

皇甫川流域柠条林地水分动态模拟 —— 坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系

贾海坤 刘颖慧* 徐霞 王昆 高琼

(北京师范大学资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要 在皇甫川流域, 随着林草覆盖度的增加, 植被与水的矛盾日益突出, 其中一个重要的问题就是植被密度与土壤水分之间的矛盾。土壤水分的降低影响了植被的生长, 甚至导致了部分植被的死亡, 因此对土壤水分与植被密度之间的关系进行研究非常重要, 有助于合理造林密度的确定。在已有研究及实验观测的基础上, 建立了柠条 (*Caragana intermedia*) 林地土壤水分动态模拟模型, 模型考虑了主要的土壤、植物过程, 包括土壤性状、降雨入渗、植物蒸腾、地表蒸发等; 模拟了从 1971 至 2000 年, 30 年里各种立地条件(不同盖度、坡向和坡度)下的柠条林地土壤水分、蒸腾和蒸发等的日动态过程。通过比较不同立地条件下的土壤水分动态, 研究了皇甫川流域典型柠条林地土壤水分与植被盖度、坡向和坡度之间的关系, 并得出了它们之间的关系式。由得到的平地上柠条的适宜密度, 同时结合上述关系式, 得出了不同坡度、坡向的适宜密度。坡度小于 10° 时, 适宜造林密度对坡度反应敏感, 在 10°~30° 时, 适宜盖度对坡度反应不敏感。对于小于 10° 的坡地, 植被建设时要特别注意设计合理的植被密度。

关键词 土壤水分动态 蒸散模拟 模拟模型 柠条

SIMULATION OF SOIL WATER DYNAMICS IN A *CARAGANA* *INTERMEDIA* WOODLAND IN HUANGFUCHUAN WATERSHED : RELATIONSHIPS AMONG SLOPE, ASPECT, PLANT DENSITY AND SOIL WATER CONTENT

JIA Hai-Kun LIU Ying-Hui* XU Xia WANG Kun and GAO Qiong

(College of Resources Science & Technology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster,
the Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract With an increase in vegetation coverage, there can be a decrease in soil water content due to up-take and evapotranspiration by the vegetation. At high planting densities, poor growth and even mortality has occurred due to the decrease in soil water content. Hence, a better understanding of the relationship between soil water content and the density of plants is important for designing effective restoration projects. To study these relationships, we developed a soil water dynamic simulation model of a *Caragana intermedia* woodland under different slope gradients and slope aspect in the Huangfuchuan watershed conditions based on previous studies and field experiments. The model took into account soil characteristics, precipitation infiltration, vegetation transpiration, and soil evaporation. Daily changes in soil water content, transpiration, and evaporation of *Caragana intermedia* woodlands with different vegetation coverage, slope gradient, and slope aspect was simulated from 1971 to 2000. Through model simulations, we determined the functional relationships among soil water content, plant coverage and slope as well as the optimal plant density on flat slopes. With further simulations, we determined the effects of slope gradient and slope aspect on soil water content. When slope gradient was less than 10 degrees, the optimal planting density was sensitive to slope gradient. In the range of 10 and 30 degrees, planting density was not sensitive to slope gradient. Therefore, when reconstructing vegetation, it is important to consider planting densities on the hillsides with slope gradients less than 10 degrees.

Key words Soil water dynamics, Evapotranspiration, Simulation model, *Caragana intermedia*

在干旱半干旱地区, 土壤水分是植物生产力形成的主要限制因子(杨文治和余祖存, 1992; 崔晓勇

等, 2001)、植被恢复的主要影响因素(朱志诚, 1993), 土壤水分还影响降雨产流过程, 与土壤侵蚀

收稿日期: 2004-11-01 接受日期: 2005-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(90202008, 90211002)

*通讯作者 Author for correspondence E-mail: lyh@ires.cn

过程密切相关(蒋定生,1997),也是土地评价的重要指标(傅伯杰,1991;王军等,2002)。因此对土壤水分进行研究,对干旱半干旱区的植被恢复及水土流失治理都具有重要的意义。皇甫川流域大部分位于内蒙古准格尔旗境内,气候为典型的半干旱气候,水分是植物生长发育的主要限制因子。目前,皇甫川流域通过长期的水土流失综合治理之后,治理效益明显,林草覆盖度显著增加(苗宗义,1992)。但是,植被的蒸腾耗水量也随之增加了,植被与水的矛盾日益突出:如皇甫川流域目前的植被正常生长能否维持或能维持多久,乔、灌、草配置模式及主要植物的种植密度是否合理等(杨劭等,2002),这些问题急需解决。对于皇甫川流域植被水分关系及相关问题已有许多研究,如高清竹等(2000)、高清竹(2003)、杨劭等(2002,2003),主要通过对流域典型群落中植物生理特性、植物蒸腾、蒸发以及土壤水分的测定,探讨了各典型群落中,植被耗水与土壤水分和降水等的关系,以及不同植物种(主要是乔、灌木)的适宜植被密度;研究工作很全面,积累了大量的流域植被水分相关资料。在这些研究和我们进行的实际观测的基础上,可以通过模型模拟的方法更全面、更详细地研究流域植被与土壤水分间的关系。本文针对的问题是,不同的立地条件(坡度和坡向)、不同的植被盖度对土壤水分的影响。由于其适应性和抗逆性强,在干旱半干旱地区,柠条(*Caragana intermedia*)是营造水土保持林和防风固沙林的优良树种。在皇甫川流域,柠条是营造人工灌木林的主要树种之一,其分布广泛,在水土保持中起着重要作用。由于柠条的重要作用,我们选择柠条作为研究对象,建立了柠条林地土壤水分动态模拟模型,通过模型模拟来研究皇甫川流域典型灌木(柠条)的土壤水分动态,探讨植被盖度与土壤水分之间的关系,这对当地的生态环境建设具有重要的理论和实践意义。

1 方法

1.1 构建模型

林地土壤水分动态过程涉及植被截留、降雨入渗、地表径流、土壤水分再分配、植物蒸腾、地表蒸发等过程。主要可以分为4个部分,与土衫有关的过程、植物相关过程、林地蒸散过程,以及坡向坡度对上面3个过程的影响(图1)。

1.1.1 坡向和坡度的影响

不同的坡向、坡度,对太阳辐射的遮蔽时间、遮蔽范围不同,使得坡面上接受的辐射量及潜在蒸散

出现差异。由于辐射(光合有效辐射)会影响植物的气孔导度——从而影响植被的冠层导度,潜在蒸散会影响林地的蒸散过程,而且坡度也影响坡面的降雨强度,这样坡向坡度就对林地的土壤水分动态产生了影响。假设降雨强度为 I_{rain} ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$),则在坡度为 slp 的坡上,降雨强度为 $I_{rain} \cos(slps)$ 。不同坡向坡度的坡面上,日辐射量 $R_n(asp, slp, lat, day)$ 是坡向(asp (°)、坡度(slp)、纬度(lat)和时间(day)的函数,其计算见文献(傅抱璞等,1994),光合有效辐射 $P_{ar}(asp, slp, lat, day)$ 的计算见周允华等(1996)的研究。模型中蒸腾、蒸发通过计算参照作物蒸散(ET_0)以及不同的影响系数得到,参照作物蒸散用 Penman-Monteith 方程(Richard *et al.*, 1998)计算。

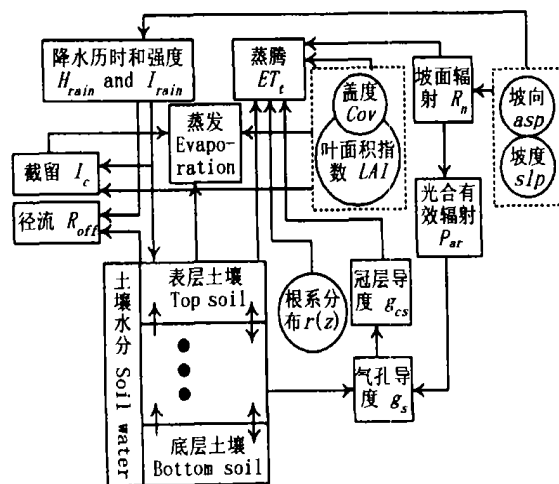


图1 柠条林地土壤水分动态模拟模型结构图

Fig.1 Structure of the model of soil water dynamic of *Caragana intermedia* woodland

1.1.2 土壤相关过程

与土壤有关的过程包括降雨入渗、地表径流、土壤水分再分配等过程。模型中降雨入渗及地表径流过程是通过模拟超渗产流过程模拟的,水分进入土壤后,各层之间的水分运动由 Buckingham-Darcy 方程计算。土壤导水率曲线根据 Rawls 等(1982)的方法由土壤粒径数据拟合得到。

1.1.3 植物相关过程

植物的影响体现在以下两个方面:冠层截留和植物蒸腾。叶面积指数(LAI)、根系分布以及气孔导度是其中的关键。

冠层截留涉及 LAI、雨量、雨强等因素,其中与 LAI 密切相关,随 LAI 的增大而增大(Running & Coughlan, 1988; 张光辉和梁一民, 1995, 1996)。模型采用的是指数形式的统计模型(刘贤赵和康绍忠,

1998;仪垂祥等,1996)。LAI 是群落中的一个重要因子,对于灌木,一般在生长季中随时间变化,只有一个峰值 (L_{\max}),通常是时间的单峰形式的函数。模型中假设 LAI 在生长季的中后期达到 L_{\max} ,持续到落叶期,然后 LAI 开始下降。

蒸腾过程是土壤水分在水势梯度驱动下由根进入植物体内,然后通过气孔向外扩散的过程;对于叶片尺度的蒸腾来说,气孔是蒸腾过程的关键控制因素。模型中采用 Gao 气孔导度模型 (Gao *et al.*, 2002) 模拟气孔导度的动态。从叶片到冠层进行尺度转换时,冠层导度通过气孔导度与叶面积指数来计算 (Running & Coughlan, 1988; 刘建栋等, 1998)。

许多研究者采用公式 $g_{cs} = C_g \cdot LAI \cdot g_s$ 模拟瞬时叶片导度对冠层导度的影响,式中 C_g 反映的是平均状况下的转换系数。在平均状态下,又有 $g_{cs} = LAI / 200$ (Allen, 1986), 所以 $C_g \cdot LAI \cdot g_s = LAI / 200$, 即 $C_g = 1 / (200 \cdot g_s)$, 这可以通过观测的叶片导度数值模拟。

1.1.4 林地蒸散过程

蒸散包括植物蒸腾和地表蒸发,是土壤水分的主要输出项,是土壤水分模拟中关键的一环。模型中蒸散分两阶段计算,首先模拟参照作物蒸散,再通过双作物系数方法模拟实际的蒸腾和蒸发。参照面完全覆盖、水分充足,因此 ET_0 不受水分胁迫,也不受盖度和 LAI 的影响。而实际的蒸散,特别是在半干旱区,受水分亏缺、气孔导度、LAI 和盖度的影响很大。实际计算时要考虑由于外貌不同导致的空气动力阻力变化的影响 (K_{pfull})、LAI 的影响 (K_{lai})、盖度的影响 (K_{cov})、冠层导度的影响 (K_{st}) 和土壤水分对蒸腾的影响 (K),蒸腾可表示为:

$$ET_t = K_{pfull} \cdot K_{lai} \cdot K_{cov} \cdot K_{st} \cdot K \cdot ET_0 \tag{1}$$

根据以往研究 (Richard *et al.*, 1998; Nouvellon *et al.*, 2000) 中 LAI 和盖度对蒸腾影响的计算, K_{lai} 和 K_{cov} 分别如下:

$$K_{lai} = 1 - \exp(-0.7LAI) \tag{2}$$

$$K_{cov} = \min(1, 2Cov, (Cov_{eff})^{1/(1+h)}) \tag{3}$$

式中 h 为冠层平均高度; Cov_{eff} 为有效盖度,指的是被植被遮荫的土壤表面比例,大于植被盖度,反映了由于植被遮挡太阳辐射而产生的对蒸散的影响。

影响蒸发的系数,由下式 (Richard *et al.*, 1998) 计算:

$$K_e = \min(K_r(K_{pmax} - K_{pt}), Cov_{ew}K_{pmax}) \tag{4}$$

Cov_{ew} 表示裸露的地表比例,在生长季中等于 $1 - Cov$,非生长季中等于 1。

1.2 研究区与数据资料

模型中数据的获取地点为皇甫川流域五分地沟实验区,隶属准格尔旗,位于黄河中游的一级支流——长川中游的东岸。位于 $39^{\circ}46'N, 111^{\circ}7'E$, 平均海拔 1 100 m, 多年平均温度 $6.2^{\circ}C$, 年均降水量 368.7 mm, 蒸发量 1 946.6 mm, 土壤主要由 3 类组成:以砒砂岩为母质的栗钙土、风沙土,及以黄土为母质的黄绵土和黄土。实验材料是柠条。

气象数据为研究区内沙圪堵气象站从 1971 年到 2000 年连续 30 年的逐日气象数据。包括降水量、平均气温、最低气温、最高气温、平均风速和相对湿度等。土壤特性数据采用剖面法调查,于 2002 年 5~8 月,在风沙土上,选取了坡位不同的 9 个点,做了 1 m 深的剖面,用环刀法测量了土壤容重,并取样分析了粒径和土壤有机质含量。对于植物相关的数据,于 2003 年 7 和 9 月,选取了典型柠条林地,用 LI-COR 公司的便携式光合测定仪 LI-6400 观测了与植物光合、蒸腾和气孔导度有关的生理过程并同时测量了土壤水分;于 2003 年 7 月,于风沙土上典型柠条林地中,选取了 6 株灌丛,观测了柠条的根系生物量。叶面积数据、林地蒸散数据和土壤水分数据分别取自杨劭等 (2002)、高清竹 (2003) 和金争平等 (2003) 的研究。

1.3 模型的参数化和验证

1.3.1 模型的参数化

1.3.1.1 土壤相关过程

根据 2002 年 5~8 月研究区所取土样的实验分析结果,得到研究区的土壤特征数据 (表 1)。 I_{rain} 和 H_{rain} 根据金争平等 (1992) 的研究中统计的研究区 1982 至 1990 年降雨历时频率分布数据随机模拟得到。土壤的稳定入渗速率根据以往试验区的径流数据 (苗宗义, 1992) 拟合得到, $I_{fil} = 6 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。模型中土壤分为 10 层,通常土壤蒸发活跃的深度在 15 cm 左右,因此第一层厚度为 15 cm,其余各层为 20 cm,共 195 cm 深。水分特征曲线,可用 Rawls 和 Brakensiek (1985) 的方法,由土壤的砂砾含量、黏粒含量和土壤有机质等估算出一组对应的水分-水势值,再拟合得到土壤的水分特征曲线:

$$\theta = -17.4 \cdot \psi^{-1.43} \tag{5}$$

水势单位 kPa。土壤导水率曲线根据 Rawls 等 (1982) 的方法由土壤粒径数据拟合得到:

表1 土壤特征指标		
Table 1 Soil character indexes		
特征指标 Character indexes	数值 Value	
砂粒含量 Sand-grain fraction	82.16 %	
粉粒含量 Silt fraction	6.78 %	
黏粒含量 Clay fraction	11.06 %	
田间持水量 Field moisture capacity	0.19 m ³ m ⁻³	
剩余含水量 Residual moisture content	0.025 m ³ m ⁻³	
饱和含水量 Saturation moisture content	0.37 m ³ m ⁻³	
萎蔫含水量 Wilting point moisture	0.027 m ³ m ⁻³	
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	10 cm h ⁻¹	
容重 Bulk density	1.44 g cm ⁻³	

$$K(r) = K_s \left(\frac{r}{r_s} \right)^{8.7732}$$

(6)

1.3.1.2 植物相关过程

Luo 等(2002)建立了 L_{max} 与降水量和温度间的回归关系,结合研究区柠条林地的 1998 年和 1999 年的叶生物量观测数据(高清竹,2003;金争平等,2003),可以通过拟合得到:

$$L_{max} = 0.78MI - 0.76$$

(7)

$$MI = \begin{cases} P / (WI + 20) & WI \leq 100 \\ 2P / (WI + 140) & WI > 100 \end{cases}$$

式中 MI 为湿度指数, WI 是温暖指数,等于 1 年中月均温高于 5℃ 的月均温之和。根据研究观测(牛西午,2003),准格尔旗的柠条展叶期在 4 月 28 号左右,落叶期在 10 月上旬;华北、西北地区的柠条芽膨大及树液开始流动的日平均气温为 5~7℃,叶落末期的气温为 2~3℃。一般 4 月开始返青,10 月上旬叶子开始枯黄,8 月底 9 月初生物量达到最高值。因此根据这些物候数据,模型中假设当连续 6 d 的气温大于 6℃ 时,柠条芽膨大及树液开始流动,进入展叶期(t_1),连续 1 周的气温小于 3℃ 时,落叶期结束(t_4),9 月 1 号达到最大值 $L_{max}(t_2)$,10 月 10 号进入落叶期(t_3)。

根据测定(蒋定生,1997),黄土高原地区灌木草本层 1 次最大截留量为 1~4 mm,由于缺乏实测,而柠条的 LAI 小于 3,模型中假设柠条群落 1 次最大截留量等于 $I_{cmax} = 0.25$ cm。

根据柠条的根系观测数据¹⁾,根系绝大部分分布在 160 cm 以内,根系分布的其它参数可以由根系分布数据拟合得到, a 、 c 和 B_{50} 分别为 -1.91、31.84 和 0.044 1,拟合效果见图 2。

分别于 2003 年 7 和 9 月,对柠条的生理特性

(LI-6400 便携式光合测定仪)和柠条林地的土壤水分进行了观测(数据未发表),利用观测数据拟合得出了 Gao 气孔导度模型中所需的参数, $g_{cm} = 4.84$ mol m⁻² s⁻¹, $k_g = 8.36 \times 10^{-4}$ mol m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹, $k_g = 0.00473$ mol mol⁻¹, $k_g = 1000$;及气孔导度到冠层导度的转换系数 $C_g = 0.0118$ m³ s⁻¹。

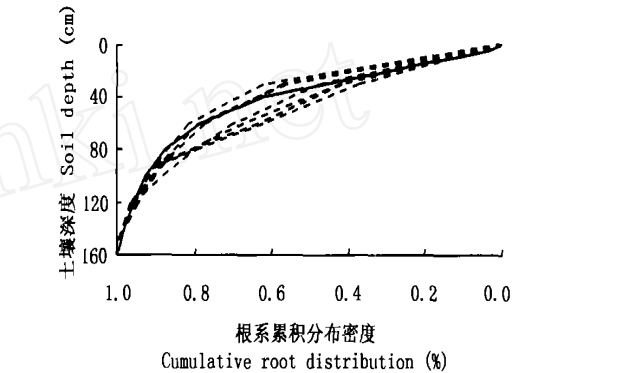


图2 柠条累计根系分布
Fig.2 Cumulative root distributions of *Caragana intermedia*
虚线表示实际测量的根系分布,实线为拟合得到的根系分布函数 The dashed for measured data, the real line for fitted

1.3.1.3 林地蒸散过程

ET_0 参照作物蒸散指参照面上的蒸散,参照面定义为高 0.12 m、表面阻力为 70 s m⁻¹、反照率为 0.23 的水分充足的草地。太阳赤纬角 $\delta = 0.409 \sin(2\pi/365 \cdot day - 1.39)$ 。 K 中 $\theta - \theta_f$ 代表的是土壤中的植物的易利用水部分, $\theta - \theta_f$ 常取 0.5~0.8 (Richard et al.,1998),模型中取 $\theta - \theta_f = 0.6$ 。 K_r 中 $\theta - \theta_f$ 代表的是土壤表层中蒸发的易利用水部分,对于壤质沙土田间持水量之下 4%~8% 为易利用水(Richard et al.,1998),模型中取 $\theta - \theta_f = 0.08$ 。

1.3.2 模型的验证

为了验证模型,模拟了典型柠条林地 1971~2000 年 30 年的土壤水分,典型柠条林地的地上部分特征:平均冠幅 213 cm × 203 cm,平均高度 142 cm,盖度 0.13(高清竹,2003)。图 3、4 中所示的分别是 1998 和 1999 年两年生长季中,土壤水分的模拟值与实测值,及月蒸腾量的模拟值与实测值(杨劼等,2002;高清竹,2003)。模型可以较好地模拟土壤水分与林地的蒸腾动态过程。模拟显示土壤水分初始值对长期的土壤水分动态没有影响。模型未考虑低温导致的土壤冰冻和降雪的影响,但由模拟结果可以知道,这种影响不大。

1) Wang JH (王君华) (2004). Study on the Root Growth Model of the Typical Shrub *Caragana intermedia* at Huangfuchuan Watershed (皇甫川流域典型灌木柠条的根系生长模型的研究). Master's degree dissertation of Beijing Normal University. (in Chinese with English abstract)

1.4 模型应用

分别模拟了坡度 $slp = 0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}$, 坡向 $asp = 0^{\circ}$ (北坡), $45^{\circ}, 90^{\circ}$ (东坡), $135^{\circ}, 180^{\circ}$ (南坡), 盖度 $Cov = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75$, 共 328 种情景。模拟时间从 1971 至 2000 年, 共 30 年, 时间步长为 1 d。

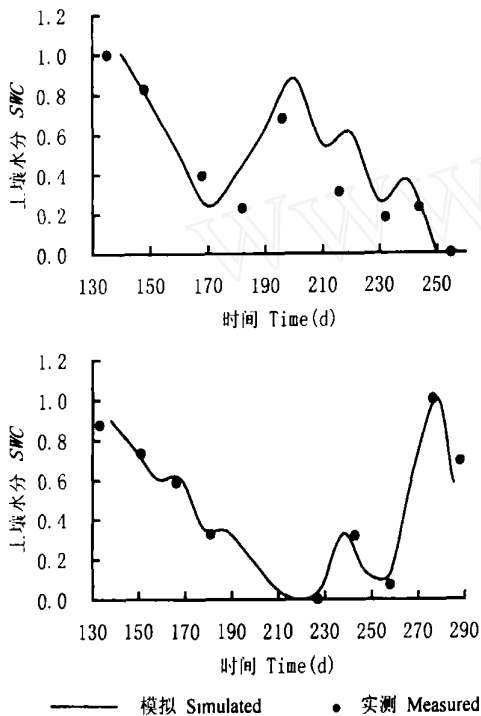


图3 1998 和 1999 年生长季中模拟与实测土壤水分
Fig.3 Simulated versus measured soil water content (SWC) in the growing season of 1998 - 1999

2 模拟结果与讨论

2.1 土壤水分与盖度和坡度的关系

图 5、6 分别显示了模拟得到的最后 10 年平均土壤水分含量(体积)与坡度、坡向和盖度之间的关系。在南坡(180°), 土壤水分随覆盖度增加而递减, 随坡度增加递减; 在 30° 的坡上, 土壤水分随坡向从北向南的增加而减少。

模拟显示, 在所有模拟的坡向坡度情况下, 土壤水分都随盖度的增加而递减。植被可以保持水土, 防止流失, 但同时植被又消耗土壤中的水分, 所以植被盖度并不是越高越好, 要控制在一个范围内。在这个范围内, 可以使得土壤保持适当的水分, 植物可以正常生长。

2.2 土壤水分与盖度和坡向的关系

在所有模拟的坡度上, 土壤水分都随坡向从北

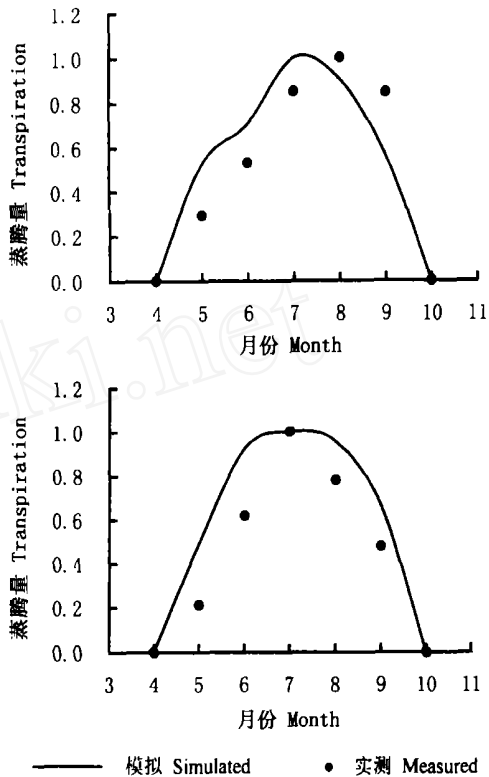


图4 1998 和 1999 年生长季中模拟与实测月蒸腾量
Fig.4 Simulated versus measured transpiration in the growing seasons of 1998 - 1999

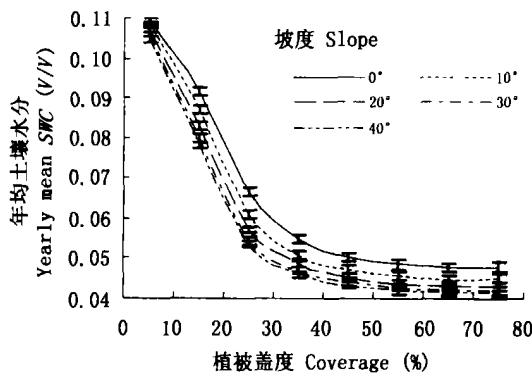


图5 1991 ~ 2000 年平均土壤水分与盖度和坡度
的关系(南坡, 180°)

Fig.5 1991 - 2000 yearly mean soil water content versus coverage-slope (aspect = 180°)

向南增加而减少。在各个坡向上, 坡度与土壤水分的关系见表 2。其中, \nearrow 表示土壤水分随坡度增加而增加, \searrow 表示土壤水分随坡度增加而减小; \cup 表示土壤水分对于坡度有一个峰值; \cap 表示土壤水分对于坡度有一个最低值。植被盖度对坡度-土壤水分间关系曲线的递增、递减、单峰、或单谷形式没有影响。这主要是因为不同坡度坡向对辐射的遮蔽不同

引起的。在北坡上,坡度越大,辐射越小——使得潜在蒸散越小,光合有效辐射越小——使得 $K_{s,r}$ 越小(蒸腾减小),最终导致土壤水分降低。在东坡上,辐射随坡度的增加有一个最大值,这导致土壤水分出现一个最大值。其它坡上也是这样,土壤水分的变化都是由辐射的差异引起的。

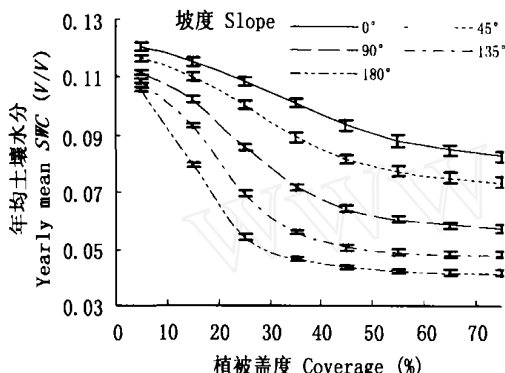


图 6 1991~2000 年平均土壤水分与盖度和坡向的关系(坡度 30°)
Fig. 6 Mean soil water content between 1991 - 2000 versus coverage and aspect (slope = 30°)

表 2 不同坡向上坡度与土壤水分的关系
Table 2 Types of function between soil water content and slope of different aspect

坡度 Slope	0°	45°	90°	135°	180°
土壤水分与坡度的关系 Soil water content versus slope	↗	↗			↘

↗:增加 Increasement ↘:减小 Decreasement ▲:峰值 Peak value
 :最低值 Lowest value

考虑盖度、坡向和坡度对土壤水分的作用,由模拟结果可以推出,在南坡上,年平均土壤水分与植被盖度和坡度的关系如下:

$$= (-5.90 \times 10^{-8} C^4 + 8.86 \times 10^{-6} C^3 - 3.60 \times 10^{-4} C^2 - 3.72 \times 10^{-4} C + 0.2940) \cdot (-2.48 \times 10^{-7} S^4 + 2.16 \times 10^{-5} S^3 - 5.90 \times 10^{-4} S^2 + 4.10 \times 10^{-3} S + 0.3793) \quad R^2 = 0.97 \quad (8)$$

式中, C 指植被盖度, S 指坡度。这里需要注意的是,应用这些关系式时,数值会跟实际情况相差较多,其价值主要体现在对水分动态变化趋势的预测上。若要应用具体的数值,必须要用实际数据来校正。

2.3 适宜盖度与坡度和坡向的关系

这里所说的适宜盖度是对于人工柠条群落来说的,不是指自然群落对气候、土壤、气候条件长时间适应的结果,而是受人的控制所形成的盖度。适宜植被盖度的确定,可优化流域内的能量流动和物质循环,得到较高的生态、经济、社会效益,为水土流失

治理提供理论依据(杨劭等,2002)。本文主要考虑水分与植被盖度间的关系,因此在这里把适宜盖度定义为最大程度上利用土壤水分、而又不影响植物生长时的密度。以往对适宜密度的研究,一般都未考虑坡度和坡向的影响,本研究通过模型模拟的方法研究了适宜密度与坡度和坡向的关系。

通过在丰水年(1998 年)和欠水年(1999 年)两个生长季里,对柠条蒸腾的测量,柠条的蒸腾速率范围为 $0.8 \sim 2.0 \text{ g(水)} \cdot \text{g}^{-1}(\text{叶干重}) \cdot \text{h}^{-1}$ (杨劭等,2002),因此文中假设柠条蒸腾速率小于 $0.8 \text{ g(水)} \cdot \text{g}^{-1}(\text{叶干重}) \cdot \text{h}^{-1}$ 时柠条生长受限制。研究中,分别用建立的模型模拟造林密度从最高(100%)到较低密度(10%)时对应的平地上的土壤水分过程,并求出平均的蒸腾速率和土壤水分。结果显示,在长时期内植被的蒸腾速率由土壤水分直接决定,植被盖度通过影响蒸腾总量对土壤水分产生影响,进而间接影响蒸腾速率;当盖度为40%时,蒸腾速率在 $0.8 \sim 2.0 \text{ g(水)} \cdot \text{g}^{-1}(\text{叶干重}) \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,这时的土壤水分为0.053;盖度高于40%时,蒸腾速率低于 $0.8 \text{ g(水)} \cdot \text{g}^{-1}(\text{叶干重}) \cdot \text{h}^{-1}$,生长受抑制;密度低于40%时蒸腾速率在范围内,但这时土壤水分高于0.053,土壤水分未被充分利用。因此平地上,适宜的植被盖度应该为40%,这与杨劭等(2002)研究的结论一致,适宜盖度对应的土壤水分为0.053。这样得出的适宜盖度是极理想情况下的一个平均的理论值,实际情况中,由于环境条件的不均匀性,适宜盖度应该是在一个范围内变化、以这个理想值为中心变化。

与上面的计算方法一样,对不同组合坡度、盖度条件进行模拟,统计模拟得到的蒸腾及土壤水分数据,求出蒸腾速率大于 $0.8 \text{ g(水)} \cdot \text{g}^{-1}(\text{叶干重}) \cdot \text{h}^{-1}$ 而且土壤水分最小时所对应的组合,这时的盖度值就是这个坡度对应的适宜盖度。由此得到了南坡上适宜盖度与坡度的关系(图7)。其它坡向的坡上,

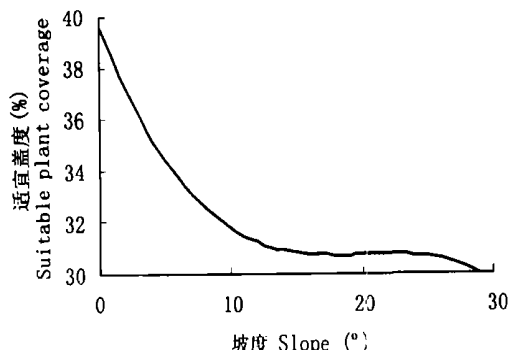


图 7 适宜盖度与坡度关系(南坡)
Fig. 7 Suitable coverage versus slope (aspect = 180°)

适宜盖度与坡度的关系也可同样推出。这样得到的值为理想条件下的值,对于实际情况,适宜盖度应该在曲线上下波动,所以这条曲线反应的只是适宜盖度的变化趋势。坡度在 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 时,适宜盖度随坡度增加变化很快,对坡度反应敏感;在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时,适宜盖度的变化很平缓。

3 结 论

本文建立了柠条林地土壤水分动态模型,模拟了土壤水分与坡向、坡度和植被盖度之间的关系。由于模型中有很多因素未考虑或考虑的不够全面,如土壤的异质性、植被的生长及叶面积动态过程等,但是通过验证知道,模型可以较好地模拟林地的水分动态:1)推出了土壤水分与植被盖度的关系,随着盖度的增加,土壤水分递减,植被盖度不是越高越好。2)得到了土壤水分与坡向、坡度的关系。3)得出了平地上柠条的适宜盖度,并结合土壤水分与坡向、坡度和植被盖度的关系,推出了不同坡度上的适宜盖度。坡度小于 10° 时,适宜盖度对坡度反应敏感,大于 10° 时,适宜盖度对坡度反应不敏感。对于小于 10° 的坡地,植被建设时可根据上面的研究结果设计合理的植被盖度。不过,本文所得到的这些结果主要是对林地水分动态变化过程的预测,具体的数值可能跟实际相差较多,这一点非常重要,否则应用时会出现很大偏差。另外,本文还存在不足,实际上坡向、坡度对温度、土层厚度的分布也有重要的影响,进而影响蒸散过程和土壤水分运动过程;由于坡度与温度关系的复杂性以及温度和土层厚度数据的缺乏,本模型中没有考虑温度和土层厚度,这对结论的严密性有一定的影响。以后应加强这方面的工作,那样得出的结论将会更加严密、实用。

参 考 文 献

- Allen RG (1986). A penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112, 348 - 368.
- Cui XY (崔晓勇), Chen ZZ (陈佐忠), Du ZC (杜占池) (2001). Study on light- and water- use characteristics of main plants in semiarid steppe. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 10(2), 14 - 21. (in Chinese with English abstract)
- Fu BP (傅抱璞), Weng DM (翁笃明), Yu JM (虞静明) (1994). *Microclimate* (小气候学). China Meteorological Press, Beijing, 197 - 227. (in Chinese)
- Fu BJ (傅伯杰) (1991). Study on land assessment in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 5, 1 - 7. (in Chinese with English abstract)
- Gao Q, Zhao P, Zeng X, Cai X, Shen W (2002). A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. *Plant, Cell and Environment*, 5, 1373 - 1381.
- Gao QZ (高清竹), Yang J (杨劼), Li QQ (李国强), Jin ZP (金争平), Wang ZW (王正文) (2000). A study on the water regime of *Thymus serpyllum* community in Huangfuchuan watershed. *Acta Agrestia Sinica* (中国草地), 5, 23 - 27. (in Chinese with English abstract)
- Gao QZ (高清竹) (2003). *Land Use Security Pattern for Farming-pastoral Zone of North China, a Case Study at Changchuan Watershed* (农牧交错带长川流域土地利用安全格局研究). Ph. D. dissertation, Beijing Normal University, Beijing, 19 - 51. (in Chinese with English abstract)
- Jiang DS (蒋定生) (1997). *Soil and Water Loss and Its' Management Patterns in the Loess Plateau* (黄土高原水土流失与治理模式). China Water Power Press, Beijing, 106 - 122. (in Chinese)
- Jin ZP (金争平), Shi PJ (史培军), Hou FC (侯福昌), Zhao HX (赵焕勋) (1992). *Soil Erosion System Models and Management Patterns in Huangfuchuan Watershed* (黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式). China Ocean Press, Beijing, 234 - 242. (in Chinese)
- Jin ZP (金争平), Miao ZY (苗宗义), Wang ZW (王正文), Yan ZQ (阎占卿), Yang J (杨劼), Li LY (李立业), Fu HL (付福林), Jia ZB (贾志斌), Chai JH (柴建华), Han XS (韩学士), Lin F (蔺丰) (2003). *Study on Soil and Water Conservation and the Development of Farming and Grazing in Pishayan Area* (砒砂岩区水土保持与农牧业发展研究). Yellow River Water Resources Press, Zhengzhou, 48 - 63. (in Chinese)
- Liu JD (刘建栋), Fu BP (傅抱璞), Yu Q (于强) (1998). The study on Penman-Monteith model taking account of the factors of the environment used for water transfer calculation. *Journal of Nanjing University* (Natural Science Edition) (南京大学学报 (自然科学版)), 34, 359 - 364. (in Chinese with English abstract)
- Liu XZ (刘贤赵), Kang SZ (康绍忠) (1998). An introduction to models of rainfall interception by forest canopy. *Journal of Northwest Forestry College* (西北林学院学报), 13, 26 - 30. (in Chinese with English abstract)
- Luo TX, Neilson RP, Tian H, Vörösmarty CJ, Zhu H, Liu S (2002). A model for seasonality and distribution of leaf area index of forests and its application to China. *Journal of Vegetation Science*, 13, 817 - 830.
- Miao ZY (苗宗义) (1992). *The Comprehensive Managements on Soil and Water Loss: Study on the Developmental Experiments of Agriculture, Forestry and Animal* (黄土高原综合治理皇甫川流域水土流失综合治理农林牧全面发展试验研究). China Agricultural Science and Technology Press, Beijing, 12 - 42. (in Chinese)

- Niu XW (牛西午) (2003). *Studies on Caragana (柠条研究)*. Science Press, Beijing, 48 - 49. (in Chinese)
- Nouvellon Y, Rambal S, Lo Seen D, Moran MS, Lhomme JP, Bègué A, Chebouni AG, Kerr Y (2000). Modeling of daily fluxes of water and carbon from shortgrass steppes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 137 - 153.
- Rawls WJ, Brakensiek DL (1985). Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones E, Ward TJ eds. *Watershed Management in the Eighties*. ASCE, New York, 293 - 299.
- Rawls WJ, Brakensiek DL, Saxton KE (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 25, 1316 - 1330.
- Richard GA, Luis SP, Dirk R, Martin S (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Available via DIALOG. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- Running SW, Coughlan JC (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 125 - 154.
- Ryel RJ, Caldwell MM, Yoder CK, Or D, Leffler AJ (2002). Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata*: evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. *Oecologia*, 130, 173 - 184.
- Schennk HJ, Robert BJ (2002). The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 72, 311 - 328.
- Wang J (王军), Fu BJ (傅伯杰), Jiang XP (蒋小平) (2002). Review on research of soil moisture heterogeneity. *Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究)*, 9 (1): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)
- Yang J (杨劼), Gao QZ (高清竹), Li QQ (李国强), He LH (何立环), Jin ZP (金争平), Wang ZW (王正文) (2002). A study on the water ecology of dominant artificial shrubs in Huangfuchuan watershed. *Journal of Natural Resources (自然资源学报)*, 17, 87 - 94. (in Chinese with English abstract)
- Yang J (杨劼), Song BY (宋炳煜), Piao SF (朴顺姬), Tong C (仝川), Gao QZ (高清竹) (2003). Experimental study on ecological use of water of a small catchment in Huangfuchuan area. *Journal of Natural Resources (自然资源学报)*, 18, 513 - 521. (in Chinese with English abstract)
- Yang WZ (杨文治), Yu CZ (余存祖) (1992). *Regional Management and Evaluation in the Loess Plateau (黄土高原区域治理与评价)*. Science Press, Beijing, 190 - 297. (in Chinese)
- Yi CX (仪垂祥), Liu KY (刘开瑜), Zhou T (周涛) (1996). Research on a formula of rainfall interception by vegetation. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation (土壤侵蚀与水土保持学报)*, 2, 47 - 49. (in Chinese with English abstract)
- Zhang GH (张光辉), Liang YM (梁一民) (1995). The seasonal change of artificial grassland coverage and its' soil and water conservation benefit in loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation (水土保持通报)*, 15 (2), 38 - 43. (in Chinese with English abstract)
- Zhang GH (张光辉), Liang YM (梁一民) (1996). A summary of impact of vegetation coverage on soil and water conservation benefit. *Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究)*, 3 (2), 104 - 110. (in Chinese with English abstract)
- Zhou YH (周允华), Xiang YQ (项月琴), Luan LK (栾禄凯) (1996). Climatological estimation of quantum flux densities. *Acta Meteorologica Sinica (气象学报)*, 54, 447 - 455. (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZC (朱志诚) (1993). The main characteristics of the vegetation and its impact on the soil essence in the Loess Plateau of Northern Shaanxi province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica (植物生态学与地植物学学报)*, 17, 280 - 286. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 刘世荣 责任编辑: 张丽赫