

# 半干旱区人工林地土壤入渗过程分析\*

郭忠升 邵明安

(西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

## SOIL WATER INFILTRATING PROCESS IN AFFORESTED LAND ON SLOPES OF THE SEMI ARID REGION OF LOESS PLATEAU

Guo Zhongsheng Shao Mingan

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Chinese Academy of Science, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

关键词 人工林地; 土壤入渗; 入渗深度; 入渗量; 确定方法  
中图分类号 S152.7 文献标识码 A

森林是陆地生态系统最高大的植物群落,是维护陆地生态系统平衡的主要力量。穿过林冠到达地表面的雨水,要么通过空隙进入土壤形成土壤水,要么沿坡面流失形成地表径流。进入土壤的水分,或存储在土体内供植物吸收和利用,或在垂直入渗过程中改变方向形成壤中流,或穿过土层形成深层渗漏补给地下水。近年来,黄土高原大部分地区人工林地林水关系失调,在多年生人工林草地出现了以土壤旱化为主要特征的土壤退化现象。由于黄土高原大部分人工林地的地下水埋藏较深,水资源缺乏,无灌溉条件,因此林地土壤水分主要依靠天然降雨补给,林水关系调控只能依据土壤水分补给和存储情况决定。目前,根系利用土层土壤水分与植物生长的动态关系又成为生态需水研究的一个核心问题<sup>[1]</sup>。因此研究半干旱地区人工林地土壤入渗过程,确定土壤水分入渗深度和入渗量,对于可持续利用土壤水资源,防治土壤旱化,改善土壤水分与植被生长关系均具有重要意义。

测定土壤入渗的方法有直接测法和间接测定法。刘向东等采用流水型下渗仪,测定了宁夏南部的六盘山区主要森林植被类型原状土入渗速率<sup>[2]</sup>。双环入渗仪<sup>[3]</sup>是国内外常用的一种测定入渗的方法。但是这种方法不能用于山坡地。在双环入土

时,对土壤,特别是表层土壤产生破坏作用,使测出的入渗性能远小于真实的土壤入渗性能。同时,双环入渗为有压入渗,不能研究土壤初始入渗过程。周择福等根据 Darcy 定律和能量守恒原理推导出了土壤水分入渗的基本规律,并采用水平土柱法实测了模型中的基本运动参数,模拟了林地的土壤水分入渗过程<sup>[4]</sup>,蒋定生等<sup>[5]</sup>、杨文治等<sup>[6]</sup>报道了黄土高原土壤水分入渗速率的水平与垂直变化规律。李雪峰等<sup>[7]</sup>采用蒸渗仪(蒸渗仪内设有中子仪测管和负压计),研究了降水入渗过程中不同时间入渗锋面演变情况。吴钦孝等<sup>[8]</sup>采用环刀法研究了黄土丘陵区小流域土壤水分入渗速率。李毅等<sup>[9]</sup>采用人工模拟降雨实验研究了人工草地盖度、雨强、土壤质地等因素对黄土坡面降雨入渗规律的影响。雷廷武等<sup>[10]</sup>探讨了坡地土壤入渗量的测定方法,王孟本等<sup>[11]</sup>、黄明斌<sup>[12]</sup>、李玉山<sup>[13]</sup>等研究了林地最大入渗深度。

近年来,土壤水分入渗的室内研究报道较多,而对野外条件下田间土壤水分入渗深度和入渗量的研究报道较少。野外条件比较复杂,室内的测定方法和结果不能用于野外。因此必须探讨野外条件土壤水分入渗深度和入渗量的确定方法,以便了解林地土壤水分补给、储存及其土壤水分承载

\* 国家科技支撑计划(2006BAD09B08)、国家自然科学基金重点项目(30230290)、中国科学院水土保持研究所领域前沿项目(SW05111)资助

作者简介:郭忠升(1963~),男,陕西富平人,博士,主要研究森林生态、森林水文与水土保持等。E-mail: zhongshenguo@sohu.com

收稿日期:2007-12-05;收到修改稿日期:2008-11-11

植被的能力,为改善生态环境,可持续利用水资源提供依据。本文试图在对林地土壤水分进行野外定位观测和对测定结果进行分析的基础上,提出简便的林地土壤水分入渗深度和入渗量的确定方法。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

实验地位于黄土丘陵半干旱区的上黄生态试验站(宁夏固原),该站位于  $35^{\circ}59' \sim 36^{\circ}02' N$ ,  $106^{\circ}26' \sim 106^{\circ}30' E$ 。区内沟沿线以上坡度为  $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ;海拔高度约  $1534 \sim 1824$  m。年降雨量变化在  $634.7$  mm (1984)  $\sim 259.9$  mm (1991),平均为  $414.9$  mm,降水年变率为  $24.6\%$ 。无霜期  $152$  d,土壤为黄绵土,植被类型为森林草原。实验林地位于黑刺岭东坡中部,坡度为  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ;海拔约  $1650$  m。研究对象为多年生人工柠条林,16年生,密度为  $8700$  丛  $hm^{-2}$ ,平均冠幅  $102.9$  cm  $\times 87.2$  cm,高  $103.3$  cm,地径  $11.2$  mm,分枝数  $34$  个。林下草本植物有长芒草 (*Stipa bungeana*)、阿尔太狗娃花 (*Heteropappus attenuatus*)、芨芨草 (*Artemisia giraldii*)、百里香 (*Thymus mongolicus*) 等。

### 1.2 观测项目与测定方法

气象资料来源于上黄简易气象站,海拔  $1602$  m。实验地在气象站西北,相距  $50$  m。

野外测定项目包括根系分布深度、降雨量、土壤水分和植物生长。试验地为一个东偏南的缓坡,坡度约  $10^{\circ}$ 。采用挖掘剖面法研究根系分布深度。在试验地附近,挖一  $4$  m 深的土壤剖面,发现实验林地土壤质地比较均一。在剖面中部 ( $180$  cm 和  $200$  cm 处)用环刀取原状土,在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室采用离心机法测定土壤水分特征曲线。

在柠条林内安置微型雨量器并建立  $20$  m  $\times 5$  m 的标准径流观测场。在径流场中心地带安置两个相距  $1$  m 的  $4$  m 长的中子仪铝合金套管,采用 CNC503A (DR) 型智能中子水分仪测定剖面土壤水分<sup>[14]</sup>。测定前对中子仪进行了标定,标定方程为:  $y = 55.76x + 1.89$ ,式中  $y$  为容积含水量,  $x$  为中子仪读数。测定时,每  $20$  cm 记录一次,中子计数时间为  $16$  s,测定深度为  $0 \sim 400$  cm。土壤水分测定采用定期和不定期测定。定期测定每年从柠条开始发芽展叶的  $4$  月中旬开始,至落叶 ( $10$  月),每隔  $15$  d 测

定一次。另外,根据天气预报,非定期的进行降雨前和降雨后林地土壤水分观测。

2002年4月15日在人工柠条林地进行连续降雨条件模拟下的土壤入渗试验。在实验场上方安置一个直径  $80$  cm,高  $110$  cm 的水桶,盛满水。选一代表性的样丛,从基部伐去植株的地上部分,在样丛中心 ( $0$  点)和东南西北  $4$  个方向距中心  $0.5$  m 和  $1.0$  m 处分别安置  $4$  m 长的铝合金套管。以样丛为中心围成直径为  $30$  cm,高  $10$  cm 土垄。用内径为  $4.7$  mm 的虹吸管从水桶向入渗区吸水并控制流量,使土坑内一直保持有薄层 ( $0.5 \sim 1.0$  cm) 水面。实验于  $4$  月  $15$  日下午  $13$  时  $20$  分开始,  $23$  日  $16$  时  $20$  分停止供水,入渗试验持续了  $8$  d。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水分特征曲线

通过对  $180$  cm 和  $200$  cm 土层容积含水量 (%) 与水吸力关系分析,发现由于土壤剖面结构比较均一,两层土壤容积含水量的关系近似线性函数关系,  $y_{i-1} = 1.067 y_i - 1.951$ ,式中  $y_{i-1}$  表示下层土壤容积含水量,  $y_i$  表示上层容积含水量,  $R^2$  为  $0.9992$ ,  $n = 10$ ;土壤容积含水量 (%) 与水吸力关系可用经验公式  $Y = aX^b$  进行描述。土壤容积含水量 (%,) 与水吸力 (Pa) 的关系为 ( $R^2 = 0.9176$ ):

$$= 16.226 \cdot X^{-0.2746}$$

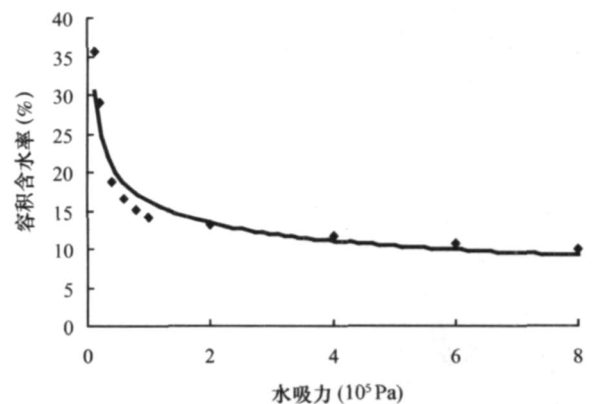


图 1 人工林地土壤水分特征曲线

根据实测结果,基质吸力  $1 \times 10^4$  Pa 时实验地土壤的最大持水量为  $35.73\%$  (容积含水量,下同)。黄土高原田间持水量时的基质吸力变化在  $1 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$  Pa<sup>[5]</sup>,相应的田间持水量实测值为  $35.73\% \sim 16.47\%$ ,实测值和模拟值相差较大。基

质吸力为  $1 \times 10^5$  Pa时的毛管断裂湿度为 14.1%,土壤水分与水吸力关系方程的拟合值为 16.2%。从图 1可以看出,在低吸力范围 ( $< 2 \times 10^5$  Pa),实测值与拟合值相差较大,在高吸力范围 ( $2 \times 10^5$  Pa),随着基质吸力增加,土壤水分的测定值与拟合值非常接近。据此预测,当基质吸力为  $1.5 \times 10^6$  Pa时,林地土壤水分的萎蔫系数估算值约为 8.6%。

### 2.2 人工模拟入渗深度与入渗量随时间的变化

人工模拟入渗过程中原点剖面土壤水分随时间变化如图 2所示。从图 2可以看出,受人工柠条林长期生长的影响,林地剖面土壤含水量较低(见入渗前土壤水分垂直分布)。随着人工模拟入渗时间的推移,深层土壤容积含水量逐渐增加,入渗深度和入渗量逐渐增加,这与李雪峰等<sup>[6]</sup>报道的结果相同。这样可以根据林地剖面土壤水分动态变化,

确定土壤水分最大入渗深度。根据人工模拟入渗实验数据分析,土壤水分最大入渗深度为 160 cm,代表土层深度为 150~170 cm,即土壤水分最大入渗深度为 170 cm。在入渗过程中,土壤最大含水量出现在 40 cm 土层,数值为 29.8%,该数值小于实验室内测定的结果。在样株东向距中心 50 cm 处入渗前和入渗 192 h 后剖面土壤水分随深度变化见图 3。在人工入渗试验期间,在不同方向距原点不同距离处的最大入渗深度是不同的:东向(下坡)50 cm 和 100 cm 处土壤入渗深度为 130 cm;南向 50 cm 处和西向 50 cm 处土壤入渗深度分别为 130 cm;北向 50 cm 处土壤入渗深度为 110 cm。由于试验地为面向东南的斜坡,黄绵土质地疏松、剖面结构均匀,受重力作用的影响,土壤入渗主要以垂直方向的入渗为主,无壤中流发生。

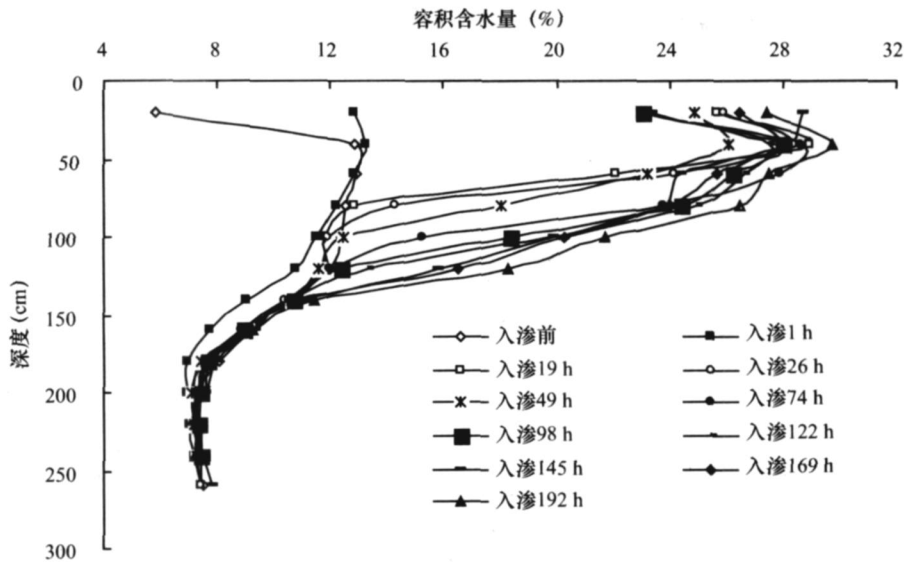


图 2 人工模拟入渗过程中林地剖面土壤水分动态变化

### 2.3 次降雨入渗深度与入渗量计算

天然状态下土壤水分入渗深度及其入渗量与立地条件(土壤质地和结构等)、降雨强度以及降雨量有关。在易变的环境中(立地条件确定),天然状态下土壤水分入渗取决于降雨强度和降雨历时。降雨强度随时间的分布可能均匀,也可能随机变化,因此人工模拟入渗试验中恒定补水速率不能真实反映自然条件下土壤水分入渗情况。但是通过对不同时间段剖面土壤水分状况的观测和分析,可以确定一定时期内土壤入渗深度和入渗量。如果事先测定了降雨前剖面土壤水分含量,就有可能确定次降雨土壤水分的补给量和入渗深度。在人工模拟试验积累经验的基础上,对试验样地降雨前后

剖面土壤水分状况进行了监测。根据当地天气预报,2002年 6月 20日有降雨,于是我们于 6月 20日上午 9时,对人工柠条林地剖面土壤水分进行了测定。6月 20日晚至 21日上午,试验地降了一场长历时的大雨,雨量为 49.5 mm,21日下午测定了不同处理雨后剖面土壤水分含量,降雨前后林地土壤剖面的水分状况见图 4。对降雨前林地剖面土壤含水量  $(x, 0)$  和降雨后  $(x, t)$  林地剖面土壤含水量变化情况进行分析,即可确定降雨入渗深度和入渗量(mm)。土壤水分入渗量  $(F_i, \text{mm})$ :

$$F_i = \int_0^l [(x, t) - (x, 0)] dx$$

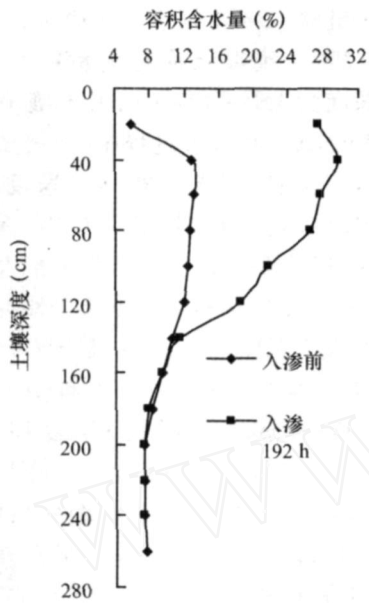


图3 中心处入渗深度

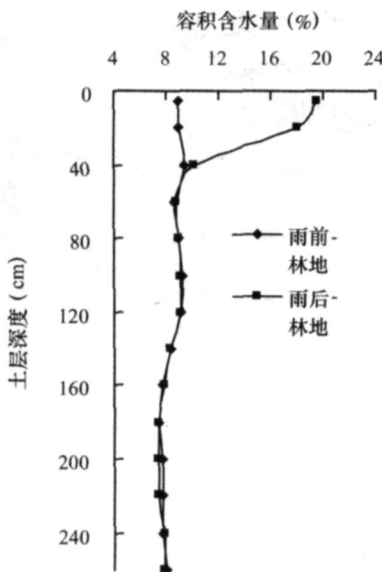


图4 降雨前后林地土壤水分

式中,积分的上限为  $l$ ,下限为  $0$ 。 $l$ 为入渗深度,即地表距降雨前后林地剖面土壤水分分布曲线的交点。实际计算中可以采用降雨前后剖面土壤水分储量的差值来方便地计算土壤水分入渗量。这样,根据当地天气预报和经验判断,如果预估某日有雨,那么预先测定剖面土壤水分,再测定雨后剖面土壤水分,根据前后两次测定的相同剖面土壤水分资料可确定土壤水分入渗深度和入渗量。由于中子仪测定的土壤容积含水量是半径约为 10 cm 的圆球体内土壤水分的平均含量,所以用中子仪测定降雨入渗深

度有一个误差,最大误差值约为 20 cm,所以用该方法不易获得较小降雨量时土壤水分入渗深度。

### 2.4 入渗深度随时间尺度的变化

降雨停止后,受重力、土壤基质吸力和土壤孔性的影响,进入土壤的水分不仅被植物根系吸收利用,而且随着时间的推移而发生变化,使得进入土壤介质的水分在土体内进行再分配。2002年6月20~30日降雨前后剖面土壤水分动态见图5。从图5可以看出,雨后,在土壤剖面的上层易形成“高含水”土层。这个“高含水”土层的土壤水分运动表现为两种相反方向的变化:一方面由于表土蒸发和根系吸水使该土层的土壤含水量逐步下降。与此同时,在高含水土层的下部分(湿润锋前沿),土壤含水量和水势较高,而下部相邻的较深土层土壤含水量和水势较低,水势差引起土壤水分的下移,使较深层次土壤含水量逐渐升高,湿润锋下移,入渗深度增加。随着时间的推移,在较深土层又形成了含水量较高的“高含水”土层。依次类推,入渗深度可能继续加深。由此可见,天然状态下,几次(间隔较短)的大雨过后,土壤入渗深度是逐渐增加,即降水后土壤水分最大入渗深度可能出现在几次较大连续降雨之后,特别是在气温较低、植物落叶以后这段时期。为了获得实验人工柠条林地土壤水分最大入渗深度,对2002~2006年降雨资料及其相应的人工林地剖面土壤水分动态测定资料的初步分析,发现土壤水分最大入渗深度可能出现在丰水年(2003年)过后的2004年。

2003年降雨量为 623.3 mm,接近有记录的最

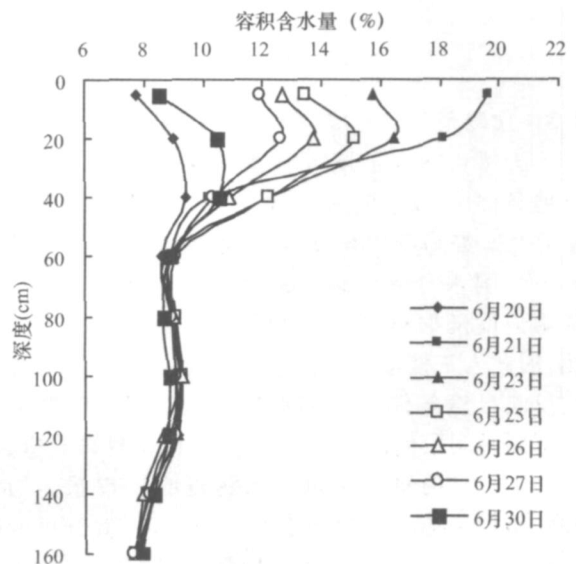


图5 连续降雨剖面土壤水分分布(2002年)

大降雨量 634.7 mm (1984年)。2003年 6月下旬至 2004年 7月底,逐日次降水量随时间的动态变化见图 6。从图 6中可以看出,土壤水分从 2003年 6月下旬至 8月间,试验地连续出现了降雨,其中几次较大的降雨量分别为:8月 1日降雨量为 55 mm, 25日降雨量为 45.7 mm, 26日为 56.4 mm。此时月均温度已越过 7月最高气温(月均 20.6), 8月份(平均温度为 17.9)气温逐渐降低。在 2003年 4月中旬柠条开始萌发时, 0~390 cm 土层储水量仅为 295.3 mm, 林地土壤干旱。6月份林地降雨补给量小于蒸散耗水量, 土壤水量平衡出现亏缺。受前期气候和土壤干旱的影响, 8~9月以后柠条提前落叶, 土壤蒸发和植物根系吸水急剧减少, 土体内湿润锋一直向下推移(见图 7), 入渗深度不断增加。根据 2003年 11月 1日土壤剖面观测资料分析, 湿润锋已下移至 200 cm 测定位置, 代表深度 210 cm。按照实验设计, 2003年 11月 1日是年该内的最后一次观测, 所以 2003年的最大入渗深度确定为 210 cm。实际上, 11月 1日以后, 降雨量稀少, 且多为无效降雨。气温和表层土壤温度较低, 而较深土层土壤温度较高, 湿润锋下移进程可能还在继续。通过对 2004年 4月 1日观测资料的分析, 湿润峰已经下移至 250 cm, 此时湿润锋前的土壤容积含水量已降至 9%左右。经过一段时间的徘徊之后, 到 5月 3日, 湿润锋又下移到 270 cm, 湿润锋前沿的土壤平

均容积含水量已降至 9%以下。这种较高含水土层一直持续到 7月 15日后, 虽然湿润锋土壤含水量低, 接近萎蔫系数, 湿润锋下移速度缓慢, 但是经过一个半月后, 湿润锋仍缓慢地地下移, 直至 2004年 8月 1日, 入渗深度已经达到 290 cm。这说明从一个较大的时间尺度来看, 由于半干旱区降雨的年内分布不均, 主要集中在 6~9月。如果前期遇到干旱胁迫, 植物较早落叶, 而雨季降雨量较大, 那么人工林地最大降水入渗深度不是出现在丰水年, 而是出现在丰水年过后的第二年(2004年), 尽管 2004年的降雨量仅为 328.3 mm。由于最大入渗深度未超过土壤水分测定厚度(0~390 cm), 所以在计算土壤水分补给深度、补给量, 研究土壤水分与植物生长的关系和土壤水分植被承载力时, 可以不考虑根层土壤水分的深层渗漏问题。该结果大于王孟本报道的晋西北黄土区柠条林地 120 cm 的入渗深度<sup>[11]</sup>, 属于李玉山报道的入渗范围<sup>[13]</sup>。另外通过对撂荒地剖面土壤水分测定结果的分析发现, 由于退耕多年的撂荒地植被稀疏, 生物量低, 植物根系分布较浅, 主要利用较浅土层的土壤水分, 单位面积耗水量少, 降雨前后剖面土壤水分一直维持在较高的水平, 即使遇到土壤干燥化, 也只能出现在浅土层, 一旦雨季来临, 土壤水分很快得到恢复。撂荒地能否采用该方法确定入渗深度和入渗量有待进一步研究。

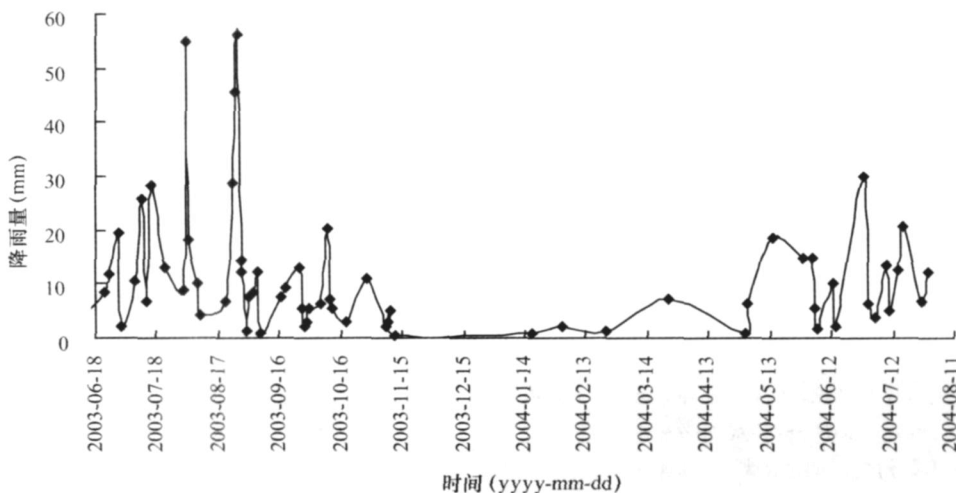


图 6 2003年 6月下旬至 2004年 7月下旬降雨量逐日分布图

从图 7可以看出, 林地剖面土壤水分最大值未达到 20%, 远低于人工模拟值 30% (见图 2), 虽然实验林地相同, 土壤结构相同, 但是由于天然状态下, 降雨量小且为脉冲降雨, 而模拟实验为连续 8天

的充分供水(供水速率等于入渗速率), 供水速率和时间的差异导致剖面土壤水分最大值的差异。因此在人工模拟入渗实验时, 要注意选用变供水速率测定最大入渗深度。

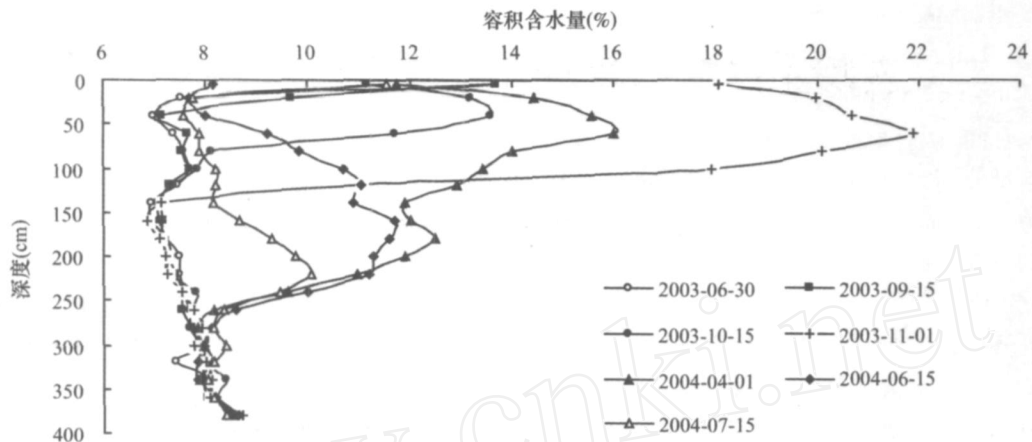


图 7 长时间序列林地土壤剖面水分的连续演变 (2003 ~ 2004 年)

## 4 小 结

在黄土高原半干旱地区水资源紧缺,大部分地区林地的地下水埋藏较深,且无灌溉条件,土壤水分主要依靠穿过林冠的天然降雨来补充。森林植被主要依靠根系从土壤中吸收液态水,因此研究半干旱区坡地人工林地剖面土壤水分动态变化规律,确定土壤水分入渗深度和入渗量对于可持续利用土壤水资源具有非常重要的价值。本文通过对人工林地剖面土壤水分的长期定位观测和对长时间序列定位观测资料的分析,提出了自然条件下土壤水分入渗深度和入渗量的简易确定方法。通过对多年生人工林地土壤水分最大入渗深度分析,发现半干旱区人工林地土壤水分最大入渗深度出现在丰水年过后的第 2 年,且最大入渗深度为 290 cm,这个发现对于野外土壤水分的测定,研究土壤水分与植物生长关系,确定土壤水资源可持续利用强度均具非常重要的意义。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 严登华,王浩,王芳,等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探. 水利学报, 2007, 38(3): 267 ~ 273
- [ 2 ] 刘向东,苏宁虎,吴钦孝,等. 六盘山森林保持水土生态功能

评价. 水土保持学报, 1987, 1(1): 90 ~ 97

- [ 3 ] Bouwer H. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: Klute A. Methods of Soil Analysis, Monograph No. 9. Madison: Am. Soc. Agron., 1986. 825 ~ 843
- [ 4 ] 周择福,洪玲霞. 不同林地土壤水分入渗和入渗模拟研究. 林业科学, 1997, 33(1): 9 ~ 16
- [ 5 ] 蒋定生,黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究. 土壤学报, 1986, 23(4): 299 ~ 305
- [ 6 ] 杨文治,邵明安编著. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000. 30 ~ 114
- [ 7 ] 李雪峰,李亚峰,樊福来. 降水入渗补给过程的实验研究. 南水北调与水利科技, 2004, (3): 40 ~ 42
- [ 8 ] 吴钦孝,韩冰,李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 1 ~ 5
- [ 9 ] 李毅,邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究. 农业工程学报, 2007(3): 18 ~ 23
- [ 10 ] 雷廷武,毛丽丽,李鑫,等. 土壤入渗性能的线源入流测量方法研究. 农业工程学报, 2007, 23(1): 9 ~ 13
- [ 11 ] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究. 生态学报, 1995, 15(2): 178 ~ 184
- [ 12 ] 黄明斌. 黄土区渭北旱原苹果基地对区域水循环的影响. 地理学报, 2001, 56(1): 7 ~ 12
- [ 13 ] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 6(5): 427 ~ 432
- [ 14 ] 王贵彦,史秀棒,张建恒,等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 23 ~ 26