

枯枝落叶覆盖下的土壤蒸发的数学模型*

赵鸿雁 刘向东 吴钦孝

(中国科学院
水利部西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

提 要

土壤蒸发受许多因子的影响,主要是土壤含水量与枯枝落叶厚度。有5 cm厚油松枯枝落叶覆盖下的土壤蒸发的数学模型是

$$Q_t = (652.5e^{0.0166t} - 660.5) / e^{0.0166t}$$

通过检验发现它能够描述土壤蒸发的规律,且参数易于确定,利用方便。

关键词: 枯枝落叶 土壤蒸发 数学模型 土壤水分

A mathematical Model on Soil Water Evaporation under Litter Cover

Zhao Hongyan Liu Xiangdong Wu Qinxiao

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract

Soil water evaporation is affected by many factors, but the main factors are soil water and litter thickness. A mathematical model on soil water evaporation under litter cover of 5 cm in thickness is: $Q_t = (652.5e^{0.0166t} - 660.5) / e^{0.0166t}$. It has been found through testings that this mathematical model can be used to describe the rule of soil water evaporation, and its parameters are easy to be fixed and convenient to be used.

Key words litter soil water evaporation mathematical model soil water content

土壤蒸发是一个相当复杂的热物理过程^[1]。它受许多因子(如气象因子、光照、土壤水分等)的影响。同时这些因子之间彼此关联,如裸土土壤水分处于田间持水量时,气象因子对土壤蒸发的影响最大;当土壤水分在50%田间持水量时,气象因子对土壤蒸发的影响较小。但是有枯枝落叶覆盖时,无论土壤水分高低,气象因子对土壤蒸发都有影响。目前国内关于林内蒸发的研究主要和森林水量平衡连系在一起,所得结果应用困难,且由于林木蒸腾远大于林地土壤的蒸发。故更多的研究都注重林木蒸腾。但总的结论是:如果林木蒸腾大于林下土壤对蒸发的补偿时,则表现为森林使流域蒸发量加大;反之,则表现为森林使流域蒸发量变小^[2]。总之,由于土壤蒸发的限制因子多,要分清诸因子对蒸发的影响则有待于进一步研究。

土壤蒸发是耗散土壤水分的一种途径。它不象林木蒸腾那样有生命意义。减少土壤水分蒸发,对黄土高原来说,是提高生物产量,有利于农林牧业生产的主要手段。而建立枯枝落叶覆盖

土壤蒸发的数学模型, 对了解林地土壤水分动态有重要意义, 同时对深入研究森林流域的水量平衡有利用价值。

一、基本原理与模型

(一) **基本原理** 土壤蒸发可以明显地划分为三个阶段^[1], 在三个阶段中影响土壤蒸发的因子在相互变化, 如迅速蒸发阶段, 影响土壤蒸发的因子主要是气象因子; 而蒸发阶段, 气象因子对蒸发有影响, 但还与土壤的性质——孔隙度有关; 平稳蒸发阶段则主要是受土壤孔隙度的影响, 与气象因子关系不大。有枯枝落叶覆盖土壤的蒸发则与裸土截然不同。它没有三个蒸发阶段, 自始至终一直是平稳蒸发阶段, 且它与气象因子一直有关。气象因子中光照、气温、空气湿度对土壤蒸发的影响也是不停地随时间 t 在变换位置(即主次关系)。晴天时光照强、气温高、近地表层的湿度小; 反之, 光照弱、气温低, 近地表层的湿度大。总之, 由时间的变化, 气象因子也发生变化, 而气象因子的这种变化就决定了时间的代替性, 即时间可以替代气象因子。

在整个蒸发过程中, 由于气象因子影响, 土壤一直蒸发, 土壤的含水量 W 逐渐变低。随着时间延续, 蒸发在较低的土壤水分中进行。所以土壤蒸发与土壤含水量有关。土壤水分的高低也依赖时间 t 在变化。

在生长季节, 枯枝落叶厚度变化小, 土壤的蒸发量大, 保持土壤有较高的水分对生长有益。为此可以认为枯枝落叶厚不依赖时间 t 变化。依据以上分析建立以下模型。

(二) **模型的建立** 假定时间 $t=0$ 时, 土壤含水量为 W_0 , 经过时间 t 后, 土壤含水量为 W_t , 则 $w_t = w_0 - Q_t$, Q_t 为 t 时间土壤的蒸发量。

土壤蒸发速度与土壤含水量成正相关, 与枯枝落叶厚成负相关。因此蒸发速率是土壤含水量和枯枝落叶厚度的函数, 表示如下:

$$\frac{dQ_t}{dt} = f(wt, l) \quad (1)$$

$$\text{具体表示为} \quad \frac{dQ_t}{dt} = k \cdot w_t^a \cdot \left(\frac{1}{l}\right)^b \quad (2)$$

$$\text{由于} \quad w_t = w_0 - Q_t \quad (3)$$

为了积分的方便取 $a = b = 1$, 并将(3)式代入(2)式积分得

$$-\ln(w_0 - Q_t) = \frac{kt}{l} + C \quad (4)$$

因为时间 $t=0$ 时, 土壤蒸发量为 Q_0 , 所以确定积分常数

$$C = -\ln(w_0 - Q_0) \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式得枯枝落叶覆盖土壤蒸发的数学模型

$$\ln \left[\frac{w_0 - Q_0}{w_t - Q_t} \right] = \frac{kt}{l}$$

$$\text{或} \quad Q_t = \left[w_0 \cdot e^{\frac{kt}{l}} - w_0 + Q_0 \right] / e^{\frac{kt}{l}} \quad (6)$$

式中: Q_t 为某天土壤的累计蒸发量(g); k 为比例常数;
 Q_0 为积分常数(g); t 蒸发时间(d)。

二、模型中 KQ_0 的确定

将 $\ln \left[\frac{w_0 - Q_0}{w_t - Q_t} \right] = \frac{kt}{l}$ 变换为

$\ln [w_0 - Q_0] = \frac{kt}{l} + \ln [w_0 - Q_t]$, 令: $\ln [w_0 - Q_0] = A$, $\frac{K}{l} = B$; 则化简为:

$$\ln [w_0 - Q_t] = -Bt + A \quad (7)$$

显而易见, (7)式是一个一元非线性方程, 式中表明 Q_t 随时间 t 而变化。(7)式说明从田间某一含水量 w_0 开始蒸发的土壤含水量的自然对数与蒸发时间 t 为负相关, 这点模型中的意义与蒸发的物理意义都很清楚, 说明建立模型的物理基础是正确的。

由(7)式求出A、B之后, (用统计分析)再按(8)式、(9)式求出K和 Q_0 。

$$k = Bl \quad (8)$$

$$Q_0 = W_0 + e^A \quad (9)$$

由以上(5)式(8)式(9)式结合起来以后, 就能确定枯枝落叶覆盖下土壤蒸发量的数学模型。

三、模型的检验

模型的好坏及其能否应用, 不是由建模的方法决定, 而必须进行检验。目前关于模型检验的方法众说不一, 也没有统一的办法。本文主要考虑理论曲线与实测曲线的吻合情况, 来直观地描述理论值和实测值是否统一; 用反推法来验证精度的准确与否。所谓反推也就是指利用实验的数据建模, 按以上的方法确定好参数以后再按模型计算理论值, 将理论值与实测值比较求出绝对误差与相对误差, 一般情况, 相对误差要求在10%以内。

(一) 实验方法 用盆栽筒装森林土壤2 966g(干重)。在盆上覆有5 cm厚的油松枯枝落叶, 其中半分解枯枝落叶2 cm厚, 干重126g; 未分解3 cm厚, 干重70g。土壤含水量为田间持水量(22%), 相当于在供试土壤中加入652.5g水。每天下午7至8时称重, 连续进行3次, 详见附表。

(二) 参数K、 Q_0 的计算 利用表1的资料, 按模型中K、 Q_0 的确定方法, 用一元统计回归, 求出A、B分别等于6.493和0.0166。再按(8)、(9)两式求出K、 Q_0 ,

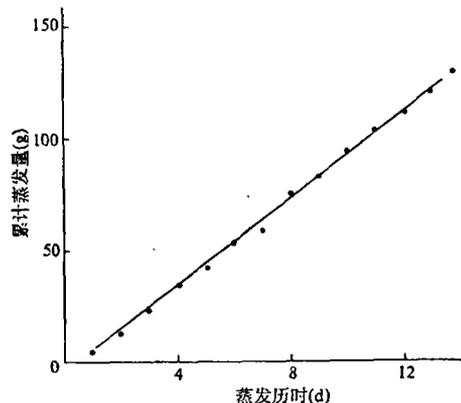
$$K = B \cdot l = 0.084$$

$$Q_0 = 652.5 - e^{6.49} = -8.0 \text{ (g)}$$

由此写出5 cm厚油松枯枝落叶覆盖土壤蒸发的数学模型

$$Q_t = [652.5e^{0.0166t} - 660.5] / e^{0.0166t}$$

(三) 模型检验 利用实测资料绘出5 cm厚油松枯枝落叶覆盖土壤蒸发的实际曲线, 利用模型计算理论值点绘到图上(见图1)表明: 实际观测值和理论值均为直线, 且理论值在实测值曲线附近, 幅度不大, 说明该模型能够表示5 cm厚油松枯枝落叶覆盖土壤的蒸发规律。



附图 油松枯枝落叶覆盖土壤蒸发的实测值与理论值比较

由附表可见, 理论值与实测值的绝对误差在0.0~2.8g之间, 其中第一天较大。即 $t=1$ 时, 模型的收敛性小, 在起点没有赶上。从相对误差看, 除 $t=1$ 外, 最大为6.2%; 最小为0.0%。且14天预测的平均误差为5.0%。所以从平均相对误差看, 该模型对整体预测效果好, 误差小, 精度高, 符合自然情况。

附表 土壤蒸发量实测值及理论值

时 间 (d)	实 测 值 (g)	理 论 值 (g)	绝 对 误 差 (g)	相 对 误 差 (%)
1	5.7	2.9	2.8	49.1
2	14.0	13.6	0.4	2.9
3	23.3	24.1	-0.8	3.4
4	34.0	34.4	-0.4	1.2
5	42.0	44.6	-2.6	6.2
6	54.3	54.6	-0.3	0.5
7	64.3	64.5	-0.2	0.3
8	75.0	74.1	0.9	1.2
9	83.0	83.7	-0.7	0.8
10	91.0	93.0	-2.0	2.2
11	101.7	102.2	-0.5	0.5
12	111.3	111.3	0.0	0.0
13	120.3	120.2	0.1	0.1
14	131.3	129.0	2.3	1.8

四、结果与讨论

(一) 有 5 cm 厚油松枯枝落叶覆盖土壤蒸发的数学模型是 $Q_t = [652.5e^{0.0166t} - 660.5] / e^{0.0166t}$ 。它的参数易于确定，利用方便，精度高，预测效果好，能够描述林地土壤蒸发的规律。

(二) 当 $t = 0$ 时，由于我们给供试土壤加水在底部，到次日土壤表面水分仍未达到田间持水量，土壤蒸发量偏低，在持续 3 次重复实验时，都表现出这种现象。在模型中由于用统计回归确定了参数 K 、 Q_0 ，所以误差较大，但从整体看，平均相对误差仍在 5.0% 以内，说明整体效果好。

参 考 文 献

- [1] 中野秀章。(李云森译)《森林水文学》。北京：中国林业出版社，1983年
 [2] 王礼先，余新晓。《森林水文学》。北京：林业大学出版，1989年