

基于 CoupModel 的黄土丘陵沟壑区荒草地水分平衡模拟*

王力¹ 王全九¹ 卫三平^{1,2}

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 山西省吕梁市水利局, 吕梁 033001)

摘要:应用土壤-植被-大气系统水热传输模型 CoupModel,在野外定位观测试验的基础上对陕北黄土丘陵沟壑区阴、阳坡荒草地 SVAT 系统水分传输进行了模拟。结果表明,土壤含水率和土壤温度模拟值与实测值有较高的一致性;阳坡荒草地的土壤蒸发量较阴坡高,阳坡荒草地植被蒸腾量低于阴坡荒草地,说明阴、阳坡荒草地在大气-土壤界面和植被-土壤界面水分交换差异明显;干旱年大气降水主要消耗于土壤蒸发和植被蒸腾,蒸散量超过了同期降水量,输入草地系统的降水满足不了水分的支出,土壤水库处于负补偿状态。丰水年,试验地约有 20% 降水储存于土壤中,系统的水分收入大于支出。黄土丘陵沟壑区阳坡和阴坡是水热条件不同的立地类型,阳坡用于土壤蒸发的水分较多,土壤储水量低,因此阳坡植被配置应当考虑盖度较高、可以降低土壤蒸发的植被类型。

关键词:黄土丘陵沟壑区 土壤蒸发 植被蒸腾 水分平衡 CoupModel

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0079-10

Grassland Water Balance Simulations Using CoupModel in Loess Hilly and Gully Region

Wang Li¹ Wang Quanjiu¹ Wei Sanping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China 2. Bureau of Water Conservancy in Luliang City, Luliang 033001, China)

Abstract: In the loess hilly and gully region of northern Shaanxi Province, the CoupModel was used to simulate the water balance of the soil-vegetation-atmosphere in the south- and north-facing slopes of grasslands. The simulation results showed that simulated values of soil water content and soil temperature was generally in good agreement with measured values in the investigated stands, implying that the CoupModel could be successfully applied to demonstrate the complex interactions between hydrological processes in the soil-vegetation-atmosphere system. Soil evaporation in the south-facing slope of grassland was higher than that in the north-facing slope, while vegetation transpiration in the south-facing slope was lower than that in the north-facing slope, indicating that there was a significant difference of water exchanges between the interfaces of atmosphere and soil, and soil and vegetation. In the dry year, vegetation transpiration and soil evaporation were the main components of water consumption in the investigated stands, which was more than the precipitation and water input was lower than water output in the soil reservoir. While in the wet year, 20% of precipitation was recharged and stored in the soil reservoir. This study indicated that water transfer and balance in the south-facing and north-facing slopes was quite different. Since there was high soil evaporation and low water storage in the south-facing slope, it is important to carefully choose planting species during the processes of the sloping land conversion program.

Key words: Loess hilly and gully region Soil evaporation Vegetation transpiration Water balance CoupModel

收稿日期: 2012-11-14 修回日期: 2012-12-25

* 国家自然科学基金重点资助项目(51239009)

作者简介: 王力,副研究员,博士生导师,主要从事生态水文、生态修复与农业水土工程研究,E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 王全九,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程与养分流失研究,E-mail: wquanjiu@163.com

引言

建立土壤-植被-大气传输模型模拟下垫面水热通量对于研究、预报气候变化、水分循环以及生态环境动态变化极为重要^[1]。水资源短缺是黄土高原地区环境的基本特征。研究该水文循环和水分平衡问题,对该地区的生态环境和社会经济等诸多方面均具有现实意义^[2]。水文循环和水分平衡与气候变化密切相关,气候变化通过影响区域降水量、蒸散量引起水资源供需平衡的变化,从而影响区域水资源可持续利用与农林草业的可持续发展。

SVAT (Soil-vegetation-atmosphere transfer) 系统的水量传输过程已取得了一系列的研究进展^[3]。在土壤-作物-大气连续体 (SPAC) 水量和能量转化研究方面,我国不少学者进行了较为系统的观测试验和研究工作,并取得了一批研究成果^[4-7]。总的来讲,我国土壤-植被-大气系统水分、能量传输的研究多集中在农田方面,且水分和能量的传输和交换研究大多采用直接观测土壤含水率、径流、降水、太阳辐射、净辐射、反射率等,然后间接计算蒸散量、潜热通量、显热通量。由于野外天气条件、观测仪器的限制,加之长期定位的观测需要消耗大量的人力、物力和财力,因此研究只局限于短时期内(一年中的一段时期,或某些典型天气)而且测定结果精度很难保证,不容易得到长系列的连续的土壤-植被-大气系统各界面之间水分传输的过程和通量。在黄土高原地区,有关不同坡向草地土壤-植被-大气系统水分传输模拟研究还比较少见^[8-9]。

本文以黄土丘陵沟壑区阴、阳坡天然荒草地为

研究对象,应用 CoupModel (Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system) 模拟土壤-植被-大气系统中不同坡向条件下水分传输特征,了解该区天然草地水量平衡基础,以期为黄土丘陵区乃至我国类似地区植被恢复与建设提供依据。

1 研究地概况

试验地选在陕西省延安市南部的燕沟流域(36°28'~36°32'N, 109°20'~109°35'E)。流域总面积46.9 km²,属黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区,地形主要以黄土梁状丘陵为主,沟壑密度4.8 km/km²,土壤侵蚀模数6 000~9 000 t/(km²·a),为强度水土流失类型区。流域处于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡带,多年平均降水量为536.6 mm,年平均气温9.8℃,10℃以上积温3 268℃,年日照时数2 472 h,无霜期约170 d。成土母质为黄土,土壤以黄绵土为主,占90%以上。流域内天然次生林覆盖率不足10%,现有人工林主要为刺槐、柠条,经济林主要为苹果^[10]。试验荒草地为天然生长的植被群落,主要植物种类有刺槐、狼牙刺、杠柳、蒿类、长芒草、胡枝子、紫苑、委陵菜、茭蒿、冰草、悬钩子、铁杆蒿等。

2 研究方法

2.1 标准地调查

选择阳坡荒草地和阴坡荒草地2种地类为研究对象,每种地类布设3块标准地(尺寸为10 m×10 m)。采用群落常规方法调查试验地基本概况(表1)。试验地经纬度、海拔高度用GPS测定,坡度、坡向用罗盘测定。

表1 试验地基本情况

Tab. 1 Basic features of experimental plots

地类	海拔高度 /m	坡度 /(°)	坡向 /(°)	纬度	经度	腐殖质层 厚度/cm	主要植物种类
阳坡荒草地	1 195	34	130	36°30'N	109°30'E	0	狼牙刺、杠柳、蒿类、长芒草、胡枝子、紫苑等
阴坡荒草地	1 195	17	70	36°30'N	109°30'E	1.0	杠柳、悬钩子、铁杆蒿、茭蒿、长芒草、胡枝子等

2.2 观测项目及观测方法

2.2.1 气象要素

在阴、阳荒草地上各安装一台美国 Davis 仪器设备公司生产的便携式小气候站,连续观测气温、气压、相对湿度、风速、降水量、太阳辐射等,风速观测高度为2 m,其他要素观测高度为1.5 m。同时安装标准雨量筒观测降水量,用于校正小气候站降水量观测值。

2.2.2 植被生长特征

高度:在标准地内选择3块1 m×1 m的样方,

分草种测量高度,计算平均高度,每月测定1~2次,地上部分枯死后停测。

植被盖度:采用样线法测定。植被生长中期,在各地类标准地内沿对角线分别随机选取20~30个样点,统计植被覆盖地面的点数,求得植被盖度。

枯枝落叶厚度:在标准地内选择5个测点,用钢卷尺测量枯枝落叶层厚度。

叶面积指数:在标准地外选择10个测点,每个测点设1个10 cm×10 cm的样方,将样方内草本全部自根部割下称质量,然后用叶面积仪量出样方内

植物的叶面积,计算出叶面积指数。每月测定 1~2 次,地上部分枯死后停测。

根系深度:埋设中子管用土钻打竖洞时,每 10 cm 深用土钻采集土样,用直径为 0.5 mm 的筛孔将各层土样过筛,并拣出所有根系,编号后装入塑料袋带回实验室,测定植被的根系深度。打竖洞的同时观测并记录各标准地土质随深度的变化情况。

生物量:生长季末收割天然荒草并称质量,取样加热干燥,换算出干物质质量。

2.2.3 土壤含水率

每块标准地中沿顺坡方向在上、下部分别选取 3 个点,埋设 630 cm 长铝质中子管(地表外露 20 cm),用 CNC-503D 型中子仪测定土壤含水率。

2.2.4 地表径流量

在每种地类标准地旁各布设一个径流小区,3 次重复处理。小区尺寸 20 m × 5 m,长边顺坡修建。小区四周用 30 cm 宽度的 PVC 板围起来,PVC 板埋入土中 15 cm,高出地面 15 cm,防止地表径流在小区内外的交换。小区上方 1 m 左右挖排水沟,以防小区上方大面积集水对试验小区的冲击。小区下方安放二级径流桶收集径流量,径流桶内径 60 cm,高度 100 cm。产流后及时测量径流量,并取样测定泥沙含量。

2.2.5 土壤物理性质

土壤饱和导水率:取各地类土壤剖面不同层次原状土样(1 m 以上分别在 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 土层取样,100 cm 以下视土质变化分层取样,土壤物理性质测定取样层次均相同),2 次重复,在实验室用恒定水头法测定饱和导水率。

土壤容重:用环刀取阴、阳坡土壤剖面不同层次土样,3 次重复,及时称量湿质量,干燥至质量恒定后称量干质量,计算容重。

机械组成:取阴、阳坡土壤剖面不同层次原状土样,2 次重复,用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度仪测定。

土壤含水率特征曲线:取阴、阳坡土壤剖面不同层次原状土样,2 次重复,用日本日立公司生产的高速恒温离心机法测定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 λ 值、进气值、残余含水率,同时计算饱和含水率、凋萎含水率。

2.2.6 土壤温度

在阴、阳坡各埋设地温表一套(包括地面温度表、曲管地温表、地表最低地温表、地表最高地温表),测定深度分别为 0、5、10、15、20 cm,每天 8:00、

14:00、20:00 观测,地表最低、最高地温仅在 20:00 观测一次。0、5、10 cm 地温按 4 次观测记录计算日合计,用算术平均法计算日平均值,2:00 的 0 cm 地温用当日地表最低地温与前一天 20:00 的地表温度之和的 1/2 求得。2:00 的 5 cm、10 cm 地温分别用 8:00 记录值代替。其他地温按 3 次观测记录计算日合计,用算术平均法计算日平均值。地温数据主要用于模型输入。

2.3 模拟分析

CoupModel 是一维的机理性 SVAT 模型,输入的是较为容易获取的常规气象资料、植被特征参数、土壤物理特征,输出的是整个土壤-植被-大气系统的水分平衡要素,而且模型层次结构可以根据具体的土壤和植被结构进行调整,适应性强。Zhang^[8]曾应用该模型对黄土高原不同管理制度下农地的土壤含水率动态进行模拟,模拟效果良好;赵军^[11]以松嫩平原海伦农业生态站 1992~2000 年的气象数据作为驱动变量,在调整该模型部分参数的基础上,模拟了 9 年的土壤温度和一些年份土壤含水率的变化过程,得到较准确的模拟结果。

2.3.1 模型描述

CoupModel 模型是由 SOIL^[12]和 SOILN^[13]2 个模型集成而来。模型经过了数次修正^[14],主要用来模拟各种植被条件下土壤-植被-大气系统水、热过程和碳氮循环的生物过程,在很多国家得到广泛应用,而目前在我国应用报道还不多见。模型的核心是 2 个耦合的水热流偏微分方程,遵循质量守恒定律,假定水、热流动是由水势梯度和温度梯度产生的,用有限差分法求解方程^[15]。模型的一个重要优点是可以使用有限的输入数据取得较为合理满意的模拟结果。模型描述详见文献[16]。

2.3.2 模型设置

模拟从 2006 年 5 月 27 日开始至 2007 年 10 月 31 日结束,包含 2 个生长季。土壤剖面分为 31 层(0~2.5 cm、2.5~7.5 cm、7.5~12.5 cm、12.5~17.5 cm、17.5~22.5 cm、22.5~30 cm、30~37.5 cm、37.5~45 cm、45~55 cm、55~65 cm、65~75 cm、75~85 cm、85~95 cm、95~105 cm、105~117.5 cm、117.5~130 cm、130~150 cm、150~170 cm、170~190 cm、190~210 cm、210~235 cm、235~260 cm、260~300 cm、300~340 cm、340~380 cm、380~420 cm、420~460 cm、460~500 cm、500~540 cm、540~580 cm、580~600 cm),模拟结点是土层厚度的中点,模拟深度为 600 cm。荒草地植被分为 1 层。

模型迭代计算次数设置为 96 次/d,模拟时间步

长为日,输出变量值为日值。试验地没有灌溉水、地下水 and 侧向径流的输入,故模拟时不考虑灌溉水、地下水和侧向径流的动态。本文明确考虑植被对土壤-植被-大气系统中的水分传输的影响,因此荒草地采用明确单大叶模式^[16];本文不模拟植被的生长过程,植被生长设置为静态方式(这样设置并不等于将植被处理为不生长)。

模型运行需要输入分层土壤含水率、土壤温度的初始值、海拔高度、坡度、坡向、经纬度、腐殖质层厚度等基本特征值,并根据测定资料建立气象数据、植被生长特征、土壤物理性质3个主要的数据库供模型模拟时调用^[9,17]。

2.4 模型参数调整

CoupModel 模型包含很多参数,模型的开发者根据研究成果给模型的参数均设置了一个科学合理的范围,同时给出一个较为理想的默认值。模拟过程中需要根据模拟结果调整部分参数值使模拟结果达到较高的精度。基于野外测定、相关文献以及模型调试过程中对参数的校正,本文调整了部分对模拟结果较为敏感的参数(表2),其他参数均采用模型的默认值。模型参数敏感性分析详见文献^[17]。

表2 模型中被调整的参数

Tab.2 Parameters adjusted in simulations

调整参数	阳坡 荒草地	阴坡 荒草地	来源
植被冠层截留容量/mm	0.5	0.5	校正, 文献 ^[18]
单位叶面积指数持水量/mm·m ⁻²	0.15	0.15	文献 ^[19]
直接穿透降水系数	0.5	0.5	校正, 文献 ^[20]
根系吸水折减临界水头/cm	1 000	1 500	校正
根系吸水补偿度	0.6	0.6	校正
叶气孔半开时的水气压差/Pa	300	150	校正
表征地表阻抗与最上层土壤水势关系的经验系数	150	150	校正
水气流弯曲度参数	0.66	0.66	文献 ^[8]
干土反照率/%	25	25	文献 ^[8]
湿土反照率/%	15	15	文献 ^[16]
植被反照率/%	20	20	文献 ^[21]
降水量校正因子	1.08	1.08	测定
气象观测站海拔高度/m	1 195	1 195	测定
试验地海拔高度/m	1 195	1 195	测定
试验地纬度/(°)	36.5	36.5	测定
年平均气温/°C	9.8	9.8	文献 ^[22]
东西坡度/m·m ⁻¹	0.517	0.287	测定
南北坡度/m·m ⁻¹	0.433	-0.104	测定
有机质厚度(包括枯枝落叶)/m	0	0.01	测定
导热率校正因子	0.4	0.4	文献 ^[8]
表征根系分布的参数	0.05	0.05	校正

2.4.1 降水量校正因子

将小气候站和标准雨量筒观测的降水量进行回归统计分析,得回归方程为

$$y = 1.0815x \quad (R^2 = 0.995, n = 127)$$

式中 y ——气候站降水量观测值

x ——标准雨量筒降水量观测值

气候站与标准雨量筒降水量观测值的回归决定系数为0.995, F 检验和回归系数的 t 检验均达极显著水平。根据上述回归方程一次项系数,本文取降水量校正因子为1.08(表2)。

2.4.2 直接穿透降水系数

CoupModel 模型在模拟明确单大叶植被类型的截留量时需要直接穿透降水系数。该参数表示直接穿过植被冠层间隙落到地面的降水量占植被冠层上降水量的比值,它与植被的盖度 A 密切相关,可将该系数计算为 $1 - A^{[23]}$ 。本文根据测定的植被盖度,确定阴、阳坡荒草地直接穿透降水系数为0.5(表2)。

2.4.3 植被冠层截留容量

植被截留降水包括截留降雨和降雪2种情况,由于降雪期间植被叶子全部枯落,只有植被枝干才会截留降雪,加之一年中降雪量较小,因此植被对降雪的截留量很小,本文只考虑植被对降雨的截留。荒草地植被冠层低矮、茎干细弱,至今没有较为理想的方法观测其实际截留量。Murai等^[20]用试验方法测得低矮植被冠层覆盖面的吸附水量为0.15~0.56 mm,本文根据试验地植被生长情况,选取阴、阳荒草地植被冠层截留容量均为0.5 mm(表2)。

2.5 土壤-植被-大气系统水分传输平衡方程

黄土丘陵沟壑区坡地没有灌溉,土壤-植被-大气系统中的水分主要来自于大气降水。植被储水只占大气降水的很小一部分,忽略不计。由于地下水埋藏较深,土壤剖面的下边界(600 cm)为不饱和状态,模拟设置为自由排水条件后,没有水分交换,因此深层渗漏量也忽略不计。故土壤-植被-大气系统水分传输平衡方程可表示为

$$P = I + q_{\text{surf}} + E_s + E_{\text{ta}} + \Delta S$$

式中 P ——降水量 I ——截留量

q_{surf} ——地表径流量 E_{ta} ——蒸腾量

E_s ——土壤蒸发量 ΔS ——土壤储水增量

试验模拟时段为2006年5月27日~2007年10月31日,其中2006年6月1日~2007年5月31日降水463.0 mm,为流域年平均降水量536.6 mm(1961~2001年)的86.3%,设为干旱年;2006年11月1日~2007年10月31日降水630.7 mm,为流域年平均降水量的118%,设为丰水年。

3 结果分析

3.1 土壤-植被-大气系统水分传输模拟

3.1.1 模拟初始值

初始值主要用于提供模拟的起始点。本文给模型输入试验开始之日 600 cm 剖面 31 层的土壤体积含水率和 0、10 和 20 cm 深度的土壤温度作为初始值。

3.1.2 模拟结果验证

用模拟值和实测值直线回归的决定系数 (R^2) 来检验模拟值与实测值的吻合程度; 用平均误差 (T_{ME}) 和均方根误差 (T_{RMSE}) 的计算值来估计模拟值与实测值之间的误差。平均误差和均方根误差计算公式为^[8,13]

$$T_{ME} = \frac{1}{j} \left(\sum_{i=1}^j V_{sim(i)} - \sum_{i=1}^j V_{obs(i)} \right)$$

$$T_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (V_{sim(i)} - V_{obs(i)})^2}$$

式中 $V_{sim(i)}$ 、 $V_{obs(i)}$ ——第 i 天(次)模拟值、实测值
 j ——观测天(次)数

(1) 土壤含水率

选取 10、50 和 200 cm 土壤含水率的实测值与模拟值进行对比分析(图 1)。模拟结果显示, 模拟值的变化趋势与实测值具有较好的一致性, 10、50 和 200 cm 土壤含水率的实测值与模拟值直线回归的决定系数均在 0.8 以上, 模拟值与实测值高度一致。10、50 和 200 cm 土壤含水率的实测值与模拟值平均误差 $-1.01\% \sim 0.64\%$, 均方根误差 $0.01\% \sim$

2.16%。总体来看, 10 cm 土壤含水率的模拟效果相对较差, 平均误差 $-1.01\% \sim 0.41\%$, 均方根误差在 1% 以上, 主要是由于上层土壤受降水、蒸发影响较大, 土壤含水率变化较剧烈所致。原因是土壤含水率实测值只能代表某时土壤含水率的瞬时值, 而模拟值是土壤含水率的日平均值, 二者之间的差异难以避免。

(2) 土壤温度

0、10 和 20 cm 土壤温度的实测值与模拟值对比见图 2。模拟结果显示, 0、10 和 20 cm 土壤温度的实测值与模拟值直线回归的决定系数均在 0.95 以上, 平均误差 $-0.92 \sim 1.03^\circ\text{C}$, 均方根误差 $1.14 \sim 2.35^\circ\text{C}$, 模拟值与实测值吻合, 说明模型模拟结果可靠。地表受降水、蒸发、太阳辐射影响较大, 土壤温度变化剧烈, 0 cm 地温的模拟效果较差, 平均误差 $-0.92 \sim 1.03^\circ\text{C}$, 均方根误差 $1.82 \sim 2.3^\circ\text{C}$ 。从图 2 可见, 12 月份至次年 3 月份地温变化平稳, 模拟误差最小。

3.2 土壤-植被-大气系统水分传输动态

3.2.1 大气降水

延安市多年(1961~2001年)平均降水量 536.6 mm, 最多年为 760.4 mm, 最少年为 330.0 mm, 降水主要集中于 6~9 月份, 占年降水量的 71.1%。2006 年 5 月 27 日~2007 年 10 月 31 日试验地降水日数 153d, 共降水 979.0 mm(校正后降水量), 为同期延安市多年平均值 956.8 mm 的 102%。6~10 月份降水 469.8 mm(2006 年和 2007 年平均), 占年降水总量的 78.6%, 其余月份降水量仅 117.1 mm, 约

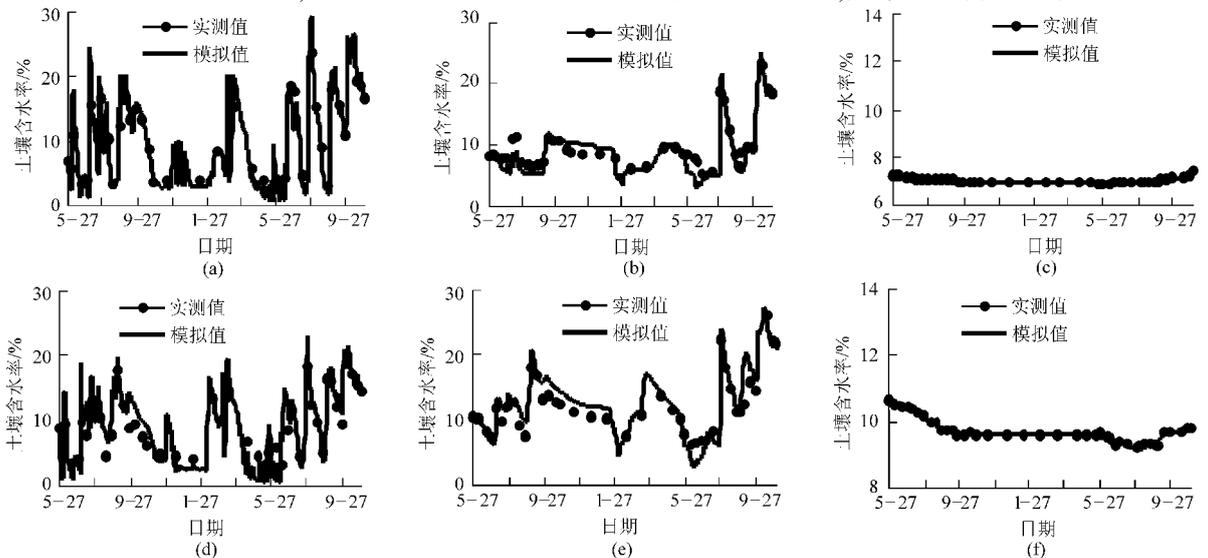


图 1 土壤含水率实测值与模拟值对比

Fig. 1 Comparison of soil water between measured and simulated values

- (a) 10 cm, 阳坡荒草地 (b) 50 cm, 阳坡荒草地 (c) 200 cm, 阳坡荒草地
- (d) 10 cm, 阴坡荒草地 (e) 50 cm, 阴坡荒草地 (f) 200 cm, 阴坡荒草地

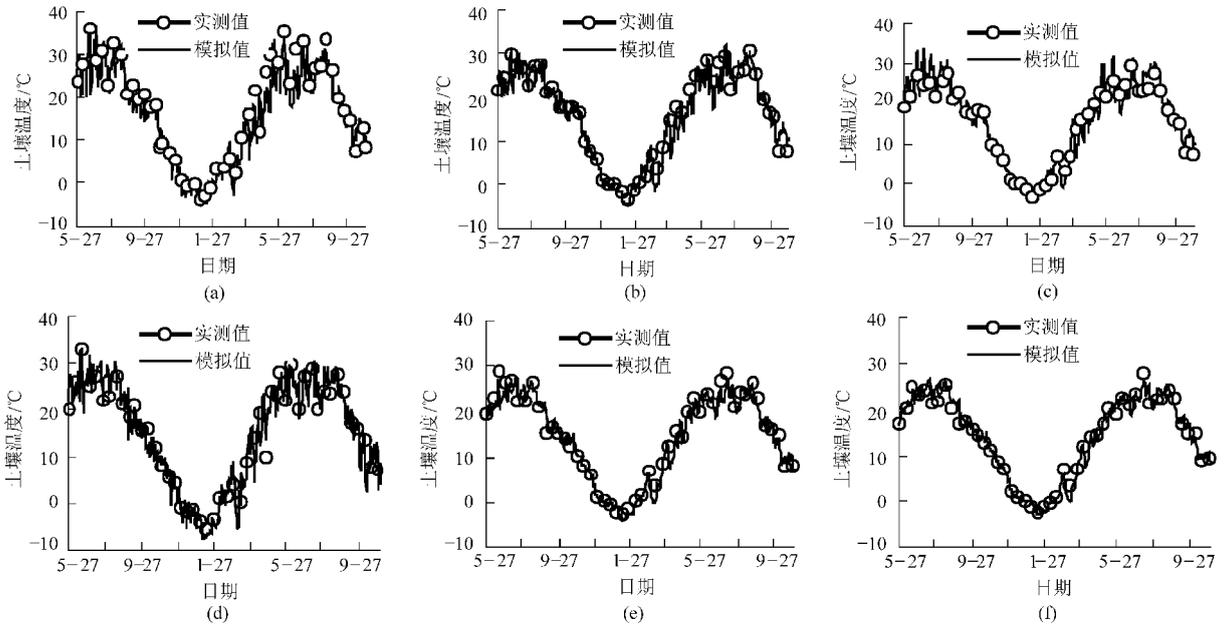


图2 土壤温度实测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison of soil temperature between measured and simulated values

(a) 0 cm, 阳坡荒地 (b) 10 cm, 阳坡荒地 (c) 20 cm, 阳坡荒地
(d) 0 cm, 阴坡荒地 (e) 10 cm, 阴坡荒地 (f) 20 cm, 阴坡荒地

占年降水总量的 21.4%, 降水主要集中于 6~10 月份(图 3, 时间始于 2006 年)。

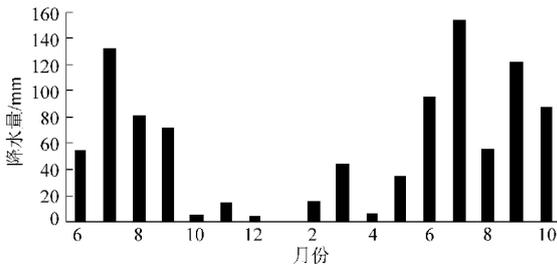


图3 试验地降水量季节分布

Fig. 3 Seasonal prevalence of precipitation in experimental plots

3.2.2 植被冠层截留

试验期间阴、阳坡荒地模拟植被冠层截留量分别为 65.6 mm 和 61.1 mm, 阴坡略高于阳坡。植被冠层对降水的截留分配表现出明显的季节变化。阴、阳坡 2 种地类植被对降水的截留规律与降水的季节变化规律一致, 均表现为多雨的 6~10 月份截留量大, 约占年总截留量的 95% 以上, 少雨季节截留量也小(图 4)。植被冠层截留率是指截留量占同期降水量的百分比。阴、阳坡荒地植被冠层截留率分别为 7.7% 和 6.2%。截留率和降水量的回归分析显示, 荒草地为单冠层, 截留率与降水量呈幂函数关系, 回归方程 F 检验和回归系数 t 检验, 达到极显著水平。决定系数 R^2 偏小, 说明截留率不仅受降水量的影响, 还受其他因素的影响, 仅降水量还不能全面解释截留过程, 需要考虑加入其他因子来解释

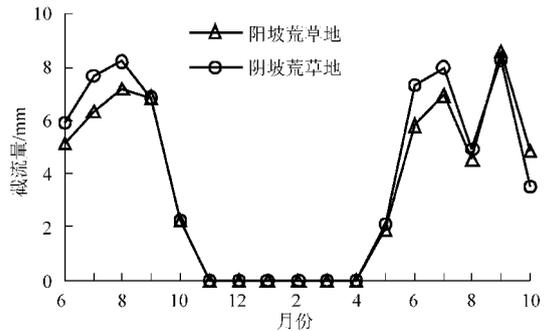


图4 试验地植被冠层截留量季节分布

Fig. 4 Seasonal prevalence of interception by canopies in experimental plots

截留机制。

3.2.3 地表径流

阴、阳坡荒地模拟产生地表径流 10 次, 产流量分别为 8.8 mm 和 16.4 mm, 与实际观测基本一致。阴坡荒地植被相对茂盛, 枝叶对降水的截留缓冲作用较大, 腐殖质层较厚, 土质疏松, 土壤入渗率高, 地表径流量小。据试验地 2006~2007 年的径流观测资料, 径流主要发生于降雨集中且多暴雨的 6~9 月份。试验期间, 没有发生短历时、高强度、大雨量的降水过程, 因此总的来说阳坡荒草地和阴坡荒草地产流均较少。

3.2.4 土壤蒸发

试验期间阴、阳坡荒地模拟土壤蒸发量分别为 392.5 mm 和 469.7 mm。阳坡荒草地的土壤蒸发量较阴坡高。10 月初至次年 7 月中旬, 阴坡荒草地有植被残茬和枯枝落叶或植被覆盖, 地表接收的能

量较少,蒸发量显著低于阳坡。一年中,1月份土壤蒸发量最小,1月份以后土壤蒸发量逐渐增大,5~6月份蒸发量达到峰值,随后又逐渐降低(图5)。5~6月份(2个月)虽然土壤含水率较低,但荒草地植被覆盖度小,土壤蒸发十分强烈,土壤蒸发量占年总蒸发量的29.2%~38.3%;7~10月份(4个月)土壤含水率较高,但植被盖度较大,土壤蒸发较弱,土壤蒸发量占年总蒸发量的28.7%~46.8%;11月~次年4月份温度较低,土壤蒸发量占年总蒸发量的22.5%~38.0%。

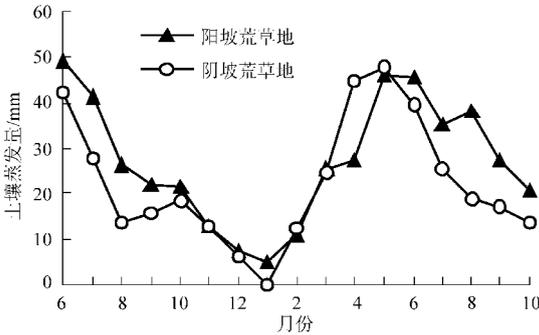


图5 试验地土壤蒸发量季节分布

Fig. 5 Seasonal prevalence of soil evaporation in experimental plots

3.2.5 植被蒸腾

试验期间阴、阳坡荒草地模拟植被蒸腾量分别为390.3 mm和320.4 mm。阳坡蒸腾量显著小于阴坡。荒草地蒸腾强度与降水量密切相关,降雨后蒸腾强度显著增大。这主要是因为降雨前荒草地土壤比较干燥,限制了植被的蒸腾耗水,降雨后土壤含水率增大,植被蒸腾随之增强。阴、阳坡荒草地蒸腾量随植被的生长周期都具有明显的季节变化规律(图6)。4月下旬荒草地植被开始出叶,蒸腾逐渐增强,到7~8月份达到峰值,随后又逐渐减弱,11月初叶子枯落后蒸腾强度减小为0 mm/d。2006年8月份降水81.0 mm,土壤储水量较低,植被耗水受限,荒草地植被蒸腾量明显下降;2007年7月份降水153.4 mm,8月份降水55.9 mm,但7月份降水主要集中在下旬,土壤储水迅速增加,使8月份植被蒸腾量增加,而7月份蒸腾量并不比8月份高。7~9月份是植被蒸腾最强烈的时期,占年总蒸腾量的63.7%~97.2%。

3.2.6 土壤储水增量

降水是试验地土壤含水率的唯一补给源。来自大气的降水渗入土壤的部分经蒸发、蒸腾、深层渗漏后多余的水分储存于土壤水库中,对植被需水起到调节作用。以2006年5月27日土壤储水量为基准到试验结束,阴、阳坡0~600 cm土壤储水量均显著增加,其中阴坡荒草地为121.9 mm,阳坡荒草地

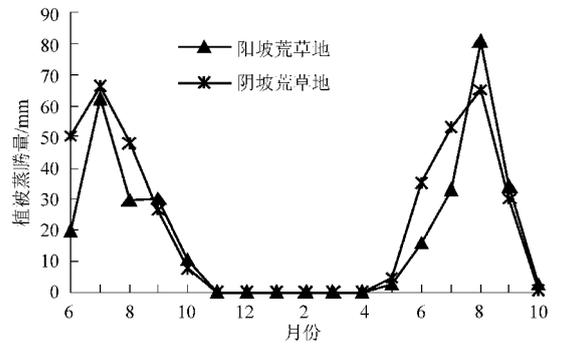


图6 试验地植被蒸腾量季节分布

Fig. 6 Seasonal prevalence of transpiration in experimental plots

111.5 mm(图7)。阴、阳坡荒草地土壤储水量均表现为在雨后迅速增加,随后逐渐减少。2006年5月下旬、6月中下旬、8月下旬以及2007年5月下旬至6月中旬降水较少,荒草地仅在多雨的某一时段土壤储水量有所增加,其余时间土壤含水率均处于亏损状态。2006年雨季降水量较小,虽然经过降水的补充,但10月份以后荒草地土壤储水量仍然减少,出现负补偿现象;2007年降水量较大,10月份以后各地类土壤储水量均显著增加。以田间持水量(2956.8 mm)为基准,阳坡荒草地土壤含水率亏缺量941.2 mm、阴坡荒草地为790.3 mm^[24]。

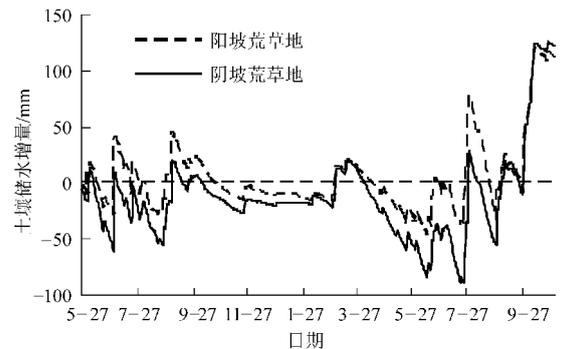


图7 试验地土壤储水增量变化

Fig. 7 Increment change of soil water in experimental plots

3.3 土壤-植被-大气系统水分传输平衡

3.3.1 干旱年

干旱年土壤-植被-大气系统水量平衡各分量及其比例见表3。荒草地系统土壤蒸发量占年总降水量的57.2%~63.6%,植被蒸腾量占年总降水量的33.3%~43.8%,植被冠层的截留量占年总降水量的6.4%~7.1%,地表径流较小,只占年总降水量的0.4%~1.1%。荒草地系统的降水1/2以上消耗于土壤蒸发。输入荒草地系统的降水满足不了水分的支出,土壤储水量均减少,土壤水库处于负补偿状态。阳坡接收的能量较阴坡多,表现为阳坡土壤蒸发量较阴坡大,但阴坡植被蒸腾量较阳坡大。荒草地植被截留率5.3%~7.1%,阴、阳坡降水的1/2

以上均消耗于土壤无效蒸发,33.3%~43.8%的降水用于植被的有效蒸腾,降水的有效利用率较低。干旱年,土壤-植被-大气系统水分的收入为463.0 mm,阳坡荒草地蒸散量为478.4 mm,阴坡荒草地为500.7 mm,降水量与蒸散量的差额分别为-15.4 mm、-37.7 mm,荒草地的年蒸散量超过年降水量,系统出现负补偿现象,阳坡地类的水分负补偿差额小于阴坡相同地类,主要是因为阳坡土壤较为干燥,可供植被利用的水分较少,限制了植被的蒸腾耗水。干旱年蒸散量大于降水量是引起荒草地群落过度消耗土壤储水而呈现负平衡的主要原因。

3.3.2 丰水年

丰水年荒草地系统,来自大气的降水41.5%~47.8%消耗于土壤蒸发,26.5%~30.0%消耗于植被蒸腾,5.2%~5.4%消耗于植被冠层的截留,1.1%~1.8%消耗于地表径流,18.7%~21.9%储存于土壤中(表3)。与干旱年相比,阳坡荒草地的土壤蒸发量和植被蒸腾量略有增加,阴坡荒草地却减小。干旱年降水量小,气候干旱,阳坡潜在蒸发、蒸腾强烈,但土壤湿度较小,限制了蒸发和蒸腾;丰

水年,土壤湿度较大,蒸发、蒸腾受限较轻微,因此蒸发、蒸腾略有增加。干旱年,阴坡荒草地通过蒸腾作用过多地消耗了深层土壤储水;丰水年,气候湿润,潜在蒸发、蒸腾不太强烈,因此蒸发、蒸腾减小。干旱年和丰水年相比,植被的截留量和地表径流占降水的比例基本相等,土壤蒸发、植被蒸腾和土壤储水增量所占降水的比例变化大,对土壤-植被-大气系统水量平衡影响较大。干旱年和丰水年荒草地系统水分主要消耗于土壤蒸发和植被蒸腾,但丰水年占降水的比例减小,地表径流量占降水的比例增大,植被截留率(截留量占同期降水量的百分比)基本保持不变,总体上水分消耗小于收入,土壤含水率增大。阴坡荒草地水分消耗相对更少,土壤含水率补充较多。丰水年,土壤-植被-大气系统水分的收入为630.7 mm,阳坡荒草地蒸散量为501.5 mm,阴坡荒草地为485.5 mm,阳坡明显高于阴坡,但均小于同期降水量,土壤水库得到降水的明显补充。因此,大气降水是黄土丘陵区土壤-植被-大气系统最重要的水分输入项,系统水量平衡方程中各分量的变化取决于降水量的多寡,并且降水量决定着系统水分循环的强弱。

表3 荒草地不同年型土壤-植被-大气系统水分传输平衡分量及其比例

Tab.3 Water transfer balance of soil-vegetation-atmosphere system in experimental plots

年型	参数	地类	降水量	截留量	地表产流量	土壤蒸发量	植被蒸腾量	土壤储水增量
干旱年	年总量/mm	阴坡	463	33.1	1.8	264.9	202.7	-39.5
		阳坡	463	29.8	4.9	294.6	154.0	-20.3
	占降水量百分比/%	阴坡		7.1	0.4	57.2	43.8	-8.5
		阳坡		6.4	1.1	63.6	33.3	-4.4
丰水年	年总量/mm	阴坡	630.7	34.1	7.0	262.0	189.4	138.3
		阳坡	630.7	32.7	11.5	301.6	167.3	117.8
	占降水量百分比/%	阴坡		5.4	1.1	41.5	30.0	21.9
		阳坡		5.2	1.8	47.8	26.5	18.7

3.4 土壤-植被-大气系统水分交换通量

土壤-植被-大气系统中,大气与植被、植被与土壤、大气与土壤界面之间水分不断地通过相变进行着交换,通过连续的水分循环保持着系统水分的动态平衡。不同坡向,系统水分的交换通量和循环强弱不同。试验地土壤-植被-大气系统各界面之间水分交换通量见表4。试验期间,大气输入土壤-植被-大气系统的降水量为979.0 mm,阳坡荒草地通过植被截留蒸发、土壤蒸发和植被蒸腾以气态形式返回大气的水分为851.1 mm,阴坡荒草地为848.4 mm。降水渗入土壤的水量分别为阳坡荒草地901.5 mm,阴坡荒草地904.6 mm。阳坡荒草地土壤

蒸发量为469.7 mm,为土壤-植被-大气系统水分第一大支出项,占到降水量的48.0%,而阴坡相应值分别为392.5 mm和40.1%,说明阳坡荒草地在大气-土壤界面水分的交换显著大于阴坡。阴坡荒草地植被蒸腾量为390.1 mm,占到降水量的39.9%,而阳坡相应值分别为320.4 mm和32.7%,说明阴坡荒草地在植被-土壤界面通过根系吸水的水分交换通量显著高于阳坡。土壤-植被-大气系统各界面水分传输规律表明,黄土丘陵区阴、阳坡是2个水热条件差异显著的立地类型,阳坡土壤蒸发量大,土壤储水量低,在阳坡进行植被建设应当配置盖度较高、可以降低土壤蒸发的植被类型。

表4 荒草地试验期间土壤-植被-大气系统水分交换通量

Tab. 4 Water flux of soil-vegetation-atmosphere system in experimental plots

参数	地类	降水量	截留量	地表产流量	土壤蒸发量	植被蒸腾量	土壤储水增量
年总量/mm	阴坡	979.0	65.6	8.8	392.5	390.3	121.9
	阳坡	979.0	61.1	16.4	469.7	320.4	111.5
占降水量的百分比/%	阴坡		6.7	0.9	40.1	39.9	12.5
	阳坡		6.2	1.7	48.0	32.7	11.4

4 结论

(1) 阴、阳坡植被对降水的截留规律与降水的季节变化规律一致。阳坡荒草地的土壤蒸发量较阴坡高,而阴坡荒草地植被蒸腾量高于阳坡,说明阴、阳坡荒草地在大气-土壤界面和植被-土壤界面水分交换差异明显。干旱年,荒草地系统,来自大气的降水主要消耗于土壤蒸发和植被蒸腾,其次是植被冠层的截留损失,蒸散量超过了同期降水量,输入草地系统的降水满足不了水分的支出,土壤储水量均减少,土壤水库处于负补偿状态。丰水年,系统的水分收入大于支出。

(2) 试验期间,大气输入土壤-植被-大气系统

的降水量均为 979.0 mm,渗入土壤的水量阳坡荒草地为 901.5 mm,阴坡荒草地为 904.6 mm。阳坡荒草地通过植被截留蒸发、土壤蒸发和植被蒸腾以气态形式返回大气的水分为 851.1 mm,阴坡荒草地为 848.4 mm。植被-土壤界面水分的交换主要表现为植被根系的吸水蒸腾,阴坡荒草地比阳坡蒸腾量大,因此在植被-土壤界面水分的交换阴坡比阳坡强烈。

(3) 试验地土壤-植被-大气系统水分传输研究表明,在黄土丘陵区阳坡和阴坡是 2 个水热条件差异显著的立地类型。试验地阳坡用于土壤蒸发的水分较多,土壤储水量低,因此在阳坡进行植被建设尤其要谨慎,应合理选择植物种类,植被配置应当考虑盖度较高、可以降低土壤蒸发的植被类型。

参 考 文 献

- 刘昌明,孙睿. 水循环的生态学方面:土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展,1999,10(3):251~259.
Liu Changming, Sun Rui. Ecological aspects of water cycle: advances in soil vegetation atmosphere of energy and water fluxes [J]. Advances in Water Science, 1999,10(3):251~259. (in Chinese)
- 余冬立,邵明安,俞双恩. 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)
- Hoff H. A new understanding of the role of the land surface [M]. BAHG NEWS, No 7. Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000: 1~16.
- 康尔泗,程国栋,宋克超,等. 河西走廊黑河山区土壤-植被-大气系统能水平衡模拟研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(6):544~551.
Kang Ersi, Cheng Guodong, Song Kechao, et al. Modeling of water balance of soil vegetation atmosphere system in the mountainous area of Hexi Corridor [J]. Science in China Ser. D: Earth Sciences, 2004, 34(6): 544~551. (in Chinese)
- 张展羽,苏里坦,张国华. 绿洲-荒漠交错带潜水-土壤-植被-大气连续体水热传输模型研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(6):88~92.
Zhang Zhanyu, Su Litan, Zhang Guohua. Computer simulation of water movement and heat transfer in groundwater-soil-vegetation-atmosphere continuum at oasis-desert ecotone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6): 88~92. (in Chinese)
- 莫兴国,刘苏峡,于沪宁,等. 冬小麦能量平衡及蒸散分配的季节变化分析[J]. 地理学报,1997,52(6):536~542.
Mo Xingguo, Liu Suxia, Yu Huning, et al. Seasonal variation of energy budget and evaporatranspiration partitioning in wheat field [J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(6): 536~542. (in Chinese)
- 康绍忠,张富仓,刘晓明. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J]. 水科学进展,1995,6(4):285~289.
Kang Shaozhong, Zhang Fucang, Liu Xiaoming. Calculation method of the ration between crop leaf transpiration and soil evaporation from farmland [J]. Advances in Water Science, 1995, 6(4): 285~289. (in Chinese)
- Zhang S L. Soil hydraulic properties and water balance under various soil management regimes on the Loess Plateau, China [D]. Umea: Swedish University of Agricultural Sciences, 2005.
- 卫三平. 黄土丘陵区土壤-植被-大气系统水能传输模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.
Wei Sanping. Study on the simulation of water and energy of soil-vegetation-atmosphere system in the loess hilly region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

- 10 徐勇, Sidle R C. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 657 ~ 666.
Xu Yong, Sidle R C. Land use change and its regulation of Yangou Watershed in loess hilly-gully region [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(6): 657 ~ 666. (in Chinese)
- 11 赵军. CoupModel 模拟土壤水热变化过程的研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 250 ~ 252.
Zhao Jun. Application of CoupModel in the research of soil water and heat process [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2001, 17(4): 250 ~ 252. (in Chinese)
- 12 Jansson P E. Simulating model for soil water and heat conditions [M]. Division of Agricultural Hydraulics, Communication 98: 2. Swedish University of Agricultural Science, Uppsala, Sweden, 1998.
- 13 Eckersten H, Jansson P E, Johnsson H. SOILN Model, Version 9.2, User's manual [M]. Division of Agricultural Hydraulics, Communication 98: 6. Swedish University of Agricultural Science, Uppsala, Sweden, 1998.
- 14 Christiansen J R, Elberling B, Jansson P E. Modelling 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(1~3): 545 ~ 556.
- 15 Jansson P E, Moon D S. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality [J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(1): 37 ~ 46.
- 16 Jansson P E, Karlberg L. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems [M]. Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, 2004.
- 17 Wang L, Wei S P, Horton R, 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.
- 18 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- 19 Manzi A O, Planto S. Implementation 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.
- 20 Murai H, Iwasaki I. Study on the mechanism of soil and water conservation in forestlands [R]. Report for Forestry Field, 1975, 274: 23 ~ 84.
- 21 贺庆棠. 气象学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- 22 刘普灵, 郑世清, 琚彤军, 等. 黄土高原燕沟流域生态环境建设模式及效益研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 88 ~ 91.
Liu Puling, Zheng Shiqing, Ju Tongjun, et al. Ecological and environmental construction in the Yangou watershed of the Loess Plateau: models and benefits [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 88 ~ 91. (in Chinese)
- 23 郭明春, 于澎涛, 王彦辉, 等. 林冠截持降雨模型的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1 633 ~ 1 637.
Guo Mingchun, Yu Pengtao, Wang Yanhui, et al. Rainfall interception model of forest canopy: a preliminary study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1 633 ~ 1 637. (in Chinese)
- 24 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤含水率环境及植被生长响应——以燕沟流域为例[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1 543 ~ 1 553.
Wang Li, Wei Sanping, Wu Faqi. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of Yangou Catchment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1 543 ~ 1 553. (in Chinese)

(上接第 58 页)

- 5 Childs D. Finite length solutions for rotor dynamic coefficients of turbulent annular seals [J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1983, 105(2): 437 ~ 444.
- 6 Fritz R. The effects of an annular fluid on the vibrations of along rotor: part 1—theory [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1970, 92(4): 923 ~ 929.
- 7 Antunes J, Axisa F, Grunenwald T. Dynamics of rotors immersed in eccentric annular flow. part 1: theory [J]. Journal of Fluids and Structures, 1996, 10(8): 893 ~ 918.
- 8 Antunes J, Mendes J, Moreira M, et al. A theoretical model for nonlinear planar motions of rotors under fluid confinement [J]. Journal of Fluids and Structures, 1999, 13(1): 103 ~ 126.
- 9 Moreira M, Antunes J, Pina H. A theoretical model for nonlinear orbital motions of rotors under fluid confinement [J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 14(5): 635 ~ 668.
- 10 Moreira M, Antunes J, Pina H. An improved linear model for rotors subject to dissipative annular flows [J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17(6): 813 ~ 832.
- 11 孙启国, 虞烈. 流体机械中浸液转子动力学特性的研究 [J]. 动力工程, 2000, 20(5): 906 ~ 910.
Sun Qiguo, Yu Lie. Study of dynamic characteristics for fluid machine rotor immersed in annular liquid flow [J]. Power Engineering, 2000, 20(5): 906 ~ 910. (in Chinese)
- 12 谷朝红, 姚熊亮, 陈起富. 水轮机部件流固耦合振动特性研究 [J]. 大电机技术, 2001(6): 47 ~ 52.
Gu Chaohong, Yao Xiongliang, Chen Qifu. Study on fluid-solid coupling dynamic characteristics for the component of hydraulic turbines [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(6): 47 ~ 52. (in Chinese)