在 0~40 cm 土层内形成以滴头为圆心,半径 30~40 cm 的土壤湿润体;持续滴灌 1~3 h 后土壤湿润体形态为逐渐增大的扁半球体,持续滴灌 4~6 h 后土壤湿润体形态为逐渐增大的长半球体。

关键词: 杨树人工林;滴灌;土壤水分运移;土壤湿润锋;土壤湿润体

中图分类号: S725.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7488(2013)06-0025-05

Soil Water Movement in a Poplar Plantation under Drip Irrigation

Fu Jianping¹ Lan Zaiping¹ Sun Shangwei¹ Liu Junqin¹ Zhang Yong²

(1. World Bank Loan Project Office, CAF Beijing 100091; 2. Forest Farm of Daxing District Beijing 102602)

Abstract: In this paper, we studied the patterns of soil water movement in poplar plantation with a ground drip irrigation system on sandy land of ancient Yongding River in Beijing by observing soil profile in the field. We measured the movement distance of wet soil front and the shape of wet soil body under condition of various durations of drip irrigation with a constant flow rate of $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$. The results showed that: the movement distance of wet soil front in the vertical and horizontal directions increased with increased duration of drip irrigation. The increment of wet front movement distance in vertical direction decreased, while the increment of wet front movement distance in horizontal direction varied in a given range, with each 1 hour increase of irrigation time. the movement of wet soil front continued to migrate for 1~3 h in the vertical and horizontal directions for 1~3 h with the movement distance of 2~10 cm in vertical direction and 1~10 cm in horizontal direction at various soil depths except for at the deepest soil layer that was significantly larger than other soil depths, after stopping drip irrigation with various irrigation durations. The wet soil front moved to the end 36~69 cm in vertical direction and 32~57 cm in horizontal direction after drip irrigation for 1~6 h, while a wet soil body with a radii of 30~40 cm around the dripper at soil layers of 0~40 cm formed after drip irrigation for 3~4 h. After drip irrigation for 1~3 h, the wet soil body was gradually developing into an oblate ellipsoid, while the wet soil body developed into an prelate ellipsoid after drip irrigation for 4~6 h.

Key words: poplar plantation; drip irrigation; soil water movement; wet soil front; wet soil body

近 30 年来,世界上已有越来越多的国家采用滴灌技术培育高产人工林,以达到节约水资源、提高水资源利用率和林地生产力的目的(Arnold *et al.*, 1999; Shrive *et al.*, 1994; 贾黎明等, 2005; 李应海

等, 2009)。滴灌是根据作物需水规律进行局部灌溉的现代节水灌溉技术,它仅对根系分布层土壤进行灌溉(Charles, 2004; Barragn *et al.*, 2006)。在滴灌条件下,作物从滴灌产生的土壤湿润体内吸收水

收稿日期: 2013-01-30; 修回日期: 2013-05-16。

基金项目: 国家林业局引进国际先进林业科学技术项目“速生丰产林自动化节水灌溉与高效栽培管理技术引进”(2009-4-48)。

* 兰再平为通讯作者。

分和养分,滴灌后形成的土壤湿润体大小和形状对作物生长和发育起着决定性的作用。因此,研究滴灌条件下土壤水分运移规律,揭示土壤湿润体形成的时空变化格局,是设计滴头间距和制定灌溉制度的重要依据。

目前,大多数学者采用实验室模拟法研究滴灌条件下的土壤水分运移规律,在实验室用土箱观察滴灌过程中和停灌后土壤水分的运移规律(Caldwell *et al.*, 1994; 李道西等, 2004); 也有少数学者采用田间试验法研究土壤水分的运移规律,通过开挖土壤剖面观察滴灌过程中和停灌后土壤水分的运动(王治军等, 2008; 赵颖娜等, 2010)。迄今为止,采用田间试验法对滴灌栽培人工林土壤水分运移规律的研究国内未见报道。本研究采用田间试验法,对北京永定河故道沙地上地表滴灌栽培的杨树人工林的土壤水分运移规律进行研究,试验和测定不同灌溉时长和停灌后土壤湿润锋的运移距离和土壤湿润体的形态。为运用地表滴灌系统在河流故道沙地上培育高产人工林提供必要的理论依据和技术参数。

1 研究区概况

研究区位于北京市大兴区林场永定河故道沙地,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均日照时数 2 620.4 h, 年均气温 11.6 °C, 冬季平均气温 -2.3 °C, 夏季平均气温 25.1 °C, 年平均降水量 552.9 mm, 全年无霜期 180—200 天, 试验地土壤为风沙土, 质地为细沙, 厚度达 5 m 以上, 地下水位深 36 m, 田间持水量为 $10\% \pm 1.2\%$; 密度为 $1.46 \pm 0.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

该试验地于 2011 年春季安装了自动化地表滴灌系统, 并采用欧美杨 107 无性系 (*Populus × euramericana* cv. '74/76') 30 cm 长的插条进行扦插造林, 株行距为 2 m × 4 m, 滴灌毛管沿树行铺设, 在生长季内通过滴灌系统对新造林进行灌溉与施肥管理。到 2012 年 10 月, 杨树人工林平均高 7.2 m, 平均胸径 6.2 cm, 对该林分根系的调查结果表明林分绝大多数侧根特别是吸收根分布在 0 ~ 40 cm 土层内。

2 研究方法

本研究于 2012 年 10 月在上述试验地进行。

2.1 土壤剖面调查

在上述试验地内, 采用机械抽样法选择 5 个点, 在每个点上开挖宽 3 m, 深 1.2 m 的土壤剖面, 调查土壤的机械组成和结构, 结果表明, 5 个调查地点的土壤性质基本相同。因此, 设置一个土壤

剖面观测坑开展滴灌试验, 就足以代表本试验地的实际情况。

2.2 设置土壤剖面观测坑

在杨树人工林行间沿滴灌毛管挖一观测坑, 观测坑长 3 m, 宽 1.5 m, 深 1.2 m, 使观测坑长边距离滴头 10 cm, 滴头流量恒定为 $4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 灌溉处理

采用自动化滴灌系统进行不同灌溉时长的 6 个处理: 持续灌溉 1 h; 持续灌溉 2 h; 持续灌溉 3 h; 持续灌溉 4 h; 持续灌溉 5 h; 持续灌溉 6 h。

2.4 观测方法

在进行每个灌溉处理试验时, 采用卷尺测量滴灌过程中以及停灌后土壤剖面上湿润锋的垂直运移距离和在距地表 0, 10, 20, 30, 40, 50 和 60 cm 处的水平运移距离半径(以下简称“水平运移距离”)。在灌溉过程中和停灌后每间隔半小时测量一次, 直到湿润锋停止运移为止。

3 结果与分析

3.1 不同灌溉时长灌溉过程中湿润锋的运移距离

在分别持续灌溉 1, 2, 3, 4, 5 和 6 h 过程中, 土壤剖面上的湿润锋会连续向垂直方向和水平方向运移。各灌溉时长处理土壤湿润锋在垂直方向和水平方向不同土壤深度运移的距离见图 1。

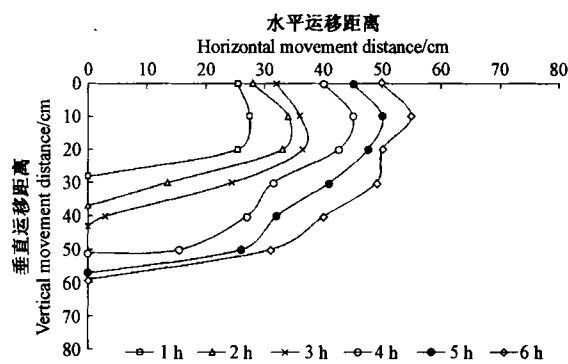


图 1 不同灌溉时长灌溉过程中湿润锋在垂直方向和水平方向的运移距离

Fig. 1 Movement distance of wet front in vertical direction and horizontal direction during drip irrigation of various time

由图 1 可见: 1) 在分别持续灌溉 1, 2, 3, 4, 5 和 6 h 后, 停灌时土壤湿润锋分别下渗到 28, 37, 43, 51, 57 和 59 cm 深的土壤中, 土壤湿润锋垂直运移的距离随灌溉时长的增加而增加, 而从持续灌溉 1 h 到持续灌溉 6 h, 每增加 1 h 灌溉时长土壤湿润锋下渗距离的增幅却逐渐减小; 2) 从持续灌溉 1 h 到持续灌溉 6 h, 随着灌溉时长的增加土壤湿润锋在不同土深处的水平运移距离也逐渐增加, 而每增加 1 h

灌溉时长土壤湿润锋在不同土壤深处的水平运移距离的增幅不同;3)从持续灌溉 1 h 到持续灌溉 6 h 停灌时,土壤湿润锋在各土深处的最大水平运移距离都出现在 10 cm 层,分别为 28,34,37,45,50 和 55 cm;4)从持续灌溉 1 h 到持续灌溉 6 h,在相同灌溉时长情况下,停灌时土壤湿润锋的垂直运移距离均大于最大水平运移距离,且从持续灌溉 1 h 到持续

灌溉 3 h,两者差距呈逐渐增大趋势,从持续灌溉 3 h 到持续灌溉 6 h,两者差距变化较小。

3.2 不同灌溉时长停灌后湿润锋的继续运移时间

在分别持续灌溉 1,2,3,4,5 和 6 h 停灌后,土壤剖面上的湿润锋会继续向垂直方向和水平方向运移。各灌溉时长处理停灌后土壤湿润锋在垂直方向和水平方向继续运移的时间见表 1。

表 1 不同灌溉时长停灌后湿润锋的继续运移时间

Tab. 1 Movement duration of wet front after stopping drip irrigation of various time length

灌溉时长 Time length of drip irrigation /h	停灌后继续垂直运移时间 Movement duration in vertical direction after stopping irrigation/h	停灌后继续水平运移时间 Movement duration in horizontal direction after stopping irrigation/h						
		0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
1	2	1	2	2	2	-	-	-
2	1	1.5	2	2	2	2	-	-
3	2	1.5	1.5	2	2.5	2.5	-	-
4	1.5	1	1.5	1	1.5	1.5	1.5	-
5	2	1	1	2	2	1.5	1.5	2
6	3	1.5	1.5	1	2	2	2.5	2.5

从表 1 中可以看出:1)各灌溉时长处理在停灌后,土壤湿润锋继续向垂直方向运移的时间为 1~3 h,而且停灌后在垂直方向上继续运移的时间长度与灌溉持续时间长度无相关性;2)各灌溉时长处理在停灌后,土壤湿润锋继续向水平方向运移的时间为 1~2.5 h,而且停灌后在各水平方向上不同土壤深度

的运移时间长度与灌溉持续时间长度无相关性。

3.3 不同灌溉时长停灌后湿润锋的继续运移距离

在分别持续灌溉 1,2,3,4,5 和 6 h 停灌后,土壤剖面上的湿润锋会继续向垂直方向和水平方向运移。各灌溉时长处理停灌后土壤湿润锋在垂直方向和水平方向继续运移的距离见表 2。

表 2 不同灌溉时长停灌后湿润锋的继续运移距离

Tab. 2 Movement distance of wet front after stopping drip irrigation of various time length

灌溉时长 Time length of drip irrigation/h	停灌后继续垂直运移距离 Movement distance in vertical direction after stopping irrigation/cm	停灌后继续水平运移距离 Movement distance in horizontal direction after stopping irrigation/cm						
		0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
1	8	3.5	4.5	5.5	11	-	-	-
2	2	10	6	3	14.5	-	-	-
3	7	8	7	3.5	8	21	-	-
4	9	1.5	2	1	3.5	4	12	-
5	7	1	1	1.5	2	6.5	5	17
6	10	2	2	2.5	3	8	6	23

从表 2 中可以看出:1)各灌溉时长处理在停灌后,土壤湿润锋继续向垂直方向运移的距离为 2~10 cm,而且停灌后在垂直方向上继续运移的距离与灌溉时长无相关性;2)在持续灌溉 1~6 h 的条件下,停灌后在土壤最深层的湿润锋水平运移距离明显大于其他各层的水平运移距离,分别继续运移了 11,14.5,21,12,17 和 23 cm,其他土壤深度的水平运移距离均为 1~10 cm;3)在相同灌溉时长条件下,如果不考虑土壤最深层的湿润锋水平运移距离,当灌溉时长为 1~3 h,停灌后土壤湿润锋在不同深度的水平运移距离相近;当灌溉时长为 4~6 h,停灌后土壤湿润锋在 0~30 cm 深处的水平运移距离

半径较小,在 40~60 cm 深处的水平运移距离半径则显著增大。

3.4 不同灌溉时长土壤湿润锋的最终运移距离

滴灌停止后,土壤湿润锋的最终运移距离是体现灌溉结果的重要指标,对科研和生产都具有很高的参考价值。本试验中,分别持续灌溉 1,2,3,4,5 和 6 h 后,土壤湿润锋从起灌到灌后停止运移时的最终垂直和水平运移距离见图 2。

从图 2 中可以看出:在分别持续灌溉 1,2,3,4,5 和 6 h 后,土壤湿润锋最终分别下渗到 36,39,50,60,64 和 69 cm 深的土壤中,土壤湿润锋的最终垂直运移距离随灌溉时长的增加而增加。从持续灌溉

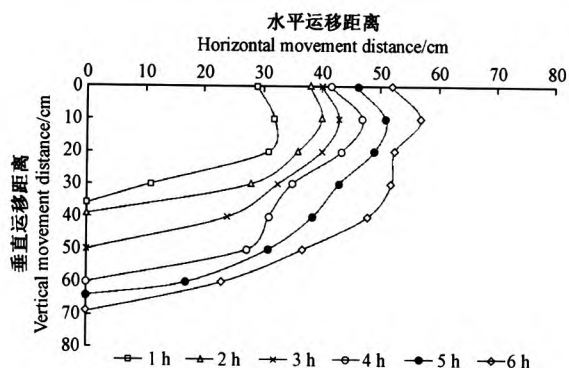


图2 不同灌溉时长土壤湿润锋最终在垂直方向
和水平方向的运移距离

Fig. 2 Final movement distance of wet front in vertical
direction and horizontal direction after drip
irrigation of various time length

1 h到持续灌溉6 h,随着灌溉时长的增加土壤湿润锋最终在不同土壤深处的水平运移距离也逐渐增加。持续灌溉1 h,土壤湿润锋在0~30 cm土层内最终水平运移距离分别为29,32,31和11 cm;持续灌溉2 h,土壤湿润锋在0~30 cm土层内最终水平运移距离分别为38,40,36和28 cm;持续灌溉3 h,土壤湿润锋在0~40 cm土层内最终水平运移距离分别为40,43,40,33和24 cm;持续灌溉4 h,土壤湿润锋在0~50 cm土层内最终水平运移距离分别为42,47,44,35,31和28 cm;持续灌溉5 h,土壤湿润锋在0~60 cm土层内最终水平运移距离分别为46,51,49,43,39,31和17 cm;持续灌溉6 h,土壤湿润锋在0~60 cm土层内最终水平运移距离分别为52,57,53,52,48,37和37 cm。从持续灌溉1 h到持续灌溉6 h后,土壤湿润锋最终在各土壤深处的最大水平运移距离都出现在10 cm层,分别为32,40,43,47,51和57 cm,都小于相同灌溉时长的最终垂直运移距离。

3.5 不同灌溉时长形成的土壤湿润体形态

各灌溉时长形成的土壤湿润体形态见图3。

从图3中可以看出:灌溉1 h最终形成的土壤湿润体为上部圆台体和下部圆锥体的组合体,灌溉2 h最终形成的土壤湿润体为椭球体,滴灌3 h最终形成的土壤湿润体为上部圆台体和下部半椭球体的组合体,滴灌4 h最终形成的土壤湿润体为2个圆台体的组合体,滴灌5 h最终形成的土壤湿润体为上部圆台体和下部半球体的组合体,滴灌6 h最终形成的土壤湿润体为上部圆台体和下部圆锥体的组合体;从土壤湿润体形态的整体轮廓来看,持续灌溉1~6 h最终形成的土壤湿润体的形态轮廓随着持续灌溉时间的增加,由一个逐渐增大的扁半球

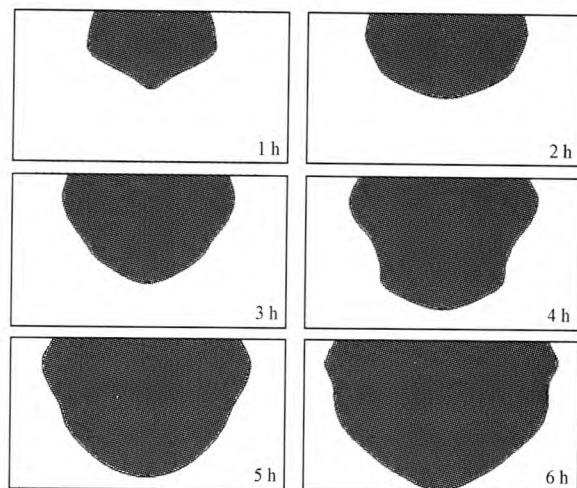


图3 不同灌溉时长形成的土壤湿润体形态

Fig. 3 Shape of wet soil body formed after drip irrigation
of various time length

体变为一个逐渐增大的长半球体。

4 结论与讨论

本研究采用流量恒定为 $4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滴头进行滴灌试验,在各灌溉时长所导致的土壤湿润锋运移范围和形成的土壤湿润体形态与树木根系的分布范围和形态特征相吻合(张良德等, 2011; 云雷等, 2012),说明在河流故道细沙土壤上设计地表滴灌系统时采用流量恒定为 $4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滴头比较适宜。

从各滴灌时长最终在不同土壤深处产生的土壤湿润锋水平运移距离可知,对于根系主要分布在0~40 cm土层的人工林而言,地表滴灌带上的滴头间距应该在60~80 cm为宜,以保证滴头半径为30~40 cm,从而确保在滴灌时短时间内就能在根系主要分布土层内形成土壤湿润带。

如果采用30 cm长的插条直接在河流故道细沙土壤上营造杨树人工林,在造林后初期滴灌1~2 h所形成的土壤湿润体,就能保证插条4周土壤湿润,满足插条对水分的需求。造林1~2个月后,当插条上的不定根生长长度超出20~30 cm时则需要持续灌溉3 h左右,使0~30 cm深的土壤形成湿润带,以保证根系的正常生长。

对于杨树、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种的优良无性系,采用扦插苗营造的人工林根系特别是吸收根主要分布在0~40 cm深的土层内(燕辉等, 2009; 张鹏等, 2008),每次持续滴灌3~4 h即可保证在0~40 cm土层内形成土壤湿润带,满足林分的生长需要。对大多数造林树种而言,采用实生苗营造的人工林根系可能分布到更深的土层内,则需要每次持续滴灌3 h以上,这样才能使40 cm以

下土层形成土壤湿润带,满足林分生长需要。

在持续滴灌 1~3 h 后形成的类似扁半球体的土壤湿润体与扦插苗造林树木的根系分布形态相似,这类树木的根系无明显主根,侧根发达,并主要分布在浅层土壤中;在持续滴灌 4~6 h 后形成的类似长半球体的土壤湿润体与实生苗造林树木的根系分布形态相似,这类树木的根系有明显主根,侧根相对不发达,并在土壤中由浅到深均有分布。因此可根据造林树种的根系分布特征来确定每次持续滴灌的时长。

本研究仅对滴灌条件下杨树人工林土壤水分在垂直和水平方向上的运移进行了研究,今后尚需对滴灌条件下杨树人工林土壤水分含量的变化规律进行研究,从而全面揭示滴灌对杨树人工林土壤水分状况的影响。

参 考 文 献

- 贾黎明,邢长山,李景锐,等. 2005. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林生产力及效益分析. 北京林业大学学报,6(27): 43-49.
- 李道西,罗金耀,彭世彰. 2004. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究. 灌溉排水学报,23(4): 26-28.
- 李应海,杨玉英. 2009. 叶中高速公路立交区桧柏滴灌节水灌溉制度试验研究. 宁夏工程技术,8(4): 361-362.
- 王治军,雒天锋. 2008. 滴灌条件下侧柏林地根区土壤水分运动规律研究. 干旱地区农业研究,4(26): 13-16.
- 燕 辉,苏印泉,朱昱燕,等. 2009. 秦岭北坡杨树人工林细根分布与土壤特性的关系. 南京林业大学学报:自然科学版,33(2): 85-89.
- 云 雷,毕华兴,马雯静,等. 2012. 晋西黄土区林草复合系统刺槐根系分布特征. 干旱区资源与环境,26(2): 151-155.
- 张良德,徐学选,胡 伟,等. 2011. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征. 林业科学,47(11): 31-36.
- 张 鹏,兰再平,马 可. 2008. 窄冠刺槐根系的研究. 林业科学研究,21(4): 516-522.
- 赵颖娜,汪有科,马理辉,等. 2010. 原状土滴灌条件下水分再分布过程研究. 灌溉排水学报,29(2): 44-49.
- Arnold R J, Bacca M J, Clark N. 1999. Commercial irrigated *E. camaldulensis* plantations and Californian experience and its applicability in Australia. Australian Forestry, 62(2): 154-159.
- Barragn J, Bralts V, Wu I P. 2006. Assessment of emission uniformity for micro-irrigation design. Biosystems Engineering, 93(1): 89-97.
- Caldwell D S, Spurgeon W E, Manges H L. 1994. Frequency of irrigation for subsurface drip irrigated corn. Trans of the ASAE, 37(6): 1099-1103.
- Charles M B. 2004. Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity. Irrigation and Drainage Systems, 18(4): 275-297.
- Shrive S C, Bride R A Mc, Gordon A M. 1994. Photosynthetic and growth responses of two broad-leaf tree species to irrigation with municipal land fill leachate. Environ Qual, 23(3): 534-542.

(责任编辑 于静娴)