

皇甫川流域单株本氏针茅的蒸腾模型

于红博^{1,2}, 杨 劼^{1,2}, 徐延达^{1,2}, 张璞进^{1,2}, 刘 鑫^{1,2}

(1. 内蒙古草地生态重点实验室 省部共建国家重点实验室培育基地, 内蒙古 呼和浩特 010021;
2. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘 要: 采用快速离体称重法, 测定皇甫川流域本氏针茅每日 6:00—19:00 蒸腾强度的日动态; 用自动气象站同步连续监测太阳总辐射、空气温度、空气相对湿度、风速、10 cm 处土壤温度等环境因子; 用 LI-6400 便携式光合系统同步测定本氏针茅每日 6:00—19:00 的叶蒸腾速率、气孔导度等因子, 并用 Excel 2003, Visual C++ 6.0 和 SPSS 13.0 处理所测定数据。通过分析本氏针茅每 1 h 单株蒸腾量与环境因子以及植物特性因子之间的关系, 建立了皇甫川流域单株本氏针茅瞬时蒸腾量数学模型。通过对模型评价指标进行计算及分析, 认为该模型拟合优度较好, 可以获得满意的数值模拟结果。在此基础上, 建立了单株本氏针茅的日蒸腾量数学模型。

关键词: 本氏针茅; 蒸腾模型; 皇甫川流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)01-0078-05

中图分类号: S161.4, P334

Individual Transpiration Model of *Stipa Bungeana* in Huangfuchuan Watershed

YU Hong-bo^{1,2}, YANG Jie^{1,2}, XU Yan-da^{1,2}, ZHANG Pu-jin^{1,2}, LIU Xin^{1,2}

(1. The Key Lab of Inner Mongolia Grassland, and The Province-Ministry Co-constructing Incubation Base of National Key Laboratory, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China;

2. College of Geography, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China)

Abstract: Transpiration of *Stipa bungeana* in Huangfuchuan watershed was measured using isolated weighing method. Synchronous environmental factors such as incident solar radiation, air temperature, relative air humidity, wind speed, and soil temperature at depth of 10 cm were recorded continuously using automatic weather station. Leaf transpiration rate and leaf stomatal conductance were also measured using LI-6400. The data were then processed using Excel 2003, Visual C++ 6.0, and SPSS 13.0. The individual transpiration model was developed by analyzing the correlation between transpiration and environmental factors along with plant characteristic factors. The model is evaluated to be good based on the performance indices. The mathematical model of daily transpiration for *S. bungeana* in Huangfuchuan watershed was developed based on the model of hourly transpiration.

Keywords: *Stipa bungeana*; transpiration model; Huangfuchuan watershed

在黄土高原干旱半干旱地区, 水资源是制约社会经济发展和生态环境改善的主要因素之一^[1]。植物蒸散量的测定是水分生态研究中的一个重要环节和内容^[2], 研究该地区主要植被的蒸腾耗水性能极为重要。本氏针茅群落是该区地带性草地植被类型, 在植被恢复、水土保持以及畜牧业生产中具有重要的地位与作用^[3]。

本研究应用离体称重法和 LI-6400 便携式光合系统测定了内蒙古黄土高原本氏针茅的蒸腾强度和蒸腾速率, 通过分析本氏针茅每小时单株蒸腾量与环境因子之间的关系, 建立了单株本氏针茅蒸腾量数学模型, 可为该地区的生态植被建设和水分平衡研究打下良好的理论基础。本氏针茅 (*Stipa bungeana* Trin.), 又名长芒草, 为多年旱生丛生禾

收稿日期: 2008-06-06

修回日期: 2008-09-30

资助项目: 内蒙古自然科学基金项目(200711020505); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB106807); 国家自然科学基金项目(30660034)

作者简介: 于红博(1977—), 女(满族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士生, 讲师, 主要从事生态建模和遥感图像处理方面的研究工作。

E-mail: y_b_fan6@yahoo.com.cn.

通信作者: 杨劼(1965—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事植物生理和草地生态学方面的教学和研究工作。

E-mail: jyang@mail.imu.edu.cn.

草^[4], 属禾本科针茅属, 广泛分布于我国西北、华北、西南和东北各地^[5]。在内蒙古鄂尔多斯高原其多分布于丘陵坡地以及东胜梁地典型草原植物区、准格尔黄土丘陵典型草原植物区、毛乌素典型草原沙地植物区、鄂托克东部荒漠草原植物区^[4], 为典型的草原建群种。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

本研究的试验是在内蒙古准格尔旗皇甫川水土保持试验站进行的, 该站位于黄河一级支流皇甫川支流十里长川中游东岸, 位于 $39^{\circ}43' - 39^{\circ}46' N$, $110^{\circ}07' - 111^{\circ}03' E$, 平均海拔高度 1 100 m, 属于典型温带半干旱气候, 年平均气温 $6.2^{\circ}C$, 年平均降水量 368.7 mm, 其中, 6—9 月降水量占年降水量的 80%, 年平均蒸发量 1 946.6 mm, 冬春季风力强盛而频繁, 年平均风速 2~3 m/s, 大风日数 10~30 d。主体地貌为小流域丘陵沟壑地貌, 该区土壤水蚀、风蚀和重力侵蚀并存, 属强烈水土流失区, 是水土保持综合治理的主要区域。

试验区天然植被以小半灌木和草本植物居多, 建群种有百里香 (*Thymus serpyllum*)、本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 等。人工植被以人工油松 (*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、沙柳 (*Salix psammophylla*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 为主。农作物以玉米 (*Zea mays*)、糜子 (*Panicum miliaceum*) 等为主。

1.2 实验材料

在皇甫川水土保持试验站选取的本氏针茅样地地理坐标位于 $111^{\circ}07' E$, $39^{\circ}45' N$, 海拔高度 1 111 m, 土壤主要为栗钙土。

1.3 研究方法

采用快速离体称重法, 测定植物蒸腾强度的日动态, 从 6:00—19:00, 每隔 1 h 或 2 h 测定一次。电子天平的灵敏度为 0.01 g。

用 LF-6400 便携式光合系统在每日 6:00—19:00 对本氏针茅进行同步测定, 每隔 1 h 或 2 h 测定一次。选取健康的植株进行测量, 每次重复 3 株, 取平均值。可得到叶蒸腾速率 [$mmol / (s \cdot m^2)$]、气孔导度 [$mol / (m^2 \cdot s)$] 等参数。测定结束后摘下叶片用格纸计算叶面积。用自动气象站同步连续监测太阳总辐射 (kW / m^2)、空气温度 ($^{\circ}C$)、空气相对湿度

(%)、2 m 处风速 (km / h)、2 m 处风向 ($deg.$)、10 cm 处土壤温度 ($^{\circ}C$)、雨量 (mm) 等环境因子, 每 0.5 h 记录一次。

1.4 数据处理

用 Excel 2003, Visual C++ 6.0 和 SPSS 13.0 对所测定数据进行处理和分析。

2 单株本氏针茅瞬时蒸腾量模型建立

2.1 模型概述

经过分析本氏针茅每小时单株蒸腾量与环境因子以及植物特性因子之间的关系, 利用所测数据建立的单株本氏针茅瞬时蒸腾量与相关因子的模型如下:

$$E_{T(h,h)} = \max \left[a \times \frac{(\Delta \cdot Q + \gamma \cdot T_r) \cdot W}{500 \cdot (\Delta + \gamma \cdot u_2)} + b, 0 \right] \quad (1)$$

式中: $E_{T(h,h)}$ ——单株本氏针茅瞬时蒸腾量 [$g / (h \cdot 株)$], 即每小时每株本氏针茅蒸腾的水量; Q ——太阳总辐射 (W / m^2); Δ ——饱和水汽压斜率 (kPa / K); γ ——潜在蒸散常数 (kPa / K); T_r ——叶蒸腾速率 [$mmol / (m \cdot s)$]; u_2 ——2 m 高度处风速 (m / s); W ——本氏针茅单株叶干重 ($g / 株$); a, b ——调整因子, 这里取 $a = 1.1457, b = 0.9675$ 。

饱和水汽压斜率(饱和水汽压与温度的比率) Δ 的计算公式^[6]如下:

$$\Delta = 21.25 \times e_s \times \left[\frac{4097.7}{(T_d + 237.3)^2 (T_d + 273)} - \frac{1}{(T_d + 273)^2} \right]$$

式中: T_d ——空气温度 ($^{\circ}C$); e_s ——饱和水汽压 (kPa)。

$$e_s = 0.61078 \times \exp \left(\frac{17.268 \times T_d}{237.3 + T_d} \right)$$

干湿球常数(即潜在蒸散常数) γ 的计算公式^[6]如下:

$$\gamma = \frac{2.9}{595 - 0.51 T_d}$$

式中各变量说明同前。

2.2 精度分析

2.2.1 模型评价指标 运用的模型评价指标有相关性指标, 包括决定系数 R^2 和修正决定系数 R_a^2 , 可以定量地反映模型的最优性, 但不能估计模型的无偏性; 第二类为绝对误差指标, 包括平均绝对误差 MAE、平均误差平方的平方根(标准偏差) RMSE 和极值效应 Outlier, 可以测定模型的绝对无偏性及极值效应; 第三类为相对误差指标, 拟合度(一致性指数) d , 可以定量地描述模型的相对无偏性^[7]。这些指标计算式如下:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2$$

$$R_a^2 = R^2 - \frac{N_v(1 - R^2)}{N - N_v - 1}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{N}; \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}}$$

$$Outlier = RMSE - MAE$$

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

式中: O_i, P_i —— 实测值和预测值; \bar{O}, \bar{P} —— 实测值的平均值和预测值的平均值; N —— 样本总数; N_v —— 自变量数。

2.2.2 模型精度分析 本氏针茅瞬时蒸腾量模型的评价指标值如表 1 所示。

复相关系数 R 用于反映所有自变量和应变量关系的密切程度, 其值在 0~1 之间, 越大越好, 它的平方称决定系数 R^2 , 当根据 R^2 的大小判断方程的优劣时, 结论总是变量最多的方程最好, 显然存在缺陷。因此, 修正决定系数 R_a^2 是衡量方程优劣的常用指标之一, 它也反映模型的拟合优度, 但同时考虑了方程中自变量的个数^[8], 它不仅与模型拟合性成正比, 而且与模型中自变量的数量成反比^[7]。平均绝对误差 MAE 和平均误差平方的平方根 RMSE 这两个指标可检验模型的无偏性。指标值越低, 模型的无偏性越强, 模型也越准确。对同一模型来说, RMSE 一般大于 MAE。RMSE 与 MAE 的差异程度 Outlier 可反映数据中极值影响的大小^[7]。拟合度 d 越接近于 1, 表明模型拟合越好^[9]。

从表 1 来看, 决定系数和修正决定系数都在 0.63 以上, 拟合度为 0.879 2, 绝对误差指标都较小, 模型的无偏性显著, 拟合程度较好。模拟结果如图 1 所示。

表 1 模型评价指标值

指标	R^2	R_a^2	MAE	RMSE	Outlier	拟合度
指标值	0.637	0.633	0.584	0.745	0.161	0.879

3 单株本氏针茅日蒸腾模型的建立

3.1 模型概述

经试验测定及分析发现, 在晴朗天气条件下, 大部分本氏针茅蒸腾日变化呈双峰曲线。因此, 将双峰曲线分割为 4 部分曲线, 假定各部分曲线符合正弦曲

线变化形式(图 2), $E_{T_{max1}}$ 为一天中单株本氏针茅经过 t_1 蒸腾时数(h)达到的第一个蒸腾量峰值 [g/(h·株)], $E_{T_{max2}}$ 为经过 t_3 蒸腾时数达到的第二个蒸腾量峰值, m 为正弦曲线②左侧延长线与横轴交点的横坐标, n 为正弦曲线③左侧延长线与横轴交点的横坐标, t_2 为正弦曲线②与③交点的横坐标, ET_3 为经过 t_2 蒸腾时数达到的蒸腾量, N 为从日出到日落的时间长度(h/d)。

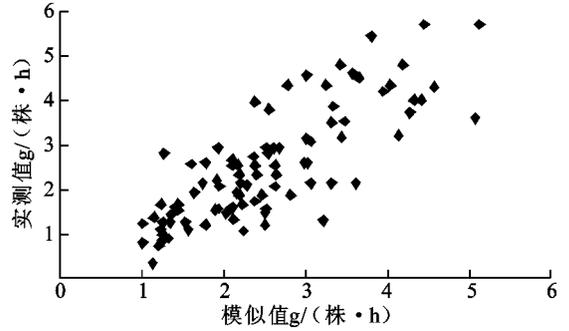


图 1 单株本氏针茅瞬时蒸腾量模拟值与实测值对比

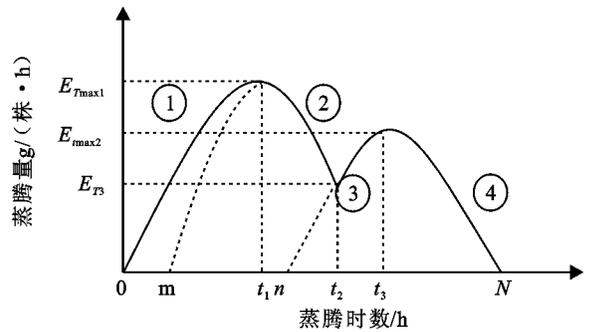


图 2 本氏针茅蒸腾量双峰模型

因此, 任意时刻单株本氏针茅的蒸腾量 $E_{T(h, h, i)}$

[g/(h·株)] 的日变化呈下述正弦曲线:

$$\begin{cases} E_{T(h, h, i)} = E_{T_{max1}} \sin\left(\frac{\pi t}{2t_1}\right) & 0 \leq t \leq t_1 \\ E_{T(b, h, i)} = E_{T_{max1}} \sin\left[\frac{\pi(t-m)}{2(t_1-m)}\right] & t_1 < t \leq t_2 \\ E_{T(b, h, i)} = E_{T_{max2}} \sin\left[\frac{\pi(t-n)}{2(t_3-n)}\right] & t_2 < t \leq t_3 \\ E_{T(h, h, i)} = E_{T_{max2}} \sin\left[\frac{\pi(t+N-2t_3)}{2(N-t_3)}\right] & t_3 < t \leq N \end{cases} \quad (2)$$

式中: t —— 从日出到 $E_{T(b, h, i)}$ 出现时的时间间隔(h), 未知量 m 由(2)中第二个式子求得:

$$E_{T3} = E_{T_{max1}} \sin\left(\frac{\pi(t_2 - m)}{2(t_1 - m)}\right) \Rightarrow$$

$$m = \frac{t_2 - t_1 \cdot a}{1 - a} \quad (\text{若 } a = 1 \quad m = 0)$$

其中, $a = \frac{t_2 - m}{t_1 - m} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{E_{T3}}{E_{T_{max1}}}\right)$

未知量 n 由公式(2)中第 3 个公式求得:

$$ET_3 = ET_{\max} 2 \sin \left[\frac{\pi(t_2 - n)}{2(t_3 - n)} \right] \Rightarrow$$

$$n = \frac{t_2 - t_3 \cdot b}{1 - b} \quad (b = 1, n = 0)$$

将(2)式进行积分可得单株本氏针茅日蒸腾量

$ET_{(h, d, double)}$ [g/(d·株)]:

$$\begin{aligned} ET_{(b, d, double)} = & \int_0^{t_1} ET_{\max} 1 \sin \left[\frac{\pi t}{2t_1} \right] dt + \\ & \int_{t_1}^{t_2} ET_{\max} 1 \sin \left[\frac{\pi(t-m)}{2(t_1-m)} \right] dt + \\ & \int_{t_2}^{t_3} ET_{\max} 2 \sin \left[\frac{\pi(t-n)}{2(t_3-n)} \right] dt + \\ & \int_{t_3}^N ET_{\max} 2 \sin \left[\frac{\pi(t+N-2t_3)}{2(N-t_3)} \right] dt = \\ & ET_{\max} 1 \frac{2t_1}{\pi} - ET_{\max} 1 \frac{2(t_1-m)}{\pi} \cos \left(\arcsin \frac{ET_3}{ET_{\max} 1} \right) + \\ & ET_{\max} 2 \frac{2(t_3-n)}{\pi} \cos \left(\arcsin \frac{ET_3}{ET_{\max} 2} \right) + \\ & ET_{\max} 2 \frac{2(N-t_3)}{\pi} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 N 由下式获得^[10]:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

式中: ω_s —— 太阳时角(弧度)。

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$

式中: φ —— 测点纬度(弧度); δ —— 太阳赤纬(弧度)。

$$\delta = 0.4209 \sin(0.0172 \text{ DOY} - 1.39)$$

式中: DOY —— 年内日序, 如 1 月 1 日, DOY = 1。

对于式(3)比较复杂, 实用性不强。因此, 以单株本氏针茅一天中最大的蒸腾量 [g/(h·株)] 为峰值点向左右各作一正弦曲线(图 3), 则任意时刻单株本氏针茅的蒸腾量 $ET_{(h, h, i)}$ [g/(h·株)] 的日变化呈下述正弦曲线:

$$\begin{cases} ET_{(h, h, i)} = ET_{\max} \sin \left(\frac{\pi t}{2t_{\max}} \right) & t \leq t_{\max} \\ ET_{(h, h, i)} = ET_{\max} \sin \left[\frac{\pi(t+N-2t_{\max})}{2(N-t_{\max})} \right] & t > t_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ET_{\max} —— 一天中某一时刻单株本氏针茅的最大蒸腾量 [g/(h·株)]; t_{\max} —— 从日出到 ET_{\max} 出现时的时间间隔(h); 其它量意义同前。

对(4)式进行积分, 可得晴天全天的单株本氏针茅的日蒸腾量 $ET_{(b, d, single)}$ [g/(d·株)], 即

$$ET_{(h, d, single)} = \int_0^{t_{\max}} ET_{\max} \sin \left(\frac{\pi t}{2t_{\max}} \right) dt +$$

$$\int_{t_{\max}}^N ET_{\max} \sin \left[\frac{\pi(t+N-2t_{\max})}{2(N-t_{\max})} \right] dt = ET_{\max} \frac{2N}{\pi}$$

分别将实测数据代入式(3)和式(5), 可计算出晴

天全天的单株本氏针茅的日蒸腾量 [g/(d·株)], 对比用单峰方法得到的值与用双峰方法得到的值相差有多少(图 4), 用两个模型计算的值相差不大, 单峰模型计算的值稍微偏大。它们的关系为:

$$ET_{(b, d, double)} = 0.946 \times ET_{(b, d, single)} + 1.013$$

$$R^2 = 0.9674 \quad (6)$$

因此, 在实际应用中, 可以采用单峰模型公式(5)计算, 得到的值再通过公式(6)进行转化, 来对单株本氏针茅的日蒸腾量进行估算, 以此解决双峰模型的复杂性。

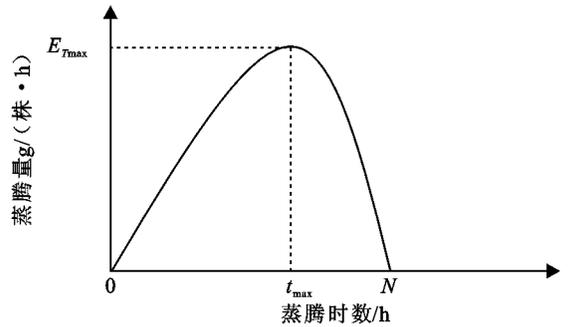


图 3 本氏针茅蒸腾量单峰模型示意图

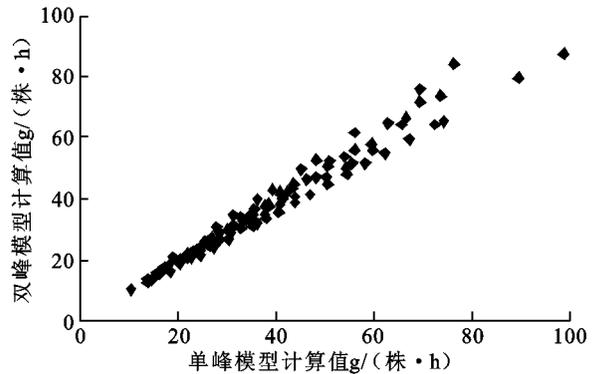


图 4 本氏针茅日蒸腾量单峰模型模拟值与双峰模型模拟值对比

3.2 模拟结果

限于试验条件, 无法对单株本氏针茅日蒸腾量作实际测定。在通常情况下, 单株本氏针茅的日蒸腾量 [g/(d·株)] 是用下式得到的:

$$ET_{(b, d)} = ET_{(b, h)} \cdot N \quad (7)$$

式中: $ET_{(b, d)}$ —— 单株本氏针茅的日蒸腾量 [g/(d·株)]; $ET_{(b, h)}$ —— 单株本氏针茅平均每 1 h 蒸腾量 [g/(h·株)], 可用式(1)计算, 只是环境因子和植物特性因子都为日均值。

对用(7)式计算的值和模型估算的值进行了对比(图 5)。可以看出, 传统方法估算的值比模型的模拟值略微偏高。

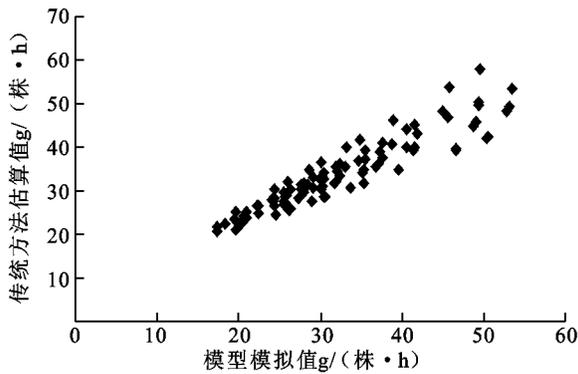


图 5 传统方法估算值与模型模拟的本氏针茅日蒸腾量对比

4 结论

利用太阳总辐射、叶蒸腾速率、饱和水汽压斜率、潜在蒸散常数、风速和单株叶干重建立了皇甫川流域单株本氏针茅瞬时蒸腾量 $[g/(h \cdot \text{株})]$ 数学模型, 通过对模型评价指标进行计算及分析, 模型拟合度较好, 可以获得满意的数值模拟结果。在此基础上, 建立了单株本氏针茅的日蒸腾量 $[g/(d \cdot \text{株})]$ 数学模型, 与传统方法相比, 模拟值稍偏低。由于该方法经过严格的推导, 故认为传统方法估算的值有偏高的可能性。

(上接第 69 页)

(4) 土壤垂直分层状况。不同类型土地的土壤含水量变化程度不同, 同一类型土地的土壤含水量变化幅度也有差异, 所以, 在黄土高原沟壑区发展农业首先要考虑土壤水分的可利用情况, 针对不同类型的土壤水分环境, 合理种植土壤水分利用率高的作物, 提高土地利用效率。

[参 考 文 献]

- [1] 王继夏, 孙虎, 王祖正, 等. 延安碾庄沟流域梯田与坝地土壤水分对比分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 88-93.
- [2] 孙一琳, 王洪英, 刘秀萍, 等. 黄土高原人工刺槐林土壤水分特征[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2007, 24(2): 123-126.
- [3] 陈洪松, 邵明安, 王克林, 等. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1853-1857.
- [4] 李开元. 黄土高原南部农田水分条件及其产量效应[J].

[参 考 文 献]

- [1] 高清竹, 杨劫, 宋炳煜, 等. 黄河中游砒砂岩地区长川流域生态用水分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 499-507.
- [2] 熊伟, 王彦辉, 程积民, 等. 三种草本植物蒸散量的对比试验研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 170-172.
- [3] 胡相明, 程积民, 万惠娥, 等. 黄土丘陵区不同立地条件下植物种群生态位研究[J]. 草业学报, 2006, 15(1): 29-35.
- [4] 赵一之. 鄂尔多斯高原维管植物[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2006.
- [5] 王静, 程积民, 万惠娥. 黄土高原本氏针茅光合特性及生产力的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 71-73.
- [6] 许红梅. 黄土高原丘陵沟壑区小流域植被净第一性生产过程模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.
- [7] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间预测的统计模型[J]. 2001, 20(6): 739-751.
- [8] 张文彤. SPSS 11 统计分析教程(高级篇)[D]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002.
- [9] 乐通潮, 张万昌. 双参数月水量平衡模型在汉江流域上游的应用[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 97-103.
- [10] 刘静, 王连喜, 马力文, 等. 中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 201-207.

水土保持学报, 1995, 15(6): 6-10.

- [5] 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(4): 357-365.
- [6] 李德广. 旱地土壤水分的特征阶段、垂直类型与土壤水分预报[J]. 水土保持通报, 1999, 10(1): 36-42.
- [7] 周择福. 太行山低山区不同植被条件下土壤水分动态变化规律的研究[M]. 北京: 北京林业大学出版社, 1994.
- [8] 张北赢, 徐学选, 刘江华, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式的土壤水分效应[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 5-9.
- [9] 穆兴民. 黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 41-45.
- [10] 赵合理, 蒋定生, 范兴科. 不同水土保持措施对坡面降水再分布的影响[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 75-83.
- [11] 杨文治. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学技术出版社, 1992.