

应用欧洲分布式 WaSiM-ETH 模型模拟中国南方 亚热带农业小流域水文过程*

王毅^{1,2} 张斌^{1,3†} Harald Zepp⁴

(1 农业可持续利用国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

(3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部作物营养与施肥重点开放实验室,北京 100081)

(4 德国鲁尔大学地理学院,波鸿 D-44780,德国)

摘要 选择具有南方亚热带农业小流域典型代表性的江西省孙家小流域,运用 WaSiM-ETH 分布式水文模型,模拟了该农业小流域的水文过程,并在流域尺度上估算了壤中流流量。研究表明,虽然孙家小流域土地利用方式多样,水文过程复杂,但是 WaSiM-ETH 模型仍显示了相当高的准确性。WaSiM-ETH 模型模拟孙家小流域出口年径流量的相对误差为 3.7%~4.3%,决定系数(R^2)高达 0.96。在模型模拟的 2002 年—2003 年期间,孙家小流域年蒸散量为 672~804 mm,占年降雨的 39.6%~52.5%;小流域壤中流年径流量为 542~666 mm,占年降雨输入的 35.4%~39.2%,高于地表径流的 8.8%~21.4%。这说明 WaSiM-ETH 模型在该地区流域水文过程模拟方面具有很高的适应性,其不仅能够准确模拟南方亚热带农业小流域的地表水文过程,同时还能在流域尺度上估算壤中流流量。

关键词 WaSiM-ETH 模型;流域水文过程;蒸散量;地表径流;壤中流

中图分类号 P333.1 **文献标识码** A

小流域是研究地表水文的自然单元,其水文过程与生态功能紧密相关。监测、模拟和预测小流域水文过程是近年来水文研究的一个重要内容^[1]。饱和/非饱和的壤中流在农业小流域中是一个普遍的水文过程,同时它也被认为是养分和污染物迁移的主要途径之一。雷晓辉等认为^[2],流域中洪水和枯水对土地利用变化响应的差异是通过饱和流和非饱和流过程的变换产生的。要评价农业生产中施用肥料和农药的时间和数量对地下水和地表水的影响,就必须定量估算饱和/非饱和壤中流^[3]。虽然学界已经建立很多系统和发展了不同方法量化壤中流过程,但由于估算方法的不足和估算尺度的差异,壤中流流量的估算在现阶段仍然是水文研究中的一个难题。到目前为止,对壤中流流量的田间观测还只停留在实验小区的尺度上^[4-5],而流域尺度上的壤中流的量化估算更多地是采取图形分割方法和模型模拟方法^[6]。

WaSiM-ETH(Water Flow and Balance Simulation

Model)模型是基于亚流域空间单元建立的具有物理意义的分布式水文模型^[7],由瑞士苏黎世联邦理工学院(der ETH Zürich)地理学院(今为大气与气候科学学院)的 Jörg Schulla 在 1994 年—1996 年期间开发完成^[7]。WaSiM-ETH 模型已经在全世界超过 50 多家大学、研究所、政府部门得到广泛应用,但国内还没出现 WaSiM-ETH 模型应用的范例。与比较流行的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型相同,WaSiM-ETH 模型也要求提供流域的特定要素(包括气象、土壤属性、地形、植被、土地管理措施),但 WaSiM-ETH 模型运行的时间步长可变,不仅可以模拟单次降雨事件,也可以连续长时间模拟。因此,与 SWAT 模型相比,WaSiM-ETH 模型更适合模拟降雨事件中发生的壤中流过程。此外,WaSiM-ETH 模型在计算程序上引入了一些 SWAT 模型不具备参数,比如土壤排水密度(dr),使其量化壤中流过程成为可能^[8]。

我国南方亚热带红壤丘陵地区的农业土地利

* 国家自然科学基金项目(40701071 和 40801101)、德国科学研究会项目(ZE 254/4)和欧盟 SoilTrEC 项目(244118)资助

† 通讯作者,E-mail:bzhang@caas.ac.cn

作者简介:王毅(1983—),男,博士,从事土壤物理学和生态水文学研究工作,现工作单位为中国科学院亚热带农业生态研究所。

E-mail:wangyi@isa.ac.cn

收稿日期:2011-07-14;收到修改稿日期:2012-04-06

用方式复杂多样,从而导致了该地区径流过程、水土流失机制、土壤水文过程以及养分和污染物迁移规律的复杂性^[9]。最近一些监测研究表明,我国南方农业小流域中壤中流及其环境效应不容忽视^[3]。本研究以江西余江县的一个典型性农业灌溉小流域(孙家小流域)为研究对象,运用 WaSiM-ETH 模型模拟该流域水文过程,并估算该小流域壤中流流量。本研究结果对理解南方亚热带红壤丘陵地区农业小流域水文过程及其与水文环境的关系,评价和优化土地利用方式,减少环境危害具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域和水文监测

研究区域地处武夷山区向鄱阳湖平原的过渡地段,位于江西省余江县境内,距离中国科学院红壤生态研究站约 5 km 的孙家小流域(图 1)。该地区气候温暖湿润,年均温 17.7℃,年降水量 1 795 mm,年蒸发量为 1 229 mm,但降雨和蒸发季节分布不均,雨季(4 月-6 月)约占全年降水的 50%,而 7 月-9 月蒸发量接近全年降水的 50%,蒸发量大于降水量常造成伏秋旱。该小流域为低丘岗地地形,海拔 37~56 m,坡度 3°~8°,面积 46 hm²^[10]。小流域水文单元完全封闭,东面和北面边界由灌溉沟渠间断,西边界由接近地形分水岭的水泥马路间断,南边界由水泥马路和地形分水岭间断。小流域土壤母质为第四纪红黏土与红砂岩,依据世界土壤资源参比基础(WRB)^[11],发育自第四纪红黏土的旱地土壤为始成土和强淋溶土,发育自红砂岩的土壤为始成土,稻田为人为土(水稻土)。

小流域按照地表沟渠和集水区的等级共建立 6 个观测围堰(图 1)。由于各观测位置流量的差异,各观测位置围堰的建设方法也不尽一致,其中灌溉水的进水口围堰(No. 1 和 No. 2)、灌溉渠的出口围堰(No. 3)、小流域的地表水出口围堰(No. 4)均为矩形侧缩堰,而子流域中(No. 5 和 No. 6)采用的是 V 型三角堰。围堰安装有水位计(Keller, PR-56W, Switzerland),每 10 min 记录一次围堰中水位高度。围堰中水流流速采用流速仪法(OA 型直读式多功能测速仪,南京水利科学研究所瑞迪高新技术公司)、盐分扩散法标定^[12]。孙家小流域为农业灌溉小流域,灌溉水量由 No. 1、No. 2 和 No. 3 围堰观测数据确定。

降雨量监测采用 JDZ(05)-1 型翻斗式雨量传感器(精度 0.5 mm)(南京水利水文自动化研究所防汛设备厂),设置在小流域中心的花生单作试验地上。其与数据采集器(Delta-T Ltd, Cambridge, UK)连接,每 10 min 自动记录一次降雨量。小流域的其他气象观测数据则从距离该小流域约 5 km 处的红壤生态研究站获得。

1.2 WaSiM-ETH 模型

WaSiM-ETH(V7.5)模型产流过程见图 2。WaSiM-ETH 模型除一些具有较强物理意义的土壤参数、土地覆盖类型参数、地理特征参数、气象参数、融雪径流参数、地下水参数等外;还具有一些不具有实际物理意义的经验系数参数,如土壤排水密度 d_r 等,这增加了模型的操作性,有利于壤中流过程的模拟。在 WaSiM-ETH 模型中,入渗过程的计算采用的是在 Green-Ampt 方法基础上改进的 Peschke 方法^[13-14]。土壤水分特征曲线的描述采用 van Genuchten 方程^[15];土壤水动力学的计算采用 Richards 方程^[16]。WaSiM-ETH 模型共有 3 种方法计算潜在蒸发散量,包括 Penman-Montieth 方法^[17]、Wendling 方法^[18]和 Hamon 方法^[19],本研究采用的是 Penman-Monteith 方法。

在 WaSiM-ETH 模型中,壤中流产生的前提条件是壤中流发生土壤层次中的水吸力必须小于 3.45 m,然后在土壤水力学性质、水分入渗阻力、前期含水量和水力梯度的基础上估算壤中流流量。整个计算过程分三步进行。首先,计算某一降雨事件中可能产生的壤中流最大流量($q_{ifl,max}$):

$$q_{ifl,max} = (\theta(\psi) - \theta_{\psi=3.45}) \times \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, $\theta(\psi)$ 为水吸力在 (ψ) 时土壤含水量 [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]; $\theta_{\psi=3.45}$ 为水吸力在 3.45 m 时的土壤含水量 [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]; Δz 为壤中流发生土壤层次厚度 [m]; Δt 为时间步长 [s]。

然后,模型在土壤水力学性质,河网密度和水力梯度分布的基础上,计算该降雨事件中可能产生的壤中流(q_{ifl})流量:

$$q_{ifl} = k(\theta) \times \Delta z \times d_r \times \tan\beta \quad (2)$$

式中, k 为导水率 [m s^{-1}]; θ 为土壤含水量 [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]; d_r 为土壤排水密度 [m^{-1}],该参数考虑到了河网密度和土壤导水率的各向异性; $\tan\beta$ 为坡度(假如 $\beta > 45^\circ$, β 则固定为 45°)。

最后,比较 $q_{ifl,max}$ 和 q_{ifl} 的大小,二者中较小的值为该降雨事件中产生的壤中流流量。

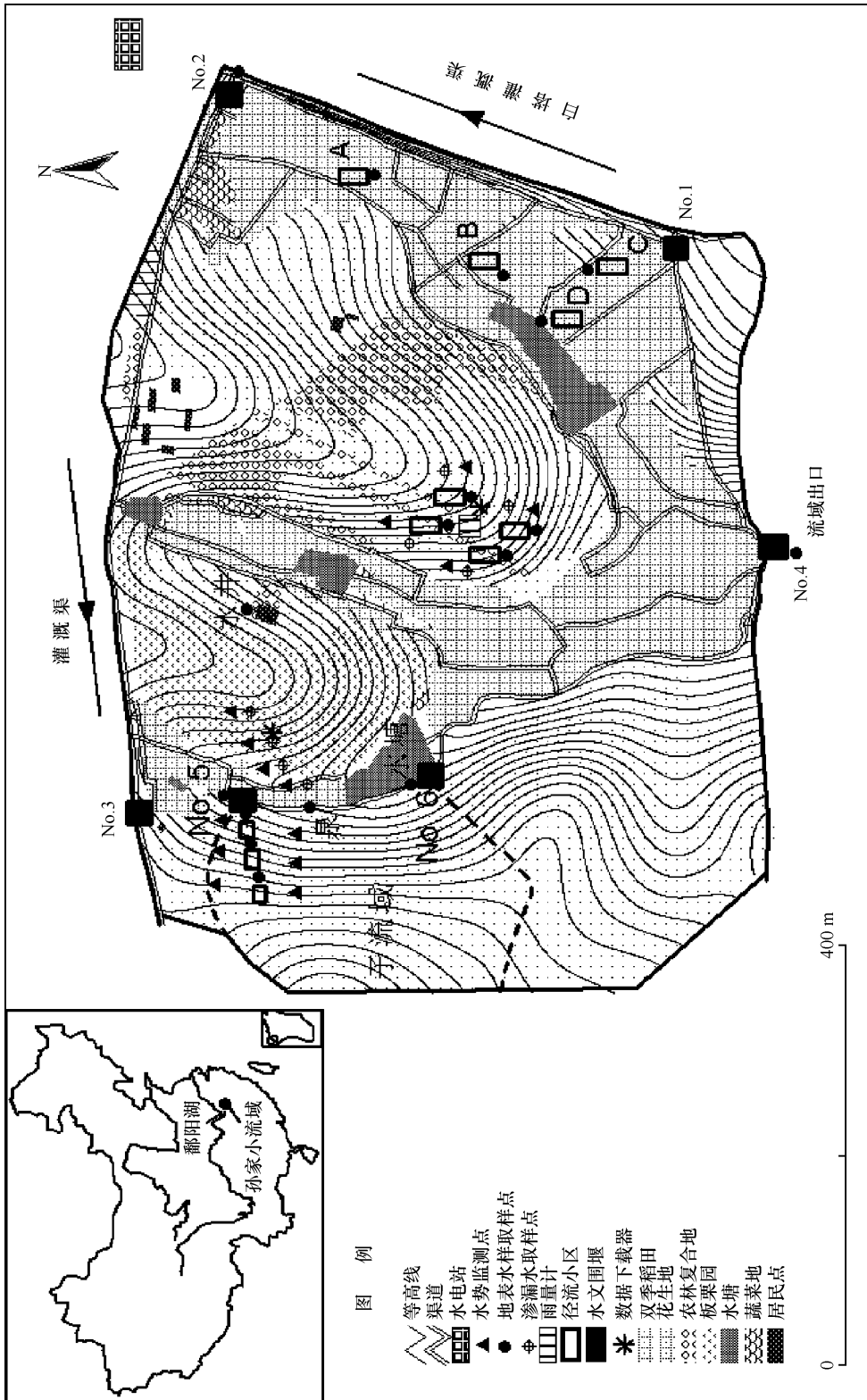


图1 孙家小流域生态水文监测图^[3]
Fig. 1 Sketch of instrumentation of Sun Jia catchment^[3]

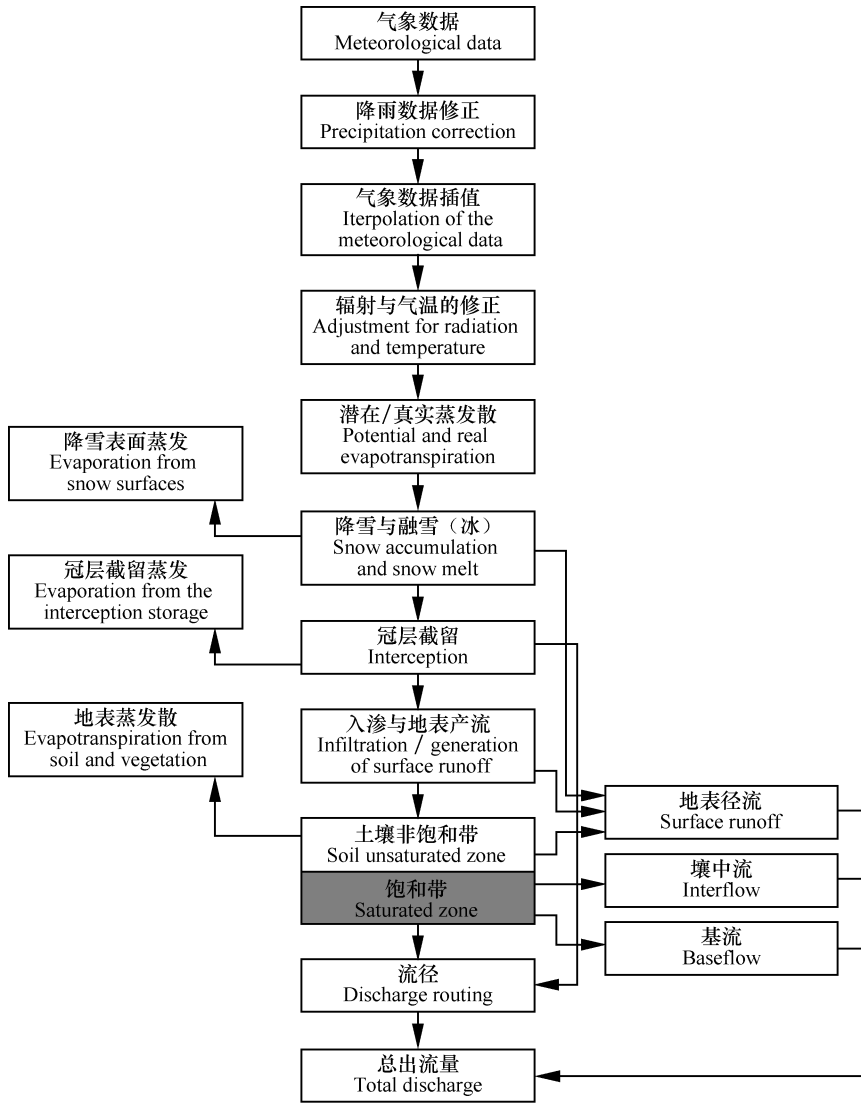


图2 WaSiM-ETH 模型的结构^[7]

Fig. 2 Model structure of WaSiM-ETH^[7]

1.3 模型参数率定和优化

在水文模拟研究中,通常情况下将使用的资料系列分为两部分,一部分用于建立初始模型和模型参数优化,另一部分用于优化后模型的验证。因为2003年度小流域的监测资料数据较齐全,且具有典型代表性,所以本研究采用2003年观测资料建立小流域水文过程的初始模型和进行参数优化,而采用2002年观测资料进行模型验证。由于实际观测项目不足,模型没有模拟地下水运动。

数字高程模型(DEM)是分布式水文模型的最基本的参数。孙家小流域 DEM 数据通过实测 288 个观测点的三维坐标值,采用反距离插值法进行处理得到,DEM 栅格大小为 1.0 m × 1.0 m (图 3)。DEM 地理特征参数的提取采用 Tanalys 地理

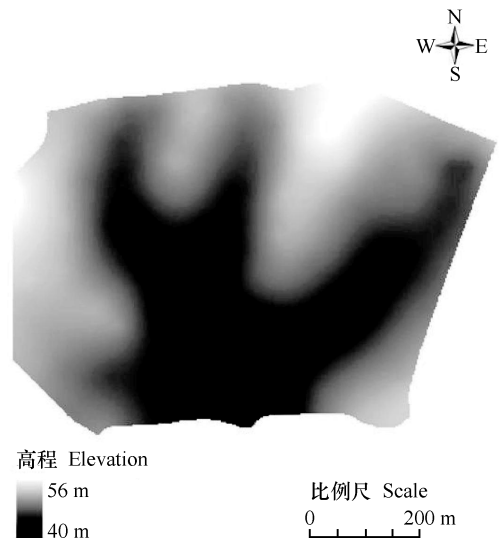


图3 孙家小流域数字高程模型

Fig. 3 The digital elevation model of Sun Jia catchment

分析软件进行^[7]。该软件专门用于提取 WaSiM-ETH 模型地理特征参数,它输出的地理特征参数文件格式能够满足 WaSiM-ETH 模型需要,提取的地理

特征参数包括坡向、坡度、坡长、流域河网、流向、流域边界、亚小流域的划分。根据 Tanalys 计算结果,整个孙家小流域被分割为 6 个亚小流域(图 4)。

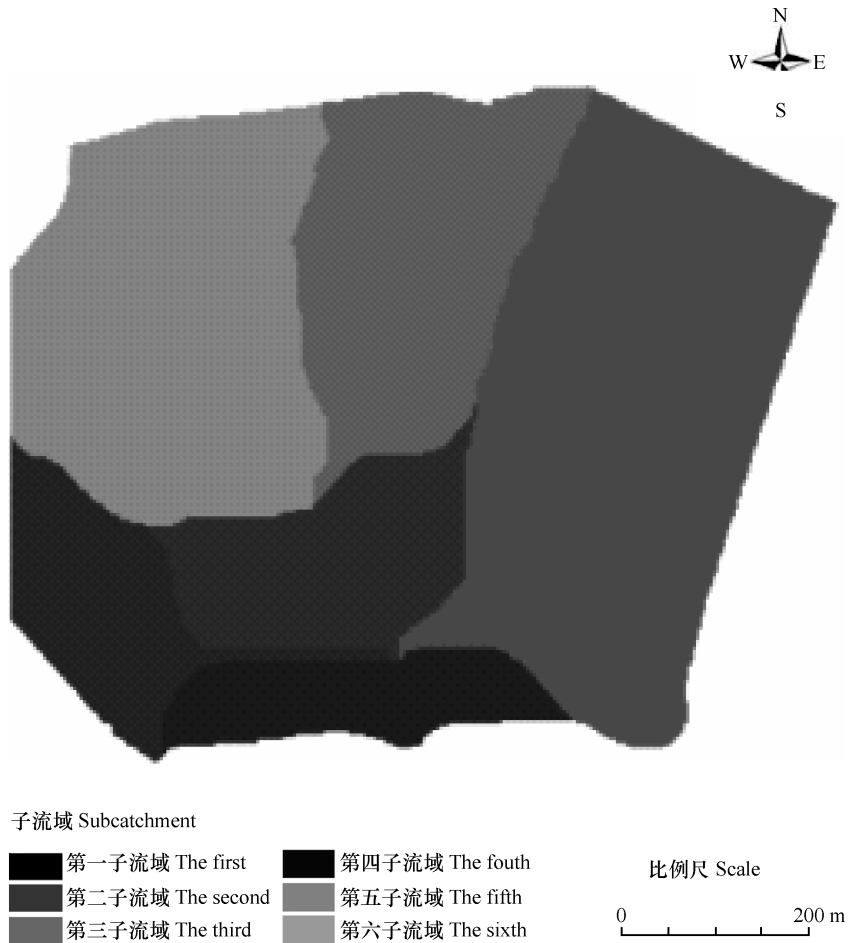


图 4 孙家小流域子流域的划分
Fig. 4 The sub-basins in Sun Jia catchment

2000 年,小流域内土壤采用网格法(100 m × 100 m),结合土链布局进行样点剖面调查和土样采集。剖面样点分布于小流域不同土地利用单元内,共计 64 个,剖面调查深度为 1.5 m^[20]。土壤性质根据土地利用方式和土壤水力学性质的差异划分为 7 个类别(图 5)。不同类别土壤的水力学性质参数通过 Rosetta 土壤转换函数获得^[21]。

流域土地利用方式调查实施于 2001 年 - 2004 年,按季节每年 4 次,逐一走访田块调查记录。土地利用方式按照植被覆盖的差异分为 10 个类别(图 6)。其中,花生主要种植于坡地,主要生育期为 4 月上旬至 8 月上旬,顺坡垄作,株行距 0.2 m × 0.3 m;水稻种植为双季稻,早稻生育期一般为 4 月上旬至 7 月中旬,晚稻生育期一般为 7 月中旬至 10 月中

旬;桔树株行距 4 m × 4 m,柑桔树冠层高 3 ~ 4 m,叶繁茂期为每年 5 月至 10 月。板栗树 1996 年栽种,株行距 4 m × 4 m,树冠层高 4 ~ 6 m,枝叶繁茂期为每年 5 月 - 10 月。

WaSiM-ETH 模型中,不同土地利用方式的模型参数差异主要有三个方面:(1)地表特征参数,如地表反射率(Albedo);(2)作物参数,如植物生长周期(JulDays)、叶面积指数(LAI)、盖度(VCF)、根系深度(zw)、根密度分布参数(RootDistr)、干旱胁迫开始时土壤水势(HReduDry)、土壤饱和时作物蒸腾速率的相对减少因子(LimitReduWet)、氧胁迫开始时的相对 θ 值(TReduWet);(3)土壤水力学参数,如饱和导水率(Ksat)和 van Genuchten 水力学参数。

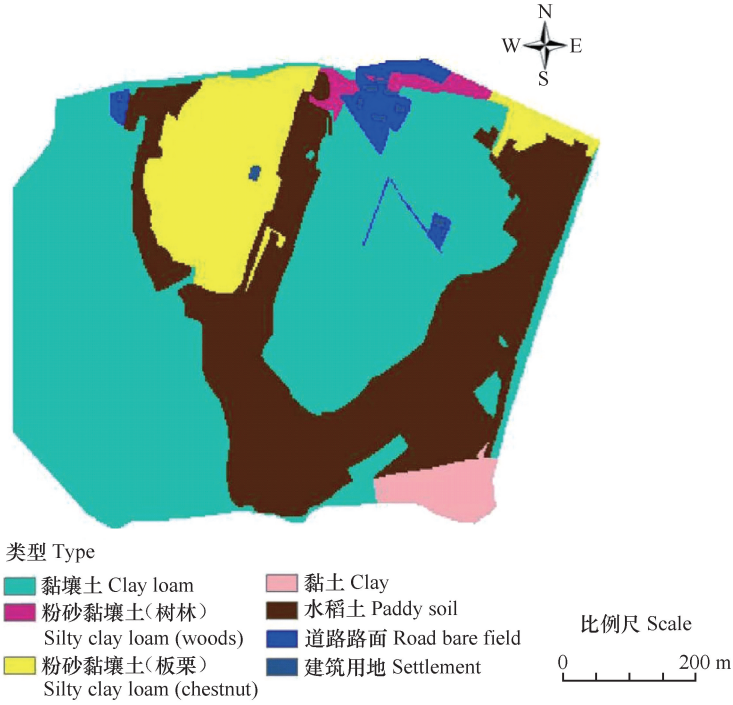


图5 孙家小流域基于土地利用方式和土壤水力学性质的土壤类型划分

Fig. 5 The soil types based on land uses and soil hydrological properties in Sun Jia catchment

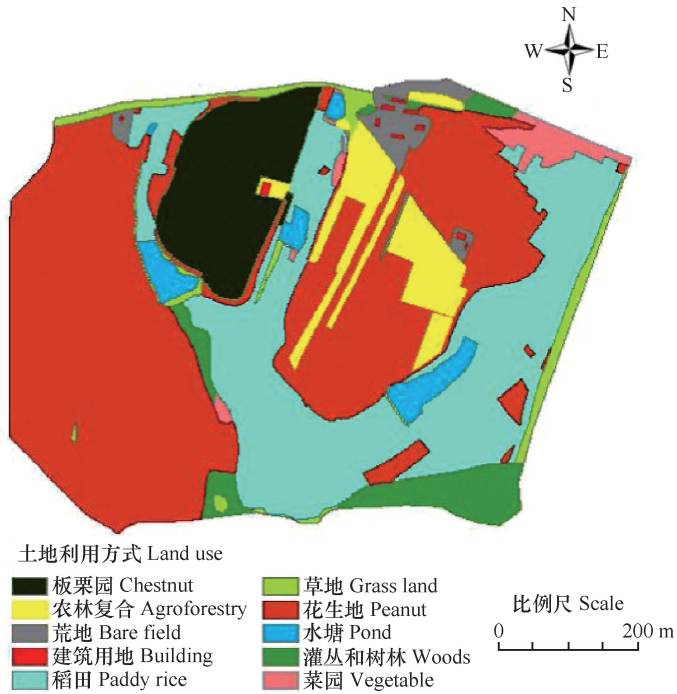


图6 孙家小流域土地利用方式

Fig. 6 The land use in Sun Jia catchment

初始模型的大部分参数通过实测而得,如植物生长周期 (JulDays)、叶面积指数 (LAI)、盖度 (VCF)、根系深度 (zw)、根密度分布参数 (RootDistr)、饱和导水率 (Ksat) 等,另一部分参数则是根据模型操作手册,在考虑模型模拟期间流域自身的特征基础上,引用自同一地区和相关领域的其他研究,如地表反射率 (Albedo)、干旱胁迫开始时土壤水势 (HReduDry)、土壤饱和时作物蒸腾速率的相对减少因子 (LimitReduWet)、氧胁迫开始时的相对 θ 值 (TReduWet)、气孔阻力 (Rsc) 等。

在初始模型的参数优化过程中,由于输入参数复杂,为防止模型过度参数化而带来的不确定性,参照 WaSiM-ETH 模型操作手册和 Grigoryan 的研究结果^[7-8],模型参数的优化采用以下原则:

(1) 对于实际观测的参数,不给予优化,如叶面积指数 (LAI)、盖度 (VCF)、根系深度 (zw)、饱和导水率 (Ksat) 和饱和导水率缩放参数 (Krec) 等;

(2) 虽引用自文献,但对模型输出结果不敏感的参数,也不给予优化,如反射率 (Albedo);

(3) 本研究小流域处于亚热带地区,降雪-融雪模块作用不明显,该模块参数引用自文献,不给予优化;

(4) 土壤 van Genuchten 水力学参数由 Rosetta 土壤转换函数获得。由于模型是模拟流域尺度的水文过程,这部分参数也不给予优化。

因此,模型中被优化的主要参数包括植物叶片表面阻力 (Rsc)、截留雨量的蒸发阻力 (rs_interception)、土壤表面蒸发阻力 (rs_evaporation)、土壤排水密度 (dr)。

根据孙家小流域的实际情况,模型中稻田的最大蓄水高度设置为 0.1 m,稻田犁底层饱和导水率被设置为 0.6 mm h^{-1} 。长期监测结果表明,孙家小流域的年均降雨量为 1 786 mm,而小流域内稻田年耗水量约为 1 110 ~ 1 250 mm^[22],小流域的降雨量完全能满足稻田的生产需求。在 WaSiM-ETH 模型计算过程中,假如稻田灌溉水或者降雨过多而溢出稻田的最大蓄水高度的话,溢出水分会被自动扣除而汇入小流域河网中,并不会影响模型模拟结果。因此,孙家小流域灌溉制度则根据当地的一般经验,设置为在水稻生长季节(从 4 月中旬至 10 月中旬)每周 0.2 m。

2 结果分析

图 7 为模型优化后,小流域出口处日径流量实测值与模拟值的比较。总体而言,模拟曲线和实测曲线的拟合度较好,模拟峰值的变化与实测值基本一致。小流域出口年径流量模拟值与实测值的误差值为 166 mm,相对误差只有 4.3%,决定系数 (R^2) 为 0.96。虽然雨季期间(5 月-7 月),模型模拟值出现了一定程度的低估,低估的原因可能是由于灌溉水输入数据误差造成的。在暴雨事件发生的 5 月 14 日,当日降雨量高达 121 mm。暴雨导致小流域灌溉水输入量剧增,使得当日灌溉水量达到 292 mm。即使在这种极端情况下,模型还是显示了非常好的拟合性,暴雨当日小流域出口径流量实测值为 387 mm,模拟值为 368 mm,误差只有 4.8%。

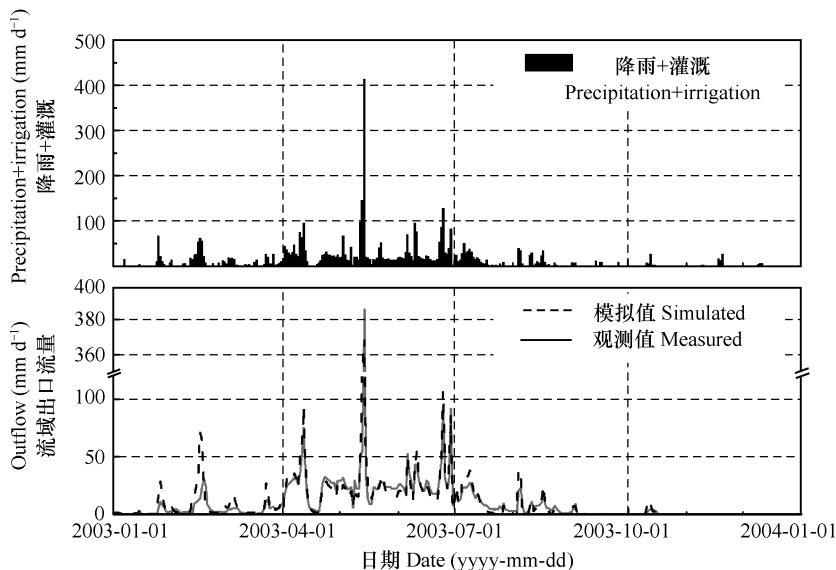


图 7 优化模型模拟的孙家小流域出口日流量值与实际观测值的比较

在 WaSiM-ETH 模型中,土壤排水密度 d_r 是一个重要的经验参数,它在某种程度上决定水分在水量平衡各子项中的分配(表 1)。表 1 结果表明,壤中流流量随着排水密度 d_r 的增加而增加,而地表径流流量随着排水密度 d_r 的增加而减小。当排水密度 d_r 从 10 m^{-1} 增加至 40 m^{-1} 时,壤中流年流量增加了 115.9%,地表径流流量却反而减小了 41.2%。而排水密度 d_r 对小流域实际蒸发散量和流域出口年径流量的影响较小。

运用优化后 WaSiM-ETH 模型对孙家小流域

2002 年度监测数据的验证结果表明,模型模拟小流域出口径流量过程曲线与实测过程曲线拟合度较好(图 8),模拟误差值为 116 mm,相对误差为 3.7%,决定系数为 0.96。

对 WaSiM-ETH 模型模拟结果的分析表明(表 2),模型水分平衡误差均小于 0.1%,说明 WaSiM-ETH 模型输出结果精度满足小流域模型模拟研究的要求。其中,小流域年蒸散量占年降雨的 39.6%~52.5%,是降雨和灌溉水分除径流外的最大支出。其次为壤中流,占降雨输入的 35.4%~39.2%,远高于地表径流的 8.8%~21.4% 比例。

表 1 优化模型中不同 d_r 参数值下模拟计算的水量平衡各子项

Table 1 The estimated annual water budget items in WaSiM-ETH model with different inputted values of d_r parameter

排水密度 Drainage density, d_r (m^{-1})	水量平衡各子项 Water budget items (mm)			
	壤中流 Interflow	地表径流 Overland flow	实际蒸发散 Actual evapotranspiration	小流域出口年径流量 Annual outflow
10	251	558	863	3 941
20	346	499	826	3 976
30	452	408	808	3 985
40	542	328	804	3 991

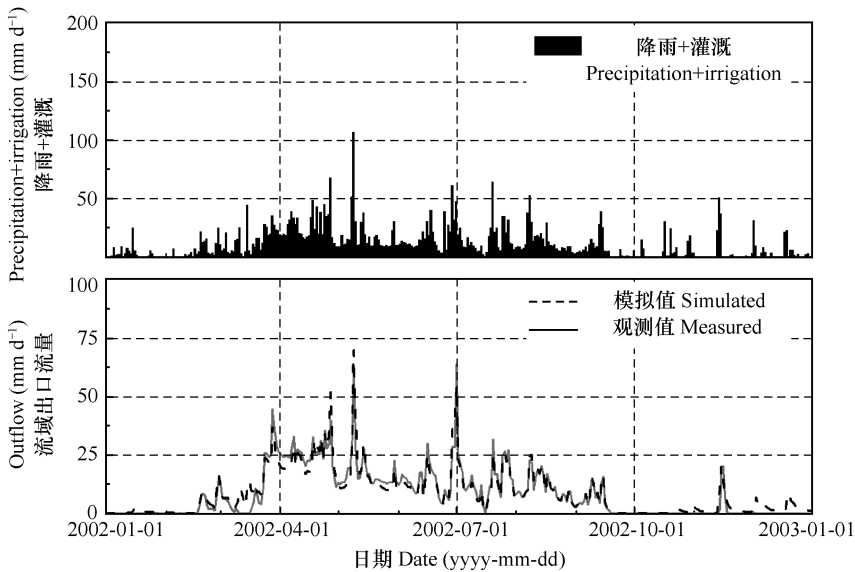


图 8 优化模型模拟的小流域出口日径流量值与实际观测值的比较

Fig. 8 The comparison of daily outflow in the Sun Jia catchment between the measured and the simulated using the WaSiM-ETH model

表 2 优化模型模拟计算的 2002 年 - 2003 年孙家小流域水量平衡子项

Table 2 The estimated annual water budget items using WaSiM-ETH model during 2002 - 2003

年度 Year	降雨 Precipitation (mm)	灌溉 Irrigation (mm)	蒸散量 Evapotran-spiration (mm)	地表径流 Overland flow (mm)	壤中流 Interflow (mm)	年径流量模拟值 Simulated outflow (mm)	年径流量实测值 Observed outflow (mm)
2002	1 698	2 471	672	149	666	3 288	3 172
2003	1 531	3 121	804	328	542	3 991	3 825

3 讨论与结论

我国南方亚热带低丘红壤地区面积 113.3 万 km², 是我国经济林果及名特优产品生产的重要基地, 也是粮食生产的重要区域。对农业小流域水资源的合理科学的利用, 首先就要定量分析小流域水量平衡组分-降水、灌溉水、地表水、地下水、土壤水和植物利用水(“六水”转化)的分配规律及各要素之间的数量关系。对小流域水量平衡各组分数量关系进行量化估算的一个重要方法就是建立以土壤物理学和水文学为基础的流域水文数学模型。自 WaSiM-ETH 模型开发以来, 它就被广泛用于模拟流域尺度的水文过程和物质迁移过程^[7-8]。运用 WaSiM-ETH 模型对 2002 年—2003 年孙家小流域水文过程的模拟结果表明, 尽管南方亚热带红壤丘陵地区农业小流域中土地利用方式多样、水文过程复杂, 但是运用 WaSiM-ETH 模型模拟小流域出口年径流量误差为 3.7%~4.3%, 决定系数高达 0.96, 且能够准确捕捉到径流过程曲线的峰值。这表明 WaSiM-ETH 模型在该地区的水文过程模拟方面具有很高的适应性, 具有良好的模拟精度, 完全可以满足该研究区域内水文过程和水资源利用的研究。

在本研究中, 由于实际观测项目不足, 模型假设小流域内地下水位保持不变, 对地下水运动不予以模拟。因此模型估算的水量平衡各组分可能存在某种程度的高估。但是孙家小流域下垫面为第四纪红黏土和红砂岩, 渗透性极差, 降雨入渗土壤后未流出的部分常常以浅层潜水的形式驻留土壤中^[23]。同时, 该小流域土壤较薄(1.0~1.5 m 厚度), 浅层潜水常常在坡边和渠道切口处潜出地面补给河流和表面水体, 尤其是在旱季的时候, 位于小流域坡地上的水井常常出现明显的干涸现象。因此, 该假设前提应当不会显著影响模型模拟效果。

WaSiM-ETH 模型估算小流域年实际蒸散量为 672~804 mm, 占降雨的 39.6%~52.5%。景元书^[22]运用 Hydrus-1D 对小流域不同土地利用方式的水量平衡的模拟结果表明, 占流域土地面积 49.0% 的花生单作利用方式的平均年蒸散量为 633~730 mm, 占流域土地面积 5.9% 的农林复合利用方式为 772~817 mm, 占流域土地面积 9.8% 的板栗园为 730~809 mm。而 Wang 等^[6]运用 Hydrus-2D 模拟的结果则表明, 花生单作利用方式的平均年蒸散量为 665~

785 mm, 农林复合利用方式为 804~1 007 mm。因此, WaSiM-ETH 模型估算小流域年实际蒸散量应该是合理的。同时, WaSiM-ETH 模型估算小流域的地表径流系数为 8.8%~21.4%。唐家良^[3]在实际监测的基础上, 运用了简单比重法和多元回归分析法估算孙家小流域 2003 年地表径流系数在 19.6%~16.0% 之间。因此, WaSiM-ETH 模型估算地表径流系数为 8.8%~21.4% 也是可信的。

WaSiM-ETH 模型估算的孙家小流域壤中流年径流量为降雨输入的 35.4%~39.2%。唐家良^[3]运用 EMMA 模型对孙家小流域中旱地子流域在降雨过程中(总降雨量 60.5 mm, 10 min 最大降雨量为 12 mm)壤中流流量的估算结果表明, 壤中流占子流域径流量的 29%~45% 和流域总径流量的 5.7%~7.3%。Wang 等^[6]运用 Hydrus-2D 模拟结果表明, 在花生单作利用方式下坡地中, 壤中流年流量占年降雨量的 35%~42%, 农林复合利用方式下占年降雨量的 14%~34%。因此, 对照其他研究结果, WaSiM-ETH 模型模拟的壤中流结果是合理的, 这也表明运用 WaSiM-ETH 模型估算包括水田利用方式的小流域壤中流流量是可行的。壤中流过程是水土界面养分和物质迁移的主要途径之一^[6]。有研究表明, 壤中流过程是 NO₃⁻-N 向溪流快速迁移的重要途径^[24], 尤其是在降雨过程中, 壤中流运动速度极快^[25], 很容易造成 NO₃⁻-N 的流失。南方亚热带地区是我国粮食生产的主要产区, 存在高强度农业发展和农用化肥物质的大量使用的现象, 南方亚热带农业小流域中如此高比例的壤中流流量, 这就意味着巨大的环境风险。

考虑到南方亚热带低丘红壤地区明显的壤中流过程, 分布式 WaSiM-ETH 模型较水文反应单元式的 SWAT 模型具有更高的空间精度, 也更能对实际物理过程, 尤其是壤中流过程进行准确刻画。但由于分布式水文模型往往数据运算量大, 因此运用 WaSiM-ETH 模型模拟水文过程时运算所需的时间要比 SWAT 模型更长; 另一方面, WaSiM-ETH 模型不具备植物生长模块, 因而不能对流域水文过程进行长时间跨度的模拟。在运用 WaSiM-ETH 模型模拟长时间跨度的水文过程时, 最好根据流域下垫面信息分时段模拟, 这样才能更好地为南方亚热带低丘红壤地区的水文研究、农业生产和环境保护服务。

参考文献

[1] Tang L, Zhang B, Gao C, et al. Hydrological pathway and source

- area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment. *Catena*, 2008, 72:374—385
- [2] 雷晓辉, 白薇. 基于二元演化模式的流域水文模型. 黑龙江水专学报, 2001, 28(4): 14—17. Lei X H, Bai W. Basin hydrology model based on the Dual Water Evolvement Mode (In Chinese). *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2001, 28(4): 14—17
- [3] 唐家良. 中国亚热带农业综合小流域生态水文过程研究. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 中国科学院研究生院, 2005. Tang J L. Ecohydrological processes in an agricultural catchment in subtropical China (In Chinese). Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005
- [4] 王峰, 沈阿林, 陈俊松, 等. 红壤丘陵区坡地降雨壤中流产流过程试验研究. 水土保持学报, 2007, 27(5): 14—17. Wang F, Shen A L, Chen H S, et al. Experimental study of rainfall-interflow processes on sloping land in red soil hilly region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(5): 14—17
- [5] 贾海燕, 叶闽, 雷俊山, 等. 紫色土地地区壤中流磷流失特征及其环境效应. 人民长江, 2002, 40(21): 59—63. Jia H Y, Ye M, Lei J S, et al. Phosphor loss and its environmental effects in purple soil area (In Chinese). *Yangtze River*, 2002, 40(21): 59—63
- [6] Wang Y, Zhang B, Lin L, et al. Agroforestry system reduces sub-surface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2011, 140: 441—453
- [7] Schulla J, Karsten J. Model description of WaSiM-ETH. Zürich, Switzerland; 2007
- [8] Grigoryan G. Überprüfung der Engnung von WaSiM-ETH 7.5 zur Abbildung vor hydrologischen processen im Ruwer Einzugsgebiet. Trier: Universität Trier, Germany; 2007
- [9] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 基于 GIS 的小流域养分流失预测. 土壤学报, 2004, 41(6): 837—842. Ni J P, Wei C F, Xie D T. GIS-based prediction of nutrient loss from a small watershed (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 837—842
- [10] Zepp H, Tang J L, Zhang B. A methodological framework for a multi-scale study on hydrological process and soil erosion in subtropical southeast China. *Pedosphere*, 2005, 15: 695—709
- [11] FAO/ISRIC/ISSS. World reference base for soil resources. FAO/ISRIC/ISSS, Rome; 1998
- [12] Spencer E A, Tudhope J S. A literature survey of the salt-dilution method of flow measurement. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 1958, 12(2): 127—138
- [13] Peschke G. A two-horizon model for infiltration processes in layered soil (In German). *Acta Hydrophysica*, 1977, 22(1): 39—48
- [14] Peschke G. Soil moisture and runoff components from a physically founded approach. *Acta Hydrophysica*, 1987, 31(3/4): 191—205
- [15] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1976, 44(5): 892—898
- [16] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1931, 1(5): 318—333
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization (UN, FAO), 1998: 300
- [18] Wendling U. Zur Messung und Schätzung der potentiellen Verdunstung. *Zeitschrift für Meteorologie*, 1975, 25(2): 103—111
- [19] Hamon W R. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of American Society of Civil Engineering*, 1961, 871: 107—120
- [20] 唐家良, 张斌, 王明珠, 等. 低丘红壤区小流域土壤肥力性质空间分布特征. 土壤, 2006, 38(4): 384—389. Tang J L, Zhang B, Wang M Z, et al. Spatial distribution and evaluation of soil fertility in a small catchment in southern hilly region of China (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(4): 384—389
- [21] Schappin M G, Leij F J, van Genuchten M T. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedontransfer functions. *Journal of Hydrology*, 2001, 251: 163—176
- [22] 景元书. 中国亚热带坡地土壤水文特征与小流域水量平衡研究. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 中国科学院研究生院, 2004. Jing Y S. Characteristics of soil hydrology on slope and water balance at a small watershed in subtropic China (In Chinese). Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2004
- [23] 程训强, 王明珠, 唐家良, 等. 低丘红壤区不同降雨类型对浅层地下水动态变化的影响——以江西省余江县为例. 山地学报, 2011, 29(1): 55—61. Cheng X Q, Wang M Z, Tang J L, et al. Dynamic in changes of underground water tables affected by different rainfall types in low hilly red soil area—A case study of Yujiang County, Jiangxi (In Chinese). *Journal of Mountain Research*, 2011, 29(1): 55—61
- [24] Mosley M P. Wuvsurface flow velocities through selected forest soil, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 65—92
- [25] McDaniel P A, Regan M P, Brooks E, et al. Linking fragipans, perched water tables, and catchment-scale hydrological processes. *Catena*, 2007, 73: 166—173

SIMULATING HYDROLOGICAL PROCESSES IN A SUBTROPICAL AGRICULTURAL CATCHMENT USING THE EUROPEAN DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL OF WASIM-ETH

Wang Yi^{1,2} Zhang Bin^{1,3†} Harald Zepp⁴

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Key Laboratory of Crop Nutrition and Nutrient Cycling of Ministry of Agriculture of China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(4 Geography Institute of Ruhr University, Bochum D-44780, Germany)

Abstract A typical subtropical agricultural catchment named Sunjia catchment in Jiangxi province was chosen and the WaSiM-ETH distributed hydrological model was employed to simulate hydrological processes and to quantify interflow at catchment scale. The results suggested that the WaSiM-ETH simulation showed acceptable accuracy and precision in simulation although there were complicated hydrological processes and various land use types in the studied catchment. Relative error of the simulated to measured outflow varied from 3.7% to 4.3%, and linear regression determining coefficient (R^2) reached as higher as 0.96. During the period of 2002–2003, the model predicted annual evapotranspiration ranged from 672 mm to 804 mm, accounting for 39.6%~52.5% of annual precipitation. Annual interflow of the catchment ranged from 542 mm to 666 mm, took 35.4%~39.2% parts of annual precipitation, being higher than 8.8%~21.4% of ratio for annual overland flow. Based on our collective data in this study, we may conclude that the WaSiM-ETH model is flexible and capable of the hydrological simulation in subtropical agricultural catchments as it can not only model the surface hydrological process, but also quantify interflow at catchment scale.

Key words WaSiM-ETH model; Catchment hydrological processes; Evapotranspiration; Overland flow; Interflow