# 指数平滑法在林地水分动态模拟和预测中的应用

崔哲伟[1,2]，毕华兴[1,2]，云 雷[1,2]，田晓玲[1,2]，靳刚雷[1,2]

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，北京 100083；
2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县，042200)

**摘 要**：指数平滑法是广泛应用的基于时间序列进行预测的方法之一，但是目前该方法在土壤水分动态模拟与预测方面的应用较少。采用指数平滑法中的 Simple 模型，对晋西黄土区人工刺槐林地 2009 年 6 月 1 日至 9 月 30 日间每日土壤含水率和土壤蓄水量进行了模拟和预测。结果表明，该模型能够以一定精度对土壤含水率和土壤蓄水量进行模拟和预测；在 0—150 cm 土层内的 7 个不同观测土层中，随着土层深度的增加，该模型的预测准确性增大。100—150 cm 土层预测值最大误差＜5%，并且 120—150 cm 土层的预测在 7 个观测土层中最为准确，其平均误差率仅为 0.101 1%。对预测值与实测值进行比较后得出，降雨、蒸发蒸散、地表径流、植物根系吸收等影响因素可能对人工刺槐林地的土壤含水率和土壤蓄水量的影响深度可至 120 cm。

**关键词**：指数平滑；土壤水分；预测；人工刺槐林

**文献标识码**：A **文章编号**：1000-288X(2011)02-0128-05 **中图分类号**：S152.7

# Application of Exponential Smoothing in Prediction and Dynamic Simulation of Soil Moisture in Forests

CUI Zhe-wei[1,2], BI Hua-xing[1,2], YUN Lei[1,2], TIAN Xiao-ling[1,2], JIN Gang-lei[1,2]

(1. *College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing* 100083, *China*; 2. *National Field Research Station of Forest Ecosystem, Jixian, Shanxi* 042200, *China*)

**Abstract**: Exponential smoothing based on time series is one of the methods widely used in predicting, but is rarely applied in the dynamic simulation and prediction of soil moisture. In this paper, the simple exponential smoothing was used to simulate and predict daily soil moisture and soil water storage capacity of an artificial locust forest in the loess region of Western Shanxi Province, between June 1st and September 30th, 2009. The results show that soil water moisture and soil water storage capacity were simulated and predicted with a reasonable accuracy level. Observations of seven different layers(0—150 cm) indicated that the prediction accuracy of soil moisture increased with soil depth. The maximum error of the predictions within the layer of 100—150 cm was less than five percent, and the most accurate prediction(with an average error of 0.1 %) were found in the layer of 120—150 cm. Compared with the predicted and measured values, it was found that rainfall, evaporation and evapotranspiration, surface runoff, plant uptake and other factors may affect the artificial locust forest soil water moisture and soil water storage capacity up to the depth of 120 cm.

**Keywords**: exponential smoothing; soil moisture; forecast; artificial locust forest

土壤水分运移的建模及预测预报是近代农业水土工程生产管理的重要依据。土壤水分受气候、土壤、植被等多种因子的影响，具有较大的随机性。时间序列分析主要是采用参数模型对所观测到的有序的随机数据进行分析与处理的一种方法，它所建立的模型是随机模型[1]。时间序列预测方法在各种基于时态数据库的计算中具有广泛的应用前景[2]，如证券走势、电力负荷、港口货物吞吐量的预测等。它通过现象的过去行为来预测未来变化，即通过时间序列的历史数据揭示现象随时间变化的规律，并将这种规律

收稿日期：2010-07-02 修回日期：2010-08-21
资助项目：国家自然科学基金项目“晋西黄土区森林植被对径流的影响及其尺度辨析”(30972419)
作者简介：崔哲伟(1984—)，男(汉族)，山西省太原市人，硕士研究生，主要研究方向为水土保持。E-mail：ronanzhe@163.com。
通信作者：毕华兴(1969—)，男(汉族)，陕西省米脂县人，博士，教授，主要研究方向为水土保持。E-mail：bhx@bjfu.edu.cn。

©

延伸到未来,从而对该现象未来做出预测[3]。

指数平滑预测法是一种简单易行、应用十分广泛的短期时间序列预测方法[4],它是利用平滑平均数可以将数据序列的数量差异抽象化的原理,对历史的统计数据进行加权修匀,使修匀后的数据信息排除异常数据的影响,从而显示出预测对象变动的基本趋势。它具有两个显著特点:(1) 充分利用全部历史数据和相关信息;(2) 遵循"重近轻远",使时间序列所包含的历史规律性能显著地体现出来。指数平滑法的估计是非线性的,通过对序列中最新观察值和早期观察值赋予不同的权重,对序列进行预测,其目标是使预测值和实测值间的方差最小[5]。

在土壤水分动态模拟方面,康绍忠[6]对较厚土层用提取周期趋势的方法作了土壤水分动态的随机模拟研究,取得了一定的效果。目前,指数平滑法在经济指标、货物吞吐量、电力负荷等方面应用较多,但用指数平滑法来对土壤水分动态进行模拟和预测的国内外相关研究较少。本研究采用指数平滑法中的 Simple 模型对晋西黄土区人工刺槐林地土壤水分动态变化进行模拟和预测,从统计学角度探讨该区土壤水分运动规律,从而为晋西黄土区人工刺槐林地管理与植被恢复提供一定的理论依据。

## 1　Simple 模型

对于未来发生的事情,最新观察值较早期观察值包含更多的信息,因而在预测时,最新观测值较早期观察值具有更大的权重。指数平滑预测法通过对序列中的最新观察值和早期观察值赋予不同的权重,对序列进行预测。指数平滑法的估计是非线性的,其目标是使预测值和实测值间的方差(SSE)为最小[7]。指数平滑法包括 Simple,Holt,Winters,Custom 这 4 个模型,本研究采用 Simple 模型对土壤水分动态变化进行模拟和预测。

### 1.1　Simple 模型的定义

Simple 模型是在传统的移动平均法基础上发展而来的一次指数平滑法,它假定所研究的时间序列数据集无趋势变化,以最新误差的修正值对下一期预测值进行修正,因此它总能跟踪实际数据的任一趋势。其计算公式为:

$$F_{t+1}=\alpha X_t+(1-\alpha)F_t \tag{1}$$

式中:$F_{t+1}$——时间 $t+1$ 的平滑值;$X_t$——时间 $t$ 的实际值;$F_t$——时间 $t$ 的平滑值;$\alpha$——平滑系数。

对式(1)重新排列后得到:

$$F_{t+1}=\alpha X_t+(1-\alpha)F_t=F_t+\alpha e_t \tag{2}$$

由公式(2)可知,$t$ 时间的误差 $e_t$ 恰好是实际观测值减去预测值。

传统的移动平均法中将 $N$ 个过去观测值中的每一个值都赋予相等的权重,而早于 $(t-N+1)$ 期的观测值的权重全赋予 0 来进行预测,有一定的局限性;而 Simple 模型认为,最近的观测值要比早期的观测值对预测值的影响更大,在预测时应赋予更大的权重。

公式(1)是指数平滑预测的通式,如果用 $F_{t-1}$ 替代 $F_t$,整理后可得到:

$$F_{t+1}=\alpha X_t+(1-\alpha)F[\alpha X_{t-1}+(1-\alpha)F_{t-1}] \tag{3}$$

$$F_{t+1}=\alpha X_t+\alpha(1-\alpha)X_{t-1}+(1-\alpha)^2F_{t-1} \tag{4}$$

如果进一步用 $F_{t-2}$ 替代 $F_{t-1}$,$F_{t-3}$ 替代 $F_{t-2}$ 等等,则式(4)可改写成

$$F_{t+1}=\alpha X_t+\alpha(1-\alpha)X_{t-1}+\alpha(1-\alpha)^2X_{t-2}+\cdots+\alpha(1-\alpha)^{N-1}X_{t-(N-1)}+\alpha(1-\alpha)^NF_{t-(N-1)} \tag{5}$$

由式(5)可知,每一递推观测值的权数按指数规律递减。

### 1.2　Simple 模型的参数估计与检验

由上可知,Simple 模型给出的预测值是前一期的预测值加上前一期预测值中所产生的误差的修正值。

对于参数估计的前提是所获取的时间序列数据集无趋势和周期性变化。其常规参数 $\alpha$ 可以控制加载到最新观察值的权重,用以决定序列的整体水平。它的取值范围为[0,1],$\alpha$ 越接近于 1,新的预测值将包括对前一期的预测误差的全部修正值。反之,则相反。

采用误差项平方和(SSE)对 Simple 模型检验。其计算公式为

$$\mathrm{SSE}=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}-\overline{x_i})^2$$
$$(i=1,2,3\cdots n;\quad j=1,2,3\cdots n) \tag{6}$$

分别计算各参数 α{取值范围为[0,1]}的模型预测值,再由式(6)得到各组预测值的 SSE 值,最后取 SSE 值最小的参数 α 为模型最适参数,同时也确定了最佳预测值[7-8]。

## 2　研究区概况及数据采集

### 2.1　研究区概况

本研究所设的观测地位于山西省吉县蔡家川流域,地理坐标为 110°45′44″E,36°16′24″N,海拔 1 036 m,属典型的黄土残塬沟壑区。流域属暖温带大陆性气候,半干旱落叶阔叶林地带;多年平均降水量579.5 mm,其中 6—9 月降雨量占全年降雨量的 70%左右;年均蒸发量 1 723.9 mm,4—7 月蒸发量最大;年平

©

均气温 10 ℃，光照时数平均 2 563.8 h，大于 10 ℃的年平均积温为 3 357.9 ℃，无霜期平均 170 d。土壤类型主要为褐土，黄土母质，呈微碱性反应，土壤贫瘠，有机质含量在 1%以下（表 1）。

表 1 观测地基本情况

| 植被类型 | 地貌 | 地类 | 坡度/(°) | 坡向 | 林木密度/(株·hm$^{-2}$) | 植被覆盖度/% | 海拔/m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 刺 槐 | 梁峁坡 | 人工刺槐林 | 25 | 南偏东 34° | 1 800 | 80 | 1 109 |

### 2.2 数据采集

本研究采用 Enviro—SMART 土壤水分监测系统对人工刺槐林地 0—150 cm 土层的土壤含水率进行实时监测。在 0—150 cm 的垂直土层上，共设 7 个观测层，分别为 0—10 cm，10—20 cm，20—40 cm，40—70 cm，70—100 cm，100—120 cm 和 120—150 cm。于 2009 年 6 月 1 日至 9 月 30 日期间以每 30 min 监测 1 次的频率，监测观测地的土壤水分。监测的土壤水分实时数据保存在 CR200 数据采集器中，用电脑从 CR200 中下载观测数据后，进行数据处理（表 2—3）。

表 2 土壤含水率数据的统计学特征

| 土层深度/cm | 最小值/% | 最大值/% | 均值/% | 标准差 | 方差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0—10 | 5.024 | 19.183 | 12.368 | 3.675 | 13.506 |
| 10—20 | 11.792 | 30.285 | 20.026 | 5.072 | 25.722 |
| 20—40 | 6.148 | 11.757 | 8.720 | 1.673 | 2.800 |
| 40—70 | 16.773 | 21.616 | 18.836 | 1.790 | 3.204 |
| 70—100 | 19.465 | 25.913 | 21.793 | 2.036 | 4.147 |
| 100—120 | 17.219 | 21.192 | 18.596 | 1.278 | 1.633 |
| 120—150 | 15.332 | 15.942 | 15.652 | 0.169 | 0.029 |

## 3 Simple 模型

利用 Enviro—SMART 土壤水分监测系统所集的实时数据，得出 2009 年 6 月 1 日至 9 月 30 日间各观测土层的日平均土壤含水率 $\theta_i$，并设土层厚度为采样 $D_i$，则各层土壤蓄水量 $W_i$ 为[9]：

$$W_i=\theta_i\times D_i \tag{7}$$

本研究使用 SPSS 13.0 建立 Simple 模型。建模的过程包括：模型的适宜性分析，参数估计，模型预测。

表 3 土壤蓄水量数据的统计学特征

| 土层深度/cm | 最小值/mm | 最大值/mm | 均值/mm | 标准差 | 方差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0—10 | 5.024 | 19.183 | 12.368 | 3.675 | 13.506 |
| 10—20 | 11.792 | 30.285 | 20.026 | 5.072 | 25.722 |
| 20—40 | 12.296 | 23.514 | 17.440 | 3.347 | 11.201 |
| 40—70 | 50.320 | 64.848 | 56.507 | 5.370 | 28.834 |
| 70—100 | 58.395 | 77.739 | 65.378 | 6.109 | 37.319 |
| 100—120 | 34.439 | 42.384 | 37.192 | 2.556 | 6.533 |
| 120—150 | 45.997 | 47.826 | 46.956 | 0.507 | 0.257 |

### 3.1 模型的适宜性分析

将 6 月 1 日至 9 月 30 日每日各土层平均土壤含水率和土壤蓄水量分别作为两个时间序列。将日期按自然数编号，即 1，2，3，…，122 为横坐标，以各自时间序列的土壤含水率（%）和土壤蓄水量（mm）分别作为纵坐标，绘制各观测土层土壤含水率和土壤蓄水量的时间序列图（图 1）。

由图 1 可看出，各观测土层平均土壤含水率和平均土壤蓄水量的序列没有显示任何明显的趋势，而是在图 1 中呈现出一种随机的波动，且两个序列没有明显的周期性，说明适合作平滑分析，进而适合应用 Simple 模型。

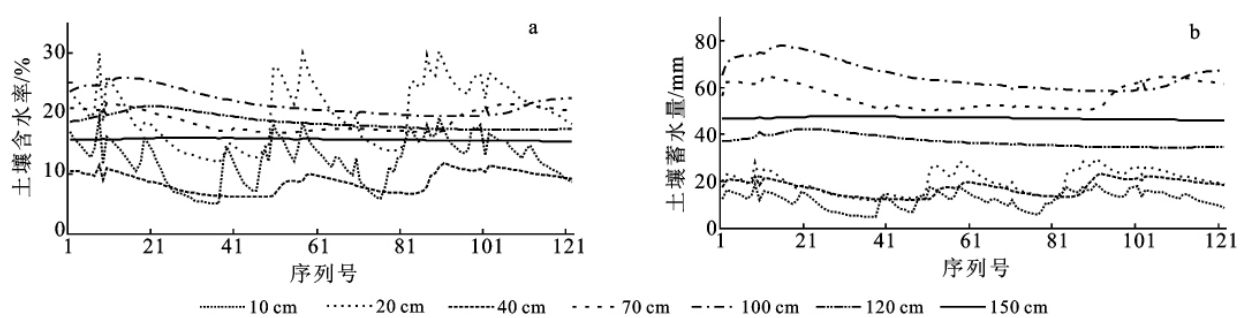



图 1 各土层含水率(a)和蓄水量(b)的时间序列图

### 3.2 模型参数估计

在参数 α 的取值范围[0，1]中，调节参数值的大小，利用式(5)可得到不同的预测结果，并且利用式(6)计算出各预测结果的 SSE 值，取其 SSE 值最小的

©

参数 α 为最适参数。各土层所取参数及其 SSE 值见表 4。由残差分析结果可以看出,各土层土壤含水率和蓄水量预测值的残差是随机分布的,没有任何可辨别的规律,说明表 4 中所取的模型参数是适合的。

表 4　各土层土壤含水率预测所取参数及其 SSE 值

| 项目 | 土层深度/cm | 参数 α | SSE |
|---|---|---|---|
| 土壤含水量 | 0—10 | 0.9 | 495.078 1 |
| | 10—20 | 0.8 | 732.458 2 |
| | 20—40 | 0.9 | 27.416 4 |
| | 40—70 | 1.0 | 9.568 2 |
| | 70—100 | 1.0 | 10.619 3 |
| | 100—120 | 0.9 | 2.996 4 |
| | 120—150 | 0.7 | 0.091 4 |
| 土壤蓄水量 | 0—10 | 0.9 | 495.078 1 |
| | 10—20 | 0.8 | 732.458 2 |
| | 20—40 | 0.9 | 109.665 4 |
| | 40—70 | 1.0 | 86.113 8 |
| | 70—100 | 1.0 | 95.573 4 |
| | 100—120 | 0.9 | 11.985 7 |
| | 120—150 | 0.7 | 0.822 3 |

### 3.3　Simple 模型预测

用表 4 中所确定的参数 α,利用式(5)来建立 Simple 模型,对 2009 年 6 月 1 日至 9 月 30 日间各观测土层的日平均土壤含水率和土壤蓄水量共 244 个值分别进行预测,并且对实测值与预测值进行比较和误差分析,其结果见表 5—6。

从表 5—6 可以得出,0—10 cm,10—20 cm,100—120 cm,120—150 cm 这 4 个土层的预测值较实测值大,而 20—40 cm,40—70 cm 和 70—100 cm 这 3 个土层的预测值较实测值小。

各土层土壤含水率和土壤蓄水量预测的平均相对误差随土层的深度增加而减小,且两者的平均相对误差一致,说明 Simple 模型能够以一定的精度预测土壤含水率和土壤蓄水量。100—120 cm 和 120—150 cm 土层的最大相对误差均<5%,说明该模型对 100—150 cm 深度的土壤含水率和土壤蓄水量的预测更为准确。最大相对误差、最小相对误差和平均相对误差可以反映出所预测的土壤含水率和土壤蓄水量的精度范围和精确度。

表 5　各土层土壤含水率误差分析　　%

| 土层深度/cm | 最大绝对误差 | 最小绝对误差 | 平均绝对误差 | 最大相对误差 | 最小相对误差 | 平均相对误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0—10 | 7.107 4 | −7.382 3 | 0.033 9 | 61.526 9 | 0.655 8 | 11.119 2 |
| 10—20 | 9.419 6 | −13.372 5 | 0.016 8 | 50.699 0 | 0.157 8 | 6.398 7 |
| 20—40 | 2.260 9 | −1.822 6 | −0.003 9 | 25.382 7 | 0.059 3 | 2.909 6 |
| 40—70 | 0.360 5 | −1.035 9 | −0.012 8 | 9.319 8 | 0.008 0 | 0.796 9 |
| 70—100 | 1.522 9 | −0.282 7 | −0.005 0 | 7.735 0 | 0.005 4 | 0.652 9 |
| 100—120 | 0.798 8 | −0.192 0 | 0.010 2 | 4.775 0 | 0.008 0 | 0.409 0 |
| 120—150 | 0.096 6 | −0.189 5 | 0.003 7 | 1.198 9 | 0.001 2 | 0.101 1 |

表 6　各土层土壤蓄水量误差分析　　%

| 土层深度/cm | 最大绝对误差 | 最小绝对误差 | 平均绝对误差 | 最大相对误差 | 最小相对误差 | 平均相对误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0—10 | 7.107 4 | −7.382 3 | 0.033 9 | 61.526 9 | 0.655 8 | 11.119 2 |
| 10—20 | 9.419 6 | −13.372 5 | 0.016 8 | 50.699 0 | 0.157 8 | 6.398 7 |
| 20—40 | 4.521 7 | −3.645 3 | −0.007 8 | 25.382 7 | 0.059 3 | 2.909 6 |
| 40—70 | 1.081 5 | −1.807 6 | −0.038 4 | 9.319 8 | 0.008 0 | 0.796 9 |
| 70—100 | 4.568 6 | −0. 868 0 | −0.014 9 | 7.735 0 | 0.005 4 | 0.652 9 |
| 100—120 | 1.597 6 | −0.803 9 | 0.020 5 | 4.775 0 | 0.007 9 | 0.409 0 |
| 120—150 | 0.289 9 | −0.568 6 | 0.011 2 | 1.198 9 | 0.001 3 | 0.101 1 |

## 4　结 论

本研究应用指数平滑法中的 Simple 模型对晋西黄土区刺槐林地土壤水分运动趋势进行了模拟和预测。其结果表明,该模型能够以一定的精度来模拟和预测土壤水分运动的动态变化过程,对土壤水分的运动趋势预测有一定的适用意义,为人工刺槐林地的合理种植,间伐、疏伐等林地管理措施提供了一定的理论依据。

对表 6 分析可以得出,0—10 cm,10—20 cm 两个土层土壤含水率预测值的绝对误差和相对误差的变化幅度分别是 14.489 7%和 60.871 1%;22.792 1%和 60.871 1%。由此可知,预测值与实际值相差较大,可能是由于降雨、蒸发蒸散、地表径流、植物根系吸收

©

等因素对土壤水分影响较大，导致模型预测值偏差较大；20—40 cm 土层土壤含水率预测值的绝对误差和相对误差的变化幅度是 4.083 5%和 25.323 4%，与上两个土层相比误差小了一些，但仍有一定偏差，可能是上述影响因素对该层的影响相对小于表层(0—20 cm)；40—70 cm，70—100 cm 和 100—120 cm 这 3 个土层土壤含水率预测值的绝对误差和相对误差的变化幅度分别是 1.396 4%，9.311 8%，1.805 6%；7.729 6%，0.990 0%和 5.767 1%，说明这 3 个土层的预测值与实际值偏差较小，预测较为准确，可能是上述影响因素对这 3 个土层的影响进一步减弱；120—150 cm 土层土壤含水率预测值的绝对误差和相对误差变化幅度分别是 0.286 1%和 1.197 6%，在所观测的 7 个土层中误差最小，预测更为准确，可能是上述影响因素对该层影响最小。对表 6 分析后可以得出，在所观测的 7 个土层中，土壤蓄水量与土壤含水率的分布趋势相一致。据此可知，120—150 cm 深度的土层土壤水分较为稳定。

用标准差和变异系数对黄土高原土壤水分剖面进行层次划分，已得到一致认可[10-12]。以标准差＞1.5为活跃层，1.5～1 为次活跃层，＜1 为稳定层为标准，对 0—150 cm 深度的 7 个观测土层进行划分，0—100 cm 为活跃层(标准差分别为 3.670 9，5.051 7，1.661 8，1.788 8，2.036 5)；100—120 cm 为次活跃层(标准差为 1.274 9)；120—150 cm 为稳定层(标准差为 0.167 9)。据此标准划分的土壤水分稳定层与本研究中所应用模型预测得出的土壤水分稳定层相一致。由此可知，降雨、蒸发蒸散、地表径流、植物根系吸收等影响因素可能对人工刺槐林地的土壤含水率和土壤蓄水量的影响深度至 120 cm。

由表 5—6 的误差分析可以得出，本研究中所采用的模型对 100—150 cm 的人工刺槐林土层预测比较准确，适用稳定层的土壤水分模拟与预测，这对人工林地“干化层”的相关研究提供了一定的理论依据；随着土层深度的增加，平均相对误差逐渐减小，预测准确性随深度的增加而增大。由于降雨、蒸发蒸散、地表径流、植物根系吸收、土壤性状等因素对预测的准确性影响较大。下一步的工作将考虑加入植被条件、土壤状况、时间尺度等变量对土壤水分动态趋势的模拟和预测。

[ 参 考 文 献 ]


[1] 刘洪斌，武伟，魏朝富，等. AR 模型在土壤水分动态模拟中的应用[J]. 山地学报，2004，22(1)：121-125.

[2] 张保稳，何华灿. 时态数据挖掘研究进展[J]. 计算机科学，2002，29(2)：124-126.

[3] 吴德会. 动态指数平滑预测方法及其应用[J]. 系统管理学报，2008，17(2)：151-155.

[4] 徐大江. 预测模型参数的指数平滑估计法及其应用的进一步研究[J]. 系统工程理论与实践，1999(2)：25-30.

[5] 张忠平. 指数平滑法[M]. 北京：中国统计出版社，1996：36-49.

[6] 康绍忠. 土壤水分动态的随机模拟研究[J]. 土壤学报，1990，27(1)：17-24.

[7] 安鸿志. 时间序列分析[M]. 北京：科学出版社，1992：1-344.

[8] 项静恬，史久恩，周琴芳，等. 动态数据处理：时间序列分析[M]. 北京：气象出版社，1991：1-433.

[9] 张建军，张岩，张波. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. 林业科学，2009，45(11)：63-69.

[10] 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[J]. 生态学报，1995，15(2)：178-184.

[11] 王孟本，柴宝峰，李洪建，等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J]. 林业科学，1999，35(2)：7-14.

[12] 李洪建，王孟本，柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报，2003，14(4)：515-519.


©