

基于 SWAT 模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究

渠勇建^{1,2}, 成向荣¹, 虞木奎¹, 吴初平³, 袁位高³

(1. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 杭州 311400;

2 河南农业大学 林学院, 郑州 450002; 3. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023)

摘要:以衢江流域作为研究对象,收集流域植被、气候、土壤、水文和地图资料,基于 ArcGIS 10.3 平台建立了衢江流域 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型。结果表明:率定期和验证期模拟月径流与实测值的相关系数(R^2)大于 0.83,纳什系数(E_{ns})大于 0.69,模型可以较好地模拟衢江流域径流过程。2000—2015 年衢江流域土地利用类型均以林地和农地为主,二者约占流域总面积的 98%,其他土地利用类型面积合计不足 2%;研究时段内,建设用地面积大幅增加,其他土地利用类型变幅较小。2000 年、2005 年、2010 年、2015 年四期土地利用情景下月径流过程变化趋势基本一致,2015 年径流量比 2000 年增加 0.27%,水量平衡各分量在四期土地利用情景下差值为 1.1~3.8 mm。不同情景模拟分析发现,流域内草地面积较小,草地转化为林地对地表径流和水量平衡的影响较小,而农地全部转化为林地,地表径流比当前土地利用模式减少 15.0%,同时深层水分渗漏增加 5.7%。因此,2000—2015 年土地利用方式的微小变化不会显著影响衢江流域径流和水量平衡,研究区林地面积持续增加,将进一步减少地表径流,增加深层水分渗漏,补给地下水。

关键词:土地利用类型; SWAT 模型; 径流; 水量平衡

中图分类号:P334⁺92

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0130-05

Study on Runoff Responses to Land Use Changes in Qujiang Basin Using SWAT Model

QU Yongjian^{1,2}, CHENG Xiangrong¹, YU Mukui¹, WU Chuping³, YUAN Weigao³

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, CAS, Hangzhou 311400, China; 2 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450002, China; 3. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China)

Abstract: This study selected Qujiang Basin as the site. Some data of vegetation, climate, soil, hydrology and map in this basin were collected, and SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model of Qujiang Basin was established based on ArcGIS 10.3. The results showed that the simulated monthly runoff values of calibration and validation periods were good in accordance with actual values in Qujiang Basin, the correlation coefficient of the simulated and the measured values was great than 0.83 and the Nash coefficient (E_{ns}) was greater than 0.69; from 2000 to 2015, forestland and farmland were the main land use types in Qujiang Basin, which accounted for about 98% of the total area of the basin, and the other land use types were less than 2%; during the study period, the area of construction land significantly increased, and the other land use types less changed; the trend of monthly runoff variation was similar for land use scenarios of 2000, 2005, 2010 and 2015; the annual runoff in 2015 increased by 0.27% compared with 2000, and the difference in water balance components varied from 1.1 mm to 3.8 mm in the four phases of land use scenarios; the simulated different scenarios found that the area of grassland in the basin was small, and the conversion of grassland to forestland had little impact on surface runoff and water balance. After farmland was converted to forestland, and the surface runoff was reduced by 15.0% compared to the current land use model, and deep water leakage increased by 5.7%. Therefore, minor changes in land use patterns during 2000—2015 would not significantly affect the runoff and water balance in the Qujiang Basin. The increase in forest area in the

study area will further reduce surface runoff, and increase deep percolation, and recharge groundwater.

Keywords: land use change; SWAT model; runoff; water balance

土地利用/覆被变化(LUCC)改变了下垫面特征,影响流域各种水文过程,引起水资源时空分布和水质改变,有可能导致水土流失、土地退化、水环境恶化等一系列生态环境问题^[1-4]。近年来,LUCC对流域、区域和全球尺度水量循环和水文过程的影响日益受到关注。模型作为定量评估下垫面变化与水文响应关系的重要工具,已在国内外得到大量探索和应用^[5-6]。从早期的集总水文模型逐渐发展到当前采用各种分布式水文模型模拟水文过程。其中美国农业部开发的基于 GIS 和 RS 平台的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式水文模型可以模拟复杂流域不同时间尺度的水文、物质循环变化过程,目前该模型已在许多地方得到应用,取得了较好的模拟效果,为区域生态环境建设和水资源综合管理与评估提供了重要参考^[7-9]。衢江是钱塘江上游的主要支流,其流域土地利用变化所引起的水量、水质等变化对钱塘江流域居民生活和工农业生产有重大影响。为此,本研究基于 ArcGIS 技术分析衢江流域土地利用变化过程,在全面评估 SWAT 模型模拟流域径流效果的基础上,深入分析径流对土地利用变化的响应,为该地区水资源利用和管理提供依据。

1 研究区概况

衢江是钱塘江流域主要支流、源头之一,发源于安徽省黄山休宁境内,浙江省内流域面积 1.11 万 km²。流域内主要是丘陵和山地,耕地较少,河流错综复杂。山地占整个区域的 82% 以上,其中大多是林地,森林覆盖率达 71%。研究区气候类型属于亚热带季风气候,年均气温 16.8℃,无霜期 256 d,海拔 33~1 500 m,年均降水量 1 843 mm,但年内降水量分布不平衡。由于流域内地形丰富,春夏交汇之际,由于复杂的地形地貌增加了气流交汇机会,降水较多。而在夏天,台风很难进入流域内,对该地区降水影响较小,晴热天较多。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究所需要的数据包括流域植被、气候、土壤、水文和地图资料等。衢江流域 30 m 分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来源于中国科学院国际科学数据服务平台,利用 ArcGIS 对其进行裁剪、投影、转换等操作,生成模型所需 DEM 数

据(图 1)。模型需要的土壤数据集包括土壤类型分布图、土壤类型索引表和修改后的土壤数据库 3 种。使用的土壤数据(1:100 万)来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界土壤数据库(HWSD)^[10],该研究流域土壤类型共 14 种,其中以铁质低活性强酸土、腐殖质低活性强酸土和旱耕人为土为主。采用中国西部环境与生态科学数据中心 1:10 万土地利用图,分别收集了 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年研究流域的土地利用数据(附图 5),土地利用类型采用我国的土地资源分类方法。SWAT 模型可以识别的土地利用基于美国分类方法,因此,需要将研究流域的土地利用数据重新分类,转化为模型规定的土地利用分类代码。气象数据来源于中国水利水电科学研究院,收集了研究流域内 15 个标准气象站点 2008—2014 年的逐日气象资料,包括最高气温、最低气温、平均气压、日照时数、平均风速、相对湿度、降水和蒸发等数据。水文数据来自浙江省水文局,包括开化和衢州 2 个水文站 2008—2014 年的月径流数据。

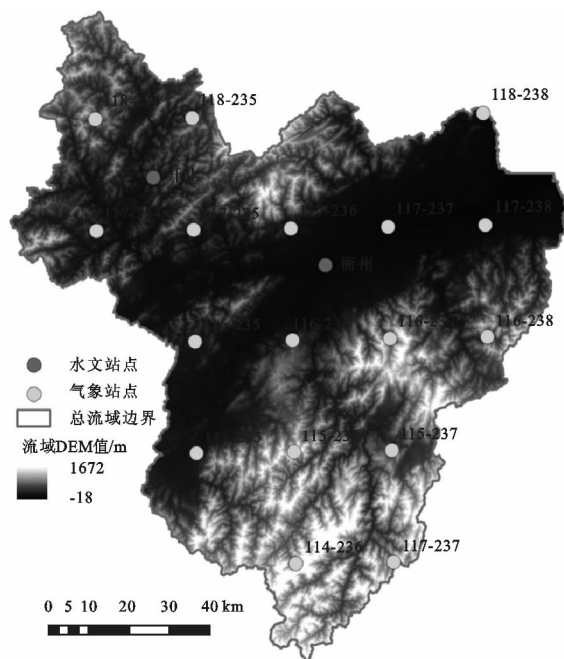


图 1 衢江流域 DEM

2.2 SWAT 模型构建

基于 ArcGIS 10.3 平台建立衢江流域基础信息数据库,根据衢江流域数字高程数据、土壤类型数据、土地利用数据、气象数据等运用 ArcSWAT 2012 建立衢江流域 SWAT 模型数据库。利用数字高程数据提取流域地形特征,包括水系、坡度、坡向及河道参数

等,共划分 74 个子流域(图 2)。根据土壤、土地利用和坡度类型进一步划分出 304 个水文响应单元(HRUs)。模型先计算各个水文响应单元的产流量,然后汇总到各子流域,最后由子流域汇总到流域出口。

2.3 模型参数敏感性分析及率定

SWAT 模型参数率定使用模型自带的 SWAT -CUP 软件。根据已有研究结果,本文选择了在中国区域内敏感性较大 9 个属性参数(GW_DELAY,CH_K2,SOL_Z、SOL_AWC, GWQMN, ALPHA_BF, ESCO, CN2, REVAPMN)进行敏感性分析,设置这些参数的最大值和最小值,进行自动分析^[11]。参数敏感性分为 4 级:很高(敏感值>1.0)、高(敏感值 0.2~1.0)、中(敏感值 0.05~0.2)和低(敏感值<0.05)。结果发现土壤蒸发补偿系数、浅层地下水径流系数、基流 α 系数、浅层地下水蒸发深度阈值、地下水延迟时间和土壤可利用水量 6 个参数具有较高的敏感性(表 1)。利用月尺度实测径流量对模型进行校准,得出最优的参数值,然后对模型进行验证分析。2008 年为模型预热期,2009—2011 年

为校准期,2012—2014 年实测数据为验证期。

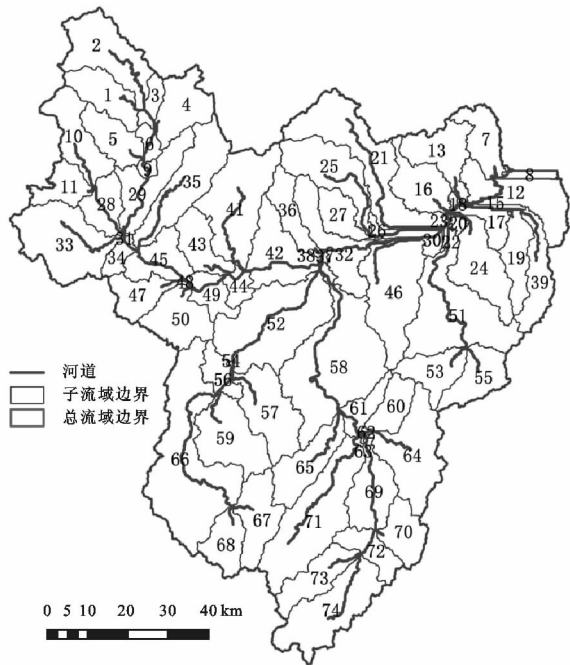


图 2 衢江流域划分的子流域

表 1 参数敏感性分析及率定结果

参数	定义	敏感性值	率定范围	最终率定值
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.6975	0.2594~0.7786	0.6023
GWQMN	浅层地下水径流系数	0.6460	-0.6852~1.1052	0.8952
ALPHA_BF	基流 α 系数	0.6113	0.4704~1.4116	0.6830
REVAPMN	浅层地下水蒸发深度阈值	0.6079	-205.9198~-35.2802	-98.2694
GW_DELAY	地下水延迟时间	0.3532	-157.9928~247.3928	29.6857
SOL_AWC	土壤可利用水量	0.3307	1.4714~2.4146	2.0385
CH_K2	河道有效水力传导系数	0.1002	2.1540~7.3859	2.3284
SOL_Z	土层深度	0.0005	-0.2105~3.3705	2.0663
CN2	SCS 径流曲线系数	<0.0001	-0.0022~0.3934	0.1653

2.4 数据处理

研究流域内 DEM、植被数据、土地利用、土壤数据等采用 ArcGIS 10.3 进行格式转换和处理,运用 ArcSWAT2 012 建立衢江流域 SWAT 模型数据库,采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件对水文气象数据进行基本的统计分析。本文选择相关系数 R^2 和纳什系数 E_{ns} 作为评价模拟结果的指标。

3 结果与分析

3.1 模型校准和验证

分别以衢江流域上游的开化水文观测站和下游的衢州水文观测站 2009—2014 年实测月径流量数据进行模型校准和验证,模拟结果表明(图 3—4),校准期(2009—2011 年)2 个水文站的 R^2 大于 0.94, E_{ns} 分别为 0.89,0.93;验证期(2012—2014 年) R^2 和 E_{ns} 略低于校准期。总体上,模拟的月径流量变化和实测

结果比较吻合,表明 SWAT 模型在衢江流域月尺度上径流模拟效果较好。

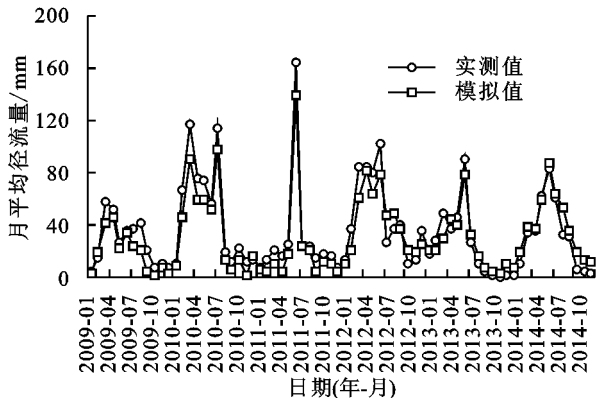


图 3 开化月平均径流量模拟值与预测值

3.2 衢江流域土地利用变化分析

对衢江流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年四期主要类型土地利用数据进行分析统计,结果显

示:2000—2015 年衢江流域土地类型均以林地和农地为主,分别占流域总面积的 78%和 20%左右,草地、水域和建设用地面积比例不足 2%(表 2)。从 2000—2010 年,林地面积基本没有变化,维持在 78.5%左右,2015 年林地面积略有增加,达到 79.02%。自 2000 年以来,农地面积持续减少,2015 年农地面积比 2000 年减少 119.04 km²,减幅达 4.99%。草地面积和比例随年份的变化趋势与林地类似,2015 年草地面积比 2000 年减少 28.95 km²,减幅达 59.81%。流域农地和草地面积减少,林地面积增加,一方面与国家退耕还林政策有关,一些坡度较大的旱地逐渐改为林地;另外也与近年来浙江省大力推进“森林浙江”、“美丽浙江”生态环境建设有关。2000—2010 年水域面积变化不大,2015 年水域面积略有减少。2000—2015 年建设用地面积持续增加,2015 年建设用地面积比 2000 年增加 95.09 km²,增幅达 1 894%,尤其是 2005 年建设用地面积增加了

表 2 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年主要土地利用类型面积和比例

年份	耕地/ km ²	比例/ %	林地/ km ²	比例/ %	草地/ km ²	比例/ %	水域/ km ²	比例/%	建设 用地/km ²	比例/ %
2000	2385.08	20.92	8954.84	78.54	48.40	0.42	7.37	0.06	5.30	0.05
2005	2325.73	20.40	8943.69	78.45	49.47	0.43	7.39	0.06	74.49	0.65
2010	2304.36	20.21	8949.78	78.49	49.48	0.43	7.39	0.06	91.32	0.80
2015	2266.04	19.87	9010.75	79.02	19.45	0.17	6.37	0.06	100.39	0.88

3.3 土地利用变化的径流响应

通过率定好的 SWAT 模型,对四期土地利用情景下 2009—2014 年月径流变化情况进行模拟。从图 5 可以看出,四期土地利用情景下月径流量的变化基本一致,3—8 月径流量较大,约占全年总量的 53.42%~53.52%,9—2 月径流量较小。相同月份四期土地利用情景下月径流量的差异非常小,年径流量随年份增加呈小幅增大趋势,但 2015 年径流量仅比 2000 年增加了 0.27%。尽管从 2000—2015 年建设用地面积大幅增加,但其占整个流域的面积比例仍然较小,不足 1%;林地是流域内最主要的土地利用类型,其面积稳中有升,对调控流域径流发挥了决定性作用。由此可见,从 2000—2015 年衢江流域土地利用方式发生了一定程度的变化,但其对流域径流的年内分配和总径流量没有显著影响。此外,对流域水量平衡的分析也发现,水量平衡各分量在四期土地利用情景下也没有较大差异(表 3)。这些结果表明,近 15 a 来衢江流域径流量及其水量平衡保持相对稳定。

3.4 不同模拟情景土地利用变化的水文效应

研究区位于钱塘江上游,是重要的水源涵养区,也是生态林的集中分布区。今后这一区域生态环境建设的重点依然是维持和提高森林面积和质量。为此,我们设置了 3 种极端土地利用情景,模拟不同土

地利用情景下水量平衡变化。相对于土地利用现状,当现有农地全部转化为林地时(情景 1),流域林地面积比例增加 19.90%;当现有草地全部转化为林地时(情景 2),流域林地面积比例增加 0.89%;当现有农地和草地全部转化为林地时(情景 3),流域林地面积比例增加了 20.11%(表 4)。

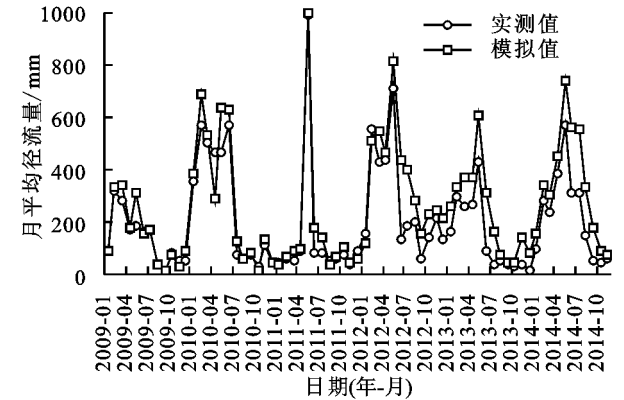


图 4 衢州月平均径流量模拟值与预测值

地利用情景下水量平衡变化。相对于土地利用现状,当现有农地全部转化为林地时(情景 1),流域林地面积比例增加 19.90%;当现有草地全部转化为林地时(情景 2),流域林地面积比例增加 0.89%;当现有农地和草地全部转化为林地时(情景 3),流域林地面积比例增加了 20.11%(表 4)。

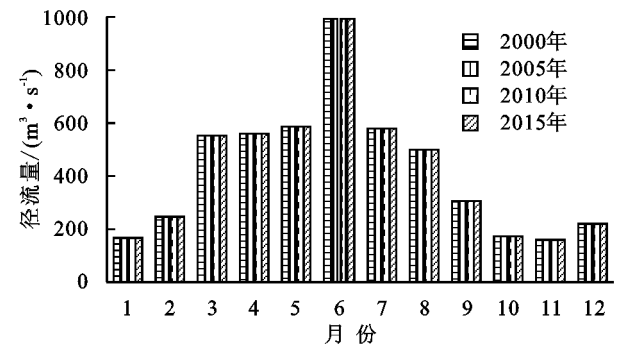


图 5 土地利用情境下月径流量模拟结果

表 3 土地利用情境下水量平衡

年份	降水/ mm	地表 径流/mm	壤中流/ mm	渗漏/ mm	蒸散 作用/mm
2000	1854	330.76	125.42	740.64	657.18
2005	1854	332.40	124.75	739.59	657.26
2010	1854	331.99	125.56	739.18	657.27
2015	1854	332.96	128.00	736.85	656.19

表 4 不同土地利用情景下土地面积的变化

情景	耕地/ km ²	林地/ km ²	草地/ km ²	水域/ km ²	建设 用地/km ²
现状	2266.04 (19.90)*	9010.75 (79.03)	19.45 (0.17)	6.37 (0.05)	100.39 (0.86)
情景 1	0	11280.13 (98.93)	19.37 (0.17)	6.31 (0.04)	100.24 (0.85)
情景 2	2253.25 (19.19)	9013.29 (79.92)	0	6.18 (0.05)	98.94 (0.83)
情景 3	0	11304.28 (99.14)	0	6.09 (0.04)	98.32 (0.83)

注:括号内数字为面积百分比。

不同土地利用情景下模拟的水量平衡结果发现,相对于现状,情景 1 和情景 3 林地面积的增加分别导致地表径流量减少了 15.0 % 和 15.2 %,深层渗漏量分别增加了 5.7 % 和 5.8 %,其他水量平衡分量变化幅度较小(表 5)。情景 2 林地面积的增加对水量平衡各分量的影响相对较小。由此可见,流域内草地面积较小,其全部转化为林地对地表径流和水量平衡的影响不大,而农地全部转化为林地,可以显著降低地表径流,同时增加水分的深层渗漏,补给地下水。

表 5 不同土地利用情境下水量平衡

土地 利用	降水/ mm	地表 径流/mm	壤中流/ mm	渗漏/ mm	蒸散/ mm
现状	1854	320.94	123.94	694.91	714.21
情景 1	1854	272.94	125.36	734.45	721.25
情景 2	1854	314.73	126.65	697.95	714.67
情景 3	1854	272.10	125.80	734.96	721.13

4 结 论

(1) SWAT 模型可以较好地模拟衢江流域径流过程。通过参数敏感性分析和率定,得出土壤蒸发补偿系数、浅层地下水径流系数、基流 α 系数、浅层地下水蒸发深度阈值、地下水延迟时间和土壤可利用水量 6 个参数对模型模拟结果有较大影响,确定了衢江流域径流模拟的最佳参数,率定期和验证期的模拟结果与实测值基本吻合,可以较好的反映流域月径流量的变化。

(2) 2000—2015 年衢江流域土地利用类型均以林地和农地为主,二者约占流域总面积的 98 %,草地、水域和建设用地的面积合计不足 2 %。研究时段内,建设用地面积大幅增加,其他土地利用类型变幅较小。

(3) 在相同气象条件下,2000 年、2005 年、2010 年、2015 年四期土地利用情景下月径流过程变化趋势基本一致,年径流量以及水量平衡分量在四期土地利用情景下也没有较大差异。因此,2000—2015 年土地利用方式的微小变化没有对衢江流域径流和水量平衡产生显著影响。

(4) 流域内草地面积较小,草地转化为林地对地表径流和水量平衡的影响较小,而农地全部转化为林地,可以显著降低地表径流,同时增加水分的深层渗漏,补给地下水。因而,研究区农地面积持续减少,林地面积增加将显著影响流域水文过程。保持农林业发展规模和城市化进程协调发展,确保生态环境建设红线,是保障衢江流域水量、水质安全健康发展的关键。

参考文献:

[1] 陈昌春,张余庆,项瑛,等.土地利用变化对赣江流域径流的影响研究[J].自然资源学报,2014,29(10):1758-1769.

[2] 杨艳昭,张伟科,封志明,等.土地利用变化的水土资源平衡效应研究:以西辽河流域为例[J].自然资源学报,2013,28(3):437-449.

[3] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等.土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J].水土保持学报,2004,18(3):5-8.

[4] 温海燕,李琼芳,李鹏,等.土地利用变化对流域产水特性的影响研究[J].水电能源科学,2013,31(1):13-14.

[5] 孙瑞,张雪芹.基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J].水文,2010,30(3):28-33.

[6] Arnold J G, Fohrer N. SWAT 2000:current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling [J]. Hydrological Processes, 2005,19(3):563-572.

[7] 陈军锋,李秀彬,张明.模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响[J].中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(7):668-674.

[8] 郝振纯,苏振宽.土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J].水科学进展,2015,26(4):491-499.

[9] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].生态学报,2017,37(4):1252-1260.

[10] Nachtergaele F, Velthuisen H V, Verelst L, et al. Harmonized world soil database[C]// World congress of soil science:Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 2010.

[11] 林炳青,陈莹,陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J].自然资源学报,2013,28(11):1988-1999.