doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.022

基于 CoupModel 的三峡库区典型农林地水量平衡模拟*

王　贤[1]　张洪江[1]　吕相海[2]　程金花[1]　王　伟[3]　李世友[4]

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.中国国际工程咨询公司, 北京 100048;
3.交通运输部科学研究院交通环保与安全研究中心, 北京 100029; 4.重庆市四面山森林资源管理局, 重庆 402296)

摘要: 应用 CoupModel(土壤-植物-大气系统热量、物质运移综合模型),在野外观测试验的基础上对三峡库区典型阔叶林(木荷和石栎)、针叶林(杉木和马尾松)和农地(玉米)SPAC 系统水量平衡进行了模拟。结果表明,土壤含水率模拟结果与实测值具有较好的一致性(R^2 为 0.80 ~ 0.91);蒸散是水量平衡中主要的支出项,比例高达 61%,蒸散量由大到小为阔叶林(720 mm/a)、针叶林(700 mm/a)、农地(601 mm/a);农地年均深层渗透量(452 mm/a)分别比阔叶林、针叶林高 60 mm 和 47 mm,且在降雨较多的年份表现更明显;试验期间阔叶林系统水分支出高于输入,这是引起阔叶林地土壤储水呈现负补偿现象的主要原因;水分盈余是农地水量平衡的主要特征,而林地却发生了春旱和秋旱,农林地水分条件具有较大差异。植被覆盖类型对水量平衡具有重要影响。在实施植被建设、退耕还林时,选择与当地水分条件相适应的树种、采取合理的抚育措施是必要的。

关键词: 三峡库区　林地　农地　土壤含水率　水量平衡　CoupModel

中图分类号: S152.7+5; S154.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)06-0140-10

引言

水分是作物生长、植被恢复的限制性因素,也是生态系统中物质和能量循环的主要载体[1]。研究水量平衡规律可以全面认识地区水资源的分配状况,合理调配水资源,使生态环境朝着人们所期待的方向转化。中国北方水资源短缺,耕地较多,众多学者集中于对北方地区水量平衡状况进行研究,提出了很多水资源合理配置的对策与建议[2-7]。作为我国生态环境最为脆弱的地区之一,长江三峡库区地形复杂,降雨时空分布不均,水旱灾害频繁[8]。季节性干旱问题严重制约了三峡库区的农林业生产,实现抗旱与防洪并举是该地区农林业发展的重要保障。定量分析不同植被覆盖条件下水量平衡和植被耗水特征,对三峡库区植被恢复过程中积极应对水旱灾害、增强防御能力、提高土地生产力具有重要意义。

对于水量平衡各分量的测量,传统田间试验工作量大、测试方法复杂,借助模型可以以较少的成本而精确地分析土壤-植物-大气连续体(SPAC)中水分迁移转化过程。CoupModel(Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system)是一个基于过程的一维模型[9-10],能够以其独特的建模方式模拟和预测不同土壤类型和土地管理措施下 SPAC 系统的土壤水热运移过程、植物水分传输过程、大气和积雪变化过程及碳氮循环过程,在国外得到广泛应用[11]。很多学者利用该模型对气候变化背景下的森林和农田生态系统碳循环[12]、土壤溶质运移[13-15]以及植物耗水特征[16-18]等问题开展了研究。该模型引入我国后,在东北地区[19]、青藏高原[20]、黄土高原[2-4,21]等地区都进行过模拟验证,在三峡库区尚未进行过相关应用。本文利用 CoupModel 模拟三峡库区 3 种典型植被类型,即木荷石栎阔叶林、杉木马尾松针叶林和玉米农田 SPAC 系统水量平衡状况,旨在为三峡库区植被恢复与建设提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　模型简介

CoupModel 由 SOIL 和 SOILN 发展而来,其核心是两个耦合的水热流偏微分方程,遵循质量和能量守恒定律,假定流动是由水势梯度和温度梯度产生

收稿日期: 2013-09-19　修回日期: 2013-11-11

*国家自然科学基金资助项目(41271300、30900866)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(TD2011-2)、"十二五"农村领域国家科技计划课题资助项目(2011BAD38B0403)和国家林业局林业科技推广资助项目(2012-42)

作者简介: 王贤,博士生,主要从事土壤水分运动与水土保持研究,E-mail: sdnydx.wangxian@163.com

通讯作者: 张洪江,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与流域管理研究,E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn

的，用有限差分法求解方程[9-10]。本研究使用 CoupModel 3.0 版本。

每日的水量平衡表示为

$$P = q_s + I + E_{ta} + E_s + q_d + \Delta S \quad (1)$$

式中　P——降雨量，mm

q_s——地表径流量，mm

I——冠层截留量，mm

E_{ta}——植被蒸腾量，mm

E_s——土壤蒸发量，mm

q_d——根系层以下深层渗透量，mm

ΔS——土壤储水变化量，mm

模型中土壤水分运动主要依据 Darcy 定律和 Richards 方程。地表径流由经验公式积水覆盖函数计算。排水与深层渗透为非饱和下边界条件，采用单位梯度流。实际蒸散在考虑植被覆盖率、冠层叶面积指数、土壤含水率及根系分布的基础上，由潜在蒸发能力计算而来。它包括裸露土壤的蒸发、植被截留蒸发、由根系吸水经植被冠层叶面的蒸腾。模型主要控制方程参照文献[9-10]。

1.2　试验区概况

试验区位于长江三峡库区末端的重庆市四面山张家山，地理坐标为东经 106°17′～106°31′、北纬 28°31′～28°46′，海拔高度 900～1 500 m，地势南高北低。研究区属于中亚热带湿润性季风气候区，年均温 10～14℃，年均降雨量 1 221～1 530 mm，相对湿度高达 80%～90%，多年平均日照时数 1 082.7 h。研究区主要土壤类型为黄壤和黄棕壤。植被具有典型的亚热带常绿阔叶林特征，群落优势树种以木荷、石栎、杉木、马尾松等为主，竹类主要以楠竹为主。

在对试验区进行全面踏勘的基础上，选取了在当地较为常见、广泛分布的木荷石栎阔叶林、杉木马尾松针叶林和玉米农地（耕作时间 10 年以上）作为研究对象，设置 20 m × 20 m 标准样地进行植被调查。调查时间为 2008 年 4 月，林龄由样地优势树种的标准木年龄确定。样地经纬度、海拔高度用 GPS 测定，坡度、坡向用罗盘测定。试验期间所有样地均没有灌溉、施肥等农业管理措施。样地基本情况如表 1 所示。

表 1　样地基本状况

Tab.1　Basic conditions of experimental plots

试验地	海拔高度/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a	植被覆盖度/%	土壤质地	主要植被
阔叶林	1 167	5	西南	35	80	砂壤土	木荷、石栎、中华里白、蕨等
针叶林	1 178	6	西南	30	75	砂壤土	杉木、马尾松、胡枝子、三脉紫菀等
农地	1 165	3	西南		70	砂壤土	玉米

1.3　数据观测

（1）气象参数

使用小型气象站观测。在样地周围的气象站观测场中，有一台 Vantage PRO 2 小型气象站连续观测降雨、风速、气温、相对湿度、总辐射，观测高度为 2 m，步长为 1 h。气象站在出厂前已经和标准气象站观测数据进行了校正。在输入气象参数时，需借助模型中 DOS 程序将其转化为 bin 数据文件格式。

（2）土壤参数

来自试验区土壤剖面属性测定。测定时间为 2008 年 4 月。在每个样地内随机选取 3 个未被扰动的点挖掘深 80 cm 的土壤剖面，每 20 cm 一层进行土样采集。比重计法测定土壤颗粒组成、环刀法测定土壤密度和孔隙度[22]、恒定水头法测定土壤饱和导水率[2-3]。采用 1500F1 型压力膜仪测定土壤水分特征曲线，由不同土壤含水率对应的土壤基质吸力，用 Brooks－Corey 方程拟合，求出 Boltzmann 变换参数值、进气值、残余含水率，同时计算饱和含水率和凋萎含水率[4]。根据室内土壤物理性质的测量初步确定参数值，并在模拟过程中进一步确定。

（3）植被参数

每月测定 1 次冠层高度、根系深度、叶面积指数。对于林地，采用测杆测量样地内标准木的树高，计算平均值即为冠层高度。林地根系深度采用人工挖土壤剖面的方法测量，每隔 20 cm 深度采集土样，拣出所有根系称量，定期测量根系生长状况。对于农地，从玉米出苗开始观测其生长状况，采用米尺测量株高，记录各生育阶段的起止日期。玉米根系深度直接采用整株挖取法测量，生长季末收割并称量。植物的叶面积指数采用 LAI－2000 型冠层影像分析系统[2-3]。以上参数取样地内不低于 10 株植物进行测量。

（4）土壤含水率

在 3 种植被覆盖类型标准地的上、中、下部选取 3 个点，埋设长 80 cm 的 FDR 探管，采用 Diviner 2000 型 FDR 土壤水分测定仪定位观测，每天 1 次，测定深度为 80 cm，土层间隔 20 cm。试验时间为 2008 年 1 月至 2009 年 12 月，历时 2 年。

（5）林冠截留

因模型中植被冠层截留容量 S_{imax}、单位叶面积

截留容量 i_{LAI}两个参数的校核需要,还应选取典型降雨进行冠层截留的测定。对于林地,分别选取样地内 3 株标准木,布设简易雨量筒收集穿透降雨。树干径流量测定采用收集槽法,在标准木 1.5 m 高处刻出环状小沟,将聚乙烯塑料管纵向剖开后,沿树干周围呈螺旋状固定,用硅胶将接触处密封,塑料管下端接容器承接树干径流。每次降雨后由降雨量、穿透雨量及树干径流计算出林冠截留量[2-3,13]。

(6)地表径流

在每个样地旁各布设一个径流小区(5 m × 20 m),小区下方安放二级径流桶,降雨后定时收集径流和泥沙量[4-5]。本试验中所有样地地形平坦,试验期间未观测到地表径流。

1.4 模型运行与参数率定

CoupModel 的驱动数据为气象、土壤和植被参数,模型输出结果是以时间序列表示的土壤含水率、温度和蒸发、蒸腾、渗透、水势以及水热通量等[11]。在输入气象、土壤、植被数据后,本次试验模拟输出阔叶林、针叶林和农地 0 ~ 80 cm 剖面土壤含水率及水量平衡各分量,输出步长为日。模拟时段 2 年,以 2008 年为率定期,模型率定后,保持所有参数不变,用土壤含水率、穿透雨量实测值对 2009 年模拟结果进行验证,探求模型在本地区的适用性。

模型迭代计算次数采用默认值 96 次,模拟输入气象数据间隔为 1 h。研究中考虑到植物对 SPAC 系统水分传输的影响,林地采用明确多层大叶模型和指数分布的根密度模型,实现土壤与冠层的耦合,农地则采用单层大叶模型。CoupModel 中参数众多,根据欧洲长序列的观测结果,模型开发者对参数值均设置了合理范围及理想默认值[9-11]。但在运行过程中还需对部分参数进行率定,进一步提高模拟精度。基于野外测定、相关文献以及校核结果,模型中被调整的参数如表 2 所示,其他未列出参数均采用模型默认值。

表 2 模型中被调整的参数

Tab.2 Parameters adjusted in the simulations

模型结构	参数	阔叶林	针叶林	农地	来源
气象	气象站海拔高度 e_{levmet}/m	1 165	1 165	1 165	测定
	试验地海拔高度 e_{levsin}/m	1 167	1 178	1 165	测定
	东西坡度 p_x/(m·m^{-1})	0.59	0.63	0.67	测定
	南北坡度 p_y/(m·m^{-1})	-0.12	-0.08	-0.11	测定
	年平均气温 T_{amean}/℃	19	19	19	测定
植被特征	最大叶面积指数 A_1	4.5	4.0	4.0	测定
	冠层高度 H_p/m	12.0	14.0	1.5	测定
	根系深度 z_{etr}/m	1.2	1.3	0.5	测定
辐射特征	试验地纬度 e_{latit}/(°)	28.51	28.51	28.51	测定
	湿土反照率 a_{wet}/%	15	15	15	文献[9]
	干土反照率 a_{dry}/%	25	25	25	文献[2-4,21]
	植被反照率 a_{veg}/%	10	13	15	文献[23-24]
	消光系数 k_{rn}	0.5	0.5	0.5	文献[2-4,21]
土壤热量性质	土壤热量传导系数 x_{hf}	0.4	0.4	0.4	文献[2-4,21]
	有机质层厚度 Δz_{humus}/m	0.08	0.05	0	测定
土壤水分运动	水气流弯曲度参数 d_{vap}	0.66	0.66	0.66	文献[2-4,21]
冠层截留	植被冠层截留容量 S_{imax}/mm	2.3	2.3	0.5	校正,文献[25]
	单位叶面积截留容量 i_{LAI}/mm	0.25	0.25	0.15	校正,文献[26]
潜在蒸腾	水气压亏缺 g_{vpd}/Pa	450	450	200	校正
	最大传导率 g_{max}/(m·s^{-1})	0.005	0.005	0.020	文献[27-28]
根系吸水	根系吸水补偿度 f_{umov}	0.9	0.6	0.6	校正
	根系吸水折减临界水头 ψ_c/cm	1500	1000	1000	校正
	表征根系分布的参数 r_{frac}	0.10	0.05	0.02	校正
土壤蒸发	蒸发阻力系数 r_ψ	150	150	100	校正
	气动阻力增加值 r_{alai}/(s·m^{-1})	60	60	50	校正

(1)植被反照率:参照李麟辉等[23]、蔡福等[24]的实测结果(亚热带阔叶林反照率 9.4% ~ 11.4%,针叶林 13.4%,玉米生长季反照率 15%),植被反照率分别取值为 10%、13% 和 15%。

(2)冠层截留容量:植被截留降水包括降雨和降雪 2 种情况,由于试验区地处亚热带,很少有降雪发生,本文只考虑植被对降雨的截留。通过实测树干径流量和穿透雨量,计算出林分对降雨的截留量,

并结合 Wang 等[2-3]、Schmidt-Walter 等[15]对阔叶林的校核结果，确定林地植被冠层截留容量和单位叶面积截留容量 2 个参数，分别取值为 2.3 mm 和 0.25 mm。玉米冠层较低，茎干较细，至今没有较为理想的方法测量其截留量，本文参照 Murai 等[25]对低矮植被冠层覆盖面吸附水量的试验结果（0.15 ~ 0.56 mm），定义玉米冠层截留容量为 0.5 mm，而单位叶面积截留容量则参照 Manzi 等[26]的研究结果定义为 0.15 mm。

（3）最大传导率：作为 Lohammar 方程中的重要参数，最大传导率对植被蒸腾量的模拟具有显著影响。参考 Kelliher 等[27]对阔叶林、针叶林的统计结果（4.6 ~ 5.7 mm/s），将其取值为 0.005 m/s，农地则根据 McGinn 等[28]对玉米冠层导度测量结果（5 ~ 20 mm/s），取值为 0.020 m/s。

（4）其他参数：干土反照率、消光系数、土壤热传导系数和水气流弯曲度等参数的取值均参照 Wang 等[2-4]、Zhang 等[15]的校核结果。水气压亏缺、根系吸水补偿度、临界水头、根系分布参数、蒸发阻力系数和气动阻力增加值等参数很难在实践中精确测量，应在模型设置的范围内适当调整，视模型敏感程度和模拟结果精度来校正确定。

2　结果与分析

2.1　土壤含水率验证

（1）土壤含水率观测结果

根系层土壤含水率受到气象、土壤、地形和植被等因素的综合影响，同时，它又影响着植被蒸散、土壤蒸发和土壤内部的水分交换过程[1]，其动态变化与地表能量、径流和植被生产力紧密相关[29]。因土壤含水率在饱和状态下不能够容纳更多的降雨和入渗，某些时候它也可以作为洪水的预警指标[29]。土壤含水率通常是水文生态模拟中一个重要的状态变量。

图 1 为 2008—2009 年 3 种植被类型 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 土壤含水率的动态变化。由图中看出，土壤含水率的变化随降雨量表现出有规律的起伏，最高值与降雨量极值几乎同步出现，说明降雨期间是产生壤中流的主要时段。从垂直分布来看，表层土壤对降雨的响应最为直接和迅速，随着土层深度的增加，变幅不断减小，稳定性增强。3 种植被覆盖类型土壤含水率均具有明显的季节变化特征，旱季较低，雨季较高。结合表 3 可见，土壤含水率在表层最低，随着土层深度的增加呈上

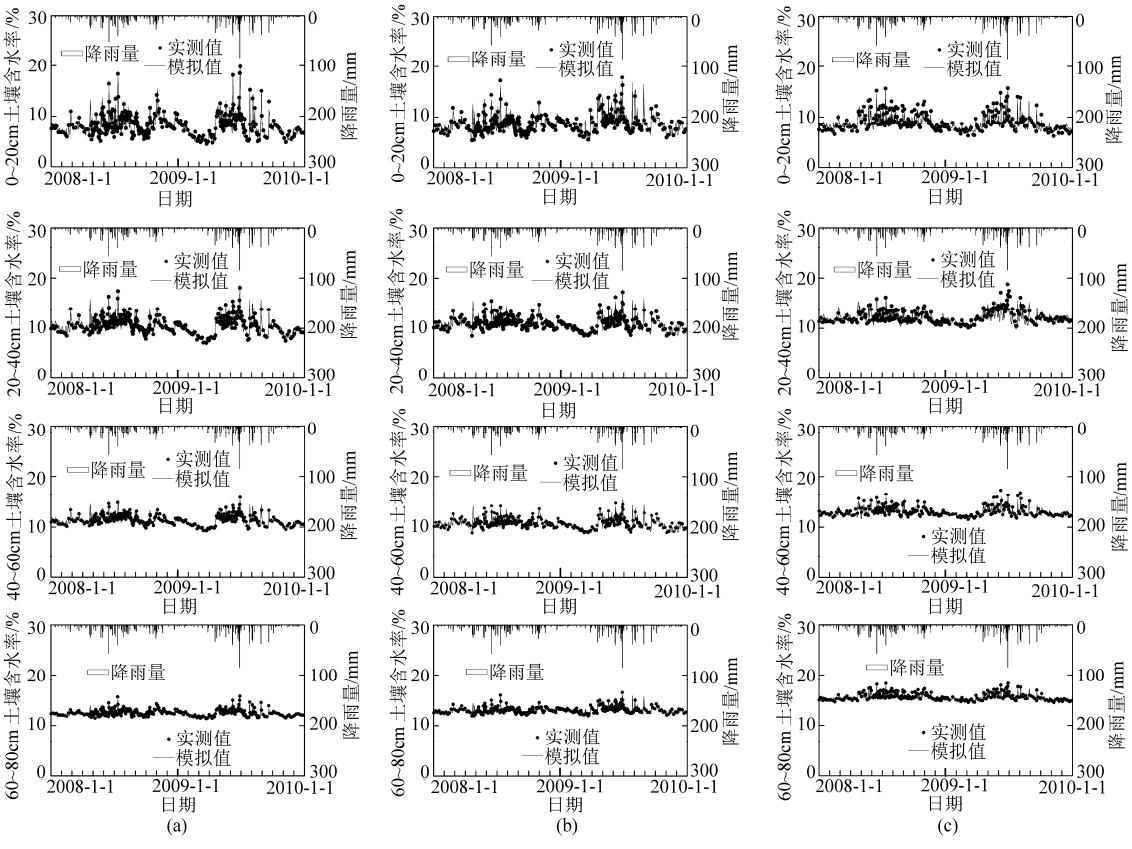

图 1　试验期间（率定期 + 验证期）土壤含水率模拟值与实测值对比

Fig. 1　Comparisons between simulated and measured soil moisture in experimental period

（a）阔叶林　（b）针叶林　（c）农地

升趋势。土壤含水率平均值由小到大依次为阔叶林(10.47%)、针叶林(10.86%)、农地(12.57%),但变异性却呈现相反的趋势,可见农地土壤含水率变化剧烈程度明显小于林地,含水率更高且相对稳定。

(2)CoupModel 模拟验证

采用决定系数 R^2、平均误差 M_E、均方根误差 R_{MSE}[19,21]对模拟结果进行评价。

$$M_E = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i) \tag{2}$$

$$R_{MSE} = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2\right]^{1/2} \tag{3}$$

式中 n——样本总数 S_i——第 i 个模拟值

M_i——第 i 个观测值

验证期 0~80 cm 土壤含水率模拟结果如表 3 所示。3 个指标中,R^2 反映了模拟值与实测值随时间变化的符合程度,阔叶林、针叶林和农地的范围分别为 0.83~0.91、0.80~0.86 和 0.80~0.87,均在 0.8 以上,说明该模型对土壤含水率总体模拟效果较好。M_E 和 R_{MSE} 则反映了模拟值与实测值之间的偏差,其范围分别为 -0.83%~1.79% 和 0.58%~2.81%,说明模拟值与实测值偏差较小,模型较好地捕捉到了水分的动态变化,模拟结果是可信的。而相比土壤含水率,模型对林内穿透雨量的模拟吻合程度稍低,模拟结果偏大,可能与样本数量较少有关。

表 3 2009 年验证期模拟结果

Tab.3 Simulated results during validation period of 2009

变量	土层/cm	阔叶林					针叶林					农地				
		R^2	M_E/%	R_{MSE}/%	平均值/%	样本数	R^2	M_E/%	R_{MSE}/%	平均值/%	样本数	R^2	M_E/%	R_{MSE}/%	平均值/%	样本数
土壤含水率	0~20	0.83	1.79	2.81	7.79	320	0.80	1.52	2.11	8.56	320	0.83	0.49	0.46	9.27	229
	20~40	0.84	0.39	1.41	10.36	320	0.85	0.83	1.48	11.06	320	0.85	-0.83	1.41	12.11	229
	40~60	0.89	0.42	1.11	11.22	320	0.86	-0.41	0.81	10.79	320	0.80	0.95	0.58	13.18	229
	60~80	0.91	-0.02	1.38	12.51	320	0.83	0.26	1.22	13.03	320	0.87	-0.12	1.89	15.71	229
穿透雨量		0.72	1.37 mm	2.51 mm		34	0.69	1.92 mm	3.2 mm		34					

2.2 林冠截留

林冠截留是土壤-植被-大气系统水循环的重要过程,可以表示为降雨与穿透雨量和树干径流的差值,与植被特征、林龄和气象条件等因素密切相关[30]。截留损失量占降雨的比例,阔叶林通常为 10%~35%,针叶林为 25%~50%[30-31]。从图 2 结合表 4 可见,2008 和 2009 年阔叶林林冠截留量最大,为 261 和 293 mm,分别占当年降雨的 26% 和 25%,而针叶林稍小,为 243 和 274 mm,分别占当年降雨的 24% 和 23%。玉米生育期较短(晚熟玉米 120 d 左右),截留量最小(121 和 134 mm),仅占阔叶林和针叶林的 46%、50%。Wang 等[2-3]、Granier 等[31]认为,叶面积指数是林冠截留量大小的重要影响因子。林地为双层复合冠层,郁闭度更高,叶面积指数较大,林冠截留量则明显大于单冠层的农地。

降雨是试验区水分输入的主要来源,3 种植被类型林冠截留的发生与降雨具有较好的一致性,同时受到植物生长的影响,其年内分配表现为单峰型变化。2008 年单日最大截留量阔叶林为 4.56 mm/d,针叶林 4.18 mm/d,农地 3.57 mm/d,均发生在 6 月梅雨季节。而 2009 年发生在降雨最多的 7、8 月份,日最大截留量分别为 5.52、4.95 和 4.29 mm/d。本文模拟结果与孙向阳等[30]对峨眉冷杉日截留量的实测结果(最大 6.5 mm/d)相近。

2.3 蒸发蒸腾

图 3 为 2008—2009 年土壤蒸发和植被蒸腾的

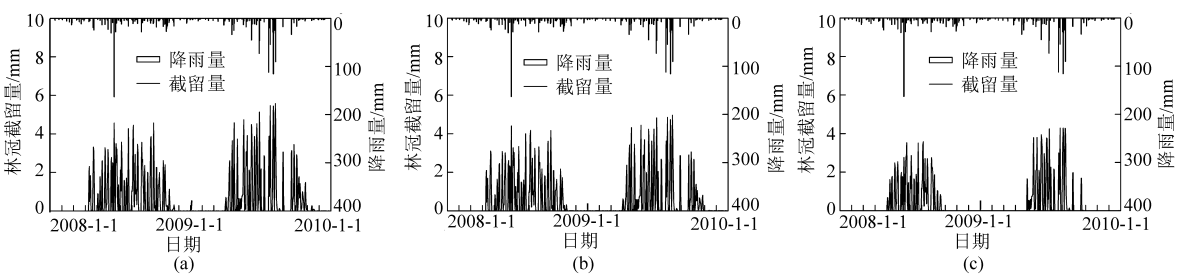

图 2 试验地冠层截留量逐日模拟结果

Fig.2 Daily results of simulated canopy capacity in experimental plots

(a) 阔叶林 (b) 针叶林 (c) 农地

表 4　年水量平衡模拟结果

Tab. 4　Simulated annually water balance

年份	试验地	降雨量 /mm	总蒸散量 /mm	冠层截留量 /mm	植被蒸腾量 /mm	土壤蒸发量 /mm	深层渗透量 /mm	土壤储水增量 /mm
2008(平水年)	阔叶林	1 020	684 (67%)	261 (26%)	240 (24%)	183 (18%)	358 (35%)	-22 (-2%)
	针叶林	1 020	670 (66%)	243 (24%)	219 (21%)	208 (20%)	368 (36%)	-17 (-2%)
	农地	1 020	581 (57%)	121 (12%)	170 (17%)	290 (28%)	408 (40%)	31 (3%)
2009(平水年)	阔叶林	1 194	756 (63%)	293 (25%)	297 (25%)	167 (14%)	426 (36%)	12 (1%)
	针叶林	1 194	731 (61%)	274 (23%)	269 (23%)	189 (16%)	441 (37%)	22 (2%)
	农地	1 194	621 (52%)	134 (11%)	213 (18%)	274 (23%)	495 (41%)	78 (7%)

注:括号中数据表示相对于降雨量的比值。

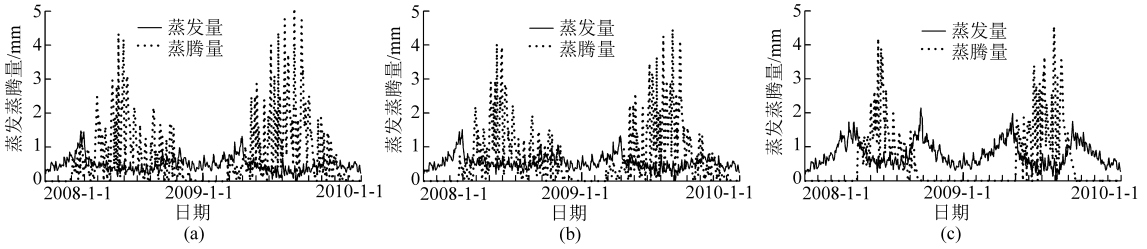

图 3　试验地土壤蒸发和植被蒸腾量逐日模拟结果

Fig. 3　Daily results of simulated soil evaporation and plant transpiration in experimental plots

(a) 阔叶林　(b) 针叶林　(c) 农地

逐日模拟结果。由于缺乏蒸发蒸腾的田间观测资料,本研究未对其模拟结果分别验证。降雨是蒸发和蒸腾最主要的水分来源,而温度则是决定其强弱的重要因素。从时间角度看,3 种植被类型蒸发蒸腾强度的季节变化特征相似,均集中在降水量较大、温度较高的 4 ~ 10 月份,在植物生长期以蒸腾为主,而在植物生长初期和末期则以蒸发为主。以 2008 年为例,3 种植被类型 4 ~ 10 月份蒸散量分别占全年的 73%、75% 和 79%。

在温度较低的 1 ~ 3 月份,3 种植被类型蒸发蒸腾量差别不大,均以土壤蒸发为主,地表裸露的农地蒸发量远高于林地;4 月份以后,气温升高,降雨增多,植物叶片不断生长,蒸腾逐渐起到主导作用,生长期更长、叶面积更大的林地蒸腾量显著高于农地;10 月份以后,气温下降,降雨减少,植物生理活动减弱,土壤蒸发又成为蒸散的主要的形式。2009 年阔叶林和针叶林的单日最大蒸发强度分别为 1.48、1.51 mm/d,仅占农地(2.15 mm/d)的 69% 和 71%,而单日最大蒸腾强度为 5.04、4.65 mm/d,却是农地(4.47 mm/d)的 1.12 和 1.04 倍。Wang 等[2-3]、Gustafsson 等[17] 认为,森林可以通过复合冠层结构来降低风速和太阳辐射从而减小土壤的蒸发,另一方面,森林具有更加稳定的叶面积、更强的根系吸水能力和更大的空气动力学效率,从而形成了适于蒸腾的环境,这是林地相比农地蒸发更小而蒸腾更大的原因。此外,Granier 等[31] 认为,与针叶林相比,阔叶林较快的林下更新和更高的灌草生物量,对其蒸腾量的增长具有显著促进作用。

2.4　深层渗透

试验区地形平坦,且地下水位较深,模拟中不考虑侧向径流和地下水的输入。模拟土壤剖面的下边界为不饱和状态,最下层土壤中水分运动通常是以水势梯度为主的非饱和水流,其流动速度与土壤湿度关系密切[2-4]。土壤湿度越大,非饱和导水率则相应越大。根系层渗透量从侧面反映了土壤水资源盈缺状况。

图 4 显示,模拟深层渗透量集中在雨季,以 2009 年为例,6 ~ 8 月份阔叶林、针叶林和农地的深层渗透量分别占全年的 93%、91% 和 86%,单日最大渗透强度分别达到 53.33、55.16 和 60.47 mm/d。此期平均渗透强度(4.24、4.48、4.62 mm/d)远高于年平均渗透强度(1.16、1.20、1.35 mm/d)。而降雨量少、蒸发蒸腾旺盛的旱季渗透量较小,甚至没有渗透的发生。

一般来说,深层渗透量随土层深度的增加而减小,本文只模拟了 80 cm 深度的土层,因而 3 种植被覆盖类型深层渗透量均较大(平均占总降雨量的 38%),且在降雨较多的年份表现更加明显。农地 70 ~ 80 cm 土壤含水率为 15.71%,高于阔叶林和针叶林(分别为 12.51%、13.03%),非饱和导水率较高,土壤含水率移动较快,故而较多的水分从模拟土壤剖面中移动出去,这是农地渗透量最大的原因。另外,深层渗透量的大小不仅取决于土壤本身的导水性能,还会受到土壤蒸发和植被蒸腾等其它分量

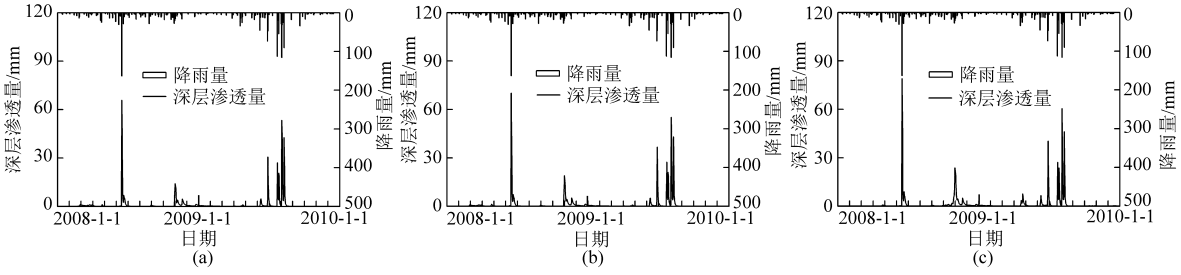

图 4 试验地深层渗透量逐日模拟结果

Fig. 4 Daily results of simulated deep percolation in experimental plots

(a) 阔叶林 (b) 针叶林 (c) 农地

的影响,农地冠层截留、植物蒸腾量均比林地要小很多,这也是导致其平均渗透强度显著高于林地的重要原因。

2.5 土壤储水量

来自大气的降水部分被植被截留或形成地表径流后,大部分将渗入土壤。经过土壤蒸发、植被蒸腾和深层渗透后,储存于一定土层中的水分则形成土壤储水量[32]。

由图 5 可见,试验地土壤储水量年内变化较大,对降雨具有明显的响应过程,随后受蒸发和蒸腾的影响而逐渐减小。以 2009 年为例,4 月份以前降雨较小,土壤得不到水分补给,为一年中的最低值。4 ~ 7 月份生长季中期,土壤储水受梅雨影响变化明显,处于失水和补水的高频波动中。而在植被生长旺季(8 ~ 9 月份),气温高,植被蒸发蒸腾强烈,林地土壤储水量仅在降雨的某一时段有所增加,其余时间均发生了不同程度的亏损(土壤储水增量为负值),说明此时大气降水已不能满足树木生理蒸腾和土壤蒸发的要求,需消耗深层土壤水来补偿。相比之下,农地消耗水分较少,土壤始终处于充盈状态。可见,水分盈余是农地水量平衡的主要特征,而林地却发生了春旱和秋旱,农地和林地水分条件差异较大。

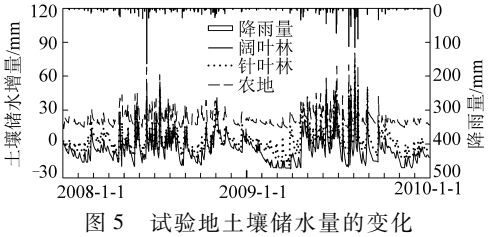

图 5 试验地土壤储水量的变化

Fig. 5 Changes of soil water storage in experimental plots

土壤储水量受水量平衡中诸多因素的影响,但年际之间变化并不大。2009 年比 2008 年降雨多 174 mm,但 3 种植被类型平均土壤储水年变化量仅为 34、39 和 47 mm。

2.6 水量平衡

土壤-植被-大气系统水量平衡各分量如表 4 所示。试验区主要的水分输入项为降雨,水量平衡方程中其他各通量的变化均取决于降雨量的多少。2008—2009 年 3 种植被覆盖类型 SPAC 系统水分收支基本保持动态平衡,水分输入量均为 2 214 mm,阔叶林、针叶林和农地水分支出量分别为 2 224、2 210 和 2 105 mm,阔叶林水分支出高于收入,这是引起阔叶林地土壤储水而呈现负补偿现象的主要原因。受本地区雨热同期、多发暴雨的影响,蒸散是系统中主要的水分输出项,试验期间阔叶林、针叶林和农地年蒸散量分别为 720、700 和 601 mm/a,分别占降雨的 65%、63% 和 54%。而 3 种植被类型的蒸散中,大部分水分消耗于土壤蒸发和冠层截留蒸发,仅有不到 1/2 的降水(分别占蒸散的 37%、35%、32%)用于植物的有效蒸腾,降水的有效利用率较低。试验期间农地深层渗透量占降雨的 41%,分别比阔叶林和针叶林高出 60 和 47 mm,大量的深层渗透降低了农地土壤水分的利用效率,且这种现象在降雨量多的年份更加明显。值得注意的是,2008 年的水量平衡关系中,林地土壤储水出现亏损,系统水量平衡出现“赤字”情况。可见,过密的林分耗水过大很可能会加剧土壤的季节性干旱,这与很多学者研究结果一致[1-5,32]。

3 讨论

(1)模型适用性

CoupModel 最初主要用于北方森林生态系统的模拟,现在已经可以应用到包括半干旱和永久冻土地区等多种陆面生态系统的研究中。在水量平衡模拟方面(表 5),Jansson 等[18]利用 CoupModel 研究了瑞典针叶林地的蒸发蒸腾动态规律,并用涡动相关和树干液流实测结果对模拟值进行了验证,发现干旱年 5 ~ 10 月份林地蒸散量为 314 mm,模型对蒸腾的模拟稍微偏高,R^2 为 0.44 ~ 0.89。Gustafsson 等[17]探讨了 CoupModel 应用于耕地的可能性,发现森林多年平均蒸散量(416 mm)显著高于耕地(352 mm),净辐射高出 40%。Christiansen 等[13]通

过研究认为 CoupModel 较好地模拟了山毛榉和欧洲云杉林的水量平衡(R^2为 0.68 ~0.91)及硝酸盐淋洗,其渗透量分别为 292 和 41 mm。Schmidt-Walter 等[15]研究发现,相对于草地(渗透量 300 mm/a),在水源地区种植柳树和白杨薪炭林能够降低 40% 的深层渗透量,较高的冠层截留损失(168 mm/a)是主要原因。Wang 等[2-4]对黄土丘陵沟壑区阴阳坡农林草地土壤含水率和温度进行了模拟,研究表明植被类型和坡向对水量平衡具有重要影响,阳坡截留和蒸腾量低于阴坡的同时蒸发量却显著高于阴坡,阳坡更容易发生土壤干化现象。综上所述,尽管模型精度有差别(R^2为 0.44 ~0.98),模拟结果也不尽相同(总蒸散量占降雨量的 45% ~88%),但总体上认为,应用 CoupModel 模拟不同植被类型下的水量平衡是可行的。

在中国三峡库区及亚热带地区,多数学者集中于对森林调节洪水、泥沙以及对截留、入渗等过程的研究,而从生态系统的角度研究水量平衡较少。孙向阳等[30]对贡嘎山冷杉林穿透降雨和林冠截留进行了测定,结果表明 2008 和 2009 年冷杉林截留量分别占降雨量的 23.6% 和 23%,崔鸿侠等[33]对三峡库区马尾松林冠截留的测定结果(23.03%)也与本文模拟结果具有很好的一致性。Zhu 等[34]利用热脉冲技术对亚热带木荷树干液流进行了测量,认为 2008 和 2009 年木荷林分蒸腾量分别为 263.2 和 291.6 mm,代俊峰等[32]研究发现阔叶林(木荷和大叶栎)和针叶林(马尾松)深层渗透量分别为 385.5、395.2 mm,均与本文模拟结果相近,说明本文的模拟结果是合理的、可信的。从测量方法的角度,本研究选择土壤含水率和林冠截留作为校验变量,采用 FDR 定点测量,在对参数进行适当调整后,土壤含水率的验正结果更加稳定(R^2为 0.80 ~0.91,变化幅度更小),冠层截留的验证也达到了比较满意的效果,证明了 CoupModel 可以应用于三峡库区土壤含水率动态模拟和水量平衡的计算。

表 5　CoupModel 在水量平衡及各分量模拟中的应用

Tab. 5　Applications of CoupModel in simulating water balance components

地区	土壤类型	观测时段	植被覆盖/土地利用	校验变量	技术手段	验证结果 R^2	来源
瑞典	砂土	1994 年	欧洲云杉、欧洲赤松、白桦	土壤含水率(0 ~1 m),土壤蒸发,植株蒸腾	TDR + 涡动相关 + 热平衡技术	0.44 ~0.89	文献[18]
瑞典	砂土 + 壤粘土	1994—1996 年	北方针叶林,农田	土壤含水率,温度(0 ~1 m),热通量	TDR + 涡动相关	0.76 ~1.00	文献[17]
丹麦	棕壤/壤砂土	1999—2001 年	山毛榉,欧洲云杉	土壤含水率(0 ~0.8 m),硝酸盐淋溶	TDR + 常规	0.68 ~0.91	文献[13]
德国	(未描述)	2010—2011 年	草地,柳树、毛白杨	土壤水势(0 ~1 m),截留,硝酸盐淋溶	张力计 + 常规	0.49 ~0.68	文献[15]
黄土高原	黄绵土/砂壤土	2001—2004 年	传统耕作,秸秆覆盖,绿肥 + 休耕	土壤含水率(0 ~2 m),LAI,产量,生物量	TDR + 常规	0.52 ~0.97	文献[21]
黄土高原	黄绵土/砂壤土	2006—2007 年	刺槐,辽东栎,马铃薯农地,草地	土壤含水率,温度(0 ~2.4 m),截留,径流	中子仪 + 常规	0.82 ~0.98	文献[2-4]
三峡库区	黄棕壤/砂壤土	2008—2009 年	石栎和木荷,杉木和马尾松,玉米	土壤含水率(0 ~0.8 m),截留	FDR + 常规	0.69 ~0.91	本研究

(2)植被类型对水量平衡的影响

近年来,由于气候变化和人类活动的加剧,植被生态退化问题日益严峻,植被生态水文过程成为国内外研究热点之一。作为土壤-植被-大气系统水分与能量传输过程中的重要一环,植被的生长既受到水分环境的影响,同时也影响着其周围的水分环境。植被一方面通过根系吸水和气孔蒸腾对水分循环具有直接作用,同时也通过其垂直方向的冠层结构和水平方向的群落分布对降雨、下渗、坡面产汇流以及蒸散过程产生间接影响。从 2008—2009 年模拟结果可见(表 4),当地面为阔叶林覆盖时,系统蒸散量最大而深层渗透最小,阔叶林以更高的郁闭度、更复杂的冠层结构、更旺盛的蒸腾作用将降雨收入 65% 的水量以气态形式散发返回到大气中,同时也消耗了大量土壤水分,这是引起阔叶林地土壤储水呈现季节性负补偿现象的主要原因。而农作物是人为控制最严格的植被类型,虽然土壤储水最多,但作物的叶面积最小,作物对水分的利用效率(或者说用于蒸腾的水量)最低[3]。反过来讲,也正是因为农作物叶面积小、耗水量低,农地才有可能积蓄更多的水分。农地和林地系统水分条件具有较大差异,不同植被类型通过自身生长直接或间接改变地表特性、调节水量平衡中的各分项,从而影响土壤-植被-大气系统水分循环。Christiansen、Schmidt-Walter、

Gustafsson 等[13,15,17]也持有相同观点。

从涵养水源的角度,过密的阔叶林并没有储存多少土壤水分,深层渗透水分较少,也没有更多的水分补给地下水。相反土壤水分过多消耗、供给不足也会影响阔叶林树木的生长,不利于土地生产力的保持和农林经济的可持续发展。王国梁、王力、佘冬立等[1-5]对黄土高原农林地土壤水分研究发现,林地土壤含水率通常低于农地,林地耗水过大可能会形成土壤干层。同样,三峡库区植被的不合理配置也会加重季节性干旱问题,导致进一步生态退化。在目前林地管理模式下,建议对阔叶林采取适当间伐,控制林分密度以达到涵养水源的作用。在实施植被建设、退耕还林时,选择与当地水分条件相适应的树种、采取合理的抚育措施是必要的。农地系统水分供应充足,但水分的有效利用效率较低,若构建农林复合系统,就能够更加合理有效地利用水资源、提高土地生产力。

4 结束语

选取位于长江三峡库区库尾的重庆四面山为试验区,以阔叶林、针叶林和农地为研究对象,应用 CoupModel 对 2008—2009 年土壤含水率进行了逐日验证,并对水量平衡进行了模拟和分析。结果表明,土壤含水率模拟结果与实测值具有很好的一致性(R^2为 0.80 ~ 0.91、M_E为 -0.83% ~ 1.79%、R_{MSE}为 0.58% ~ 2.81%),该模型可以应用于三峡库区农林地土壤水分动态模拟和水量平衡的计算。2008—2009 年 3 种植被覆盖类型 SPAC 系统水分输入均为 2 214 mm,阔叶林、针叶林和农地水分支出分别为 2 224、2 210 和 2 105 mm,阔叶林水分支出高于收入,这是引起阔叶林地土壤储水而呈现负补偿现象的主要原因。蒸散是水量平衡中最主要的支出项,其比例高达 61%,且降雨量越大,蒸散耗水越多;相同降雨条件下,蒸散量从大到小依次为阔叶林(720 mm/a)、针叶林(700 mm/a)、农地(601 mm/a)。农地年均深层渗透量(452 mm/a)分别比阔叶、针叶林高 60 mm、47 mm,且在降水较多的年份表现更加明显。水分盈余是农地水量平衡的主要特征,而林地却发生了春旱和秋旱,三峡库区农地和林地水分条件具有较大差异。不同植被类型通过自身生长直接或间接改变地表特性、调节水量平衡中的各分项,从而影响土壤-植被-大气系统水分循环。

参 考 文 献

1 王国梁,刘国彬,党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(2):31-35.
Wang Guoliang, Liu Guobin, Dang Xiaohu. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and gully region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2):31-35. (in Chinese)

2 Wang Li, Wei Sanping, Horton Robert, et al. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2011, 87(1):90-100.

3 Wang Li, Wei Sanping, Shao H B, et al. Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau in China[J]. Plant Biosystems, 2012, 146(Supp. 1):226-243.

4 王力,王全九,卫三平. 基于 CoupModel 的黄土丘陵沟壑区荒草地水分平衡模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(5):79-88.
Wang Li, Wang Quanjiu, Wei Sanping. Grassland water balance simulations using CoupModel in loess hilly and gully region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):79-88. (in Chinese)

5 佘冬立,邵明安,俞双恩,等. 黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5):73-78.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Water balance simulation in SPAC systems of slope lands covered with typical vegetations on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):73-78. (in Chinese)

6 杜嘉,张柏,宋开山,等. 三江平原主要生态类型耗水分析和水分盈亏状况研究[J]. 水利学报,2010,41(2):155-163.
Du Jia, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Study on water consumption and water budget in the Sanjiang Plain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2):155-163. (in Chinese)

7 邹慧,黄兴法,龚时宏. 水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(9):72-77.
Zou Hui, Huang Xingfa, Gong Shihong. Effects of water deficit on soil moisture and temperature regimes in subsurface drip irrigated summer corn field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9):72-77. (in Chinese)

8 蔡庆华,刘敏,何永坤,等. 长江三峡库区气候变化影响评估报告[M]. 北京:气象出版社,2010.

9 Jansson P E, Karlberg L. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems[M]. Stockholm: Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Enviromental Engineering, 2004.

10 张洪江,程金花,王伟,等. 土壤-植物-大气系统热量、物质运移综合模型理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2010.

11 Jansson P E. CoupModel: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1-11.

12 Svensson M, Jansson P E, Kleja D B. Modelling soil C sequestration in spruce forest ecosystems along a Swedish transect based

on current conditions[J]. Biogeochemistry, 2008, 89(1):95 – 119.

13 Christiansen J R, Elberling B, Jansson P E. Modeling water balance and nitrate leaching in temperate Norway spruce and beech forests located on the same soil type with the CoupModel[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237(3):545 – 556.

14 Nykänen A, Salo T, Granstedt A. Simulated cereal nitrogen uptake and soil mineral nitrogen after clover-grass leys[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 85(1):1 – 15.

15 Schmidt-Walter P, Lamersdorf N P. Biomass production with willow and poplar short rotation coppices on sensitive areas-the impact on nitrate leaching and groundwater recharge in a drinking water catchment near Hanover, Germany[J]. BioEnergy Research, 2012, 5(3):546 – 562.

16 Karlberg L, Ben-Gal A, Jansson P E, et al. Modeling transpiration and growth in salinity-stressed tomato under different climatic conditions[J]. Ecological Modeling, 2006, 190(3 – 4):15 – 40.

17 Gustafsson D, Lewan E, Jansson P E. Modeling water and heat balance of the boreal landscape—comparison of forest and arable land in Scandinavia[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(11):1750 – 1767.

18 Jansson P E, Cienciala E, Grelle A, et al. Simulated evapotranspiration from the Norunda forest stand during the growing season of a dry year[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98 – 99:621 – 628.

19 Wu Sihong, Jansson P E, Zhang Xingyi. Modelling temperature, moisitue and surface heat balance in bare soil under seasonal frost conditions in China[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62(6): 780 – 796.

20 Zhou Jian, Kinzelbach W, Cheng Guodong, et al. Monitoring and modeling the influence of snow pack and organic soil on a permafrost active layer, Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 90 – 91:38 – 52.

21 Zhang Shulan, Lövdahl L, Grip H, et al. Modeling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(2):283 – 298.

22 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.

23 李麟辉,张一平,谭正洪,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林与林外草地太阳辐射比较[J]. 生态学杂志,2011,30(7): 1435 – 1440.
Li Linhui, Zhang Yiping, Tan Zhenghong, et al. Variation patterns of solar radiation above evergreen broadleaved forest and open area in Ailao Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1435 – 1440. (in Chinese)

24 蔡福,周广胜,李荣平,等. 东北玉米农田下垫面参数动态研究[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3):494 – 501.
Cai Fu, Zhou Guangsheng, Li Rongping, et al. Dynamic characteristics of land surface parameters of rain-fed maize fields in Northeast[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(3):494 – 501. (in Chinese)

25 Murai H, Iwasaki I. Study on the mechanism of soil and water conservation in forestland[R]. Report for Forest Field, 1975, 274:23 – 84.

26 Manzi A O, Planto S. Implentation of the ISBA parametrization scheme for land surface processes in a GCM—an annual cycle experiment[J]. Journal of Hydrology, 1994, 155(3 – 4):37 – 46.

27 Kelliher F M, Leuning R, Raupach M R, et al. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 73(1 – 2):1 – 16.

28 McGinn S M, King K M. Simulataneous measurements of heat, water vapour and CO_2 fluxes above afalfa and maize[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 49(4):331 – 349.

29 Verstraeten W W, Veroustraete F, Feyen J. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation[J]. Sensors, 2008, 8(1):70 – 117.

30 孙向阳,王根绪,李伟,等. 贡嘎山亚高山演替林林冠截留特征与模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(1):23 – 29.
Sun Xiangyang, Wang Genxu, Li Wei, et al. Measurement and modeling of canopy interception in the Gongga Mountain subalpine succession forest[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1):23 – 29. (in Chinese)

31 Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(4):291 – 308.

32 代俊峰,陈家宙,崔远来,等. 不同林草系统对集水区水量平衡的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 435 – 443.
Dai Junfeng, Chen Jiazhou, Cui Yuanlai, et al. Impact of forest and grass ecosystems on the water budget of the catchments[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4):435 – 443. (in Chinese)

33 崔鸿侠,张卓文,陈玉生,等. 三峡库区莲峡河小流域马尾松水文生态效应[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 46 – 49.
Cui Hongxia, Zhang Zhuowen, Chen Yusheng, et al. The hydrological and ecological effect of the masson's pine in Lianxiahe watershed of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Central South Forestry University, 2005, 25(2): 46 – 49. (in Chinese)

34 Zhu Liwei, Zhao Ping. Temporal variation in sap-flux-scaled transpiration and cooling effect of a subtropical *Schima superba* plantation in the urban area of Guangzhou[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(8): 1350 – 1356.

(下转第 160 页)

treatments, 1.6 (T11), 1.3 (T12), 1.0 (T13), 0.7 (T14) and 0.4 (T15) times of E_{Tp} (E_{Tp} was the accumulated of 20 cm pan evaporation during twice of the irrigation interval), were set for pot experiment and the irrigation time of each treatment was consistent with a cycle of 4 ~ 10 d, 3 ~ 7 d, 2 ~ 5 d and 4 ~ 10 d at seeding stage, squaring stage, blooming-boll forming stage and boll opening stage, respectively. The results were shown as follows, for plot experiment, seed yield, number of bolls per plant and single boll weight were maximum under T2, and the difference of seed yield was insignificant compared to T4, while WUE and IWUE decreased by 23.93% and 34.01%, respectively. For pipe experiment, the numbers of bolls per plant and seed yield were maximal under T7, where the seed yield decreased by 3.98% for T8 compared to CK while WUE and IWUE increased by 9.7% and 20.2%, respectively. For pot experiment, the numbers of bolls per plant and seed yield were maximal under T11, and seed yield increased by 9.7% and 30% compared to T12 and T13, respectively. This showed that moderate water stress was propitious to improve seed yield and WUE of intransplanted cotton following wheat harvest (lower limit 60% ~65% FC, upper limit 80% ~85% FC).

Key words: Cotton Seed cotton yield Water regulation Water use efficiency

(上接第 149 页)

Water Balance Models of Typical Forestland and Farmland in Three Gorges Reservoir Area with CoupModel

Wang Xian[1] Zhang Hongjiang[1] Lü Xianghai[2] Cheng Jinhua[1] Wang Wei[3] Li Shiyou[4]

(1. *College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

2. *China International Engineering Consulting Corporation, Beijing* 100048, *China*

3. *Research Center for Environmental Protection and Transportation Safety, China Academy of Transportation Sciences, Beijing* 100029, *China*

4. *Chongqing Forest Resource Management Bureau of Simian Mountain, Chongqing* 402296, *China*)

Abstract: Based on field measurement, the CoupModel (Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system) was applied to simulate water balance in three kinds of vegetation types, including broadleaved forest (*Schima superba* and *Lithocarpus glaber*), coniferous forest (*Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*) and farmland (*Zea mays*) in Three Gorges Reservoir Area of China. The results showed that the simulated values of soil moisture were fairly consistent with measured ones and the determination coefficient (R^2) were 0.80 to 0.91. Evapotranspiration was main output of water balance with the percentage up to 61%, and the figures were ranked as follows: broad-leaved forest (720 mm/a) > coniferous forest (700 mm/a) > farmland (601 mm/a). Annual simulated deep percolation decreased by 60 mm for broad-leaved forest and 47 mm for coniferous forest compared with that for farmland (452 mm/a), and it was even greater in wet year. For broad-leaved forestland, water consumption was more than income during the experimental period, which was the main reason causing soil water deficit. The water balance of farmland was characterized by moisture surplus, while spring and autumn drought occurred in forestlands. There was obvious difference between forestland and farmland for water conditions. Model results indicated that the vegetation species significantly influenced the magnitude of water balance components, which called for further attention to the selection of tree-species when planning future afforestation projects. Forest tending should also be applied scientifically during the practice of vegetation restoration.

Key words: Three Gorges Reservoir Area Forestland Farmland Soil moisture Water balance CoupModel