

# 黄土高原丘陵沟壑区小流域植被净第一性生产力模型

许红梅<sup>1</sup>, 贾海坤<sup>2</sup>, 黄永梅<sup>2</sup>

(1. 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081; 2. 北京师范大学资源学院, 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 构建了机理性植被净第一性生产力模型 (Vegetation-Soil-Integrated-Model, VSIM), 该模型将土壤水分动态过程与植被生长过程相耦合, 用以分析黄土高原丘陵沟壑区土壤水分对植被生产力的影响。模型考虑了叶片尺度上气孔导度对净光合过程和蒸腾过程的影响, 在此基础上通过考虑植被冠层结构和地形因素的影响对模型进行尺度转换, 并以位于黄土高原丘陵沟壑区纸坊沟流域的观测数据对模型进行参数化和验证。结果表明对于生物量的模拟草本和半灌木比乔、灌木好, 主要植被类型 LAI 的季节变化与观测结果具有很好的一致性, 模型能够反映出流域降雨-产流过程, 并且基本上也能够反映土壤水分的时空变化范围。模拟结果表明, 刺槐林和苹果林属于高光合-低蒸腾类型, 农作物、白羊草群落和达乌里胡枝子群落属于高光合-高蒸腾类型, 铁杆蒿群落和芨芨群落属于低光合-低蒸腾类型, 而沙棘灌丛和柠条灌丛的净第一性生产力居中, 但蒸腾量较高。流域内土壤水分在多年序列上基本平衡, 而在不同的水文年表现出失衡。其中刺槐林、苹果林和沙棘灌丛的多年平均土壤水分在年内存在少量亏缺, 铁杆蒿群落和芨芨群落略有增加, 而其它植被类型基本保持平衡。丰水年不同植被类型土壤含水量都明显高于欠水年, 土壤水分含量的变化在丰水年表现为盈余, 而在欠水年表现为明显的亏缺。

**关键词:** 气孔导度; 植被净第一性生产力; 土壤水分动态; 模拟模型; 黄土高原丘陵沟壑区

**文章编号:** 1000-0933(2005)05-1064-11 **中图分类号:** P931.6, Q14 **文献标识码:** A

## A simulation model of net primary production at watershed scale in hilly area of Loess Plateau, China

XU Hong-Mei<sup>1</sup>, JIA Hai-Kun<sup>2</sup>, HUANG Yong-Mei<sup>2</sup> (1. *The Laboratory of Climate Study of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*; 2. *College of Resource Science and Technology of Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters, Ministry of Education of China, Beijing 100875, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1064~1074.

**Abstract:** The hilly area of loess plateau is well known for its high erosion rate and sensitive to the global change for their vulnerable ecosystem. Vegetation is the main factor to improve the environment of soil erosion and water loss. The net primary production is the significant characteristic of ecosystem structure and function. The production of different vegetation types and plant species under various environmental conditions reflect their adaptability to Loess Plateau.

In arid and semiarid ecosystem of Loess Plateau of China, the average soil moisture is quite low and the patterns of seasonal precipitation and the quantity of soil water availability are highly variable. Because of this, water is a major determination of ecosystem processes. Modeling soil water dynamic and soil moisture spatial distribution at watershed scale are very important.

A model (VSIM) to simulate net primary production model at watershed scale was developed to explore the effect of soil

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40401009); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018605); 国家自然科学基金资助项目(90202008, 90211002)

**收稿日期:** 2004-05-27; **修订日期:** 2005-01-20

**作者简介:** 许红梅(1974~), 吉林前郭人, 博士, 主要从事陆地生态系统及其对全球变化响应模拟研究。E-mail: xuhm@cma.gov.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 40401009), National Key Projects for Basic Research in China (No. G2000018605) and National Natural Science Foundation of China (No. 90202008, 90211002)

**Received date:** 2004-05-27; **Accepted date:** 2005-01-20

**Biography:** XU Hong-Mei, Ph. D., mainly engaged in simulation on terrestrial ecosystems and its response to global change. E-mail: Xuhm@cma.gov.cn

water dynamic on the primary production processes. The model coupled a soil water dynamic module and a vegetation growth module. The former is a daily time step, multi-horizon, distributed spatial model. The later included a mechanism model of stomatal conductance based on the mechanical character of guard cell, which used to reflect both the influence of soil water potential to stomatal conductance and the stomatal control to net photosynthesis and transpiration processes at leaf scale. Scaling up to canopy and watershed scale through considered the effect of canopy structure and heterogeneity of topography.

The main inputs of the model include photosynthetic characteristics of main vegetation type, meteorological data, soil texture and physical properties. The outputs are soil water of 4 soil layers, evaporation, transpiration, runoff, net primary production and biomass of leaf, stem and root. The model was used in Zhifanggou watershed, which located in forest steppe zone and belonged to hilly area of Loess Plateau, and the model validation was tested by observation data sets. In the modeling experiment, simulations show to provide good approximation with field observation data. The simulation of biomass of grass and sub-shrub are better than that of arbor and shrub, and the dynamic of LAI of main vegetation types have well coherence with the observation results. The model could reflect the processes of precipitation-runoff at the watershed, and could indicate the spatio-temporal changes of soil water content.

The simulation results show that (1) Form. *R. pseudoacaciat* and *M. pumila* have highest primary production with lower transpiration, and crop, Form. *B. ischaemum* and *L. davurica* have higher primary production with highest transpiration, and the primary production and transpiration of Form. *A. gmelinii* and *A. giradii*. are all lowest, while Form. *H. rhamnoides* and *C. korshinskii* have moderate primary production with higher transpiration. (2) Soil water keep balance at long term, but with fluctuating in short term. Soil moisture of Form. *R. pseudoacaciat*, *M. pumila* and *H. rhamnoides* is deficit higher, soil water is complemented at end of year for Form. *A. gmelini* and *A. giradii*, and soil water keep balance for others. Soil moisture is higher in high-flow year than that in low-flow year for all vegetation types, and shows serious deficit in low-flow year and abundant in high-flow year.

**Key words:** stomatal conductance; net primary production; soil water dynamic; simulation model; hilly area of Loess Plateau

黄土高原地区是我国乃至全世界水土流失最为严重的地区。脆弱的生态系统结构使其成为全球变化响应的敏感区域。植被是改善该区域水土流失环境的最重要因素,植被净第一性生产力是生态系统结构和功能的重要表征。不同植被类型、不同植物种在不同环境条件下的生产力直接反映了它们对黄土高原的适应性。通过构建机理性的小流域植被净第一性生产过程模型,可以为区域生态系统恢复和重建提供理论依据。

## 1 模型介绍

黄土高原丘陵沟壑区降雨量少,降雨强度高,潜在蒸发强烈,深达几十到百米的黄土层又使得地下水难以到达地面,土壤水分成为植物生长的主要水分来源<sup>[1]</sup>。但是,由于蒸发力大于降水量,土壤水分经常处于亏缺状态,因此,黄土高原地区植被生产力模拟的关键就是土壤水分的模拟。土壤水分一方面通过根系进入植物体,通过叶片表面的气孔以蒸腾的形式释放到大气中,另一方面通过蒸发作用从地表散失。前者主要受气孔行为影响,而后者主要由到达地表的能量所决定。植物的光合和蒸腾过程是植被生产力形成的基础,对于叶片水平的的光合与蒸腾来说,气孔是关键的控制因素,在植物水分散失和 CO<sub>2</sub> 气体交换过程中具有调控作用。本文构建的模型选用了包含了土壤水分状况对气孔行为影响的气孔导度模型<sup>[2]</sup>,该模型能够很好的反映干旱半干旱区土壤水分状况对植物蒸腾过程和光合过程的影响<sup>[3]</sup>。在冠层和流域尺度上,随着时间和空间尺度的加大影响光合和蒸腾过程的主导因素也有所改变。由于黄土高原丘陵沟壑区地形具有明显的空间异质性,通过考虑坡度、坡向和海拔对地表接受太阳辐射的影响可以反映辐射分布的空间差异,而将 LAI 作为冠层结构的主要表征,一方面考虑了 LAI 对于冠层中辐射传输过程的影响,同时也考虑 LAI 在降雨截留、蒸腾、蒸发和干物质形成中的作用,在土壤水分运动中考虑了不同植物种类根系在土层分配对根系吸水的影响,以及气孔导度对蒸腾的影响等,这些为尺度转换提供了基础。在尺度转换过程中,通常认为水分平衡和植被生产力形成的机理没有改变,因此,通过流域地形因素、植被类型、根系分布及土壤类型等的空间分布,可以将叶片尺度的模型转换到流域尺度。本文所构建的植被净第一性生产过程模型包括土壤水分子模型和植被生长子模型,模型的结构图见图 1。模型模拟了降雨入渗、冠层截留、地表径流、土壤水分运动和蒸腾蒸发等水分循环过程以及光合作用、呼吸作用、同化物形成和分配等植被生长过程。

### 1.1 土壤水分子模型

根据黄土高原水分循环特征可以做出以下基本假设:在模型中每个栅格的空间分辨率为 30m×30m,土壤剖面深度为 2m,模型中只考虑土壤水分在土体中的垂直运动,并且 2m 以下土壤水分的渗漏不考虑。根据土壤水分运动状况和植物根系分布情

况,土壤剖面分为4层:表层为20cm,第2层为20~60cm,第3层为60~100cm,第4层为100~200mm。由于降雨入渗导致的每层土壤中水分的增加是取决于各土层的土壤持水量,自上而下依次进行,一天内降雨(非连续性降雨)对土壤水分的补充不超过60cm,连续两天以上的降雨(连续性降雨)对土壤水分的补充不超过100cm,多余的降雨以地表径流的形式损失,并且不考虑栅格间的径流作用。土壤持水量是由土壤水势所决定的。水分在土层中存在再分配,土壤水分再分配过程遵循依据达西定律和连续性原理建立的非饱和流运动方程。土壤水分的散失主要通过表层土壤的蒸发和各土层的蒸腾进行的。由蒸发导致的土壤水分散失遵循 Penman-Monteith 方程,地表接受的有效辐射决定蒸发量。蒸腾导致的每层中水分的散失由不同植被类型的根系在土层中的分布决定,同时与植被冠层蒸腾性能和叶面积指数相关。

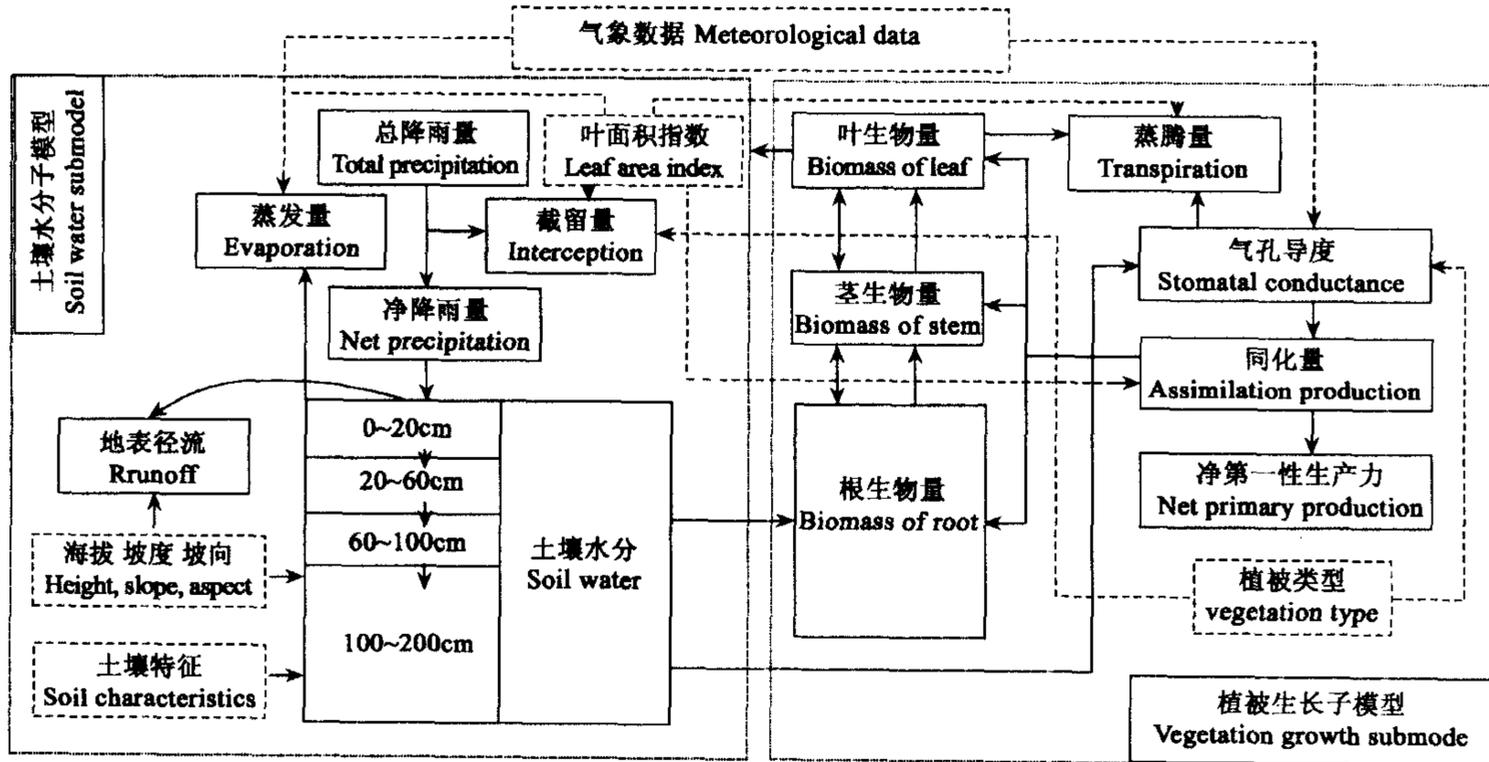


图1 黄土高原丘陵沟壑区小流域植被净第一性生产力模型结构图

Fig. 1 Structure Figure of the model of net primary production at watershed scale in hilly area of Loess Plateau, China

在降雨的情况下,由于入渗导致的降雨对土壤水分的补充见方程(1)~(5):

$$\Delta\theta^j = \frac{1}{\Delta D_j^s} (f_{in}^j - f_{out}^j) \tag{1}$$

$$f_{in}^j = P_{re} - E_{vs} - R_{off} \tag{2}$$

$$f_{out}^j = f_{j(j+1)} + T_r^j, j = 1, 2, 3 \tag{3}$$

$$f_{j(j+1)} = \begin{cases} k(\theta)(\theta^j - \theta_f^j)\Delta D_j^s & \frac{1}{D_j^s}(f_{in}^j - T_r^j) + \theta^j < \theta_s \\ f_{in}^j - (\theta_s^j - \theta^j)\Delta D_j^s + k(\theta)(\theta^j - \theta_f^j)\Delta D_j^s & \frac{1}{D_j^s}(f_{in}^j - T_r^j) + \theta^j > \theta_s \end{cases} \tag{4}$$

$$f_{in}^j = f_{(j-1)j}, j = 1, 2, 3 \tag{5}$$

式中,  $\theta^j$  为第  $j$  层土壤体积含水量(%),  $\Delta D_j^s$  为第  $j$  层土层厚度(cm),  $f_{in}^j$  为第  $j$  层流入的水量(cm),  $f_{out}^j$  为第  $j$  层流出的水量(cm),  $P_{re}$  为净降雨量(cm),  $E_{vs}$  为土壤表层蒸发量(cm),  $R_{off}$  为流出的径流量(cm),  $T_r^j$  为第  $j$  层植物蒸腾耗水量(cm),  $f_{(j-1)j}$  为由于入渗导致的第  $(j-1)$  层流入第  $j$  层的水量(cm),  $\theta_f^j$  为第  $j$  层田间持水量(%),  $\theta_s^j$  为第  $j$  层饱和持水量(%),  $k(\theta)$  为土壤导水率(cm/d)。

土壤水分在土层之间的再分布遵循方程(6)~(7):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial D} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial D} \right] - \frac{\partial k(\theta)}{\partial D} - T_r + \theta \cdot \sum_{i=1}^n \delta(t - t_0) \tag{6}$$

$$D(\theta) = k(\theta) / \frac{d(\theta)}{d\Psi} \tag{7}$$

式中,  $\Psi$  是土壤水势,  $D(\theta)$  为水分扩散系数。

根据黄土高原地区已有研究的成果<sup>[4~6]</sup>, 在本研究所采用的截留模型如方程(8)~(9):

$$S_v = I_{max} (1 - \exp(-0.5LAI)) \tag{8}$$

$$I_c = \begin{cases} P & P < S_v \\ S_v & P > S_v \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $S_v$  为植被冠层蓄水能力(cm),  $I_{\max}$  为植被最大截留能力(cm),  $I_c$  为冠层截留量(cm),  $P$  为降雨量(cm)。

在本研究中径流量的计算如下:

非连续性降雨

$$R_{off} = \begin{cases} 0 & \sum_{j=1}^2 \frac{1}{D_j} (f_{in}^j - T_j^j) + \theta^j < \theta_f \\ f_{23} & \sum_{j=1}^2 \frac{1}{D_j} (f_{in}^j - T_j^j) + \theta^j > \theta_f \end{cases} \quad (10)$$

连续性降雨

$$R_{off} = \begin{cases} 0 & \sum_{j=1}^3 \frac{1}{D_j} (f_{in}^j - T_j^j) + \theta^j < \theta_f \\ f_{34} & \sum_{j=1}^3 \frac{1}{D_j} (f_{in}^j - T_j^j) + \theta^j > \theta_f \end{cases} \quad (11)$$

蒸散量的计算遵循 Penman-Monteith 方程, 见方程(12):

$$ET = \frac{1}{L} \frac{\Delta \cdot R_n + \rho \cdot C_p \cdot D_a \cdot g_{ca}}{\Delta + \gamma \cdot [1 + (g_{ca}/g_{cs})]} \quad (12)$$

式中,  $ET$  是实际最大蒸散量(cm),  $L$  为水的汽化潜热( $J \cdot m^{-3}$ ),  $\Delta$  为饱和水汽压与温度的比率( $kPa \cdot k^{-1}$ ),  $R_n$  为净辐射通量( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $\rho$  为恒定气压下空气密度( $g \cdot m^{-3}$ ),  $C_p$  是恒定气压比热( $J \cdot g^{-1} \cdot k^{-1}$ ),  $\gamma$  是潜在蒸散常数( $kPa \cdot k^{-1}$ ),  $D_a$  为冠层内水汽压亏缺(kPa),  $g_{ca}$  为边界空气动力学导度( $m \cdot s^{-1}$ ),  $g_{cs}$  为冠层导度( $m \cdot s^{-1}$ )。

Penman-Monteith 方程是以能量平衡和边界层扩散理论为基础的。根据能量平衡方程, 冠层上部接受的净辐射通量在理论上可以用(13)计算<sup>[7]</sup>:

$$R_n = R_s(1 - C_r) - R_l \quad (13)$$

式中,  $R_n$  为净辐射通量( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $R_s$  为太阳总辐射( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $C_r$  为反射率(对于绿色植物通常取 0.25),  $R_l$  为长波辐射( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )。

考虑坡度坡向对辐射的影响<sup>[8,9]</sup>, 地面某一点实际接受到的太阳总辐射为:

$$R_0(\varphi, A, B) = I_0 \times E_0 \times [\omega_0(\sin\varphi\cos B - \cos\varphi\sin B\cos A)\sin\delta + (\cos\varphi\cos B + \sin\varphi\sin B\cos A)\sin\omega_0\cos\delta - \sin B\sin A\cos\delta\cos\omega_0] \quad (14)$$

式中,  $R_0(\varphi, A, B)$  为任一点实际接受的日太阳总辐射( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $I_0$  为太阳常数( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $E_0$  是日地距离订正系数;  $\omega_0$  为日没时角(弧度);  $\varphi$  为地理纬度;  $A$  为坡向(弧度);  $B$  为坡度(弧度);  $\delta$  为太阳赤纬(弧度)。

边界层导度可以用方程(15)计算<sup>[10,11]</sup>:

$$g_{ca} = \frac{k^2 u}{\{\ln[(z-d)/z_0]\}^2} \quad (15)$$

式中,  $k$  为 von Karman 常数(通常取 0.4),  $u$  为风速( $m \cdot s^{-1}$ ),  $z$  是风速记的高度(2m),  $d$  为零平面位移(m),  $z_0$  为下垫面粗糙高度(m)。

假定冠层中所有叶片气孔导度都一致, 则冠层导度可以按照方程(16)~(17)计算<sup>[12,13]</sup>:

$$g_{cs} = 0.0432LAI \cdot g_s \quad (16)$$

$$g_s = \frac{g_{um} + k_{\psi}\Psi_s + k_{a\beta}I_p}{1 + k_{\beta g}d_{vp}} \quad (17)$$

式中,  $g_s$  为单叶片气孔导度( $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), 其参数介绍见参考文献<sup>[3]</sup>;  $LAI$  为叶面积指数( $m^2 \cdot m^{-2}$ ), 表示单位地面上的叶面积。

考虑土壤水分对地表蒸发量和蒸腾量影响, 实际蒸发和蒸腾量的计算如下:

$$E_{vs} = \max[ET \exp(-C_0LAI) \cdot k_w(\theta^j), 0] \quad (18)$$

$$T_j^j = ET(1 - \exp(-C_0LAI)) \cdot f_j^j k_w(\theta^j) \quad (19)$$

式中,  $E_{vs}$  是地表蒸发量(cm),  $T_j^j$  为第  $j$  层的蒸腾量,  $k_w(\theta)$  是土壤供水系数(无量纲),  $\theta^j$  是第  $j$  层土壤的凋萎湿度(%),  $f_j^j$  是根系在第  $j$  层的分布比例。

## 1.2 植被生长子模型

本文所用的净光合速率模型是 Thornley & Johnson<sup>[14]</sup>提出的叶片水平的模型。该模型具有简化了的生物化学过程,但却直接突出了气孔导度的控制作用,因此对北方干旱区的植物有较强的适应性。

对于 C3 植物,净光合速率模型为:

$$P_n = \frac{[g_{sc}g_{so}(\alpha_p I_p + g_x C_a + g_p O_a) - R_d P_a (g_{so}g_x - g_{sc}g_p) + \alpha_p I_p P_a (g_{sc}g_p + g_{so}g_x)]}{2P_a (g_{so}g_x - g_{sc}g_p)}$$

$$\sqrt{\frac{[g_{sc}g_{so}(\alpha_p I_p + g_x C_a + g_p O_a) - R_d P_a (g_{so}g_x - g_{sc}g_p) + \alpha_p I_p P_a (g_{sc}g_p + g_{so}g_x)]^2 + 4P_a (g_{so}g_x - g_{sc}g_p)g_{sc}g_{so}[R_d(\alpha_p I_p + g_x C_a + g_p O_a) + \alpha_p I_p (g_x O_a - g_x C_a)]}{2P_a (g_{so}g_x - g_{sc}g_p)}}$$

对于 C4 植物,考虑了 CO<sub>2</sub> 泵从叶肉细胞到维管束鞘的传递效率,模型的形式为:

$$\begin{cases} P_n = \frac{\alpha_p g_x I_p C_b - \alpha_p g_p I_p O_b}{\alpha_p I_p + g_x C_b + g_p O_b + g_t C_m} - R_d \\ P_n = g_{scb} \frac{C_a - C_b}{P_a} + g_{scm} \frac{C_a - C_m}{P_a} = g_{sob} \frac{C_b - C_a}{P_a} \\ g_{scm} = \frac{C_a - C_m}{P_a} = \frac{\alpha_p I_p g_t C_m}{\alpha I_p + g_x C_b + g_p O_b + g_t C_m} \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $P_n$  为净光合速率 ( $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $C_a$  为空气 CO<sub>2</sub> 分压 (kPa);  $C_m$  和  $C_b$  分别为叶肉细胞和维管束鞘的 CO<sub>2</sub> 分压 (kPa);  $P_a$  为大气压 (kPa);  $O_b$  为维管束鞘的氧分压 (kPa);  $I_p$  为光合有效辐射 ( $\text{mmol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $g_{sc}$  为气孔对 CO<sub>2</sub> 的导度 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $g_{so}$  为气孔对氧气的导度 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\alpha_p$  为光量子效率 ( $\text{mmol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ );  $g_x$  为羧化速率系数 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$ );  $g_p$  光呼吸速率系数 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$ );  $R_d$  是暗呼吸速率系数 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $g_t$  为 CO<sub>2</sub> 从叶肉细胞到维管束鞘的速率系数 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $g_{scb}$  和  $g_{scm}$  分别为 CO<sub>2</sub> 从大气到叶肉细胞的导度和维管束鞘的导度 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $g_{sob}$  为 O<sub>2</sub> 从维管束鞘到大气的导度 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

太阳总辐射中光合有效辐射 (PAR) 部分的计算:

$$R_{par} = \eta_0 R_s \quad (22)$$

式中,  $R_{par}$  为光合有效辐射能量 ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\eta_0$  为系数 (无量纲)。

根据 McCree<sup>[15]</sup> 计算, 每 J 光合有效辐射 (PAR) 能量具有 4.57  $\mu\text{mol}$  光量子, 则:

$$I_p = 0.00457 R_{par} \quad (23)$$

由于叶片尺度的光合模型考虑的环境因子为瞬时的, 模拟的是瞬时光合速率, 而在冠层和景观的尺度上模拟逐日光合速率和光合同化物产量时, 就必须考虑环境因子变化对光合速率的影响。在本文中考虑了光合有效辐射的日变化, 计算方法见 (24)~(25):

$$R_s(\varphi, A, B, t) = R_s \max\{0, \sin\varphi \cos B \sin\delta - \cos\varphi \sin B \cos A \sin\delta + \sin\varphi \sin B \cos A \cos\delta \cos\omega + \cos\varphi \cos B \cos\delta \cos\omega + \sin B \sin A \cos\delta \sin\omega\} \quad (24)$$

$$\omega = (t - 12)/12 \times \pi \quad (25)$$

式中,  $R_s(\varphi, A, B, t)$  为任意点接受的光合有效辐射 ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\omega$  为时角 (弧度),  $t$  为时间 (h)。

通过方程 (24) 和 (25) 可以获得一天内逐小时的平均光合有效辐射的光量子通量密度, 带入叶片尺度净光合速率公式 (20) 和 (21), 可以得到逐小时的平均光合速率, 进一步可以求得日平均光合速率  $\bar{P}_n$ 。

光合同化物的产量一方面取决于植物的净光合速率, 另一方面也与进行同化的植物的叶生物量有关。日光合同化所形成的干物质的量可以通过方程 (26) 计算:

$$A_d = D_L \times \bar{P}_n \times m_l \times l_s \times Q_f(T_d) \times C_{dw} \quad (26)$$

式中,  $A_d$  为日同化干物质质量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $D_L$  为日长 ( $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $\bar{P}_n$  为日平均净光合速率 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $m_l$  为叶生物量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $l_s$  为叶面积比 ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $Q_f(T_d)$  表示温度对于同化物形成的影响函数,  $T_d$  为日平均气温 (C),  $C_{dw}$  为 CO<sub>2</sub> 转为干物质的经验系数。

本文的同化物分配和生物量动态的模拟, 主要参考了 Gao and Reynolds<sup>[16]</sup> 的干旱区景观模拟器 (MAIS) 的处理方法。植物干物质分配状况随生育期不同而变化, 水分作为影响因子, 对植物干物质分配有重要的调节作用。由于在本研究中植物根系主要分布在 1m 内, 所以综合考虑了 1m 土层内 (1~3 层) 土壤水分对同化物分配的影响见 (27)~(29):

$$\Delta m_l = a_l A_d \left( \sum_{i=1}^3 \theta_i / 0.5 \times \left( \frac{365 - t_d}{365} \right) \right) + D_{st} \times Q_f(t_d) \times m_s - m_l \times (r_i + r_r) \quad (27)$$

$$\Delta m_s = a_s A_d \left( \sum_{i=1}^3 \theta / 0.5 \times \left( \frac{365 - t_d}{365} \right) + D_r \times Q_f(t_d) \times m_r - D_d \times Q_f(t_d) \times m_s - m_s r_s \right) \quad (28)$$

$$\Delta m_r = A_d \times (1 - (a_l + a_s)) \left( \sum_{i=1}^3 \theta / 0.5 \times \left( \frac{365 - t_d}{365} \right) \right) - D_{rs} \times Q_f(t_d) \times m_r - m_r \times r_r \quad (29)$$

式中,  $a_l$  和  $a_s$  分别为同化物分配到叶和茎的比例,  $t_d$  为时间(1月1日为0),  $Q_f(t_d)$  为发育期函数, 在叶萌芽期、生长早期、稳定生长期和叶的衰老期有所不同,  $D_d, D_r$  分别为同化物在茎-叶、根-茎的传递系数,  $r_l, r_s$  和  $r_r$  分别为叶片、茎和根系的消耗损失系数( $d^{-1}$ ),  $r_t$  为叶片温度损失系数( $d^{-1}$ )。

叶面积指数计算见方程(30):

$$LAI = m_l l_s \quad (30)$$

## 2 研究区概况和数据收集

### 2.1 研究区概况

野外观测实验地点设在中科院安塞水土保持实验站长期治理的小流域——纸坊沟流域( $36^{\circ}51'N, 109^{\circ}19'E$ )。该流域居黄土高原腹地, 属典型的梁峁状丘陵沟壑区, 流域面积  $8.27 \text{ km}^2$ 。纸坊沟流域处于暖温带半干旱气候区, 多年平均降雨量为  $524.5 \text{ mm}$ , 年平均温度为  $8.8^{\circ}\text{C}$ 。流域内地形破碎, 梁峁起伏, 地带性土壤为黑垆土, 但大部分已流失殆尽, 绝大部分土壤是在黄土母质上发育的幼年土壤黄绵土。流域地处森林草原过渡带, 由于人类活动的影响, 地带性植被已经破坏殆尽, 自1973年以来安塞水土保持实验站开始对这个小流域进行治理, 目前流域除农田外主要植被类型包括人工种植的刺槐和苹果等阔叶林, 沙棘和柠条等人工灌丛以及封禁后自然恢复的茵陈蒿、铁杆蒿、芨蒿群落等天然草地。

### 2.2 数据收集

**2.2.1 野外观测数据** 在流域内分别选择有代表性的样地, 对刺槐、苹果、柠条、沙棘、铁杆蒿、芨蒿、茵陈蒿、白羊草、沙打旺、谷子、玉米等主要植物种进行单叶片的光合、叶水势和叶面积的测定。光合测定采用 LI-6400 便携式光合系统, 叶水势采用 HR-33T 露点水势仪测定, 叶面积采用 LAI-300A 测定。测定方法为在2002年生长季前期(5月上旬)、中期(7月下旬)和后期(9月下旬)分别选择晴朗无云日进行, 每天从  $8:00 \sim 18:00$ ,  $2 \text{ h}$  观测1次。在生长季的同期分别测定这些主要植物种的叶面积比、根系分布状况, 根、茎、叶的生物量。土壤水分的观测是在同期对不同群落在  $0 \sim 2 \text{ m}$  土壤剖面取样, 通过烘干称重法获得的。

**2.2.2 空间数据** 根据研究区植被调查结果, 将流域植被划分为13个类型, 包括刺槐林、苹果、沟谷杂木林、沙棘灌丛、柠条灌丛、芨蒿群落、铁杆蒿群落、白羊草群落、胡枝子群落、农作物、居民点、裸岩和水域, 对1997年1:35000的黑白航片解译获得植被现状图。通过对流域1:10000地形图(1975年航测)数字化得到研究区的DEM, 以此为基础利用 Arcinfo 得到流域坡度图和坡向图。流域的土壤类型图是根据流域土壤普查图数字化得到的。本研究中利用 Arcinfo 对相关图形进行了栅格化处理, 栅格的大小为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

**2.2.3 气象数据** 选择位于纸坊沟流域东南部的延安气象站( $109^{\circ}32'E, 36^{\circ}36'N$ )自1990~1999年逐日的气象数据, 包括逐日降水量、平均气温、最低气温、相对湿度、风速、云量和气压。

### 3 模型的实施与验证

本研究中用 Matlab5.0 数据库开发软件对上述模型过程进行了编译和调试。模型的输入包括气象数据、土壤参数、植物生理生态学参数。输出包括不同植被类型的净第一性生产力, 根、茎、叶的生物量和4层土壤水分, 蒸腾量、蒸发量及径流量。由于搜集到安塞水土保持实验站提供的纸坊沟流域把口站2000年7月的次降雨-径流数据和2000年纸坊沟流域内设置的雨量桶观测到的次降雨量数据, 所以又用2000年纸坊沟流域降雨数据, 而其它气象数据采用1990~1999年平均值驱动模型, 模拟得到2000年7月相应的降雨-径流结果。

目前区域模型研究方面的难点之一是对模型的全面验证<sup>[17]</sup>。本文中流域模型的检验存在相同的问题。在本文中就模型模拟的植被净第一性生产力和水分循环这两方面, 将模型输出结果与野外观测数据以及整理研究区相关文献获得的数据进行了对比, 从而在一定程度上说明模型的有效性。虽然利用目前的数据还不能对模型进行全面的验证, 但验证过程却有利于对于模型结构和参数化的检查与修订。

#### 3.1 流域植被净第一性生产力模拟有效性验证

由于净第一性生产力中凋落和凋落后分解的部分, 以及被其他消费者消耗的部分很难估测, 所以本文用生物量的输出结果来检验模型对净第一性生产力模拟的有效性。将模拟得到的1990~1999年平均年最大地上生物量与研究区不同群落地上生物量的观测值进行对比。

图2给出了根据现有模型模拟的研究区主要植物群落地上生物量与观测值的对比, 从中不难看出, 由于观测值包括了2001年对不同群落地上生物量观测的结果, 也包括从文献数据中整理得到的不同群落的生物量观测值<sup>[18-21]</sup>, 其中刺槐群落的

观测数据包括了 2~12a 不同林龄,沙棘和柠条的观测数据包括了 2~10a 不同林龄,而铁杆蒿、芨蒿、茵陈蒿和白羊草等半灌木和草本植物群落分别收集了封禁 1~6a 的不同荒山植物群落观测结果。由于林龄和封禁恢复年限的差异,导致观测的最大值、最小值与模拟的平均值差异较大,但是,模拟得到的 8 个群落的地上生物量与观测的地上生物量的平均值较为接近,特别是草本和半灌木的模拟效果要比对乔灌木的好。

LAI 是表征冠层特征的主要指标,同时也能很好的反应叶生物量的变化。为了检验 LAI 的季节变化模拟的准确性,本文以位于纸坊沟流域以北的大南沟流域 1999 年 LAI 的观测值作为参考<sup>[22]</sup>,将模拟得到的 1999 年 LAI 的季节变化与观测值进行比较。由于观测是于 1999 年针对林地、草地、灌丛、荒草地、农作物和果园等不同土地覆盖类型进行的,将模拟得到的 1999 年不同群落的 LAI 数据按照不同土地覆盖类型归类,与 1999 年 LAI 观测数据进行比较。

图 3 给出了 1999 年 LAI 预测值与观测值之间的关系。观测数据基本上是通过采集一定面积样方内植物的叶子并在室内扫描得到其叶面积,从而推算得到的。由于每次选取的样地不同,所以叶面积指数出现一定的波动,本文对观测数据做了滑动平均,并以此来代表该月份的 LAI,从图中可以看出预测值与观测值之间有较好的一致性。

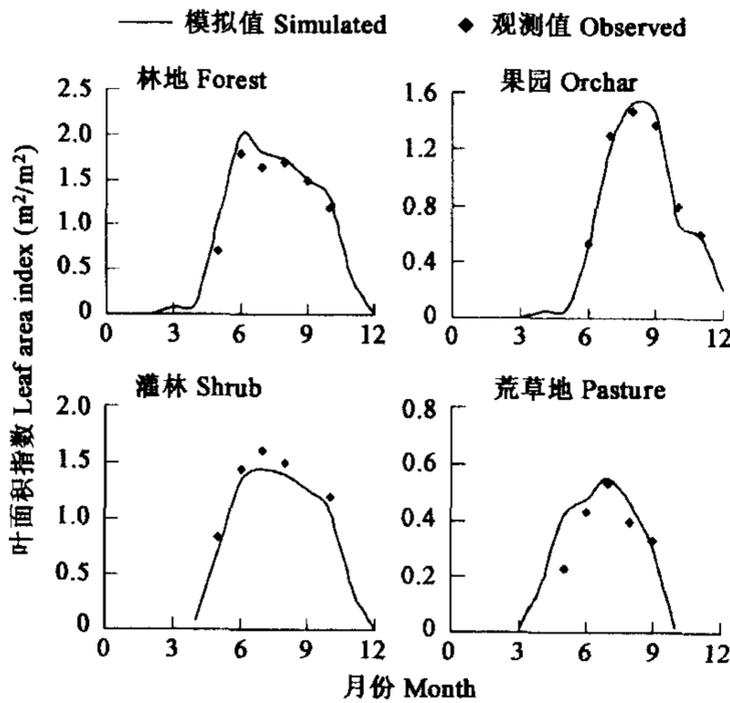


图 3 1999 年不同土地覆盖类型叶面积指数动态的模拟和观测值  
Fig. 3 Simulation result and survey data of the dynamic of leaf area index of different land cover types in 1999

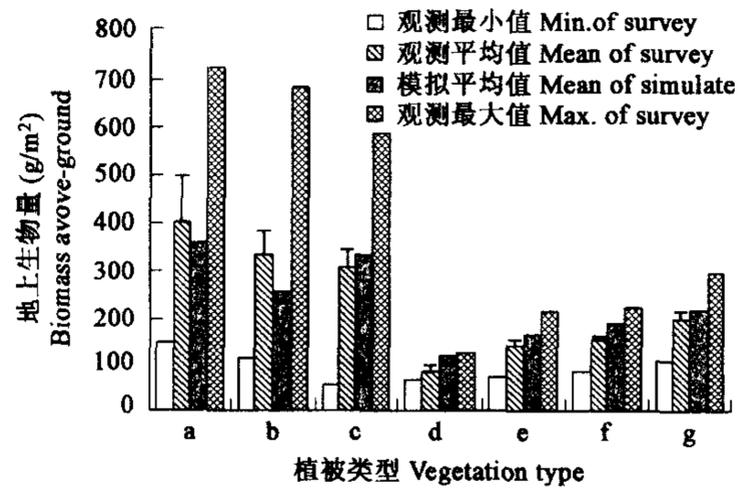


图 2 1990~1999 年研究区不同群落地上生物量观测和模拟平均值  
Fig. 2 Survey data and mean simulated result of the biomass aboveground of various community for the period 1990~1999 of study area  
(a) 刺槐林 Form. *R. pseudoacacia*, (b) 沙棘灌丛 Form. *H. rhamnoides*, (c) 柠条灌丛 Form. *C. korshinskii*, (d) 铁杆蒿群落 Form. *A. gmelinii*, (e) 芨蒿群落 Form. *A. girardii*, (f) 白羊草群落 Form. *B. ischaemu*, (g) 达乌里胡枝子群落 Form. *L. davurica*

图 2 1990~1999 年研究区不同群落地上生物量观测和模拟平均值  
Fig. 2 Survey data and mean simulated result of the biomass aboveground of various community for the period 1990~1999 of study area

(a) 刺槐林 Form. *R. pseudoacacia*, (b) 沙棘灌丛 Form. *H. rhamnoides*, (c) 柠条灌丛 Form. *C. korshinskii*, (d) 铁杆蒿群落 Form. *A. gmelinii*, (e) 芨蒿群落 Form. *A. girardii*, (f) 白羊草群落 Form. *B. ischaemu*, (g) 达乌里胡枝子群落 Form. *L. davurica*

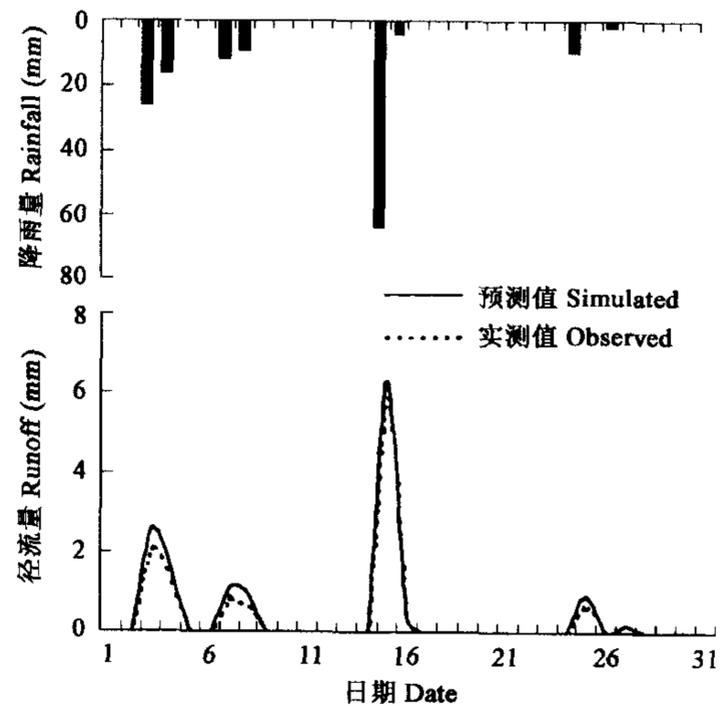


图 4 研究区 2000 年 7 月降雨量、径流量预测和观测值  
Fig. 4 Rainfall, simulated and observed runoff of study area in Jul. 2000

### 3.2 流域水分平衡模拟有效性验证

图 4 给出了 2000 年 7 月份流域把口站观测的径流量以及模型预测结果与 2000 年 7 月的日降雨量。模拟得到的径流量略高于观测值。2000 年 7 月份共有 8 次降雨,降雨日最大降雨量为 62.9mm,最小降雨量 1.98mm;流域共产流 7 次,而模型预测结果为流域共产流 8 次。这可能是由于模型的产流机理没有考虑前期土壤水分状况对于降雨-产流过程影响的结果。

由于气象数据的限制,无法模拟 2002 年不同群落土壤水分的剖面动态,在检验土壤水分模拟效果时,将 1990~1999 年生长季初期、中期和末期(分别为 5 月、7 月、9 月份)的剖面土壤水分平均值与 2002 年相应时期的观测数据进行了对比,见图 5。

由于土壤水分动态对于降雨量的变化极其敏感,土壤水分月平均值只能反应相应时期土壤水分在剖面上的变化趋势,而 2002 年观测的土壤水分在剖面上的变化由于受降雨量的影响而与土壤水分平均值的变化有一定的差异,但通过两者的对比还

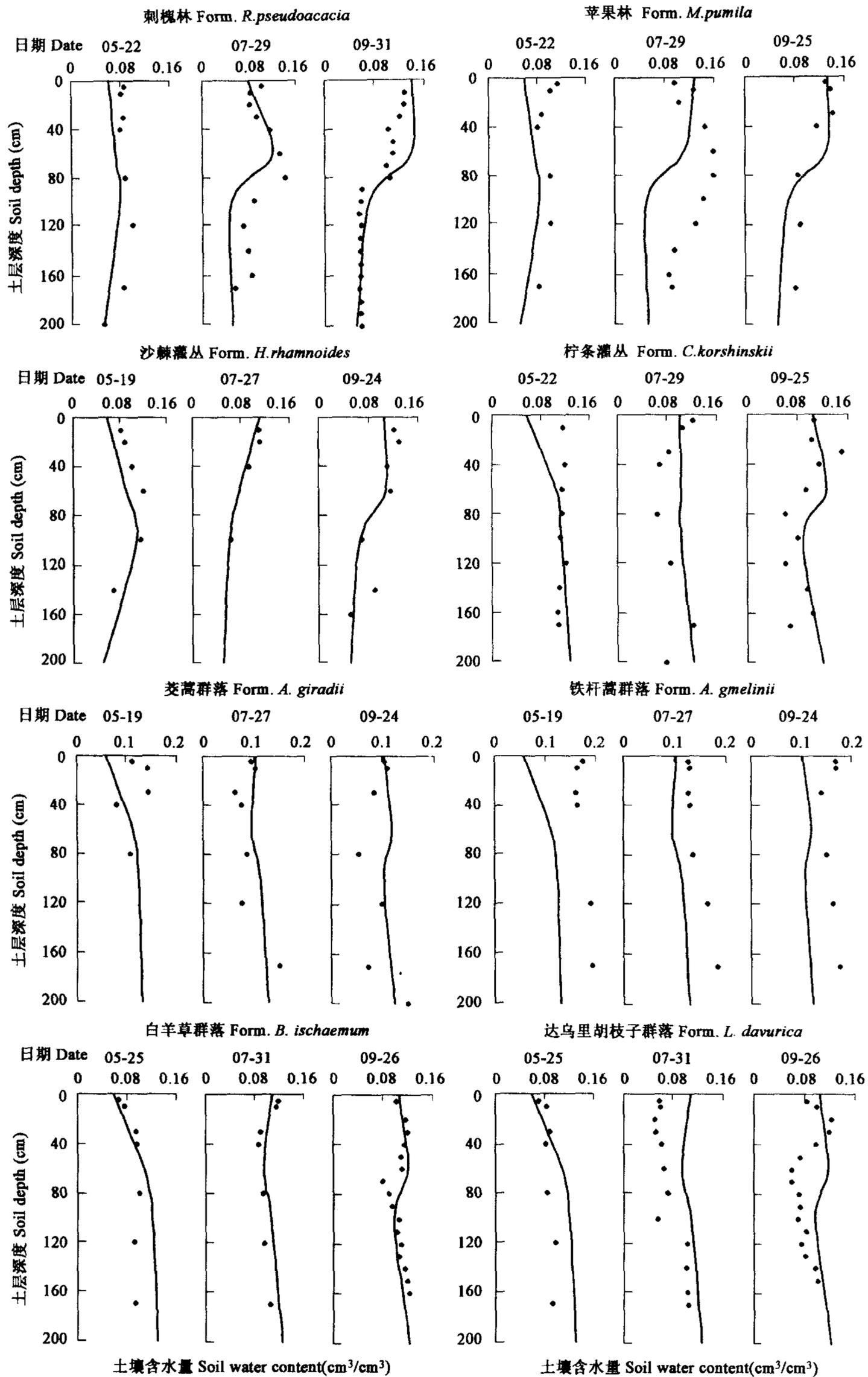


图 5 生长季不同时期剖面土壤水分动态预测值与观测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and observed soil water dynamic along the profile during growing season

刺槐林 Form. *R. pseudoacacia*, 苹果林 Form. *M. pumila*, 沙棘灌丛 Form. *H. rhamnoides*, 柠条灌丛 Form. *C. korshinskii*, 铁杆蒿群落 Form. *A. gmelinii*, 芨芨群落 Form. *A. giradii*, 白羊草群落 Form. *B. ischaemum*, 达乌里胡枝子群落 Form. *L. davurica*

是可以看出本模型基本上能够反映土壤水分的绝对值的数量级时间空间变化范围。

#### 4 结果与分析

##### 4.1 不同植被类型植被净第一性生产过程分析

水分作为植物生存的基本因子,在黄土高原地区具有特殊的生理生态意义。水分胁迫对植被生长的首要反应是关闭气孔,降低水分消耗,干扰 CO<sub>2</sub> 的呼吸,降低同化作用,结果导致干物质生产的降低。植物的水分生产力反映了水分因素与生物量之间的关系,为了研究水分供耗关系对植物生长及生产力的影响,本文选用了水分利用效率(WUE)和水分有效利用率(T/ET)来分析植物的水分生产力状况<sup>[23]</sup>,并对比了不同植被类型的净第一性生产力、蒸腾量、蒸发量、蒸散量以及土壤水分的动态。

表 1 1990~1999 年纸坊沟流域不同植被类型净第一性生产力、蒸腾量、蒸发量、水分利用效率和水分有效利用率模拟

Table 1 Simulated mean net primary production, transpiration, evaporation, water use efficiency and water availability use ratio of various vegetation types during 1990~1999 of Zhifangou watershed

植被类型 Vegetation type	净第一性生产力 NPP(g · m <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	蒸腾量 T(mm)	蒸发量 E(mm)	蒸散量 ET(mm)	水分利用效率 WUE (g · mm <sup>-1</sup> · m <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	水分有效 利用率 T/ET
刺槐林 Form. <i>R. pseudoacacia</i> .	442.70	160.49	312.96	473.45	2.76	0.34
苹果林 Form. <i>M. pumila</i>	380.87	140.43	337.84	478.27	2.71	0.29
沙棘灌丛 Form. <i>H. rhamnoides</i>	282.08	213.21	265.21	478.42	1.32	0.45
柠条灌丛 Form. <i>C. korshinskii</i>	284.74	208.05	258.41	466.46	1.37	0.45
铁杆蒿群落 Form. <i>A. gmelinii</i>	127.74	120.64	334.49	455.13	1.06	0.27
芨芨群落 Form. <i>A. girardi</i> .	166.12	124.01	330.07	454.08	1.34	0.27
白羊草群落 Form. <i>B. ischaemum</i>	280.46	221.16	239.14	460.3	1.27	0.48
达乌里胡枝子群落 Form. <i>L. davurica</i>	229.00	235.9	215.2	451.1	0.97	0.52
农作物 Crop	356.60	248.11	210.1	458.21	1.44	0.54

根据模型模拟结果,对 1990~1999 年流域内不同植被类型多年平均的植被净第一性生产力、蒸腾量、蒸发量、水分利用效率和水分有效利用率进行了统计分析,见表 1。通过对比不同植被类型的净第一性生产力,可以看出,刺槐林、苹果林和农作物的植被净第一性生产力较高,铁杆蒿群落和芨芨群落的植被净第一性生产力较低,而沙棘灌丛、柠条灌丛、白羊草群落和达乌里胡枝子群落的净第一性生产力居中;从蒸腾量来看,刺槐林、苹果林、铁杆蒿群落和芨芨群落的蒸腾量较低,而沙棘灌丛、柠条灌丛、白羊草群落、达乌里胡枝子群落和农作物的蒸腾量较高;从蒸发量来看,达乌里胡枝子群落和农作物的蒸发量较低,刺槐林、苹果林、铁杆蒿群落、芨芨群落的蒸发量较高,而沙棘灌丛、柠条灌丛和白羊草群落的蒸发量居中。由此不难看出刺槐林和苹果的植被净第一性生产力较高而蒸腾量很低,属于高光合-低蒸腾类型,植物的水分利用效率(WUE)很高,而水分有效利用率较低(T/ET);农作物、白羊草群落和达乌里胡枝子群落的净第一性生产力很高,但同时蒸腾耗水量也很高,水分利用效率(WUE)也较高,属于高光合-高蒸腾类型,水分有效利用率较低(T/ET);而铁杆蒿群落和芨芨群落的植被净第一性生产力较低,蒸腾量也较低,属于低光合-低蒸腾类型,水分利用效率(WUE)和水分有效利用率(T/ET)最低;沙棘灌丛和柠条灌丛的净第一性生产力居中,但蒸腾量较高,水分利用效率(WUE)较低。

##### 4.2 不同植被类型土壤水分平衡分析

土壤水分是植物蒸腾的直接水分来源,特别是干旱半干旱地区,土壤水分状况在很大程度上决定了植被的生长状况。土壤水分状况是大气降水、土壤贮水、植物用水以及径流的共同作用结果,反应了植物生长条件特征。

1990~1999 年的 10a 间,研究区平均降雨量为 471.4mm,其中 1994 年降雨量最高为 606.8mm,为丰水年;而 1999 年降雨量仅为 333.3mm,为欠水年。表 2 给出了研究区不同植被类型 1990~1999 年及丰水年(1994 年)和欠水年(1999 年)的 2m 土层内年平均土壤含水量和年土壤水分含量的模拟结果。从土壤水分平衡来看,研究区土壤水分表现为多年序列的表观平衡和不同水文年的失衡。对于流域不同植被类型来说,土壤水分在多年序列上基本平衡,但不同的植被类型之间也存在着差异,其中刺槐林、苹果林和沙棘灌丛在 10a 的时间序列上,土壤水分在年内仍存在亏缺,柠条灌丛和农作物也略有亏缺,而白羊草群落和达乌里胡枝子群落的土壤含水量在这 10a 期间保持平衡,铁杆蒿群落和芨芨群落的土壤含水量略有盈余。丰水年不同植被类型土壤含水量都明显高于欠水年,并且 2m 土层内多年平均土壤水分含量的变化在丰水年表现为盈余,而在欠水年表现为明显的亏缺。在丰水年,以柠条灌丛的土壤水分增加最为明显,而在欠水年以白羊草群落和农作物的土壤水分亏缺最多。

#### 5 讨论

本文构建了基于植被生理生态学过程的土壤水分和植被生长过程相耦合的机理性植被净第一性生产过程模型,并应用于

黄土高原丘陵沟壑区典型小流域-纸坊沟流域,模型验证结果表明模型对于生物量的模拟草本和半灌木要比对乔灌木的好,主要植被类型 LAI 的季节变化与观测结果具有很好的一致性;模型能够反映出流域降雨-产流过程,并且基本能够反映土壤水分的时空变化范围。这一方面说明模型在该区域具有较好的适用性,同时也为模型在该区域的推广提供了范例。

表 2 纸坊沟流域不同植被类型 1990~1999 年及丰水年和欠水年 2m 土层内年平均土壤含水量和年土壤水分含量变化模拟

Table 2 Simulated mean annual soil water content and change of soil water content in 2m soil layer during 1990~1999, high-flow year and low-flow year of Zhifangou watershed

植被类型 Vegetation type	年平均土壤含水量 $\theta_a$ (cm · cm <sup>-3</sup> ) Mean annual soil water content			年土壤水分含量变化 $\Delta W_a$ (mm) Change of annual soil water content		
	1990~1999	1994	1999	1990~1999	1994	1999
	刺槐林 Form. <i>R. pseudoacacia</i>	0.076	0.083	0.064	-10.0	4
苹果林 Form. <i>M. pumila</i>	0.077	0.086	0.065	-10.0	10	-22
沙棘灌丛 Form. <i>H. rhamnoides</i>	0.085	0.094	0.064	-10.0	8	-28
柠条灌丛 Form. <i>C. korshinskii</i>	0.120	0.135	0.102	-2.0	16	-34
铁杆蒿群落 Form. <i>A. gmelinii</i>	0.129	0.139	0.118	2.0	14	-28
芨芨群落 Form. <i>A. girardii</i>	0.129	0.139	0.116	2.0	12	-30
白羊草群落 Form. <i>B. ischaemum</i>	0.125	0.14	0.106	0.0	12	-46
达乌里胡枝子群落 Form. <i>L. davurica</i>	0.128	0.115	0.109	0.0	12	-26
农作物 Crop	0.114	0.136	0.089	-4.0	12	-54

模拟结果分析表明,刺槐林和苹果林的净第一性生产力较高而蒸腾量很低,属于高光合-低蒸腾类型;农作物、白羊草群落和达乌里胡枝子群落的净第一性生产力很高,但同时蒸腾耗水量也很高,属于高光合-高蒸腾类型;而铁杆蒿群落和芨芨群落的植被净第一性生产力较低,蒸腾量也较低,属于低光合-低蒸腾类型;沙棘灌丛和柠条灌丛的净第一性生产力居中,但蒸腾量较高。

流域内土壤水分在多年序列上基本平衡,而在不同的水文年表现出失衡。其中刺槐林、苹果林和沙棘灌丛的多年平均土壤水分在年内存在少量亏缺,铁杆蒿群落和芨芨群落略有增加,而其它植被类型的土壤水分在年内保持平衡。丰水年不同植被类型土壤含水量都明显高于欠水年,并且 2m 土层内多年平均土壤水分含量的变化在丰水年表现为盈余,而在欠水年表现为明显的亏缺。

本文中构建的流域植被生产力模型仍存在一定问题,主要表现在:(1)模型在叶片尺度的气孔导度和净光合速率模型的基础上向流域尺度转换时,考虑了环境因子和叶面积指数的时空变异,但一方面只考虑了坡度坡向对太阳辐射的影响,而忽略了由此导致的温度的空间变化的影响,另一方面,采用叶面积指数进行尺度转换时,由于叶面积指数模拟的准确性对于冠层结构较为复杂的乔灌木影响较大,导致乔灌木的净第一性生产力模拟效果要比草本和半灌木差;(2)在土壤水分动态模拟中,将土壤剖面视为均一的,采用了统一的土壤水分物理参数,而在模拟径流的过程中,没有考虑相邻栅格间的径流作用,所以无法反映和解释坡面不同部位土壤水分的差异,这些都有待于进一步改进和完善。

#### References:

- [1] Ruan C J, Li D Q. Biomass and net primary productivity of above ground parts of artificial *Hippophae rhamnoides* L. stand in Ansai. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2001, **10**(2): 38~41.
- [2] Gao Q, Zhao P, Zeng X, et al. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. *Plant, Cell and Environment*, 2002, **5**: 1373~1381.
- [3] Xu H M, Gao Q, Huang Y M, et al. Photosynthetic characteristics of six plant species in a forest steppe of the Loess Plateau, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(2): 157~163.
- [4] Zhang G H, Liang Y M. A study on intercepting rainfall of grassland of *Astragalus adsurgens* in Loess Hilly Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, **15**(3): 28~32.
- [5] Hou X L, Cao Q Y, Bai G S. Study on the benefits soil and water conservation of different forest types in the Loess Region of northern Shaanxi. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, **9**(2): 20~24.
- [6] Liu X D, Wu X Q, Zhao H Y. The vertical interception function of forest vegetation and soil and water conservation. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994, **1**(3): 8~13.
- [7] Fankelun H, Wolf J translated by Yang S C, et al. *Agricultural production model: climate, soil and crop*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1990. 65~66; 221~222.
- [8] Fu B P, Weng D M, Yu J M, et al. *Microclimate*. Beijing: China Meteorological Press, 1994.

- [9] Weng D M, Luo Z X. *Topographical Climate in a Mountainous Area*. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 31~35.
- [10] Monteith J L. Evaporation and environment in the state and movement of water in living organisms. *Symposium of the Society for Experimental Biology*, 1965, **19**:205~224.
- [11] Whitehead D, Hinckley T M. Models of water flux through forest stands; critical leaf and stand parameters. *Tree Physiol.*, 1991, **9**:35~57.
- [12] Jarvis P G, McNaughton K G. Stomatal control of transpiration; scaling up from leaf to region. *Advance Ecology Research*, 1986, **15**:1~49.
- [13] Kaufmann M R. A canopy model (RM-CWU) for determining transpiration of subalpine forests I. Model development. *Canada Journal Forestry Research*, 1984, **14**:218~226.
- [14] Thornley J M & Johnson I R. *Plant and Crop Modelling*. Oxford, U. K., Clarendon Press, 1990.
- [15] McCree K J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agri. Meteor.*, 1972, **10**:443~453.
- [16] Gao Q & Reynolds J. Historic shrub-grass transition in northern Chihuahuan desert, Modeling the effects of shifting rainfall seasonality and event size over a landscape gradient. *Global Change Biology*, 2003, **9**:1475~1493.
- [17] Yu M, Gao Q, Xu H M, et al. Responses of vegetation distribution and primary production of the terrestrial ecosystems of China to climatic change. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(4): 281~293.
- [18] Hou X L, Bai G S, Cao Q Y. Dynamic observation of soil moisture on arbor and shrubbery in sinking lands in Loess hilly region. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, **3**(2): 57~65.
- [19] Wang G L, Liu G B, Liu F, et al. Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at Loess gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(12):2550~2557.
- [20] Liu Z D, Liu Z W. Study on biomass of *Hippophae rhamnoides* L. and *Caragana microphylla* L. on Loess Plateau. *Acta Agriculturae Boreall-occidentalis Sinica*, 1994, **3**(2):92~96.
- [21] Ruan C J, Li D Q. Biomass and net primary productivity of above ground parts of artificial *Hippophae rhamnoides* L. stand in Ansai. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2001, **10**(2):38~41.
- [22] Wu Y Q, Zhang Q C, Zhang Y et al. Crop characteristics and their temporal change on Loess Plateau of China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(1):104~107.
- [23] Zhang Z B, Shan L. Research development in estimation models of crop water use efficiency and transpiration and evaporation. *Agricultural Research in Arid Areas*, 1997, **15**(1):73~78.

#### 参考文献:

- [1] 张兴昌, 卢宗凡. 坡地土壤水分动态及耗水规律研究. *水土保持研究*, 1996, **3**(2): 46~56.
- [3] 许红梅, 高琼, 黄永梅, 等. 黄土高原森林草原区 6 种植物光合特性研究. *植物生态学报*, 2004, **28**(2): 157~163.
- [4] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区沙打旺草地截留试验研究. *水土保持通报*, 1995, **15**(3): 28~32.
- [5] 侯喜禄, 曹清玉, 白岗栓. 陕北黄土区不同森林类型水土保持效益的研究. *西北林学院学报*, 1994, **9**(2): 20~24.
- [6] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 森林植被垂直作用于水土保持. *水土保持研究*, 1994, **1**(3): 8~13.
- [7] 杨守春, 等译. 范柯伦, 沃尔夫, 等主编. 农业生产模型气候、土壤和作物. 北京: 中国农业科技出版社, 1990. 65~66, 221~222.
- [8] 傅抱璞, 翁笃明, 虞静明, 等. 小气候学. 北京: 气象出版社, 1994.
- [9] 翁笃明, 罗哲贤. 山区地形气候. 北京: 气象出版社, 1990. 31~35.
- [17] 喻梅, 高琼, 许红梅, 等. 中国陆地生态系统植被结构和净第一性生产力对未来气候变化响应. *第四纪研究*, 2001, **21**(4): 281~293.
- [18] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区湾塌地乔灌林土壤水分动态监测. *水土保持研究*, 1996, **3**(2): 57~65.
- [19] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 等. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. *生态学报*, 2003, **23**(12):2550~2557.
- [20] 刘占德, 刘增文. 沙棘柠条的生物量及立地因子分析. *西北农业学报*, 1994, **3**(2):92~96.
- [21] 阮成江, 李代琼. 安塞人工沙棘林地上部生物量和净初级生产量. *植物资源与环境学报*, 2001, **10**(2): 38~41.
- [22] 伍永秋, 张清春, 张岩, 等. 黄土高原小流域植被特征及其季节变化. *水土保持学报*, 2002, **16**(1):104~107.
- [23] 张正斌, 山仑. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展. *干旱地区农业研究*, 1997, **15**(1): 73~78.