

基于土壤含水量模拟的干旱监测指数研究

金君良^{1,2}, 申瑜³, 王国庆^{1,2}, 顾颖^{1,2}, 刘翠善^{1,2}, 贺瑞敏^{1,2}

(1. 南京水利科学研究所 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 山西省水文水资源勘测局, 山西 太原 030001)

摘要:以山西省汾河流域为例,采用水量和能量平衡原理的VIC模型模拟了区域内径流和土壤含水量的变化过程,并构建了土壤干旱指数进行实例研究。结果表明:建立的VIC模型能够较好地模拟研究区站点的径流和土壤含水量的变化过程,基于土壤含水量模拟的土壤干旱指数与实际干旱的发生具有较好的相关性,土壤干旱指数物理意义清晰,能较好地刻画区域干旱在时空上的发生、发展及结束过程,对区域干旱监测具有一定的应用价值。

关键词:土壤含水量; VIC模型; 干旱指数; 水文模拟

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0014-05

Study on index of drought monitor based on simulation of soil moisture

JIN Junliang^{1,2}, SHEN Yu³, WANG Guoqing^{1,2}, GU Ying¹, LIU Cuishan^{1,2}, HE Ruimin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute,

Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China;

3. Shanxi Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taiyuan 030001, China)

Abstract: The paper used variable infiltration capacity model to simulate the variable process of runoff and soil moisture in the region based on the principle of water and energy balance taking Fenhe river basin in Shanxi province for example. The soil drought index (SDI) was constructed and applied in the study area. The results showed that the VIC model can better simulate the variable process of runoff and soil moisture. The simulated SDI has better relativity with the actual drought. The physical significance of SDI is clear and can better depict the process of occurrence, development and ending in time and space of region drought. The method has certain application value for regional drought monitor.

Key words: soil moisture; VIC model; drought index; hydrological simulation

旱灾是影响社会、经济和环境的最大自然灾害之一,是农业生产的重要制约因素。如何利用有效手段及时了解旱情的发生、发展一直是各国政府部门关注的焦点。据统计,近50多年来,我国平均每年干旱受旱面积达到20多万km²,每年因旱灾损失粮食100亿kg。随着经济的迅速发展、人口增加和以气候变暖为主要标志的全球变化的发生,区域干旱有进一步加重的趋势^[1]。

干旱通常可分为4种,即:气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱。但是没有一种单独的干旱指数完全适合于区域干旱监测^[2]。而具有物理

机理性干旱指标考虑了与干旱发生有关的气象、土壤、水文以及生物等各种因素,能够反映局地干旱的强度、持续时间和影响程度,是目前干旱指标研究的新领域。

利用水文模型模拟的土壤含水量来进行干旱指数的研究,是从土壤含水量的角度来开展干旱监测和预测。模拟土壤含水量的干旱指数,考虑了降水、蒸发、植被和土壤特性对于旱的综合影响,具有较为严格的物理机制,能够更加真实地反映实际发生的干旱。采用水文模型连续模拟逐日的土壤含水量,建立逐日或旬时间尺度的干旱指数,会比以往月时

收稿日期:2014-01-16; 修回日期:2014-02-18

基金项目:全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951103);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC21B01、2012BAC19B03);水利部公益性行业科研专项(201001042);国家自然科学基金项目(41330854、41371063);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y511008、Y514004、Y513009)联合资助

作者简介:金君良(1982-),男,浙江金华人,博士,高级工程师,主要从事水文学水资源及气候变化等研究。

间尺度的干旱指数更能准确描述干旱的发生、结束和程度,进而为旱情监测预测及抗旱决策提供更加及时、可靠的支持,达到有效防灾和减灾的目的。

而选取合适的水文模型来模拟土壤含水量的时空变化是土壤干旱研究的关键。通常干旱涉及的范围较大,因而水文模型也必须适合大尺度的水文过程模拟。再且,针对我国北方春季融雪会影响着春旱的发生,所以选用水文模型又需要具有融雪过程的模拟的能力。再者,日常的旱情监测和预测系统较容易实时获得的气象资料主要是降水、气温资料,为了方便应用,所以选用的水文模型对输入数据的要求也尽可能少。鉴于以上考虑,本文选用网格分布的VIC (Variable Infiltration Capacity) 水文模型,模拟不同空间区域分布的土壤含水量,并建立土壤含水量模拟的土壤干旱指数。VIC 模型被认为是一个大尺度水文模型,它在计算网格内同时考虑能量和水量平衡,考虑积雪融雪及土壤冻融过程,输入数据为日降水和日最低、最高气温。和大多数水文模型或降雨径流模型相比,由于其考虑了能量平衡过程的模拟,因而VIC 模型被认为是更基于物理机制模拟的水文模型。自研发以来,该模型已经被广泛应用于美国的密西西比河及哥伦比亚河等流域的径流模拟及早情评估。同时VIC 模型还被用于20世纪美国西部径流、蒸发和土壤含水量的趋势分析以及20世纪美国主要干旱事件的识别和规律研究。吴志勇等^[3]还利用VIC 模型模拟了全国28个站19年的逐日土壤含水量过程,结果表明VIC 模型能较好的模拟土壤含水量的变化过程。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

选择山西省太原市、吕梁市及晋中市3个地级行政单位作为研究区。图1为研究区内水文气象及墒情站的分布情况。研究区共设有104个雨量站、9个墒情站和6个流量,收集了各站自有观测记录以来的日降水量、日最高、日最低气温及日平均流量作为本文的数据支持,其中大部分测站具有从20世纪50年代以来的实测气象资料系列,土壤墒情观测站都设在旱作区,部分站点设在白地,不受灌溉用水影响。研究区属于黄河流域的汾河水系,区域总面积44 213 km²,其中太原市面积6 878 km²,吕梁市面积20 988 km²,晋中市面积16 347 km²,研究区内主要农作物为小麦和玉米。

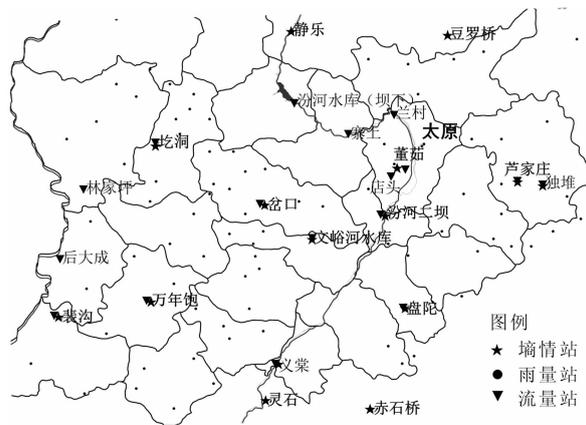


图1 研究区水文气象站点分布情况

1.2 VIC 模型

VIC 模型是由 Washington 大学及 Princeton 大学的研究者共同研制出的大尺度分布式水文模型,也称为“可变下渗容量模型”。模型考虑了大气-植被-土壤之间水分及能量的物理交换过程,在计算网格内考虑了裸地及不同的植被覆盖类型,考虑了积雪、融雪及土壤冻融等过程,且同时考虑了陆-气间的水量平衡和能量平衡过程,弥补了传统水文模型对能量过程描述的不足,在水文水资源及气候变化影响评价应用广泛。

VIC 模型考虑冠层截留蒸发、植被蒸腾和裸土蒸发3种蒸散发计算。采用 Penman - Monteith 公式计算日蒸发,比新安江模型少输入一项实测资料,因此对在缺少蒸散发资料的地区的应用上具有更好的优势。模型常用参数主要分为4类:气候地理参数、植被参数、土壤参数和水文参数。前面3类参数主要反映流域的自然气候条件及下垫面的土壤植被特性等,这3类参数经确定后就保持不变。在8个水文参数中,分别对基流非线性增长指数(C)和表层土壤厚度(d1)分别取2和0.1 m,其余6个参数需要采用流域观测的水文资料进行率定。由于其具有较强的物理基础,因此自研发以来,被广泛地应用于水文水资源模拟、气候变化影响以及土壤含水量的模拟研究中,在不同空间尺度的区域都有成功的应用^[4-11]。

在汾河流域运行4 km × 4 km 空间分辨率网格上运行VIC 模型,以1951 - 2010年的日降水、日最高气温及日最低气温资料作为模型的气象强迫资料,逐个网格计算蒸散发和产流,经汇流得到流域出口断面的流量,与实测值比较。本文将各子流域控制站1969年以前的实测流量系列作为VIC 水文模型参数的率定期和检验期,将率定和检验后的参数

保持不变,模拟1970年以后的流域水文过程。

2 结果分析

如何选取合适方法来比较模型输出的土壤含水量和实测含水量是很复杂的。因为模型计算的土壤含水量代表着模型计算尺度 16 km^2 网格的一个均值,而实测值仅代表某一小块实验地的含水量;且模型模拟的是一个网格内一天 24 h 的土壤含水量平均值,墒情监测站是参用多点平均法作为这一天的平均值,因此模拟和观测值之间的时间和空间尺度都很不一致,并且每个网格的土层厚度是不一致的。因此为了方便比较,对模型输出的土壤含水量进行垂向插值计算,选取整编后的实测土壤垂线平均含水量和模拟的垂线平均土壤含水量来相互比较。根据土壤墒情监测规范(SL364-2006)推荐标准,垂线土壤平均含水量为 10、20 和 40 cm 3 层土壤含水量作为垂线平均含水量的计算参考值。

考虑到模型模拟的土壤含水量和实测的土壤量之间的时空尺度差异,采用两者土壤含水量的距平来进行比较。主要步骤如下:首先,分别计算模拟和实测的土壤含水量的多年平均值;其次,将模拟和实测的土壤含水量分别减去其多年平均值,得到土壤含水量距平值;最后,比较模拟和实测土壤含水量距平的过程。将土壤含水量距平作为土壤干旱的一个指标,反映的是该地区当前土壤含水量状态与该区

多年平均含水量的差值百分比,是土壤当前相对正常态的水分亏缺或盈余,是一种相对干旱指数。

2.1 模拟结果

表1和图2为模型在研究区各子流域的各站率定期和检验期径流模拟过程及其性能指标统计。由于近年来研究区内的河川径流量受人类活动影响显著,而通常认为1969年以前河道径流受人为影响相对较小,可以近似认定为天然径流。因此,研究选取1969年以前的实测径流量作为模型的适应性检验标准。图2为研究区内后大成、林家坪和兰村等流量控制站点的历史月径流过程模拟结果。结合表1,可以看出,模型在各子流域对径流的模拟效果较好,月径流过程的Nash效率系数都在0.71以上,其中后大成和林家坪两个站的Nash效率系数在0.80以上,相对误差也控制在10%以内,因此从径流过程的模拟结果来看,VIC模型可以适用于研究区的水文循环过程模拟。

表2和图3为VIC模型对研究区各站点土壤含水量月过程模拟过程及其性能统计。从中可以看出,模型整体上都能较好的模拟各墒情站的土壤含水量变化过程,11个站的率定期平均相关系数为0.71,平均相对误差为0.47%;检验期平均相关系数为0.67,平均相对误差为0.52%。构建的模型可以用来模拟研究区的墒情变化过程。

表1 VIC模型在研究区子流域径流模拟的性能指标统计表

%

序号	水文站	水系	率定期			检验期		
			时间	相对误差	效率系数	时间	相对误差	效率系数
1	后大成	三川河	1958-1965	-2.3	0.85	1966-1969	-9.6	0.82
2	林家坪	湫水河	1954-1965	3.6	0.83	1966-1969	-4.3	0.81
3	裴沟	屈产河	1962-1966	6.1	0.72	1967-1969	3.4	0.69
4	芦家庄	潇河	1953-1965	-0.3	0.81	1966-1969	1.2	0.79
5	兰村	汾河	1951-1957	-4.5	0.75	1958-1959	5.5	0.71
6	义棠	汾河	1958-1965	7.2	0.82	1966-1969	2.4	0.80

2.2 土壤干旱

根据上述土壤墒情的模拟结果来看,建立的模型能够较好的模拟研究区土壤墒情的变化过程。因此,根据上述建立的土壤墒情模拟模型,利用实测站点与所在 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 网格之间的拟合关系,将率定好的水文模型参数移用到整个研究区,模拟研究区1970-2007年空间分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 网格逐旬的土壤含水量变化过程,分析研究区历史土壤干旱的发生

情况。

根据山西省防办的建议,结合研究区实际情况,采用土壤据对含水量标准来定义研究区各县的干旱情势。由于各区县的下垫面植被覆盖、土壤质地及类型的不同,各区县具体土壤含水量标准的划分范围也各异,具体标准范围见图4。其中寿阳县、祁县、太谷县、平遥县及榆次区的土壤含水量较低,为第一档;兴县、岚县、临县及方山的土壤含水量较大,为第四档。

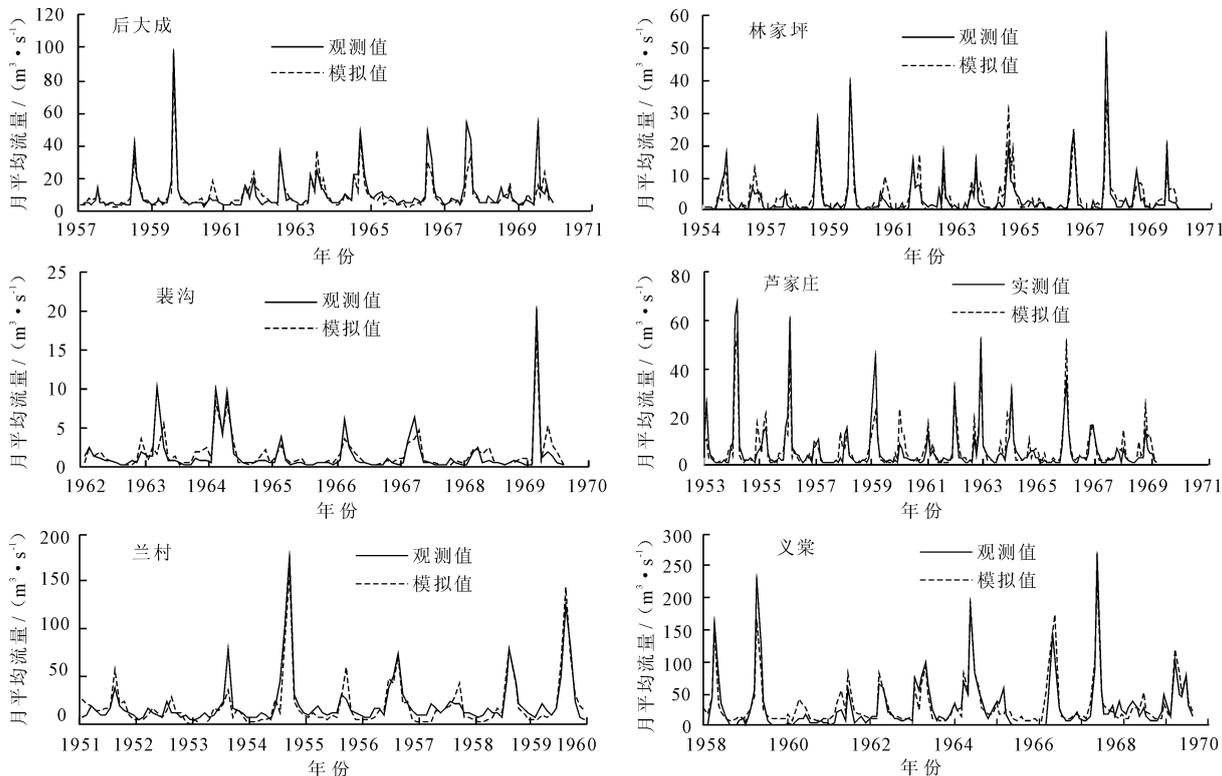


图 2 研究区内各典型子流域径流模拟结果

表 2 研究区各站历史土壤含水量模拟性能统计表

%

序号	墒情站	率定期			检验期		
		时间	相关系数	相对误差	时间	相关系数	相对误差
1	盘陀	2000 - 2005	0.82	-0.16	2006 - 2007	0.73	-1.71
2	义棠	2000 - 2005	0.78	0.35	2006 - 2007	0.76	0.61
3	文峪河水库	2000 - 2005	0.67	3.46	2006 - 2007	0.54	2.45
4	岔口	2000 - 2005	0.71	1.34	2006 - 2007	0.64	-3.26
5	董茹	2000 - 2005	0.74	2.13	2006 - 2007	0.76	2.41
6	汾河二坝	2000 - 2005	0.54	-3.12	2006 - 2007	0.62	1.54
7	静乐	2000 - 2005	0.72	1.43	2006 - 2007	0.68	3.21
8	独堆	2000 - 2005	0.69	0.13	2006 - 2007	0.63	-2.15
9	芦家庄	2000 - 2005	0.71	-1.26	2006 - 2007	0.71	1.54
	平均	2000 - 2005	0.69	1.48	2006 - 2007	0.67	2.09

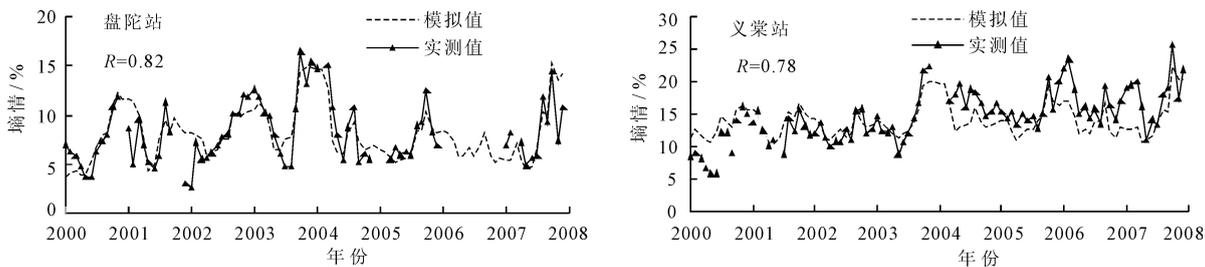


图 3 汾河流域盘陀和义棠站 2000 - 2007 年逐月土壤含水量模拟过程

由于干旱过程是发生在一年中某一段或几段时间,有连续或不连续的。在本研究中,年干旱级别定义为以各旬干旱为基础,某空间单元连续 4 个旬干旱等级之和等于 16,则该年为土壤发生特旱年;连

续 4 个旬干旱等级之和大于等于 12,且小于 16,则该年为土壤发生重旱年;连续 4 个旬干旱等级之和大于等于 6,且小于 12,则该年为土壤发生中旱年;连续 4 个旬干旱等级之和大于等于 3,且小于 6,则

该年为土壤发生轻旱年。具体划分标准见表3。



旱情程度	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱	县区	
土壤相对湿度标准	$W < 45$	$45 \leq W < 65$	$65 \leq W < 65$	$65 \leq W < 70$	$W \geq 70$		
土壤绝对含水量标准	1	$S < 7$	$7 \leq S < 8.5$	$8.5 \leq S < 10$	$10 \leq S < 11.5$	$S \geq 11.5$	寿阳县, 祁阳县, 太谷县, 平遥县, 榆次区
	2	$S < 9$	$9 \leq S < 11.5$	$11.5 \leq S < 13$	$13 \leq S < 16.5$	$S \geq 16.5$	太原市区, 阳曲县, 清徐县, 古交市, 娄烦县, 文水县, 汾阳市, 孝义市, 交口县, 介休市
	3	$S < 10$	$10 \leq S < 13$	$13 \leq S < 16$	$16 \leq S < 19$	$S \geq 19$	交城县, 离石区, 中阳县, 石楼县, 柳林县
	4	$S < 12.5$	$12.5 \leq S < 15.5$	$15.5 \leq S < 18.5$	$18.5 \leq S < 21$	$S \geq 21$	兴县, 岚县, 临县, 方山县

备注: W—土壤相对湿度, S—土壤绝对含水量

图4 研究区土壤干旱标准

表3 研究区土壤干旱年等级定义

干旱等级	标准
特旱年	$SUM(DM) = 16$
重旱年	$12 \leq SUM(DM) < 16$
中旱年	$9 \leq SUM(DM) < 12$
轻旱年	$3 \leq SUM(DM) < 6$
无旱年	$SUM(DM) < 3$

其中,特旱旬定义 DM 为 4;重旱旬定义 DM 为 3;中旱旬定义 DM 为 2;轻旱旬定义 DM 为 1;无旱旬定义 DM 为 0。SUM(DM)为连续 4 个旬的 DM 之和。

图5为研究区1990-2007年模拟土壤干旱指数与历史实际受旱率变化过程图。图5中立柱代表研究区1990-2007年历史实际的受旱率,红色实线代表模拟土壤干旱等级指标。从模拟的18年历史干旱结果来看,两者相关系数达到0.86,变化过程十分吻合。模拟的历史系列中,计算结果显示1999年土壤干旱指数最大,研究区各县年干旱等级平均达到了3.95;而来自山西省防办的统计信息显示,1999年为20世纪90年代以来山西省干旱最为严重的年份,1999年研究区24个县中有19个县发生了特大干旱,区域的平均受旱率达到了76.1%。说明建立的土壤干旱等级指数与实际旱情的发生发展和变化过程具有很好的相关性,能从一定程度上反映出实际干旱的发生过程。能够反映不同等级干旱的时空特征,精细刻画干旱的发生、发展和结束过

程,对土壤干旱的描述具有重要意义。

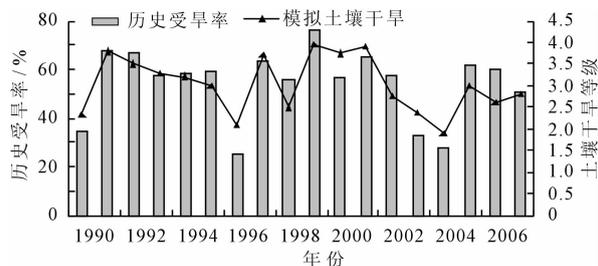


图5 研究区1990-2007年模拟土壤干旱指数与实际受旱率变化过程

3 结 语

(1)以汾河流域为例,构建了具有物理机制的考虑水分和能量平衡的VIC模型,模拟了流域的水文循环过程,结果显示模型能较好的模拟径流变化过程。根据研究区内各站点的月径流过程模拟结果可以看出,模型在各子流域对径流的模拟效果较好,月径流过程的Nash效率系数都在0.71以上,其中后大成和林家坪两个站的Nash效率系数在0.80以上,相对误差都在10%以内。

(2)模型整体上能较好地模拟研究区各站的土壤含水量变化过程,9个站的率定期平均相关系数为0.71,平均相对误差为0.47%;检验期平均相关系数为0.67,平均相对误差为0.52%。

(3)构建了基于土壤水分模拟的土壤含水量干旱指标模拟了研究区1990-2007年的土壤干旱变化过程。结果显示,建立的土壤干旱等级指数与实际旱情的发生发展和变化过程具有很好的相关性,能较好反映出实际旱情的发生过程。

采用基于考虑水分和能量平衡的VIC模型,根据土壤水分平衡原理逐日滚动模拟研究区土壤水分变化过程,物理意义清晰。构建的土壤干旱指数显示能够反映区域内不同等级干旱的时空特征,能够精细刻画区域干旱时空上的发生、发展和结束过程。本方法可为全面认识和监测干旱提供科学技术支持,对有效预防和减轻干旱具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4): 523-529.
- [2] 侯英雨,何延波,柳钦火,等. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志,2007,26(6): 892-897.

- 及污染源解析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 213 - 219.
- [6] Haith D A, Shoemaker L L. Generalized watershed loading functions for stream-flow nutrients [J]. Water Resources Bulletin, 1987, 23(3): 471 - 478.
- [7] Li X Y, Weller D E, Jordan T E. Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(3): 277 - 288.
- [8] Wu W, Hall C A, Scatena F N. Modelling the impact of recent land - cover changes on the 25 stream flows in north-eastern Puerto Rico[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(21): 2944 - 2956.
- [9] Tian P, Zhao G, Li J, et al. Integration of monthly water balance modeling and nutrient load estimation in an agricultural catchment[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2012, 9(1): 163 - 172.
- [10] Liu R M, Yang Z F, Shen Z Y, et al. Estimating nonpoint source pollution in the upper yangtze river using the export coefficient model, remote sensing, and geographical information system [J]. Journal of Hydraulic Engineering - Asce Engineering, 2009, 135(9): 698 - 704.
- [11] May L, House W A, Bowes M, et al. Seasonal export of phosphorus from a lowland catchment: upper river chervell in oxfordshire, England[J]. Science of the Total Environment, 2001, 269(1): 117 - 130.
- [12] Haith D A, Mandel R, Wu R S. GWLF: Generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual[J]. Dept. of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, 1992.

(上接第 18 页)

- [3] 吴志勇, 陆桂华, 张建云, 等. 基于 VIC 模型的逐日土壤含水量模拟[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 359 - 364.
- [4] 金君良, 陆桂华, 吴志勇. VIC 模型在西北干旱半干旱地区的应用研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(1): 12 - 14 + 24.
- [5] 陆桂华, 金君良, 吴志勇, 等. 水文模型植被参数获取方法及应用研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 47 - 52.
- [6] Wu Z. Y., Lu G. H., Wen L, et al. Thirty-Five year (1971 - 2005) simulation of daily soil moisture using the variable infiltration capacity model over China[J]. Atmosphere Ocean, 2007, 45(1): 37 - 45.
- [7] 金君良, 王国庆, 刘翠善, 等. 大尺度分布式水文模型 VIC 在嘉陵江流域径流模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 55 - 58 + 63.
- [8] Wang G Q, Zhang J Y, Jin J L, et al. Assessing water resources in China using PRECIS projections and a VIC model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(1): 231 - 240.
- [9] Zhang J Y, Wang G Q, Pagano T C, et al. Using hydrologic simulation to explore the impacts of climate change on runoff in the Huaihe River Basin of China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1393 - 1399.
- [10] Zhenxin Bao, Jianyun Zhang, Jiufu Liu, et al. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro - climatic conditions[J]. Journal of Hydrology, 2012, 466: 37 - 46.
- [11] 金君良, 王国庆, 刘翠善, 等. 黄河源区水文水资源对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 137 - 143.