

# 黄土丘陵区柠条林地土壤水分垂直变化

王振凤<sup>1</sup>, 郭忠升<sup>2,3</sup>, 郭满才<sup>1</sup>, 袁志发<sup>1</sup>, 赵龙<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了解水资源紧缺地区多年生林地的土壤水分状况, 采用中子仪测定法, 于 2002—2006 年对宁夏回族自治区固原市上黄生态试验站人工柠条林地(生长季 4—10 月)的土壤水分进行了监测。并应用隔室分析法建立了土壤水分垂直变化模型, 对柠条林地土壤水分实测数据进行了拟合。分析结果表明, 在参数取值特定的条件下, 模型可表达试区内不同降雨条件下柠条人工林下的土壤水分垂直变化, 拟合优度  $R^2$  符合统计学要求, 模型具有较好的应用价值。

**关键词:** 人工柠条林地; 土壤水分; 垂直变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0071-04

中图分类号: S152.7+5

## Vertical Variations of Soil Water in Shrubland of *Caragana Microphylla* in Hilly and Gully Areas of Loess Plateau

WANG Zhen-feng<sup>1</sup>, GUO Zhong-sheng<sup>2,3</sup>, GUO Man-cai<sup>1</sup>, YUAN Zhi-fa<sup>1</sup>, ZHAO Long<sup>1</sup>

(1. College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to understand the status of soil water under perennial woodlands in the water-limited regions, soil moisture were observed using the neutron probe in the soil profile under *Caragana microphylla* shrubs in the semi-humid region of the Loess Plateau during April to November from 2002 to 2006. A compartment model was used to study the vertical changes of soil water. The results showed that the characters of vertical variations of the moisture in the profiles were described well by the model with the specifically calibrated parameters and the goodness of fit met the statistical requirement, suggesting a great potential applicability of the model to the similar areas.

**Keywords:** *Caragana microphylla* shrubland; soil water; vertical variation

在黄土高原干旱和半干旱地区, 水分是影响生态系统功能和过程的关键驱动因子。由于黄土高原大部分地区土层深厚、地下水埋藏较深, 无灌溉条件, 水资源缺乏<sup>[1]</sup>, 降水成为黄土高原土壤水分唯一的补充来源, 但由于黄土高原特殊的水文特征, 其降水入渗深度较浅, 因此无深层渗漏发生<sup>[2-3]</sup>, 林水关系调控只能依据土壤水分补给、存储和利用情况决定<sup>[4-6]</sup>。近年来, 黄土高原大部分地区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<sup>[2,7-8]</sup>。研究

半干旱地区人工林地土壤水分动态变化规律, 对于可持续利用土壤水资源, 改善土壤水分与植被生长关系均具有重要意义。

目前对于黄土高原丘陵半干旱区柠条林地的土壤水分研究主要集中在土壤水分植被承载力研究<sup>[9-11]</sup>, 土壤水分的补给和消耗规律<sup>[12-14]</sup>, 土壤水资源利用限度研究<sup>[14-15]</sup>等, 而对柠条林地的土壤水分垂直变化研究报道较少。随着计算机技术的发展, 利用数学—物理原理, 建立数学模型, 再经试验验证模拟

收稿日期: 2012-04-19

修回日期: 2012-06-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵半干旱区人工柠条林地土壤水分承载力研究”(41071193); 中央高校基本科研业务费专项资金(QN2010101)

作者简介: 王振凤(1985—), 女(汉族), 河北省沧县人, 硕士研究生, 研究方向为数学生态学。E-mail: zhenfengwang@sohu.com。

通信作者: 郭忠升(1963—), 男(汉族), 陕西省富平县人, 博士, 研究方向为土壤水分与植物生长、森林生态、森林水文与水土保持等。E-mail: zhongshenguo@sohu.com。

结果, 解决实际问题, 这使得田间试验大量减少且试验精度有所提高。用这一方法研究土壤水分已经取得了很大成功, 推动了土壤水分研究的发展<sup>[16]</sup>。赵忠等<sup>[17]</sup>应用隔室模型, 研究了黄土高原半湿润水分生态区沟坡人工刺槐林地土壤水分垂直变化, 而利用隔室模型研究柠条林地土壤水分的垂直变化的研究未见报道, 本研究依据 2002—2006 年在黄土高原半干旱区柠条人工林地不同土层土壤水分的实测数据, 利用隔室模型研究生长季柠条林地土壤水分的垂直变化, 以揭示土壤水分动态变化机理, 为进一步研究人工柠条林生长对土壤水分的影响奠定基础。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

试验在黄土高原西部、黄土丘陵半干旱区的宁夏回族自治区固原市原州区河川乡上黄村的生态站内进行。该区地势起伏, 沟壑纵横, 水土流失严重, 属黄土丘陵半干旱区, 地理位置为东经  $106^{\circ}26'$ — $106^{\circ}30'$ , 北纬  $35^{\circ}59'$ — $36^{\circ}02'$ 。区内沟沿线以上坡度较缓, 沟沿线以下坡度大于  $25^{\circ}$ , 海拔高度约  $1534\sim 1824$  m。从有降水记录的 1983—2001 年, 年降雨量变化在  $634.7$  mm(1984 年)~ $259.9$  mm(1991 年), 1983—2001 年年平均降雨量为  $415.6$  mm, 降水年变率为  $22.8\%$ 。6—9 月降水量占总降水的  $72.3\%$  以上, 无霜期 152 d。土壤为黄绵土母质发育的淡黑垆土、黄绵土。植被类型为森林草原向干草原过渡的灌丛草原类型。

试验地位于上黄生态站西边黑刺岭东坡中部。该山岭中部大部分土地为 1986 年种植的柠条林。试验地坡度约为  $8^{\circ}$ , 海拔约  $1650$  m。试验地为柠条成林

地, 坡度比较平缓, 柠条密度为  $87$  丛/ $100\text{ m}^2$ , 平均冠幅  $102.9\text{ cm}\times 87.2\text{ cm}$ , 高  $103.3\text{ cm}$ , 地径  $11.2\text{ mm}$ , 分枝数 34 个。林下天然生长的草本植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔太狗娃花(*Heteropappus attai-cus*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、达乌里胡子(*Lespedeza davurica*)等。

### 1.2 试验布设及测定方法

2001 年 7 月对黄土高原半干旱区人工植被进行面上考察, 选择上黄生态试验站多年生人工柠条林作为试验地。2002 年 4 月 13 日对 16 年生柠条林地进行面上踏查, 选择灌丛分布比较均匀的地段作为试验样地, 确定柠条密度。然后在样地内选择代表性样丛, 对柠条四周不同方向不同距离的土壤水分分布情况进行了测定, 分析发现代表性样丛中心及东西南北四个方向距中心  $0.5$  和  $1.0\text{ m}$  处, 相同深度的土壤水分无显著性差异。因此, 在样地中心地带( $10\text{ m}$  处)安置两个相距  $2\text{ m}$  的深度为  $4\text{ m}$  的中子仪铝合金套管, 具体位置为柠条与林中空地中心的  $1/2$  处, 并对中子仪进行了标定。之后, 在柠条的生长季(4—10 月, 测定延至 11 月), 每隔  $15\text{ d}$ , 在  $4\text{ m}$  深度范围内, 用中子仪对土壤水分进行测定。测定时, 每隔  $20\text{ cm}$  测定记录一次, 中子仪计数时间为  $16\text{ s}$ 。

## 2 柠条林地土壤水分垂直变化特征及预测

### 2.1 土壤水分垂直变化特征

为反映土壤水分长期稳定的垂直变化规律, 对 2002—2006 年上黄生态试验站柠条林地土壤含水量监测数据按月份分层计算平均值, 并对所得数据进行统计分析(图 1)。

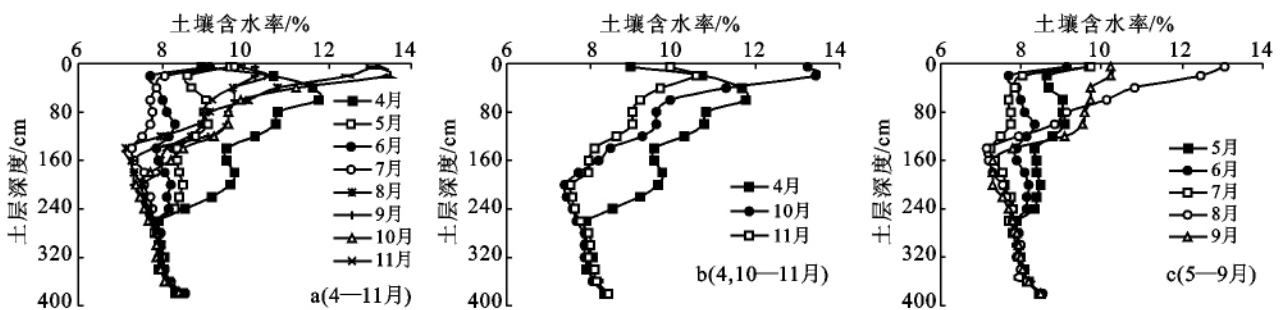


图 1 4—11 月柠条各生长季土壤水分的垂直变化

由图 1a 可知, 在柠条生长季内, 柠条林地各月土壤含水量差异主要集中在  $0\sim 260\text{ cm}$  土层内,  $260\sim 400\text{ cm}$  土层水分差异不大。由图 1b 和图 1c 可看出,

4, 10, 11 月柠条林地土壤含水量随土层深度的增加呈现是先增加后减少, 然后趋于稳定的变化。峰值出现在  $20\sim 60\text{ cm}$  土层, 随土层深度增加土壤含水量逐

渐衰减,当达到一定土层深度时,土壤含水量趋于稳定。而 5—9 月,土壤水分随深度逐渐衰减,而后缓慢增加,最终趋于稳定。总体来看,4,10,11 月土壤含水量增长迅速而衰减较缓慢,最后趋于稳定;而 5—9 月土壤含水量大体呈指数衰减,最终也趋于稳定。

2.2 土壤水分垂直变化模型的建立

土壤为疏松多孔介质,降水进入土壤的过程,也即降水的入渗过程,首先有一个吸附过程,当土壤颗粒的吸附水达到饱和时,在重力作用下(此时为重力水),进行稳定入渗,当入渗到最大深度时,湿润锋土壤含水量逐渐与下层土壤水分  $f$  平衡(此时随土层的深度增加,湿润锋土壤含水量与下层土壤含水量之差为零或趋近于零)。同时,土壤水分的消耗随深度逐渐减弱,从而有

$$\lim_{h \rightarrow \infty} (f - W_c) = 0 \rightarrow \lim_{h \rightarrow \infty} W_c = f$$

式中:  $W_{c1}$ ——补给水分;  $W_c$ ——土壤含水量。土壤水分垂直变化模型可以用隔室模型描述 (compartment models)<sup>[18]</sup> (图 2)。

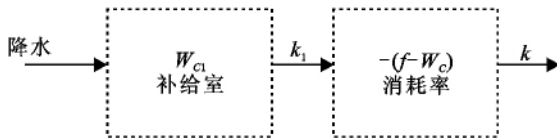


图 2 土壤水分动态变化过程的隔室模型

其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dW_{c1}}{dh} = -k_1 W_{c1} \\ \frac{d[-(f - W_c)]}{dh} = k_1 W_{c1} - k[-(f - W_c)] \\ W_c |_{h=0} = W_{c0} \end{cases}$$

可得土壤含水量随土层深度增加的垂直变化的模型:

$$W_c = ae^{-k_1 h} - ce^{-kh} + f$$

式中:  $a > 0, c > 0, k_1 > 0, k > 0$ 。  $h$ ——土层深度;  $k_1$ ——土壤对降水的吸附速率常数;  $k$ ——土壤水分消耗的衰减速率常数;  $a, c$ ——与  $k_1, k$  有关的常数; 并且地表土壤水  $W_{c0}$  和土壤深层水  $f$  满足  $W_{c0} = f + a - c$ 。该模型为通用模型,在不同降水条件下有不同的参数条件和表达式。

(1) 一般来讲,当有降水进入土壤,土壤吸附达到饱和后,在重力作用下,进行稳定入渗,补给深层土壤水,期间土壤蒸发较小,土壤水分得到补给,此时有  $k > k_1 > 0$  (图 3 曲线 a)。

(2) 对于土壤水分含量较低的干旱土壤,土壤吸

附力非常强,土壤水分蒸发消耗衰减速率减缓,当有降水进入土壤后,主要是土壤对降水的吸附过程,土壤达不到饱和,此时有  $k_1 > k > 0$  (图 3 曲线 b)。

(3) 在较长时间没有降水补给的情况下,  $k_1 = 0$ , 该模型简化为 (图 3 曲线 c):

$$W_c = -ce^{-kh} + f \quad (c > 0, k > 0)$$

当土壤吸附力极强时,土壤水分既不能被蒸发(或蒸发量很少),亦不能被植物根系利用,即有  $k = 0$  (或  $k \approx 0$ )。当有降水进入土壤时,土壤迅速吸附,浅层土壤水分得到补充,此时简化为 (图 3 曲线 d):

$$W_c = ae^{-k_1 h} + f \quad (a > 0, k_1 > 0)$$

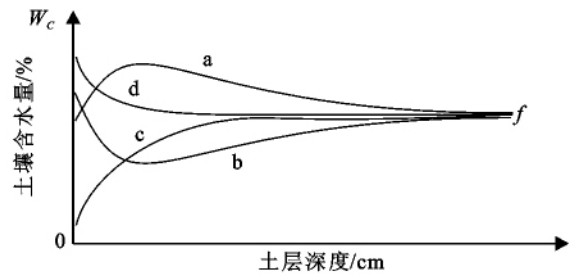


图 3 土壤水分垂直变化特征

2.3 模型验证

模型验证采用中国科学院水土保持研究所上黄生态试验站试区的降雨量观测资料。自从有记录的 1983 年以来,试验区附近的上黄生态站降水年际变化较大。2002 年降水量为 384.8 mm,略低于多年平均值 415.6 mm,为偏早年;2003 年降雨量为 623.3 mm,接近多年降水量的最大值,相差仅 1.8%,为丰水年。

2002 年 1—5 月当地持续干旱,截至 5 月底累积降雨量为 87.6 mm,次降雨量绝大部分未超过 5 mm,鲜有降雨超过 10 mm;进入 6 月份降雨增多,累积降雨达到 118.6 mm,其中 6 月 8 日和 6 月 27 日降雨量超过 40 mm,分别为 46.4 和 49.5 mm。采用 2002 年 6 月 30 日上黄生态试验站多年生人工柠条林地土壤水分的观测数据,使用 SPSS 13.0 对建立的土壤水分模型进行验证,拟合优度  $R^2 = 0.799$ ,符合统计学要求。由于 2002 年当地偏旱,降雨不足,土壤水分亏缺。2003 年 1—6 月降水充足,截止 7 月中旬累计降雨量达 238.6 mm,自 4 月份起,每月降雨达 5 次以上,而且 7 月至中旬已有 5 次降雨,其中两次达到 25 mm 以上,土壤水分得到较好补充。采用 2003 年 7 月 18 日的土壤水分观测数据,使用 SPSS 13.0 对建立的土壤水分模型进行验证,拟合优度  $R^2 = 0.923$ ,符合统计学要求。两次降雨的模型拟合曲线和实测值的对比情况如图 4 所示。

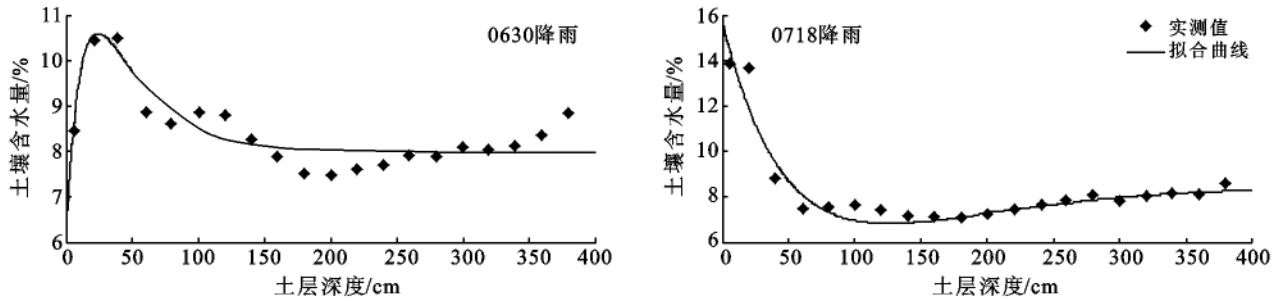


图 4 2002 年两次降雨的土壤水分模型拟合曲线和实测值对比

### 3 结论

通过对 2002—2006 年每年 4—11 月中国科学院水土保持研究所上黄生态试验站柠条林地土壤水分实测数据分析,建立了黄土丘陵半干旱区人工柠条林地土壤水分随深度变化模型。该模型为通用模型,在不同降水条件下有不同的参数条件和表达式。

通过应用上述模型对数据用 SPSS 13.0 进行拟合,拟合优度  $R^2$  符合统计学要求,最后用实测值与模型拟合曲线进行对比验证,结果表明,模型拟合误差较小,说明在上黄生态试验站,该模型能够客观反映不同降雨条件下人工柠条林地土壤水分的垂直变化。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998:42-68.
- [2] 朱显谟.黄土高原的形成过程与整治对策[J].水土保持通报,1998,11(1):1-17.
- [3] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:30-114.
- [4] 郭忠升,李耀林.植物生长与土壤水关系调控起始期[J].生态学报,2009,29(10):5721-5729.
- [5] 韩士峰.黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J].中国水土保持,1999(5):48-52.
- [6] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [7] 杨维西.试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J].林业科学,1996,32(1):78-85.
- [8] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:30-114.
- [9] 郭忠升.黄土丘陵半干旱区土壤水分植被承载力研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2004.
- [10] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [11] 邵明安,郭忠升,夏永秋,等.黄土高原土壤水分植被承载力研究[M].北京:科学出版社,2009:101-272.
- [12] 程积民,万惠娥,王静,等.半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J].林业科学,2005,41(2):37-41.
- [13] 郭忠升,邵明安.人工柠条林地土壤水分补给和消耗动态变化规律[J].水土保持学报,2007,21(2):119-123.
- [14] 郭忠升.半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J].水土保持通报,2009,29(5):69-72.
- [15] 郭忠升.黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度[J].应用生态学报,2010,21(12):3029-3035.
- [16] 尚松浩,毛晓敏,雷志栋,等.土壤水分动态模拟模型及其应用[M].北京:科学出版社,2009:17-23.
- [17] 赵忠,李剑,袁志发,等.黄土沟坡刺槐林地土壤水分垂直变化的数学模型[J].林业科学,2009,45(9):9-13.
- [18] 李保国,龚元石,左强,等.农田土壤上的动态模型及应用[M]//龚元石,李保国.农田土壤水动态的均衡模型及应用.北京:科学出版社,2000:40-62.