

典型泥石流流域蒋家沟的降雨—径流模拟

郭晓军^{1,2}, 崔鹏^{1,2}, 朱兴华^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过实际观测, 获得蒋家沟流域近 2 a 的径流资料, 总结出 2008—2009 年间径流的年内特征。通过收集蒋家沟流域土壤、土地利用和气象数据, 用 SWAT 模型模拟了蒋家沟流域的基流月径流模拟和日径流变化。基流月模拟中旱季的模拟效果比较好, 汛期由于泥石流暴发时无法观测流量, 导致实测资料不完整, 模拟结果比较差。日径流模拟分为旱季和汛期模拟, 模拟结果的 Nash 效率系数和相关系数都在 0.7 以上, 表明 SWAT 模型可以应用于泥石流流域蒋家沟地区的降雨—产流机制研究。

关键词: 径流特征; SWAT 模型; 泥石流; 蒋家沟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0175-05

中图分类号: S157.4

Flow Simulation in a Typical Debris Flow Basin of Jiangjia Canyon

GUO Xiao-jun^{1,2}, CUI Peng^{1,2}, ZHU Xin-hua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The flow data of Jiangjia Canyon from 2008 to 2009 was collected and annual variations of the stream flow were analyzed. A database of soil, land use and meteorological parameters was built based on the field survey and experiments, and monthly flows and daily flows were then simulated using the SWAT model in the canyon. The simulations of monthly flows were relatively better in the dry seasons than in the rain seasons, owing to the lack of observations during the rainy seasons when debris flows frequently occurred. Daily flows were simulated separately for the dry seasons and the flood period. The Nash efficiency and correlation coefficients of daily flow simulation in both rain season and dry season were higher than 0.7, which implies that the model can be successfully used in this area. This paper contributes to the study of rainfall-runoff mechanism in Jiangjia Canyon.

Keywords: flow characteristics; SWAT model; debris flow; Jiangjia Canyon.

SWAT(soil and water assessment tool)模型是美国农业部(USDA)的农业研究中心(ARS)研发的基于尺度的一个长时段的分布式流域水文模型^[1], 用来模拟预测在具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的复杂大中流域土地管理措施对水、沙、化学物质等的长期影响^[2]。虽然我国是近几年才开始引进 SWAT 模型, 但由于该模型功能强大, 能进行长时间的模拟, 因此在国内也很快被普遍接受, 被广泛应用于径流模拟、土壤侵蚀、污染物运移等领域。朱利等^[3]应用 SWAT 模型研究了汉江上游区径流对气候变化的响应, 指出汉江上游区的降水变化对水资源的

影响大于气温变化对水资源的影响。张雪松等^[4]在卢氏流域(4 623 km²)应用 SWAT 模型进行中尺度流域的产流产沙模拟试验, 得出该模型在长期连续径流和泥沙负荷模拟中具有较好的适用性。随着应用的广泛, SWAT 模型也逐渐被改进并应用于小流域径流产沙模拟, 郝芳华等^[5]将 SWAT 模型用于洛河流域的径流模拟, 取得了可信的效果, 随后张海斌^[6]将 SWAT 模型应用于三峡地区张家冲小流域的产流产沙, 也取得了较好的结果。本文在蒋家沟观测数据的基础上, 应用 SWAT 模型对降雨—径流进行模拟, 对该地区洪水预测和产流机制进行了研究。

收稿日期: 2010-05-05

修回日期: 2010-07-30

资助项目: “973”国家重点基础研究项目“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(2008CB425802); 国家自然科学基金项目“分布式单沟泥石流预报模型”(06K1100100)

作者简介: 郭晓军(1985—), 男(汉族), 山西省运城市人, 硕士, 主要研究方向为山地水文学。E-mail: sblong2003@yahoo.com.cn.

蒋家沟是长江上游金沙江支流小江右岸的一条支沟,自东向西汇入小江,主要支沟有门前沟、多照沟、大凹子沟、查菁沟和老蒋家沟等。主沟长 13.9 km,流域面积 48.52 km²。位置介于东经 103°06′—103°13′,北纬 23°13′—23°17′之间,自东向西汇入小江,流域最高海拔 3 269 m,最低海拔 1 041 m。

蒋家沟流域位于滇东北高山峡谷区,是著名的泥石流多发沟,地形的显著特点是沟深坡陡,流域平均坡度为 43°,坡度在 30°~68°之间的土地面积占总面积的 60%以上;流域内由于长期过度砍伐、放牧,导致区域内山坡林草覆盖率较少。2006 年时林地约占流域总面积的 11.5%,灌丛约占总面积的 5.22%,草地约占总面积的 31.2%,农田约占总面积的 28.2%,裸露荒地约占总面积的 16.1%。流域内气候干湿季分明,垂直气候带明显,每年 11 月至翌年 4 月为旱季,6—10 月为雨季,暴雨中心多出现在海拔 2 500~3 000 m 的地带。从河谷到分水岭可分为 3 个区:海拔 <1 600 m 为亚热带干热河谷区,年降雨量 600~700 mm,植被稀疏,是蒋家沟泥石流堆积区;海拔 1 600~2 200 m 之间为亚热带、暖温带半湿润区,年降雨量 700~850 mm,是蒋家沟泥石流固体物质主要源区;海拔 >2 200 m 为温带湿润山岭区,年降雨量 1 200 mm,植被覆盖率较高,是蒋家沟泥石流水源汇流区。随着海拔的上升,湿度增大,蒸发与气温下降,植被呈现出明显的垂直地带性,从低到高共有 3 带,分别为稀疏灌草丛带、针阔叶混交林带和高山草甸带^[7]。

1 蒋家沟径流观测与特征分析

蒋家沟是世界著名的泥石流沟,其泥石流暴发历时,规模大,种类齐全,因此有“泥石流博物馆”之称。长期以来,中国科学院及其它科研单位的学者以东川泥石流观测研究站为基地,对蒋家沟的泥石流进行了长期细致的研究。

在该站专家和工作人员的努力下,近年来大多数泥石流的基本特征包括规模、流速、容重等都被详细记载,但由于条件的限制,有关蒋家沟流域径流方面

的研究却很少有人进行。降雨—径流的研究对泥石流,尤其是泥石流起动的研究有着非常重要的意义。由于蒋家沟沟道内除了暴发泥石流之外,很少有大规模的洪水发生,而泥石流暴发时往往淹没河道,无法实测出其最大洪水径流量。即便是平时不爆发泥石流的时候,由于河道变迁无常,断面不稳定等因素,也很难用常规的水文方法对其水文特征进行长期观测。作者从 2008 年夏季开始,用浮标法对蒋家沟的流量进行了详细观测,旱季一周 2 次观测,汛期不发泥石流时,每日一测。经过 1 a 的努力,基本掌握了 2008—2009 年内和 2009—2010 年 3 月之间非泥石流时期蒋家沟的径流量等基本水文资料(见图 1)。

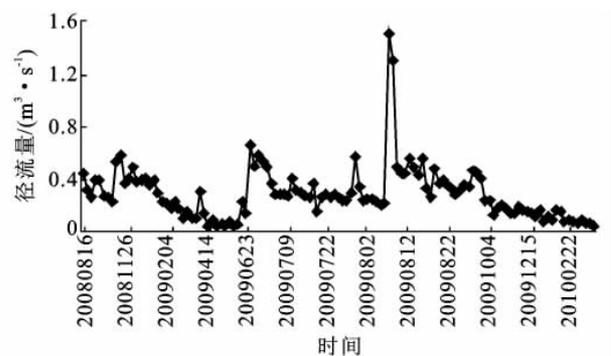


图 1 蒋家沟 2008—2010 年日径流变化

蒋家沟流域的水文情势受该地区气象和地质地貌条件影响很大。虽然它的主要支沟都有常流水,但年内分配很不均匀。本文主要采用年内不均匀系数(C_{vy})、相对变化幅度(C_m)、绝对变化幅度(ΔQ)、汛期—非汛期占年径流的百分比等指标来描述该流域的年内变化特征(见表 1)。

(1) 不均匀系数。本文采用不均匀系数来衡量蒋家沟年内径流分配的不均匀性,计算公式如下:

$$C_{vy} = \sigma / \bar{x} \quad (1)$$

其中 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (x_i - \Delta Q)^2}$, $\bar{x} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} x_i$

式中: x_i ——年内各月径流量 ($i = 1, 2, \dots, 12$); \bar{x} ——年内月平均径流量。不均匀系数越大,说明年内分配越不均匀。

表 1 蒋家沟流量的年内变化特性

径流特征	特征值	径流特征	特征值
年平均径流量/(m ³ ·s ⁻¹)	0.288	年径流标准差	0.188
流量年内不均匀系数	1.510	流量日相对变化	32.950
流量年内相对变化幅度	7.410	流量年内绝对变化幅度	0.400
汛期占径流百分比	0.420	非汛期占径流百分比	0.580

(2) 变化幅度。蒋家沟是一条山区小流域,因此本文采取两个指标来衡量河川径流的变化幅度。相对变化幅度 C_m ,取河川径流最大月流量(Q_{\max})和最小月流量(Q_{\min})之比;绝对变化幅度 ΔQ 取最大最小月河川径流之差,定义如下:

$$C_m = Q_{\max} / Q_{\min} \quad (2)$$

$$\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min} \quad (3)$$

2 SWAT 模型在蒋家沟的应用

在 SWAT 模型的应用中,数据库的建立和参数的调整是关键,通过野外考察和野外试验确定了数据库中所需要的数据,建立了 SWAT 数据库,并在此基础上调整了参数。

2.1 数据库的建立

SWAT 模型需要的数据包括数字高程模型 (DEM)、土地利用和土地覆盖 (LUCC)、土壤分类和土壤属性数据、气象数据等。

蒋家沟地区的土地利用类型主要有林地、草地、坡耕地、裸地、滑坡崩塌体、泥石流滩地等 15 种,通过 GIS 将土地利用类型的编码进行转换,使其重分类为 SWAT 能识别的 9 种类型,详见附图 2。土壤类型主要有砾石土、燥红土、红黄壤 3 种^[8](见图 2)。其中砾石土是由红黄壤演化而成,主要分布于滑坡崩塌体和泥石流滩地,由于其下渗特征与红黄壤有较大差异,因此本文将作为一种独立的土壤类型来研究。

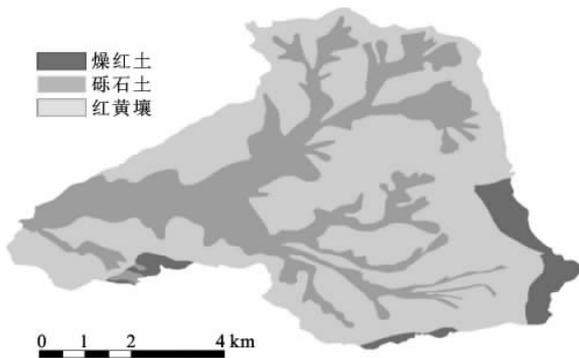


图 2 蒋家沟土壤类型分布

蒋家沟流域内有 9 个雨量站,分别分布在观测站、上巴子、弯房子、陈家梁子、蚂蚁坪、银洞、李家丫口、背阴山、阴家凹 9 个站点。这 9 个站点在布设时一定程度上考虑了分布位置、海拔高度等因素,因此对该地区的山区降雨具有很强的代表性。降雨采用这 9 个气象站的数据进行插值,气象资料采用蚂蚁坪气象站 2007—2010 年收集的气象数据。

2.2 水文响应单元划分

模型根据蒋家沟地区的地貌,将流域划分成 27

个子流域(见图 3)。加载土地利用图、土壤类型图,再进行重分类,对坡度进行分类之后,将 3 个图层叠加,模型会根据不同的土壤、土地利用和坡度将流域划分成多个水文响应单元(HRUs),每个水文响应单元内土地利用、土壤类型和坡度相同,因此产流机制相似。蒋家沟流域被划分成 1 588 个水文响应单元。

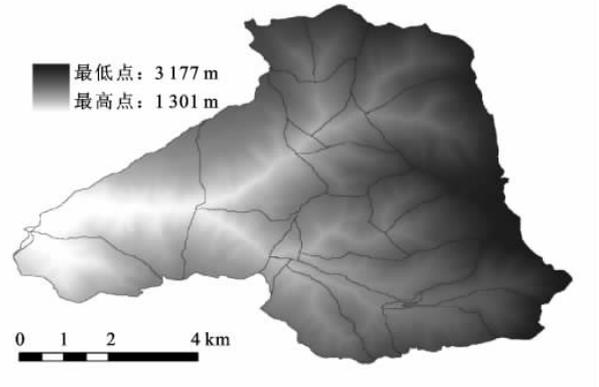


图 3 蒋家沟子流域分布图

2.3 参数敏感性分析和率定

对参数进行敏感性分析,选取 5 个敏感性等级最高的参数,进行模型率定。调整过程中,先调整月径流,再调整日径流,先调整基流,再调整直接径流。

对蒋家沟径流模拟比较敏感的参数(大小排序)依次是土壤蒸发补偿系数 ESCO,土壤可利用水量 SOL_AWC,正常水分条件下的径流曲线数 CN_2 ,基流消退系数 ALPHA_BF,地下水再蒸发系数 GW_Revap。其中正常水分条件下的径流曲线数 CN_2 对地面产流的敏感度最高,而土壤蒸发补偿系数 ESCO,土壤可利用水量 SOL_AWC,基流消退系数 ALPHA_BF,地下水再蒸发系数 GW_Revap 等参数对基流的影响较大。由此可以看出,相比于一般坡面产流比较丰富的流域,蒋家沟流域地下产流的比例相对较大。

CN_2 是 SCS 产流模型中的最重要的参数,它是流域内土地利用方式、水文土壤类型、耕作管理措施、水文条件、前期水分状况等因素的综合反映。 CN_2 值越大,产生直接径流的可能性越大,理论上 CN_2 值的取值范围是 0~100。土壤蒸发补偿系数(ESCO)是模型调整不同土壤层间水分补偿运动的参数,该系数与产流量成反比关系。土壤可利用水量 SOL_AWC 也与产流量呈反比关系,它是反映土壤从田间持水量减去植物永久凋萎点之间的水分的参数。基流消退系数 ALPHA_BF 是反映基流消退时间长短的参数。地下水再蒸发系数 GW_Revap 是反映地下水蒸发能力的参数。

根据模型参数敏感性分析的结果,对径流过程敏感性的参数进行校正,其目的是为了使得模拟结果与实测径流量更加接近,提高模拟精度。最终参数见表 2。

表 2 蒋家沟流域径流模拟模型的主要参数取值

参数名称	取值范围	参数值
土壤蒸发补偿系数	0~1	0.382
土壤可利用水量	0~1	0.267
径流曲线数 CN_2	30~99	58.104
基流消退系数	0~1	0.582
地下水再蒸发系数	0~1	0.410

2.4 径流模拟及其验证

采用 Nash—Sutcliffe 模拟效率系数 Ens , 相关系数 R^2 和相对误差来对模型的验证结果进行评价。 Ens 越大, 相关系数 R^2 越高, 表明模拟效率越高。如果 $Ens < 0$, 说明模型模拟值比实测值可信度更低, 通常取 $Ens > 0.5$ 作为径流模拟效率的评价标准^[9]。

$$Ens = 1 - \frac{\sum_i (Q_i - Q_j)^2}{\sum_i (Q - \bar{Q}_c)^2} \quad (4)$$

式中: Q_i, Q_j ——实测径流量和模拟径流量; \bar{Q}_c ——平均实测径流量。

相关系数在 MS-EXCLE 中应用线性回归法求得, 是实测径流流量和模拟径流流量相关程度的比较, 越接近 1, 表明两者越相关。

(1) 月径流模拟。蒋家沟流域的水文观测起步较晚(2008 年雨季), 实测径流资料序列比较短, 因此本文中的月径流模拟用 2008 年 9 月至 2009 年 8 月的实测径流资料来率定, 用 2009 年 9 月至 2010 年 3 月的实测径流资料来验证。率定期模拟结果见图 4。

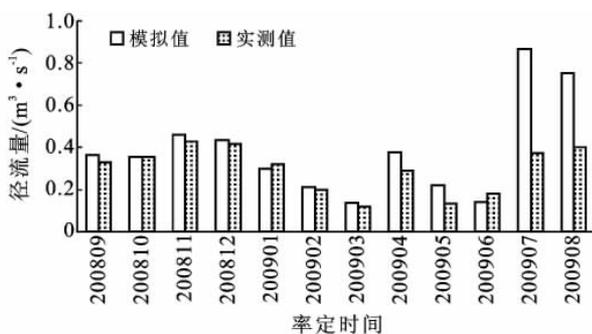


图 4 率定期月径流模拟

如图 4 所示, 旱季(2008 年 9 月至 2009 年 5 月)的模拟效果比较好, 相对误差在 16.7% 左右, 但雨季的模拟效果并不理想, 这是由于蒋家沟雨季的实测月径流资料的不完整造成的。在雨季中, 泥石流暴发之后数日内无法进行径流观测, 也无法获得大洪水的流量过程线, 因此实测资料比真实值偏小。

验证期模拟效果见图 5, 相对误差为 17.2% 左右, $Ens = 0.793$, 相关系数 $R_c = 0.90$ 。

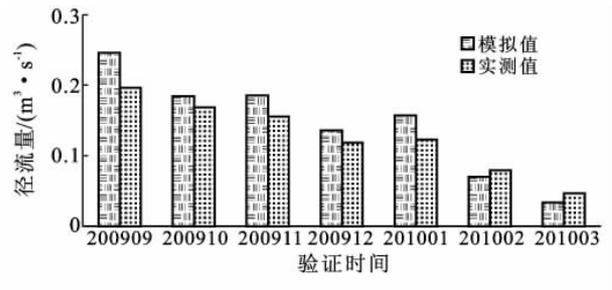


图 5 验证期月径流模拟

(2) 日径流模拟。将 2007 年 9 月至 2008 年 8 月的气象数据用于模型进行预运算。由于旱季实测径流时, 测取的是未降雨时的径流数据, 即基流数据; 雨季由于降雨导致泥石流暴发, 无法测取暴雨时的洪峰流量, 也就无法划分洪水基流。因此本文将旱季和雨季分开模拟。

采用 2008 年 9 月到 2009 年 6 月之间的径流数据进行旱季基流率定, 采用 2009 年 9 月到 2010 年 3 月的数据进行基流验证。采用 2009 年 7 月的实测径流资料进行汛期的日径流率定, 采用 2009 年 8 月的实测径流资料进行汛期的日径流验证。模拟和验证结果为: 旱季模型率定相对误差为 26.4%, $Ens = 0.884$, 相关系数 $R_c = 0.858$; 旱季模型验证相对误差为 13.5%, $Ens = 0.740$, 相关系数 $R_c = 0.866$; 汛期模型率定相对误差为 22.6%, $Ens = 0.710$, 相关系数 $R_c = 0.861$; 汛期模型验证相对误差为 31.2%, $Ens = 0.700$, 相关系数 $R_c = 0.710$ 。

3 结论

通过在泥石流流域蒋家沟进行长期实地观测, 获取了 2008—2010 年之间非泥石流时期的径流资料, 总结了 2008—2009 年一整年的径流年内变化特征, 在此基础上利用 SWAT 模型模拟研究了该地区径流对降雨的响应。

利用 GIS 将蒋家沟流域划分成 27 个子流域; 通过对地形地貌的实地考察, 根据模型的需要, 将该地区的土地利用类型和土壤类型进行重分类, 建立了土地利用数据库和土壤数据库; 整理了该地区 2007—2010 年的气象资料, 建立了气象数据库。在此基础上, 将流域划分为 1 588 个水文相应单元。

对影响蒋家沟流域产流的参数进行了敏感性分析和调整。从参数的敏感性来看, 影响蒋家沟地区产流的参数中, 土壤蒸发补偿系数 $ESCO$ 、土壤可利用水量 SOL_AWC 比地表径流的径流曲线数 CN_2 更为敏感, 反映了在该地区产流中地下径流的作用比一般流域大。同时, 地表径流的径流曲线数 CN_2 参数值

调整为 58,也反映该地区的产流特点,即地表径流的作用相对较小。

利用该地区气象资料进行了月基流模拟和日径流模拟。基流月模拟中旱季的模拟和验证效果比较好,相对误差都在 20%以内,但汛期由于实测资料的不完整(泥石流暴发时无法观测流量),导致模拟结果偏小。由于雨季实测数据的不连续,本文对旱季和雨季分别进行日径流模拟,模拟和验证结果的 Nash 效率系数和相关系数均在 0.7 以上,表明了在该流域内数据充分的情况下,SWAT 模型可以用来模拟该地区的日径流。

泥石流沟道本身的特殊性,使得实测径流资料的获取难度极大。蒋家沟是典型的泥石流流域,虽然长期以来在东川泥石流观测站的支持下,泥石流的流量等资料被详细记载,但河道的径流量数据却从未被观测过。本文作者虽然通过实际观测,最终获得了 2008—2010 年没有泥石流暴发时的径流数据,但由于受泥石流活动的影响,所得的径流数据,尤其是汛期的径流数据误差相对较大,序列不连续,导致在模拟过程中,作者只能将旱季和雨季分开进行模拟。因此,本文的模拟结果仅供参考。

由于实测资料序列有限,本文的径流模拟结果对说明该地区的水量平衡、污染物运移等问题有较大的局限性。但对于泥石流多发流域而言,首要的课题是泥石流的启动、运动以及防治等问题的研究,其中泥石流启动是泥石流研究的基本问题。从根本上讲,泥石流的启动与该地区的产汇流过程是分不开的,因此水文过程的研究对泥石流的研究有着很重要的意义。由于径流资料难以实测获取,目前对于泥石流多发地区的洪水径流和泥石流流量的研究只停留在估算阶段,误差比较大,也很难从过程上分析和解释降雨对泥石流的影响。本文从径流模拟的角度对该地区的产流特点进行了分析,为研究该地区降雨响应下的水文过程及其对泥石流启动和汇流的影响做出了贡献。

泥石流多发地区下垫面的特点是具有很厚的泥石流堆积体土壤层,这种土壤具有很大的孔隙度,蕴藏着丰富的土壤水。同时,这些地区宽级配土壤的下渗率较大,降雨时,很少产生较大规模的地表径流,地下径流在产流中的比例相对于一般流域来说比较大。因此如果能在径流模拟的基础上对该地区的下渗、壤中流和地下径流的产汇流机制进行进一步研究,将从机理上解释泥石流多发地区的水文过程,进而从水文过程的角度解释泥石流的启动和运动。

[参 考 文 献]

- [1] Romanowicz A A, Vancloster M, RouEnsvell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data para-metrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1):27-39.
- [2] Neisch S L, Aronld J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation: version 2005[M]. TX: Grassland Soil Water Research Laboratory, 2005:101-105.
- [3] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4):38-42.
- [4] 朱利,张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化的响应研究[J]. 资源科学, 2005, 27(2):16-22.
- [5] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型:理论与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [6] 张海斌. 基于 SWAT 模型的小流域产沙产流的研究:以三峡地区张家冲小流域为例[D]. 武汉:华中农业大学, 2006.
- [7] 邹翔. 小江流域的土壤侵蚀特征与机理[D]. 成都:中国科学院成都山地灾害与环境研究所,2003.
- [8] 林永明. 金沙江小流域景观格局变化与土壤侵蚀的耦合作用:以云南蒋家沟为例[D]. 成都:中国科学院成都山地灾害与环境研究所,2008.
- [9] 盛春淑,罗定贵. 基于 AVSWAT 丰乐河流域水文预测[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9):493-496.