

黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟^{*}

余冬立¹ 邵明安² 俞双恩¹

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心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)

【摘要】 应用土壤-水-大气-植物整合模型(SWAP), 在野外观测试验基础上对坡耕地(豆地)、长芒草地和苜蓿草地土壤-植被-大气系统中的水循环进行了数值模拟。结果表明, 土壤水分和储水量模拟结果与实测值具有很好的一致性; 长芒草地水分收支基本平衡, 苜蓿草地的水分支出是坡耕地(豆地)的1.38倍, 其中苜蓿的蒸腾耗水量是坡耕地(豆地)的3.88倍, 这是引起苜蓿草地群落过度消耗土壤储水而呈现负补偿的主要原因。农地退耕还林还草后会增加 SPAC 系统水分支出, 如果植被群落耗水过大很可能使土壤干化。

关键词: 坡耕地 长芒草地 苜蓿草地 水量平衡 SWAP 模型

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0073-06

Water Balance Simulation in SPAC Systems of Slope Lands Covered with Typical Vegetations on Loess Plateau

She Dongli¹ Shao Ming'an² Yu Shuang'en¹

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China,

Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China 2. State Key Laboratory of Soil

Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

A numerical model, soil-water-atmosphere-plant model (SWAP), was applied to simulate dynamics of soil moisture and soil-water balance in three kinds of land use patterns, including cropland with mung bean, *Stipa bungeana* grassland and alfalfa grassland, based on field observations. The predicted values of soil moisture and soil water storage had obviously consistent with the measured values. The water input on *Stipa bungeana* grassland was roughly equal to the output. The water output on alfalfa grassland was 1.38 times of that on cropland, and the evapotranspiration of alfalfa was 3.88 times of that on cropland with mung bean, which was the main reason causing soil water deficit on alfalfa grassland. So conversion of farmland to forest and grassland regeneration will increase the output of water in the SPAC system, if there is a great deal of water consumption by vegetation community, it will lead to soil desiccation.

Key words Sloping cropland, *Stipa bungeana* grassland, Alfalfa grassland, Water balance, SWAP model

引言

植被恢复对黄土高原区域水分循环和水量平衡具有重要影响, 尤其是植物根系吸水形成蒸散型土

壤干层等问题日益引起人们的重视。降水是黄土高原水蚀风蚀交错带土壤水分补给的主要来源, 土壤水分循环特征差异主要决定于植被类型、土壤类型、地形特征等因素^[1]。

收稿日期: 2010-06-07 修回日期: 2010-09-25

^{*} 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室开放研究基金资助项目(IDA003)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009B02014)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-250)

作者简介: 余冬立, 讲师, 主要从事土壤空间变异与侵蚀控制研究, E-mail: shedongli@gmail.com

为了解蒸散型土壤干层的形成机理及其在黄土区流域水循环中的作用,需研究水文-生态系统中土壤-植物-大气连续体(SPAC)的水量传输过程。针对黄土区植被恢复与土壤水分动态变化规律之间相互关系已开展了广泛研究。黄土高原人工植被恢复区土壤水分循环过程中土壤蒸散量普遍较大,特别是紫花苜蓿草地的蒸散量很大,即使在丰水年也得消耗深层的土壤储水^[2]。不同的植被类型蒸散耗水规律不同^[3]。通过数学模型模拟 SPAC 系统中水分动态变化,有助于进一步认识不同植被覆盖系统水量平衡定量关系和植物生长的土壤水分生态效应^[4]。本文利用土壤-水-大气-植物整合模型(soil-water-atmosphere-plant, 简称 SWAP)模拟黄土高原水蚀风蚀交错区坡耕地(豆地)、长芒草地和苜蓿草地 SPAC 系统水分传输过程,以期揭示研究区坡面典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡状况,为该人工植被恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验选在中国科学院水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站六道沟小流域进行。该区地处黄土高原向毛乌素沙漠过渡、森林草原向典型干旱草原过渡的过渡带,同时也处于流水作用的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂尔多斯草原过渡的水蚀风蚀交错带。六道沟流域面积 6.89 km²,东经 110°26',北纬 38°49',属于典型的半干旱地区,其主要气候、土壤和植被特征见文献[5]。

1.2 数据收集

试验于 2007~2008 年进行。在六道沟小流域建立坡耕地(豆地)、长芒草和苜蓿草地 3 种植被覆盖类型的坡面径流小区(4 m × 15 m),坡面向北,坡度 13°~14°,在坡底利用 2 级径流桶收集径流和泥沙。苜蓿草地为种植 6 年的紫花苜蓿草地,苜蓿盖度为 85%,长芒草地为生长 20 年左右的长芒草地,长芒草盖度为 80%。坡耕地小区每年 5 月 20 日左右播种绿豆,密度为 10.5 万株/hm²,于每年的 10 月 10 日左右收获。在每个坡面径流小区的上、中和下部各安装 1 根 4 m 中子管,用中子水分仪(CNC503DR)监测土壤水分变化。0~100 cm 土层每 10 cm 读取 1 组数据,100 cm 以下每 20 cm 读数。上、中、下 3 点平均值为该小区测定值。每月定期测量不同植物株高生长状况,以及它们的叶面积指数和冠幅变化,在植物生长末期通过挖剖面 and 根钻相结合的方法调查各小区植被的细根垂直分布特征。在试验站及小区附近分别布设标准雨量桶,雨后用

雨量筒及时测定降水量。利用自动气象站获取温度、太阳辐射、风速和湿度等的连续观测数据,同时通过安装水面蒸发自动监测 E60 系统自动监测水面蒸发量动态过程。

1.3 SWAP 模型与数据分析

SWAP 主要用于模拟土壤-植物-大气传输系统中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生长过程^[6]。采用一维 SWAP 模型模拟 3 种植被覆盖小区土壤水分运动和植物冠层水热交换过程,以实测径流作为输入。模型上边界位于植物冠层上方,以气象资料作为模型上边界条件,驱动模型运行的基本气象资料包括日降雨量、最高和最低气温、太阳辐射以及风速。SWAP 模型计算土层深度为 400 cm,因地下水埋深一般超过 50 m^[7],所以模拟土层深度不考虑地下水。本研究使用 SWAP 中的简单生长模型进行植物生长过程模拟,需要株高、盖度及根系深度随生长阶段的变化过程参数。土壤水分特征参数分不同土壤层次的水分特征曲线参数和土壤质地参数。对供试土壤采用环刀法测定饱和导水率,并利用离心机法测得脱湿曲线,采用 RETC 拟合得到 Mualem-Van Genuchten 函数形式下水分特征曲线参数(表 1)。

表 1 模型输入的土壤水分特性曲线参数

Tab.1 Input values of the soil hydraulic parameters

植被覆盖类型	深度 /cm	θ_{res} /cm ³ ·cm ⁻³	θ_{sat} /cm ³ ·cm ⁻³	K_{sat} /cm·d ⁻¹	a /cm ⁻¹	m
坡耕地	0~20	0.086	0.401	111.4	0.016	1.80
	>20	0.072	0.413	60.5	0.018	1.92
长芒草地	0~20	0.046	0.408	52.4	0.023	1.58
	>20	0.057	0.384	76.5	0.015	1.73
苜蓿草地	0~20	0.046	0.388	52.4	0.023	1.58
	>20	0.057	0.400	76.5	0.015	1.73

注:表中 θ_{res} 为残余含水率; θ_{sat} 为饱和含水率; K_{sat} 为饱和导水率; a 为与进气吸力有关的参数; m 为决定土壤水分特性曲线的形状系数。

为评价模型的模拟效果,分别采用平均预测误差(MPE)和均方根预测误差(RMSPE)来评价模型估计的精度。MPE 和 RMSPE 的计算方法为

$$e_{MPE} = \frac{1}{n} \sum_j^n (z_j - \hat{z}) \quad (1)$$

$$e_{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j^n (z_j - \hat{z})^2} \quad (2)$$

式中 n ——观测次数 z_j ——第 j 次观测值
 \hat{z} ——第 j 次模型模拟值

数据分析采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 SWAP 模拟结果验证

利用研究资料对模型的适用性进行验证。模型运行采用气象资料驱动。表 2 给出了模拟需要输入的绿豆、长芒草和苜蓿的作物参数。其中作物参数阶段定义为作物生长日期的线性函数,起止范围为 0~2。作物出苗的前一天定义为 0(苜蓿和长芒草定义为 4 月 13 日,坡耕地绿豆定义为 6 月 1 日),成熟期为 2(苜蓿和长芒草定义为 11 月 1 日,坡耕地绿豆定义为 10 月 10 日)。根据实际观测资料分别建立作物生长阶段与作物盖度、作物高度和作物根长的关系。研究区 3 种植被覆盖区土钻取土观测表明,剖面深达 400 cm 以下土层坚硬,根系分布很少,水分与上层交换较少,因此模型模拟的下边界定义在表层以下 400 cm 深度,按照零通量处理。模拟初始含水率按照实测含水率确定。对整个生育阶段作物生长与土壤水分运移耦合的复杂过程进行模拟,选取其中有实测资料的土壤含水率模拟值与实测值进行比较与分析(图 1),计算了模拟值与实测值之间的平均预测误差(MPE)和均方根预测误差(RMSPE)(表 3)。结果显示,在时间序列上土壤水分的动态变化趋势基本上与实测结果相符,各个点实测含水率与模拟值相差不大,3 种土地利用方式预测的不同深度土壤水分与实测值之间的平均预测误差(MPE)和均方根预测误差(RMSPE)均保持较低的水平,模拟结果反应了土壤水分的动态特征。图 2 给出了坡耕地、长芒草地、苜蓿草地小区 0~400 cm 土层储水量实测值与模拟值的动态变化,模拟结果较理想,其 e_{MPE} 分别为 1.80、-6.90 和 7.58, e_{RMSPE} 分别为 7.25、17.22 和 24.20。从以上的检验结果可以看出,率定参数后的 SWAP 模型能够揭示

实验区坡耕地(豆地)、长芒草地和苜蓿草地 SPAC 系统水分运移的各个过程,计算所得的水量平衡分量是可靠的。

2.2 典型植被覆盖 SPAC 系统水量平衡模拟分析

利用 SWAP 模型模拟的土壤剖面水分含量日变化及其蒸散量可以用来分析土壤水分与植物耗水的短时段特征,分析 SPAC 系统水量的动态平衡^[8]。SWAP 模型采用 Penman - Monteith 方程计算潜在蒸散量,通过根系吸水受到土壤水分、盐分抑制及土壤蒸发降低因子确定实际蒸散量,然后在此基础上通过植被盖度来划分植物蒸腾与土壤蒸发量的比例,具体计算过程参照文献[6]。

2008 年 4 月 1 日至 10 月 31 日坡耕地(豆地)、长芒草地和苜蓿草地模拟的蒸散特征如表 4~6 所示。3 种植被类型季节蒸散变化特征类似,均对降水有明显响应,降雨量多的月份蒸散量高。这主要是由于在黄土高原半干旱水蚀风蚀交错区作物较高的蒸散速率很大程度上取决于降雨对土壤水分的补给,这也与 Oliveira 等的研究结果一致^[9]。坡耕地(豆地)蒸散量最低,月蒸散发量为 25.1~64.1 mm,蒸腾量主要发生在 6~10 月,绿豆平均日耗水量为 0.40~0.62 mm,蒸腾量占蒸散总量的比例较低,在 12.7%~39.2% 之间,因此大部分的水分消耗都是以蒸发形式损失掉的。与坡耕地相比,长芒草地与苜蓿草地蒸散量明显增加,月蒸散量分别在 27.3~93.1 mm 和 47.1~71.8 mm 之间变化,且在整个生长季节都保持较高的蒸腾速率,长芒草地日耗水量变化为 0.58~1.55 mm,苜蓿日耗水量变化为 1.10~1.64 mm,蒸腾量占蒸散总耗水量的比例较高,长芒草地在 51.6%~72.6% 之间变化,苜蓿草地在 57.5%~80.0% 之间变化,因此以土壤蒸发无效消耗水分较少。

坡耕地、长芒草地和苜蓿草地 SPAC 系统水量平衡特征见图 3,图中“/”前后数字分别表示 2008 年 4~10 月坡耕地、长芒草地和苜蓿草地 SPAC 系统各水量平衡部分占降雨量的百分比。由于黄土高原土壤质地均一,土层深厚,在土体上部一般不存在倾斜不透水的层次,土壤水分的流动主要是垂直流动,加之地下水埋深一般超过 50 m,因此,不同植被覆盖下的水量平衡方程为

$$\Delta W = P - I - R - E - T \quad (3)$$

式中 ΔW ——测期始末土壤储水量的变化量

P ——降水量 I ——冠层截留量

R ——地表径流量

E ——土壤蒸发量

T ——植物蒸腾量

表 2 模型输入的作物参数

Tab.2 Input values of vegetation parameters

作物	指标	作物生长阶段定义值						
		0	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0
绿豆	盖度/%	0	1.7	2.2	2.5	3.2	2.8	2.0
	株高/cm	0	3.0	8.0	13.0	17.8	22.0	16.0
	根长/cm	0	5.0	11.0	16.5	20.0	17.3	15.0
长芒草	盖度/%	25.0	25.0	33.0	38.0	42.0	32.0	27.0
	株高/cm	11.0	14.0	17.0	21.0	23.0	24.0	23.5
	根长/cm	96.0						100.0
苜蓿	盖度/%	5.0	10.0	30.0	55.0	70.0	75.0	70.0
	株高/cm	5.0	13.0	25.0	26.0	27.0	28.0	27.5
	根长/cm	295.0						300.0

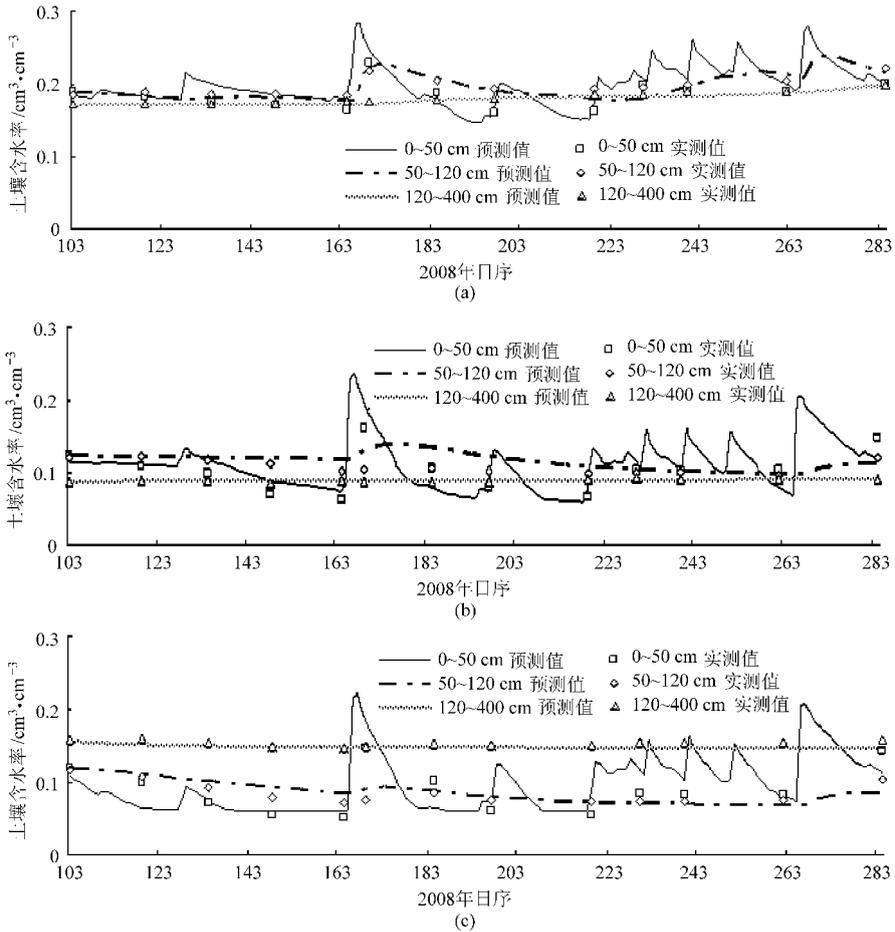


图1 典型植被覆盖下土壤水分模拟值与实测值结果比较

Fig. 1 Simulated and measured daily soil moisture contents for the three kinds of typical vegetation plots

(a) 坡耕地 (b) 长芒草地 (c) 苜蓿草地

表3 不同植被小区土壤水分和储水量模拟结果误差统计分析

Tab. 3 Statistical analysis on simulated error of soil moisture contents and water storage for different vegetation plots

指标	深度/cm	e_{MPE}			e_{RMSPE}		
		坡耕地	长芒草地	苜蓿草地	坡耕地	长芒草地	苜蓿草地
含水率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	0~50	-0.008 9	-0.001 4	-0.002 9	0.013 4	0.019 1	0.024 6
	50~120	0.003 1	-0.009 5	-0.002 5	0.007 1	0.014 2	0.009 3
储水量/mm	120~400	0.001 4	0.000 2	0.003 8	0.002 3	0.001 4	0.005 1
	0~400	1.797 6	-6.899 6	7.579 3	7.248 9	17.224 4	24.196 5

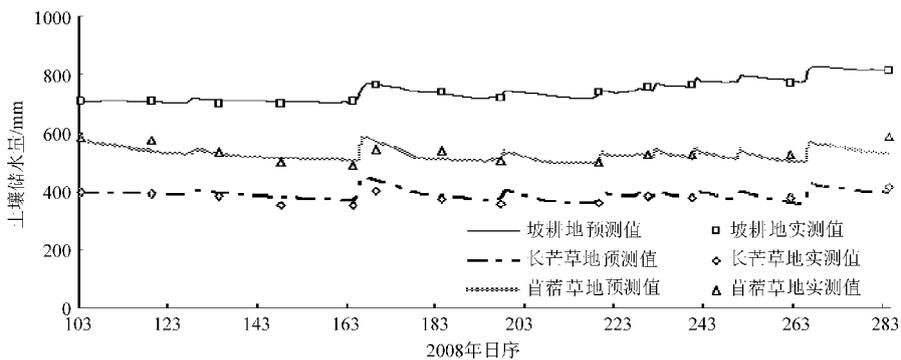


图2 不同植被小区0~400 cm土层储水量模拟值与实测值比较

Fig. 2 Simulated and measured daily soil water storage of 0~400 cm for the three kinds of typical vegetation plots

表4 坡耕地(豆地)蒸散、蒸腾特征比较(2008年)

Tab.4 Characteristics of evapotranspiration and transpiration in slope cropland with mung bean(2008)

月份	降雨量 /mm	蒸散 /mm	蒸腾 /mm	蒸腾/蒸散 /%	蒸散/降雨 量/%
4	22.4	31.7	0	0	141.4
5	15.9	25.1	0	0	157.7
6	92.1	44.0	15.0	34.2	47.8
7	35.5	48.8	19.1	39.2	137.4
8	112.2	64.1	17.5	27.3	57.2
9	107.9	54.3	16.6	30.6	50.3
10	15.3	34.6	4.4	12.7	225.9

表5 长芒草地蒸散、蒸腾特征比较(2008年)

Tab.5 Characteristics of evapotranspiration and transpiration in *Stipa bungeana* grassland(2008)

月份	降雨量 /mm	蒸散 /mm	蒸腾 /mm	蒸腾/蒸散 /%	蒸散/降雨 量/%
4	22.4	50.4	30.4	60.4	225.2
5	15.9	27.3	18.1	66.4	171.7
6	92.1	62.2	45.2	72.6	67.5
7	35.5	57.3	41.1	71.7	161.4
8	112.2	93.1	48.1	51.6	83.0
9	107.9	69.0	39.5	57.3	63.9
10	15.3	36.2	23.1	63.7	236.4

表6 苜蓿草地蒸散、蒸腾特征比较(2008年)

Tab.6 Characteristics of evapotranspiration and transpiration in alfalfa grassland(2008)

月份	降雨量 /mm	蒸散 /mm	蒸腾 /mm	蒸腾/蒸散 /%	蒸散/降雨 量/%
4	22.4	47.1	33.9	71.8	210.5
5	15.9	55.1	44.1	80.0	346.4
6	92.1	54.7	38.6	70.6	59.4
7	35.5	71.8	50.7	70.6	202.3
8	112.2	64.2	36.9	57.5	57.2
9	107.9	70.0	43.6	62.3	64.9
10	15.3	52.8	34.2	64.8	345.1

2008年4~10月坡耕地水分主要消耗于土壤蒸发,占降水量57.3%的降水通过蒸发进入大气,其次是占降水量18.1%的降水以植物蒸腾的形式进入大气。24.1%的降水用于增加土壤储水量。长芒草地水分主要消耗于植被蒸腾,占降雨量61.2%的降水通过植被蒸腾形式返回大气,而土壤蒸发和植被冠层截留蒸发一起占到了降雨量的100%。因此,长芒草地土壤储水量基本保持年内平衡,未发生

明显的变化。苜蓿草地水分主要消耗于植被蒸腾、土壤蒸发和截留蒸发并以气态形式返回大气,为降水量的104.8%,不仅消耗了全部降水,还消耗了土壤水库中的部分水分。植被有效利用的水分主要为植被蒸腾量,苜蓿草地对降水的利用率达到了70.3%。3种植被类型利用方式下SPAC系统中水分收入均为401.3mm,而坡耕地、长芒草地和苜蓿草地水分支出分别为304.7、401.2和420.3mm。苜蓿草地的水分支出是坡耕地的1.38倍,其中苜蓿的蒸腾耗水量是坡耕地绿豆蒸腾耗水的3.88倍,这是引起苜蓿草地群落过度消耗土壤储水而呈现负补偿现象的主要原因。可见,坡耕地退耕还林还草后会增加SPAC系统水分支出,如果植被群落耗水过大很可能使土壤干化,这与前人相关研究结果一致^[3,10]。作者在研究区野外调查监测结果也表明,农地退耕为苜蓿草地后,随着紫花苜蓿生长年限的延长,土壤密度增加,且苜蓿对土壤水分消耗严重,土壤储水量的负补偿现象逐渐明显,形成土壤干化;苜蓿草地经过15~20年的群落演替,紫花苜蓿退化,群落演替发展为该研究区草地的顶级群落——长芒草群落,而随着群落的进一步演替,土壤水分年收支趋于平衡,土壤水分是一个逐步补给恢复过程;通过人工翻耕退化苜蓿草地发展坡耕地农业可以加速土壤水分补给恢复过程^[11]。

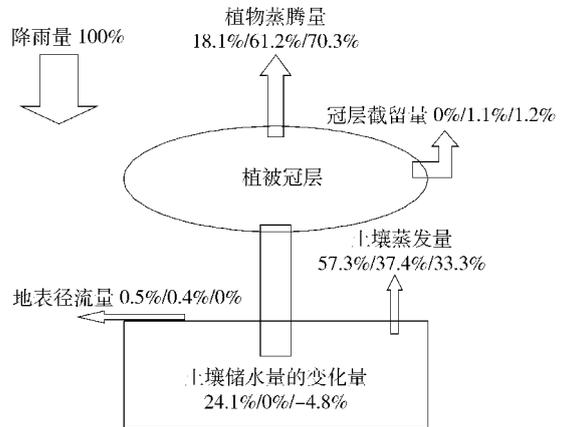


图3 SPAC系统水量平衡示意图

Fig.3 Schematic structure of water balance in SPAC system

3 结束语

采用试验小区法研究了不同植被覆盖方式下水分循环过程,通过连续监测土壤水分变化、产流和植物生长等过程,并采用SWAP模型对水文过程进行模拟研究,分析黄土坡面典型植被覆盖下SPAC系统水量平衡特征。模型验证结果表明,土壤水分和储水量模拟结果与实测值具有很好的一致性,SWAP模型可应用于研究区农地和草地土壤水分

态模拟及水量平衡计算。应用 SWAP 模型对六道沟流域 4~10 月坡耕地(豆地)、长芒草地和苜蓿草地水分传输过程模拟结果表明,3 种植被类型利用方式下 SPAC 系统中水分的收入均为 401.3 mm,而坡耕地、长芒草地和苜蓿草地的水分支出分别为 304.7、401.2 和 420.3 mm。苜蓿草地的水分支出是

坡耕地的 1.38 倍,其中苜蓿的蒸腾耗水量是坡耕地绿豆蒸腾耗水的 3.88 倍,这是引起苜蓿草地群落过度消耗土壤储水而呈现负补偿现象的主要原因。可见,农地退耕后还林还草后会增加 SPAC 系统水分支出,如果植被群落耗水过大很可能使土壤干化。

参 考 文 献

- 1 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1 853~1 857.
Chen Hongsong, Shao Ming'an, Wang Kelin. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10):1 853~1 857. (in Chinese)
- 2 Li Yushan, Huang Mingbin. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 124(1~2):24~32.
- 3 Kimura Reijin, Fan Jun, Zhang Xingchang, et al. Evapotranspiration over the grassland field in the Liudaogou basin of the Loess Plateau, China [J]. Acta Oecologica, 2006, 29(1):45~53.
- 4 苏宏新,桑卫国. 宏观植物生态模型的研究现状与展望[J]. 植物生态学报,2002,26(增刊1):98~106.
Su Hongxin, Sang Weiguo. Review on the current state and future development of the macro-scale plant ecological models [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(Supp.1): 98~106. (in Chinese)
- 5 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. 农业机械学报,2010,41(7):57~63.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Spatial variability of soil water content on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 57~63. (in Chinese)
- 6 Kroes J G, van Dam J C, Groenendijk P, et al. SWAP version 3.2. theory description and user manual [M]. Wageningen: Alterra, 2008.
- 7 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1 045~1 048.
Hu Liangjun, Shao Ming'an. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8):1 045~1 048. (in Chinese)
- 8 刘艳伟,朱仲元,乌云,等. 浑善达克沙地天然植被蒸散量两种计算方法的比较[J]. 农业机械学报,2010,41(11):84~88.
Liu Yanwei, Zhu Zhongyuan, Wu Yun, et al. Comparison of evapotranspiration of the natural vegetation in the Otindag sandy area using two calculation methods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):84~88. (in Chinese)
- 9 Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil [J]. Functional Ecology, 2005, 19(4):574~581.
- 10 Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Shao Hongbo. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1~2): 9~17.
- 11 She Dongli, Shao Ming'an, Timm Luis Carlos, et al. Temporal changes of an alfalfa succession and related soil physical properties on the Loess Plateau, China[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2009, 44(2):189~196.

(上接第 23 页)

- 5 曹万科,张天侠,刘应吉,等. 基于 TTCAN 的汽车控制系统信息调度设计与分析[J]. 农业机械学报,2007,38(12):41~44.
Cao Wanke, Zhang Tianxia, Liu Yingji, et al. Design and analysis on scheduling of messages in automotive control system based on TTCAN [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12):41~44. (in Chinese)
- 6 张新丰,杨殿阁,陆良,等. LIN 总线的动态调度算法设计与应用 [J]. 农业机械学报,2009,40(3):21~25.
Zhang Xinfeng, Yang Diange, Lu Liang, et al. Dynamic scheduling algorithm for local interconnect network and its application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):21~25. (in Chinese)