

基于多植物生长模式的 SWAT 模型的修正与有效性初探*

赖格英^{1,2}, 仇 霖², 张智勇³, 潘瑞鑫², 曾祥贵², 张玲玲², 易发钊²

(1: 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

(2: 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022)

(3: 江西省赣州市气象局, 赣州 341000)

摘 要: 以农林系统的非点源污染模拟为目标, 通过研究建立变化密度及多种类混杂的森林生长模型, 修正了 SWAT 模型采用平均森林植被密度和单一植物生长模式估算生物累积量的问题, 并建立了与之相适应的森林优势组份丰度遥感反演模型、叶面积指数和消光系数遥感反演模型以获取森林生长模型的相关参数。同时, 根据间作套种下的辐射能利用 Keating 方程, 引入间作套种指数变量, 修正 SWAT 原有的单一生物量日积累模型, 探讨了作物复种指数、间作套种指数遥感反演方法和以此为基础的作物间作套种生长模型。以亚热带季风湿润区红壤背景下的鄱阳湖流域子流域梅江流域为试验区, 以野外实测数据为基础, 探讨修正 SWAT 模型的有效性。结果表明: 修正后的 SWAT 模型与原始 SWAT 模型相比, 在模拟流量和营养盐负荷方面, 得到了较好的改善。在模拟流量方面, 有效性提高了 7.8%, 流量峰值的模拟也得到了改善, 能更好地反映地表蓄流方面的实际情况; 在模拟营养盐负荷方面, 有效性提高了 6.4% (总磷) 和 6.1% (总氮)。

关键词: SWAT 模型; 多植物生长模式; 修正; 非点源污染; 鄱阳湖流域; 梅江流域

Modification and efficiency of SWAT model based on multi-plant growth model

LAI Geyong^{1,2}, QIU Lin², ZHANG Zhiyong³, PAN Ruixin², ZENG Xianggui², ZHANG Lingling² & YI Fazhao²

(1: Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Nanchang 330022, P.R.China)

(2: School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, P.R.China)

(3: Ganzhou Weather Bureau of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, P.R.China)

Abstract: This project focuses on the simulation of non-point source pollution (NPSP) of agro-forestry system in Lake Poyang Basin. Based on field survey and measured data, a forestry-growth model of changing density and mixed forestry have been built to improve the model of single plant-growth and biomass accumulation with averaged forestry density in SWAT model. This project also establishes necessary matching models such as the model of vegetation coverage fraction (VCF), the model of forest component abundance (FCA), the model of leaf area index (LAI) and extinction coefficient (EC) to get the relevant parameters of forest growth model by remote sensing techniques. Meanwhile, according to the Keating equation, a new model of radiant energy utilization of intercropping is added to original SWAT to modify its single daily-biomass accumulation model. The estimating methods of crop multi cropping index (MCI) and intercropping index (ICI), using remote sensing techniques, are all under investigation in this project. The temporal-spatial impacts of forest vegetation landscape on NPSP have been simulated, with these newly introduced variables (VCF, FCA and LAI of vegetation). The results show that the modified SWAT performs better in the aspect of flow simulation and nutrient loading, compared with the original SWAT. Based on the data from the field of Lake Poyang in the subtropical monsoon wetland and the red soil background, the effectiveness of the modified SWAT model was discussed. The results show that the modified SWAT performs better in the aspect of flow simulation and nutrient loading, compared with the original SWAT. The effectiveness of the simulations was improved by 7.8%, and the simulation of the peak flow rate was also improved to better reflect the actual situation of surface runoff. In simulating nutrient loading, the effectiveness was improved by 6.4% (total phosphorus) and 6.1% (total nitrogen).

* 国家自然科学基金项目(40971266, 41171393)资助。2017-02-21 收稿; 2017-05-30 收修稿。赖格英(1963~), 男, 博士, 教授; E-mail: laigeying@126.com.

Keywords: SWAT model; multi-plant growth model; modifying; non-point source pollution; Lake Poyang Basin; Meijiang Basin

农林系统是非点源污染形成和发展的重要生态系统,非点源污染涉及到的气象、土壤、水文、植物生长、农事活动和管理等多种过程,都与农林生态系统密不可分。运用分布式机理性非点源模型进行时间和空间尺度上的模拟,是定量研究和评估农林系统对非点源污染影响的有效方法。在众多的流域分布式非点源模型中,SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是目前具代表性、使用广泛、应用前景广阔的分布式机理性模型^[1],是流域尺度、时间连续、基于过程的模型。它不仅可以在水文响应单元的空间尺度上模拟地表径流、入渗、侧流、地下水流、回流、融雪径流、土壤温湿度、蒸散发、产沙输沙、作物生长、营养盐输移、流域水质等多种自然过程,还可以模拟包括耕作、灌溉、施肥、收割、用水调度等农业管理措施对这些过程的影响^[2]。该模型自 1990s 由 USDA-ARS 开发以来,在国内外已广泛应用于水质和水量的模拟评估、非点源污染负荷估算及形成机制探讨、情景分析与预测、环境变化及农业管理措施对水文水质的影响、气候变化对区域水循环和作物生长的影响等多方面^[3];应用的流域尺度从几百平方千米到几十万平方千米不等,甚至大到国家级或大陆级空间尺度,如 Jayakrishnan 等^[4]将 SWAT 模型用于宏观分析和评估美洲大陆或美国全国的水质、水量等水资源管理措施的效应;应用的时间尺度从某次降水过程的数小时、数天到几十年不等^[5]。

SWAT 模型虽然在国内外得到了广泛的应用^[2],但模型中单一的植物生长模式难于表达变化密度、多林种混交的森林植被状态以及不同的种植制度与农耕方式,因而这些模型的应用难于考虑植被景观、种植制度和农耕方式对非点源污染的影响。针对这些问题,国内外学者对该模型进行了不同程度的修正。如 Watson 等^[6-7]引入了森林生长的机理模型 3-PG 来代替 SWAT 的植物生长模型;Kiniry 等^[8]通过引进并修正 ALMANAC 植物模型以改善 SWAT 模型在模拟森林生态系统有关水和生物地球化学循环方面不足的方法。国内学者在这方面,近年来也作了大量探索,代俊峰等^[9]针对中国南方丘陵水稻灌区的水文特点,改进了 SWAT 的灌溉水运动模块、稻田水分循环模块、稻田水量平衡各要素和产量模拟的计算方法,增加了渠系渗漏模拟模块及其对地下水的补给作用、塘堰的灌溉模块等。谢先红等^[10]在稻田蒸发蒸腾、控制灌溉排水、塘堰实时灌溉等方面对 SWAT 模型进行了改进,可以模拟“间歇”、“淹灌”和“薄浅湿晒”等灌溉模式的水稻灌区水分运动过程。仕玉治等^[11]针对灌溉资料相对缺乏流域,以 SWAT 模型为基础,修改了其水稻田的自动灌溉制度,并构建了多水源综合灌溉模块。郑捷等^[12]针对平原型灌区人工—自然复合的水文循环特点,考虑平原灌区灌溉渠道、排水沟和河道等人工干扰,在沟渠河网的提取方法、子流域与水文响应单元的划分以及作物耗水量计算模块等方面对 SWAT 模型进行了改进。

在非点源模型的研究与应用过程中,针对亚热带季风湿润区的森林植被景观和我国南方水稻种植区种植制度与农耕方式的特征,开展非点源污染建模及模拟方法的研究,并应用遥感技术获取植被混交比例、复种和套种等相关参数,对于应用现有的非点源模型开展非点源污染的研究具有实际意义。因此,本文以农林系统的非点源污染模拟为目标,通过研究建立变化密度及多种类混交的森林生长模型,修正 SWAT 采用平均森林植被密度和单一植物生长模式估算生物累积量的问题,并建立与之相适应的森林优势组份丰度遥感反演模型、叶面积指数和消光系数遥感反演模型以获取森林生长模型的相关参数。同时,根据间作套种下的辐射能利用 Keating 方程,引入间作套种指数变量,修正模型原有的单一生物量日积累模型,并以亚热带季风湿润区红壤背景下的鄱阳湖流域为试验区,以野外实测数据为基础,对 SWAT 修正模型的有效性进行探讨。

1 SWAT 模型植物生长模式的应用局限与修正

1.1 SWAT 模型植物生长模式及应用中存在的问题分析

1.1.1 SWAT 模型原有植物生长模式的缺陷 SWAT 植物生长模型源自简化的 EPIC(Environmental Policy-Integrated Climate)模型,它利用单一的植物生长模型来模拟所有植物的生长,SWAT 模型主要适用于高度农业区的非点源模拟^[3]。农林系统的差异导致了多个研究者对 SWAT 模型进行了修正^[6-7]。然而, Watson^[6]和 MacDonald 等^[7]引进的 3-PG 模型需要大量森林生长数据的支持,增加了模型的复杂性,使模型的应用受到一定的局限;而 ALMANAC 模型原本来源于 EPIC 模型,为多作物通用模型,其作物生长模型不再单一,但其生物量累积过程并没有考虑到间作套种这种复合群体的增益效能^[8]。在最新的 SWAT 2012 版本中,虽然作

了适当的修正,但其生物量累积过程中的两个重要参数:消光系数和叶面积指数仍然还是简化形式,所有植物的消光系数都被缺省地定为-0.65,而叶面积指数则基于平均的植物密度进行估算,且由统一的理想叶面积发育模型来控制.这种单一的植物生长模型难于描述森林系统和农业系统中多林种混交、间作套种的植被景观和种植方式.而农林系统是流域生态系统的重要子系统,也是氮(N)和磷(P)循环的重要界面,模型的这种简化局限了该模型在农林系统中的一些应用.

1.1.2 模拟间作套种农耕方式的局限 SWAT模型主要用于估算大流域的非点源负荷,预测、评估不同土壤、土地利用/覆盖和农业管理对水、泥沙沉积、农业化学物质的长期影响.但由于其植物生长模型的单一,难于表达复杂的种植方式,且在农事管理上,虽然考虑了多种农事活动和农事管理,但这种考虑主要基于美洲和欧洲等国家粗放型的农耕方式^[6],对我国常见的间作套种等种植制度和农耕方式基本上无法处理,而这些耕作方式极大地改变了农作物的光能利用效率^[13-14],改变了作物对N和P的吸收,影响了营养物质的循环.

1.2 SWAT模型原有的植物生长模式

SWAT的植物生长模型为单一的植物生长模型,它主要由两部分组成,一是生物量累积模型,另一个是理想叶面积发育模型.具体内容如下:

(1) 日生物量最大增量由植物叶面积截取的光合有效辐射来估算:

$$\Delta bio = D \cdot RUE \cdot Reg \cdot H_{phosyn} \quad (1)$$

式中, Δbio 为逐日的总生物量潜在增量; RUE 为植物的辐射利用率; D 为空间单元中的平均密度; Reg 为温度、水分和氮磷养分的综合胁迫因子(其值在0~1之间),如温度的胁迫以植物(作物)生长的下限温度、最适温度和上限温度等来表达,以植物(作物)生长的S型曲线来描述,植物的三基点温度及其他胁迫因子数据都存储在SWAT的植物生长数据库中.

而 H_{phosyn} 为给定时间内植物叶面积截取的光合有效辐射,该变量由下式确定:

$$H_{phosyn} = 0.5H_{day} (1 - \exp(-k_1 \cdot LAI)) \quad (2)$$

式中, H_{day} 为在给定时间内入射的总辐射, $0.5H_{day}$ 为光合有效辐射, k_1 是消光系数(缺省值为-0.65), LAI 是叶面积指数,由理想叶面积发育模型估算.

(2) 理想叶面积发育模型.植物生长初期,在叶面积达到最大叶面积之前,冠层高度和叶面积发育由理想叶面积发育模型(曲线)所控制:

$$fr_{LAI_{mx}} = \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp(l_1 - l_2 \cdot fr_{PHU})} \quad (3)$$

式中, $fr_{LAI_{mx}}$ 为对应于所给植物潜热单位比(fr_{PHU})的植物最大叶面积指数比, fr_{PHU} 为该植物在生长季节内给定时间的潜热单位比, l_1 和 l_2 为形状系数. fr_{PHU} 的计算公式为:

$$fr_{PHU} = \frac{\sum_{i=1}^d HU}{PHU} \quad (4)$$

式中, HU 为第*i*天的累积热量单位, PHU 为该植物的总热量单位.

形状系数通过2个已知点($fr_{LAI,1}$, $fr_{PHU,1}$)和($fr_{LAI,2}$, $fr_{PHU,2}$)解方程(3)来计算,其公式如下:

$$l_1 = \ln \left[\frac{fr_{PHU,1}}{fr_{LAI,1}} - fr_{PHU,1} \right] + l_2 \cdot fr_{PHU,1} \quad (5)$$

$$l_2 = \frac{\left\{ \ln \left[\frac{fr_{PHU,1}}{fr_{LAI,1}} - fr_{PHU,1} \right] - \ln \left[\frac{fr_{PHU,2}}{fr_{LAI,2}} - fr_{PHU,2} \right] \right\}}{fr_{PHU,2} - fr_{PHU,1}} \quad (6)$$

某天的冠层高度由下式计算:

$$h_c = h_{c, \max} \cdot \sqrt{fr_{LAI_{mx}}} \quad (7)$$

式中, h_c 为给定某天的冠层高度(m), $h_{c, \max}$ 为该植物的最大冠层高度.

1.3 基于多植物生长模式的SWAT模型的修正

1.3.1 森林生长模型的调整与修正 原始的SWAT植物生长模型用于森林生长,存在如下问题:一是由于叶

面积季节变化不大,常绿树木类叶面积如采用理想叶面积发育模型来估算,会存在一定的误差;二是所有的森林植被冠层的消光系数都设置为-0.65;三是森林密度采用平均密度来表示。

基于上述考虑,对 SWAT 模型有关森林植被的生长模型,提出如下修正方法:

(1)对于落叶类树木,仍然采用原来的植物生长模型;(2)对于常绿树木类,植物生长模型的理想叶面积发育模型由叶面积指数与遥感植被指数统计模型来代替;(3)对于消光系数,通过试验建立研究区优势植物类型遥感消光系数模型来代替统一的消光系数-0.65. 研究区优势植物类型遥感消光系数模型由实测的消光系数与遥感植被指数的统计关系来确定;(4)落叶常绿针阔混交林的植物生长模型由下式确定:

$$H_{\text{phosyn}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot H_{\text{phosyn},i} \quad (8)$$

式中, P_i 为*i*类优势树种在混交林中的比例,采用流域森林优势植被组份丰度来表示,采用遥感方法来获取。 $H_{\text{phosyn},i}$ 为*i*类优势树种给定时间内植物叶面积截取的光合有效辐射, n 为混交林中优势树种的数量。(5)森林密度问题的修正,SWAT 植物生长的密度体现在日生物量最大增量公式中(公式(1)),它对于农作物种植来说,问题不大,但对于森林系统来说,问题比较大。在 SWAT 模型原有的输入变量中,森林的密度主要体现在土地利用/覆盖中的林地类的 2 级分类,即有林地、灌木林地等。因此,在式(1)中引入流域森林植被覆盖度来代替其中的平均密度 D ,流域森林植被覆盖度采用遥感方法提取。

1.3.2 间作套种方式下农作物生长模型的建立 间作套种是一种在时间和空间上实现种植集约化的种植方式。根据 Keating 和 Carberry^[14-15]的方程可以得出间作套种的高秆作物在给定时间内植物叶面积截取的光合有效辐射为:

$$H_{\text{phosyn},H} = 0.5H_{\text{day}} \left\{ \left[1 - \exp(k_{1,H} \cdot LAI_{H,1}) \right] + \frac{k_{1,H} \cdot LAI_{H,2}}{k_{1,H} \cdot LAI_{H,2} + k_{1,L} \cdot LAI_L} \left[1 - \exp(k_{1,H} \cdot LAI_{H,2} + k_{1,L} \cdot LAI_L) \right] \right\} \quad (9)$$

而矮秆作物在给定时间内植物叶面积截取的光合有效辐射为:

$$H_{\text{phosyn},L} = 0.5H_{\text{day}} \left\{ \frac{k_{1,L} \cdot LAI_L}{k_{1,H} \cdot LAI_{H,2} + k_{1,L} \cdot LAI_L} \left[1 - \exp(k_{1,H} \cdot LAI_{H,2} + k_{1,L} \cdot LAI_L) \right] \right\} \quad (10)$$

式中, $LAI_{H,1}$ 、 $LAI_{H,2}$ 和 LAI_L 分别为高秆作物上层和下层的叶面积指数和矮秆作物的叶面积指数, $k_{1,H}$ 和 $k_{1,L}$ 分别为高矮搭配作物类型的消光系数,上层与下层以矮秆作物的冠层高度为分界点。 $LAI_{H,1}$ 、 $LAI_{H,2}$ 的计算由下式表示:

$$\begin{cases} LAI_{H,1} = \frac{h_H - h_L}{h_H} LAI_H \\ LAI_{H,2} = \frac{h_L}{h_H} LAI_H \end{cases} \quad (11)$$

式中, h_H 和 h_L 分别为高秆和矮秆作物的冠层高度,由作物性状和生长习性数据库提供。因此,间作套种产生的日最大生物量累积为:

$$\Delta bio = RUE(I_H \cdot H_{\text{phosyn},H} + I_L \cdot H_{\text{phosyn},L}) \quad (12)$$

式中, I_H 、 I_L 分别为高秆和矮秆作物的间作套种指数。所谓间作套种指数,是指在单位面积中某种作物在间作套种中所占的比重。不同作物的间作套种指数将采用遥感技术通过建立间作套种指数遥感模型来获取。

1.4 SWAT 模型源代码的修正及编译

SWAT 模型由 Fortran 语言编制而成,其执行框架由主程序及大量的子程序构成,共有 307 个程序文件。

针对公式(8)和公式(12),构造了 3 个新变量 P (森林优势植被组份丰度)、 I_H (高秆作物的间作套种指数)和 I_L (矮秆作物的间作套种指数),由于叶面积指数和消光系数两个变量在原始的 SWAT 模型中就有,因此无需增设。由于 SWAT 模型的叶面积指数(LAI)是在水文响应单元(HRU)中的一个变量,即在 HRU 中植被的 LAI 是均一的,因此,公式(8)和公式(12)的 P 、 I_H 和 I_L 均在水文响应单元级别上提取其数值,并增加了相应的数据读取子程序 ReadNewVar.f。该子程序完成修正后模型所需要的变量包括 LAI 、植被冠层消光系数(K ,即(2)式的 k_i ,与后面的 EC 意义相同)等原有变量和 P 、 I_H 和 I_L 等新增量。

由于 SWAT 模型对于模拟间作套种存在一定的局限(见 2.1.3),对 SWAT 模型农事管理模块的修正,主

要增加了一个判断某 HRU 内是否存在间作套种的逻辑变量 InterPlant, 并增设了新的间作套种规模模块 InterPlantMgt.f, 该模块参照原有的管理模块, 增加了允许多种作物并存管理的功能。

SWAT 模型的修正与编译是采用 Intel Visual Fortran Compiler 11.1.067 编译器在 Visual Studio 2005 平台上修正及编译完成。

2 试验区概况及模型的数据准备

2.1 试验区概况

选取梅江流域 ($26^{\circ}17'34''\sim 27^{\circ}08'54''\text{N}$, $115^{\circ}44'28''\sim 116^{\circ}16'06''\text{E}$) 为研究区, 该流域集水面积约 3304 km^2 。境内以中低山为主, 高程分布在 $170\sim 1440\text{ m}$, 平均高程为 379.1 m (图 1)。贯穿全流域的梅江发源于江西省宁都县肖田乡北缘的王陂障, 梅江是赣江的水源区, 也是鄱阳湖的主要源头之一, 属赣江的上支。流域内气候温和湿润, 季风明显, 雨量充沛, 年平均气温 17.3°C , 极端最高气温 37.9°C , 极端最低气温 -6.2°C , 年降雨量 1706 mm , 年平均相对湿度 80% 以上。土壤多为变质岩、花岗岩发育而成的山地红壤和黄红壤, 质地为壤土和轻砂壤, 土层深厚肥沃。流域内地带性植被为中亚热带常绿阔叶林, 森林覆盖率达 70% , 天然林面积占森林面积的 87% 。流域内的植被群系主要为针叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、竹林、矮(曲)林、灌丛、草丛。由于研究区处于亚热带湿润季风区, 其森林分布特征以混交林为主, 即使是人工林, 也难见单一的林木。天然植被群系中, 常绿阔叶林和针叶林优势明显, 其中针叶林的优势树种是马尾松 (*P. massoniana* Lamb.) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.), 主要分布在中低丘陵岗地; 常绿阔叶林有 17 种树种, 但优势树种为丝栗栲 (*C. fargesii* Fr.) 和苦槠栲 (*C. sclerophylla* (Lindl.) Schott.), 主要分布在人类活动较少且海拔高于 $600\sim 700\text{ m}$ 的高山上^[16-17], 低丘陵以樟 (*Cinnamomum camphora*) 和木荷 (*Schima superba*) 为主, 主要分布在居民地附近; 落叶阔叶林的垂直地带性分布表现出低矮岗地以杨树 (*Populus*)、桉树 (*Eucalyptus* spp.)、苦楝 (*Melia azedarach*)、乌柏 (*Sapium sebiferum*) 等为主, 中高山地以枫 (*Liquidambar formosana* Hance)、栎 (*Q. aliena* var. *acu-teserrata*) 为主; 竹林以毛竹 (*P. pubescens* Mazel) 为主, 但总量不多, 主要分布在低矮岗地。此外, 流域内还有零星分布的果菜园林。

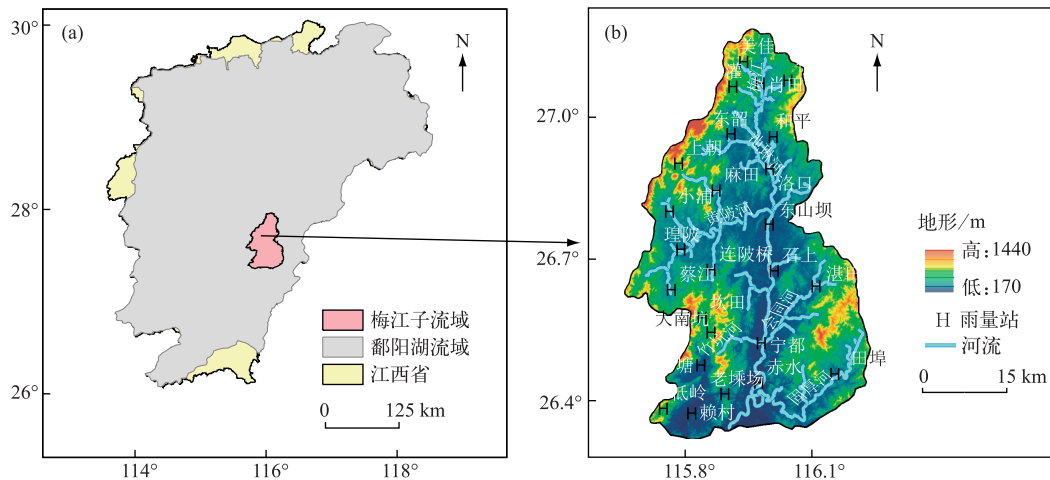


图 1 研究区的地形 (a)、主要河流及雨量站分布 (b)

Fig.1 Distribution of terrain (a), domain rivers and precipitation stations in the study area (b)

流域内主要水系为梅江 (干流)、琳池河 (支流)、黄陂河 (支流)、会同河 (支流)、竹坑河 (支流)、固厚河 (支流) 6 条主干河流 (图 1)。其中 5 条支流的水量占整个梅江干流水量的 92.3% 。

按 2010 年人口统计资料, 三种产业结构比为 $24.7:39.7:35.6$ 。农业以水稻种植为主, 兼有脐橙、莲子等作物种植。行政区涉及广昌县、乐安县、宁都县、石城县、兴国县、宜黄县共 6 个县, 其中宁都县占研究区面积

的 96.4%,其余县仅占 3.6%.

2.2 模型的数据输入及其处理

SWAT 模拟过程中涉及的数据包括 2 部分:1)SWAT 模型需要的基本数据,主要有:地形 DEM、河网、土地利用与覆盖、土壤类型及其理化属性、植物与植物生长数据、肥料数据、水文与水质数据、气象数据和农业养殖数据与人口排放数据^[18],其中水文与水质数据主要用于模型的建立、模型参数的率定和验证;2)修正后 SWAT 模型所需的数据,包括植被覆盖度、森林优势植被组份丰度、森林优势植被冠层叶面积指数及消光系数、农耕方式间作套种指数及复种指数等森林植被与间作套种参数.

2.2.1 森林植被与间作套种参数的获取方法 (1)森林优势组份丰度的遥感估算方法流域森林优势组份丰度是反映流域中某森林组份的单位面积比重,是修正后 SWAT 模型的一个重要变量. 本文基于线性混合模型方法通过遥感技术来获取研究区森林优势组份丰度的空间分布数据. 线性混合模型假定混合像元的光谱是该瞬时视场内各类地物光谱的线性组合^[19-20]. 根据研究区的实际地表覆盖,将研究区地表覆盖分成阔叶林、针叶林、草地与稀疏灌丛、裸地、水体、耕地、居民地共 7 种地表覆盖组份,其中森林植被包括阔叶林、针叶林和草地与稀疏灌丛 3 种基本组份. 作为研究成果的一部分,地表覆盖组份丰度的遥感提取方法见文献[21-23],提取的地表覆盖丰度是以遥感影像的像元为空间单元,一个像元中的 7 种地物覆盖丰度累加值为 1. 研究区阔叶林、针叶林和草地与稀疏灌丛 3 种森林植被组份丰度见图 2.

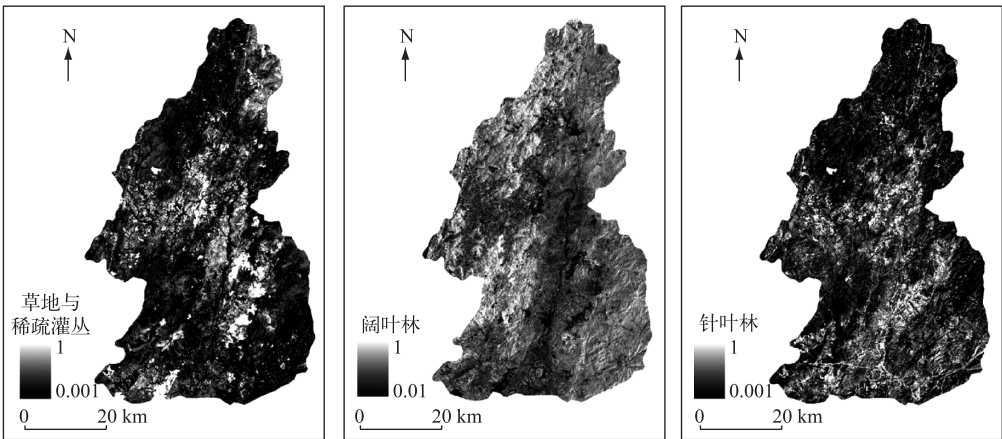


图 2 研究区 3 种主要森林植被组份丰度

Fig.2 Three domain forest vegetation component abundance of the study area

(2)森林优势植被冠层叶面积指数及消光系数的遥感反演叶面积指数和消光系数是表征植被群体冠层结构及光能利用的地球表层下垫面参量,也是修正后 SWAT 模型的重要参数. 我国南方地处中亚热带湿润地区,雨量丰沛,植被多呈混交状态,且疏密程度不均,少见单一大面积的均匀分布. 因此,以目前的遥感技术及遥感信息源难于获取单一树种或单一植被的叶面积指数和消光系数. 以遥感技术反演的叶面积指数或消光系数只能是一定空间范围内森林优势植被类型的叶面积指数或消光系数. 为更好地匹配叶面积指数和光合有效辐射(用于估算消光系数)的实测数据,反映植被混交和疏密不均的状态,本文以美国 Landsat ETM 作为遥感信息源,通过 Gram-Schmidt(GS)图像融合方法,将 ETM 融合成空间分辨率为 15 m 的多光谱数据. 在实测森林优势植被冠层叶面积指数和光合有效辐射的基础上,利用植被指数法经验公式法反演流域的叶面积指数,并根据 Beer-Lambert 定律,建立了流域优势植被冠层消光系数的反演模型,具体方法参见文献[24]. 图 3 给出了利用该反演模型估算的研究区森林优势植被冠层叶面积指数和消光系数.

(3)农耕方式间作套种指数及复种指数的遥感信息提取农业系统中的农耕方式在原有的 SWAT 模型中已有多种方式体现,集中在农事管理模块中,如播种、施肥/杀虫、深耕、收割等,但间作套种的农耕方式在原有的 SWAT 模型中体现的不够. 为此本文修正了 SWAT 模型作物生长模型的日最大生物量累积方程(公式

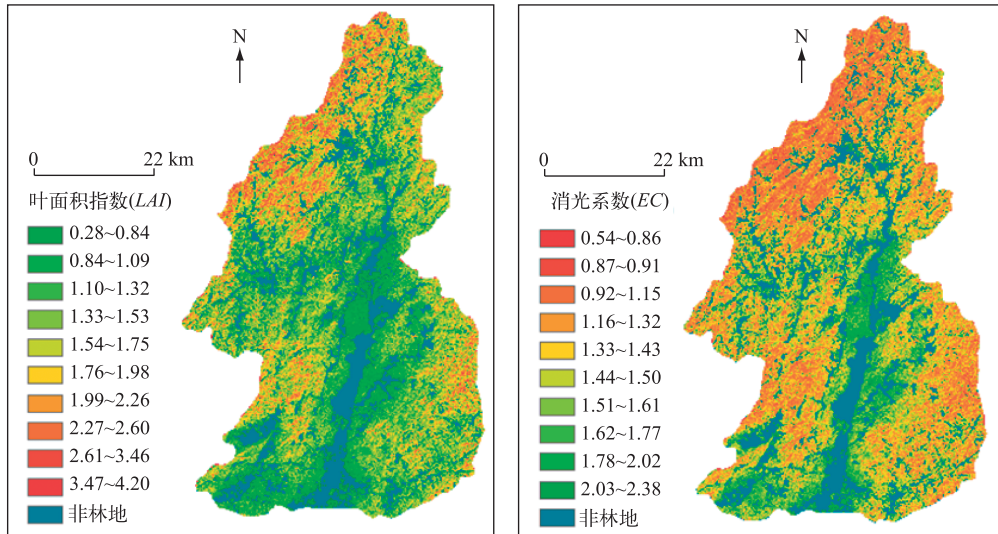


图 3 研究区森林优势植被冠层的叶面积指数和消光系数

Fig.3 The LAI and EC of forest domain species vegetation canopy of the study area

(12)). 式中的 I_h 、 I_l 将通过建立间作套种指数遥感模型获取。

复种问题在 SWAT 模型中已有所体现,可以通过农事管理模块来实现有关复种的相关参数的设置及数据库建立,复种指数的遥感反演也有比较成熟的方法^[25-27]。本文所涉及的试验区复种指数的遥感反演参见文献[28]。

2.2.2 模型的其他输入数据 (1) DEM 数据和河网数据. DEM 和河网的 GIS 数据来源于 1:5 万的地形图,主要用于 SWAT 模型的流域离散化过程。

(2) 土地利用数据. 土地利用/覆盖数据是 SWAT 模型的主要输入变量,同时也是人口及牲畜养殖排放估算、森林优势组份丰度模型建立、农作物复种与间作套种指数模型建立和叶面积指数与消光系数模型建立的重要参考数据. 为了获得研究区的土地利用/覆盖数据,采用了高级陆地成像仪 (Advanced Land Imager, ALI) 数据作为遥感数据源 (来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn>) 的 Level 1Gst 数据)。通过多光谱数据与全色波段的 Gram-Schmidt (GS) 数据融合,生成了 10 m 分辨率的多光谱假彩色合成图像,通过目视解译方法对研究区土地利用/覆盖进行了解译,并对解译结果进行了多次调研并验证. 形成的最终类别为:农村居住用地、城镇及交通建设用地、旱地、未利用地、水田、低矮植被 (包括草地、灌丛)、疏林地、有林地、河流、湖泊水库坑塘 10 个类别 (图 4)。

(3) 土壤数据. 土壤数据主要包括土壤类型及其理化属性,来源于江西省宁都县 2009 年完成的《宁都县耕地地力评价》成果和 1986 年完成的土壤普查成果^[29],其中土壤类型空间分布地图比例尺为 1:5 万 (图 5)。SWAT 的土壤用户数据库 (usersoil) 包括 17 个物理属性,其中 SOL_CLAY (layer #)、SOL_SILT (layer #)、SOL_SAND (layer #)、SOL_ROCK (layer #) 和 SOL_Z (layer #) 按参考文献[29]进行转换,SOL_BD (layer #)、SOL_AWC (layer #)、SOL_K (layer #)、SOL_CBN (layer #)、USLE_K 等变量则按照参考文献[30]进行转换并计算;而化学属性存放在 SWAT 的土壤输入文件 (.chm) 中,共有 7 个属性。

(4) 植物/作物生长数据. 植物/作物的生长数据主要包括植物生长发育所需的有效积温、发育的最低温度、最高温度和最适温度等农业气象参数,以及最大冠层高度、最大潜力叶面积指数、消光系数、根深、收获指数等品种性状参数. 部分植物参数取自 SWAT 模型自带的参数,如松树、杉树、水稻、大豆等,研究区特有的作物参数来自《宁都县耕地地力评价》所收集的宁都县作物品种特征数据。

(5) 肥料数据与各地施肥数据. 肥料数据来自于《宁都县耕地地力评价》所收集的肥料信息,包括所施用肥料的名称、含氮量、含磷量、含钾量等,利用这些数据,建立了 SWAT 模型运行所需肥料数据库;研究区

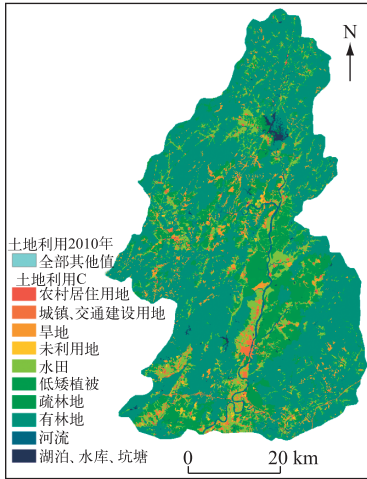


图 4 土地利用与覆盖
Fig.4 Land use
and cover

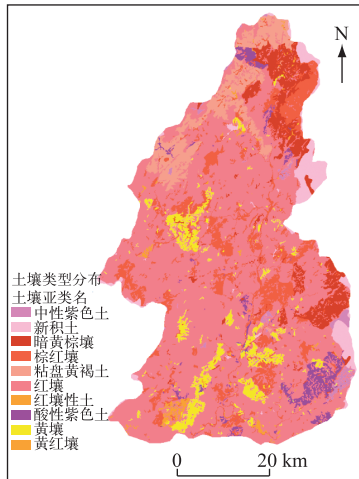


图 5 土壤类型空间分布
Fig.5 Spatial distribution of
soil type

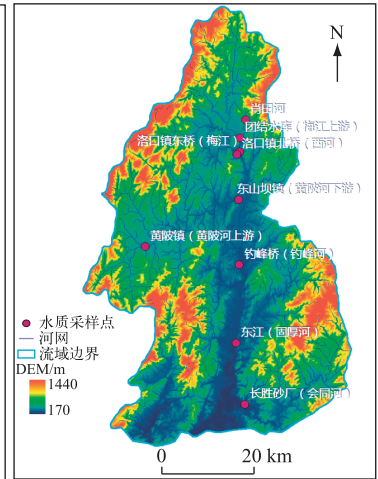


图 6 水质采样点的分布
Fig.6 Distribution of the
water quality sampling sites

不同区域农业施肥数据来源相同,包括了 24 个乡镇共 21062 户农户施肥品种和每亩施肥量、亩产等内容。

(6) 水文和水质数据. 水文和水质数据主要用于 SWAT 模型的参数率定和模型验证,包括河流流量数据和河流主要营养盐浓度数据. 为了获得研究试验区水文水质的实测数据,对研究区空间离散化了 87 个子流域,设置了 9 个断面的测点(图 6),这些测点大约控制了 70 个子流域,占研究区子流域总数的 80.5%;对流量与水质进行了 6 次测定,其中水质采样要素包括 TN、TP、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮。

(7) 气象数据. 采用了研究区周边 9 个气象站的数据,包括宁都县、宜黄县、瑞金市、石城县、于都县、南丰县、广昌县、泰宁县(福建)、长汀县(福建)1957—2011 年共 54 a 的气温(最高和最低)、湿度、风速和降水数据,利用这些数据,按照 SWAT 气象用户数据库的要求,整理成 SWAT 的气象用户数据库^[31]. 此外,在流域内还采用了 33 个雨量站 2005—2011 年共 7 a 的实测降水数据,作为模型的输入,用于模型的建立、参数率定和验证。

(8) 农业养殖数据与人口排放数据. 研究区不仅包含林业、农业和少量的工业,同时还有一定规模的养殖业,为了能较好地利用 SWAT 模型模拟流域内的非点源污染,农业养殖和人口排放不能不考虑. 本文对农业养殖和人口排放采用了 GIS 的空间分析方法,建立了在中小尺度流域农业养殖和人口排放空间化方法,具体可参见文献[32-33]。

3 模型的调试及参数率定

采用了汇流累积区面积为 3000 hm^2 的阈值进行了空间离散化,生成了 87 个子流域,并采用土地利用/覆盖、土壤、坡度比例阈值为 20:10:20 的水文响应单元(HRU)划分阈值,得到 700 个 HRU 单元。

选取了 2005—2011 年作为模型调试运行、参数率定、验证的时间,其中 2005—2007 年为调试运行时间,2008—2010 年为模型参数率定时间,2011 年为模型验证时间。

模型参数率定先对水文参数进行率定,率定完水文参数以后,再对营养盐负荷参数进行率定,这期间不再对水文参数进行率定. 使用的模型均为原始模型。

修正模型的模拟参数采用原始模型率定的参数结果,除了模型进行了修正及输入参数进行了相应调整外,其余变量及参数均控制在与原始模型的变量与参数一致,并使用修正模型的模拟结果进行不同研究目标的分析。

3.1 流量的参数率定与敏感性分析

参数率定采用 SWAT-CUP 软件进行,该软件采用 t 检验的方法,对变量进行敏感性评价,一般认为 $P < 0.05$ 为敏感性变量. 流量的参数敏感性试验包括 CN2、ALPHA_BF、GW_DELAY、GWQMN、GW_REVAP、ESCO、SOL_AWC 等 13 个参数,各参数名称、物理意义和率定结果见表 1,其中参数名称中的扩展名表示所在数据库名称.

表 1 流量的率定参数及率定结果
Tab.1 Calibration parameters and results of the flow

序号	参数名称	物理意义	率定结果
1	CH_K2.rte	主河道冲积层的有效水力传导率/(mm/h)	487.5
2	ALPHA_BF.gw	基流的 α 因子/d	0.025
3	SOL_AWC.sol	土壤的饱和含水量/(mm/mm)	0.355
4	CH_N2.rte	主河道的曼宁“ n ”值	0.293
5	CN2.mgt	SCS 径流曲线数	96.43
6	OV_N.hru	地表径流的曼宁“ n ”值	18.75
7	GWQMN.gw	浅水层回归流发生时水深阈值/mm	0.050
8	GW_DELAY.gw	地下水延迟时间/d	355.5
9	ESCO.hru	土壤蒸发补偿因子	0.825
10	DEPIMP_BSN.bsn	模拟到达的地下水位至不透水层的深度/mm	150.0
11	MSK_CO1.bsn	用于控制正常流存储时间常数影响的率定系数	2.75
12	MSK_CO2.bsn	用于控制低流存储时间常数影响的率定系数	1.75
13	GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	0.145

图 7 给出了这 13 个参数的率定敏感性程度,从 P 值可以看出,CH_K2、ALPHA_BF 和 GW_REVAP 3 个参数比较敏感,其中以 CH_K2 最敏感^[34].

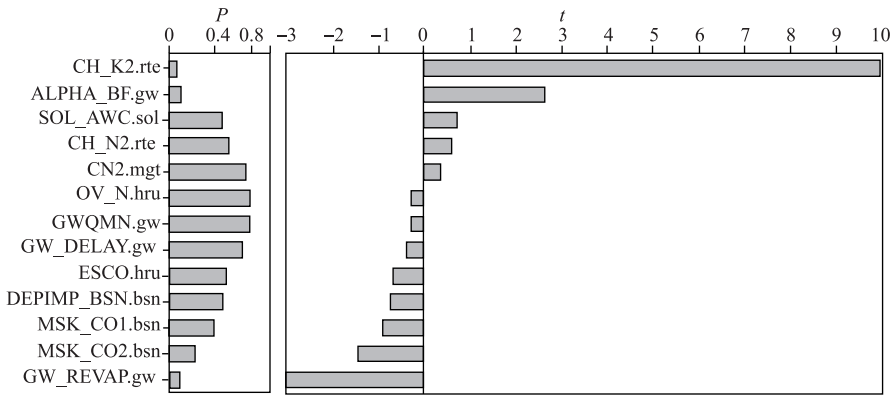


图 7 流量参数率定的敏感程度 t 值和 P 值

Fig.7 The flow parameters calibration of sensitive degree of the t and P

3.2 营养盐负荷的参数率定与敏感性分析

氮营养盐负荷的参数率定选择了 NPERCO、CMN、ERORGN、SPCON、BIOMIX、SHALLST_N 等 8 个参数,其中 NPERCO、CMN 2 个参数对氮营养盐的排放具有一定的敏感性(图 8a). 磷营养盐负荷的参数率定选择了 PSP、RSDCO、BIOMIX、PHOSKD 和 PPERCO 等 10 个参数,其中 PSP 和 SPEXP 2 个参数反应敏感,以 PSP 参数最为敏感(图 8b). 各参数的名称、物理意义及率定结果见表 2.

在氮和磷参数率定基础上,对上述反应敏感的参数,再用 SWAT-CUP 进行微调率定,得到最优的参数,利用这些率定好的参数进行模拟. 在实测氮和磷负荷数据基础上对模拟结果进行验证,并分析模拟的有效

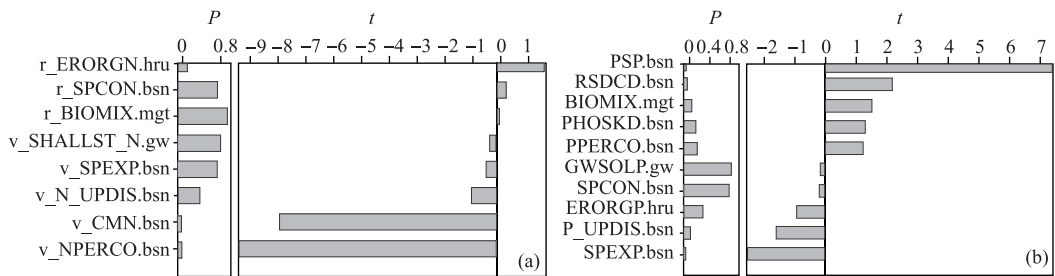


图 8 氮(a)和磷(b)相关参数率定的敏感程度 t 值和 P 值

Fig.8 The sensitive degree of t and P of relevant parameters of nitrogen and phosphorus

表 2 氮和磷相关参数的率定结果

Tab.2 The calibration results of relevant parameters of nitrogen and phosphorus

氮			磷		
参数名称	物理意义	率定结果	参数名称	物理意义	率定结果
SHALLST_N.gw	流域通过地下水排向河道的硝酸盐浓度/(mg/L)	675.0	GWSOLP.gw	流域通过地下水排向河道的可溶性磷浓度/(mg/L)	625.00
BIOMIX.mgt	生物混合系数	0.875	BIOMIX.mgt	生物混合系数	0.775
NPERCO.bsn	氮的渗透系数	0.325	PPERCO.bsn	磷的渗透系数	13.938
CMN.bsn	活性有机氮矿化率因子	0.0012	RSDCO.bsn	植物/作物残渣分解系数	0.098
SPCON.bsn	河道演算中泥沙被重新携带的线性指数	0.0048	SPCON.bsn	河道演算中泥沙被重新携带的线性指数	0.0043
SPEXP.bsn	河道演算中泥沙被重新携带的幂指数	1.338	SPEXP.bsn	河道演算中泥沙被重新携带的幂指数	1.388
ERORGN.hru	有机氮富集率	3.375	ERORGP.hru	有机磷富集率	3.875
N_UPDIS.rte	氮吸收分配参数	32.50	PHOSKD.bsn	磷的土壤分配系数	167.5
			PSP.bsn	磷的吸附系数	0.510
			P_UPDIS.rte	磷吸收分配参数	32.50

性程度.

4 模型的验证与有效性分析

4.1 原始模型的验证与有效性分析

在参数率定结果的基础上,用修正模型对 2011 年进行模拟. 利用 6 次 9 个采样点的水质采样数据和同期的宁都县水文站的实测流量,与模型同期断面输出的流量及营养盐负荷进行有效性分析. 采用相关系数(R^2)和有效性系数 Nash-Sutcliffe (NS) 系数来衡量模型的有效性. 其中 NS 系数的计算公式如下:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\xi_{oi} - \xi_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (\xi_{oi} - \bar{\xi_o})^2} \tag{13}$$

式中, ξ_o 、 $\bar{\xi_o}$ 和 ξ_m 分别为观测值、观测值平均值及模拟值, n 为统计的样本数. NS 值在 $-1 \sim 1$ 之间变化,其值越接近 1,说明模型的有效性越好.

原始模型模拟的流量与实测流量及流域平均降雨量的对照图可以看出,模拟与实测的流量基本趋势一致,但模拟的峰值与实测的峰值存在较大的出入,主要表现在模拟的极大峰值偏小、中小峰值值偏大(图 9). 与流域平均降雨量比较可看出,流量模拟值与流域降雨量的变化趋势有比较好的一致性,模型的地表产流调蓄模拟方面不及实际情况. 在研究区不同部位有多个不同规模的水库,由于没有获取到相关的水库数据,

因而模型没有考虑水库对河道的调蓄作用. 模型结果中基流和降雨量小的峰值模拟相对较差可能与此有关.

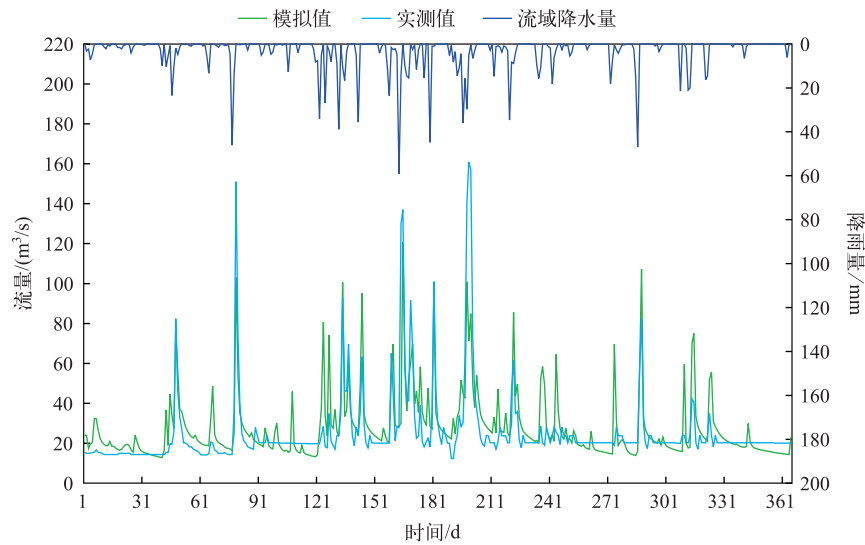


图 9 原始模型模拟的流量与实测流量及流域平均降雨量对照

Fig.9 Comparison of the original model simulation and measured flow and the average rainfall of basin

原始模型模拟流量的有效性分析可以看出,模拟值与实测值的相关系数为 0.753,达到极显著水平. 此外模型的 NS 系数为 0.686,说明模型存在较好的有效性(表 3).

表 3 原始的模型模拟流量的有效性分析

Tab.3 The effectiveness analysis of the original model of the flow simulation

参数名称	平均值/(m ³ /s)	最大值/(m ³ /s)	最小值/(m ³ /s)	标准差/(m ³ /s)	时间/d	R ² (α=0.01)	NS
实测值	25.633	161.00	12.30	19.948	365	0.753	0.686
模拟值	28.005	120.63	12.88	17.133	365		

模型在模拟 TP 和 TN 营养盐负荷方面,时间流与空间流趋势都基本一致(图 10). 表 4 给出了原始模型模拟营养盐方面的有效性分析,从营养盐负荷的平均值、最大值和最小值来看,模拟值总体比实测值偏高. 另外,从 R²值和 NS 值来看,模拟效果略差于流量的模拟,且 TN 的模拟效果比 TP 的模拟效果差.

表 4 原始模型模拟营养盐方面的有效性分析

Tab.4 The effectiveness analysis of the original model of the nutrient simulation

变量	平均值/(μg/L)	最大值/(μg/L)	最小值/(μg/L)	标准差/(μg/L)	样本数	R ² (α=0.01)	NS
TP 实测值	0.038	0.145	0.001	0.040	54	0.79	0.68
TP 模拟值	0.042	0.165	0.001	0.044	54		
TN 实测值	0.416	0.665	0.124	0.161	54	0.62	0.65
TN 模拟值	0.444	0.803	0.047	0.192	54		

4.2 基于多植物生长模式修正后的 SWAT 模型的验证与有效性分析

修正模型模拟的流量与实测流量及流域平均降雨量的对照示意图可以看出,修正模型在流量方面的模拟与原始模型基本一致(图 11),但对比图 7,在流量的峰值模拟方面,修正模型有较大的改善,说明修正模型能够较好地反映地表径流方面的实际情况.

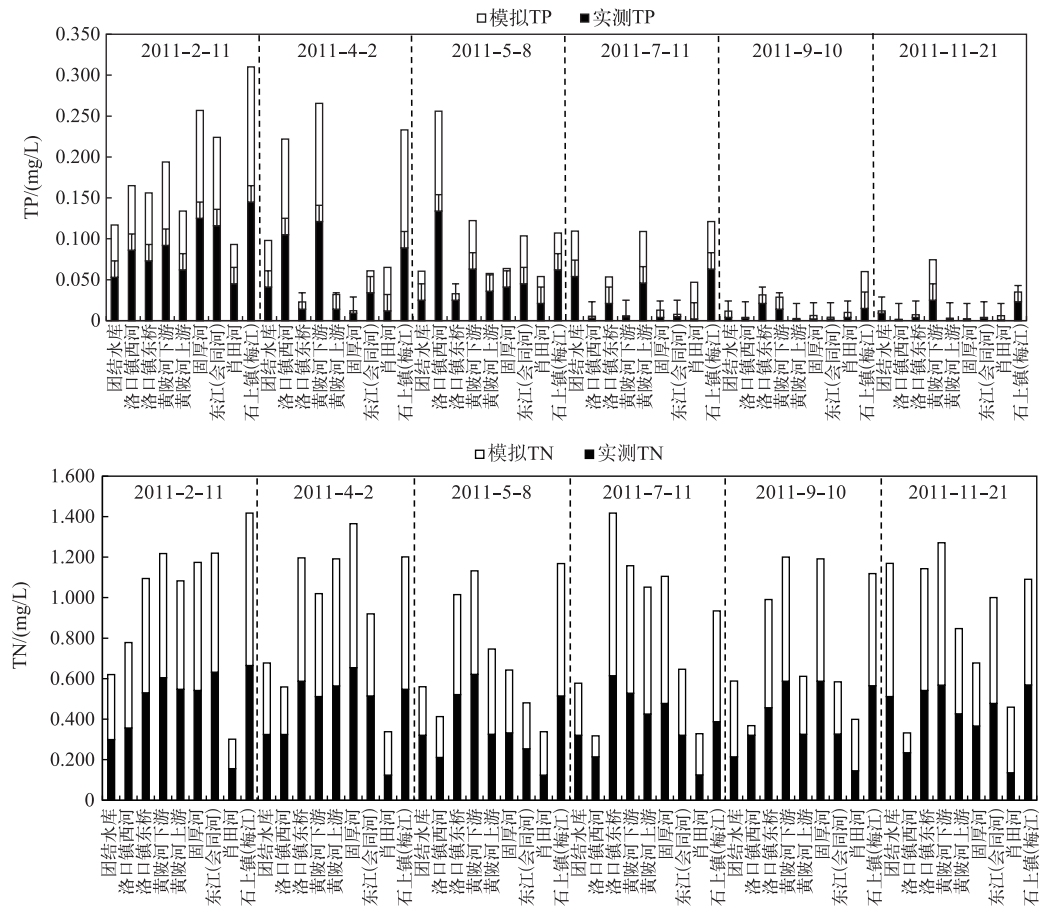


图 10 原始模型模拟的 TP、TN 与实测的 TP、TN 浓度对照

Fig.10 Comparison of the original model simulation and measured TP, TN concentrations

从模拟的流量平均值、最大值、最小值、流量总量来看,修正模型的模拟结果更接近实测值(表 5). 相关系数由原始模型的 0.753 增加到修正模型的 0.863,而 *NS* 系数则由 0.686 增加到 0.740,分别增加了 14.6% 和 7.8%. 说明修正模型的流量模拟效果比原始模型的流量模拟效果要好.

表 5 修正模型的流量模拟有效性分析

Tab.5 The effectiveness analysis of the modified model of the nutrient loading simulation

模型	参数名称	平均值/(m^3/s)	最大值/(m^3/s)	最小值/(m^3/s)	标准差/(m^3/s)	$R^2(\alpha=0.01)$	<i>NS</i>
原始模型	实测值	25.633	161.00	12.30	19.948	0.753	0.686
	模拟值	28.005	120.63	12.88	17.133		
修正模型	实测值	25.633	161.00	12.30	19.948	0.863	0.740
	模拟值	26.802	151.42	12.52	16.500		

在营养盐负荷模拟方面,将 9 个水质采样点的 6 次(分别为 2011 年 2 月 11 日、4 月 2 日、5 月 8 日、7 月 11 日、9 月 10 日和 11 月 21 日)实测 TP 和 TN 浓度与模拟的 TP 和 TN 浓度见图 12 和图 13. 修正模型在模拟营养盐负荷方面的有效性分析可以看出,修正模型在模拟 TP 时效果好于模拟 TN, R^2 与 *NS* 系数分别为 0.82、0.78 和 0.71、0.69(表 6). 对比原始模型,修正模型在模拟 TP 和 TN 方面的 R^2 和 *NS* 系数,分别增加了 3.8%、4.4% 和 6.4%、6.1%.

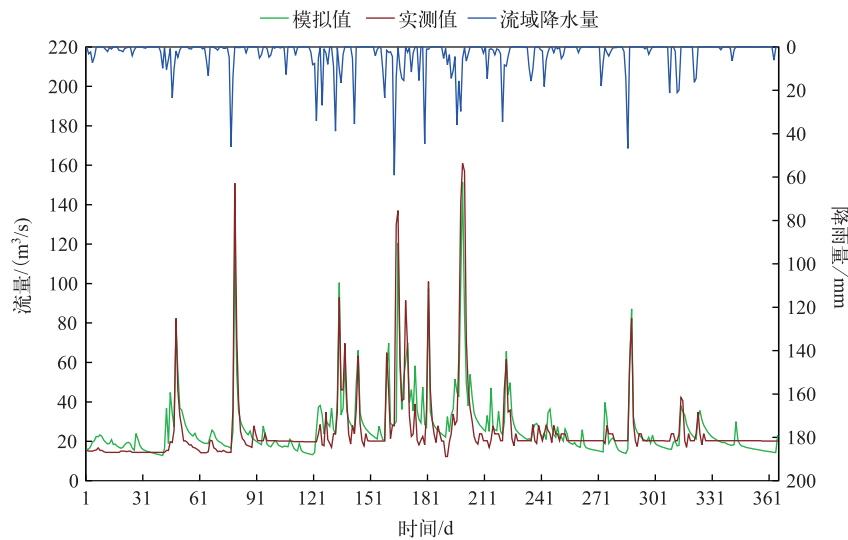


图 11 修正模型模拟的流量与实测流量及流域平均降雨量对照

Fig.11 Comparison of the modified model simulation and measured flow and the average rainfall of basins

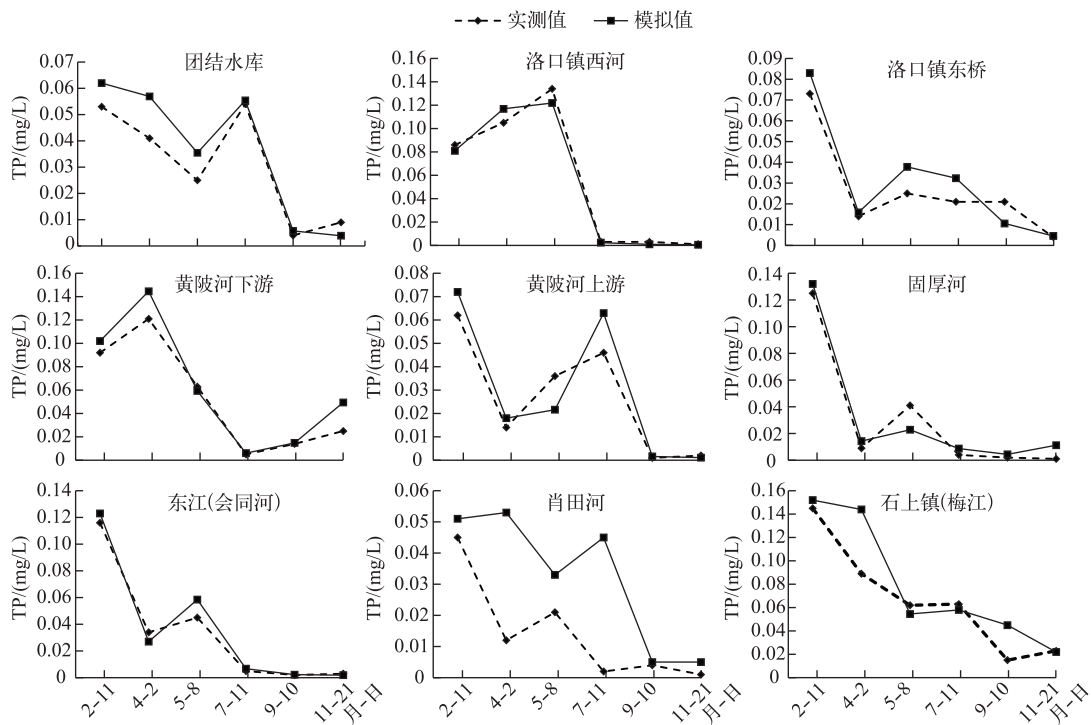


图 12 修正模型在模拟 TP 浓度的时空流与实测的时空流对照

Fig.12 Comparison of the temporal-spatial flow between the modified model simulation TP concentration and the measurement

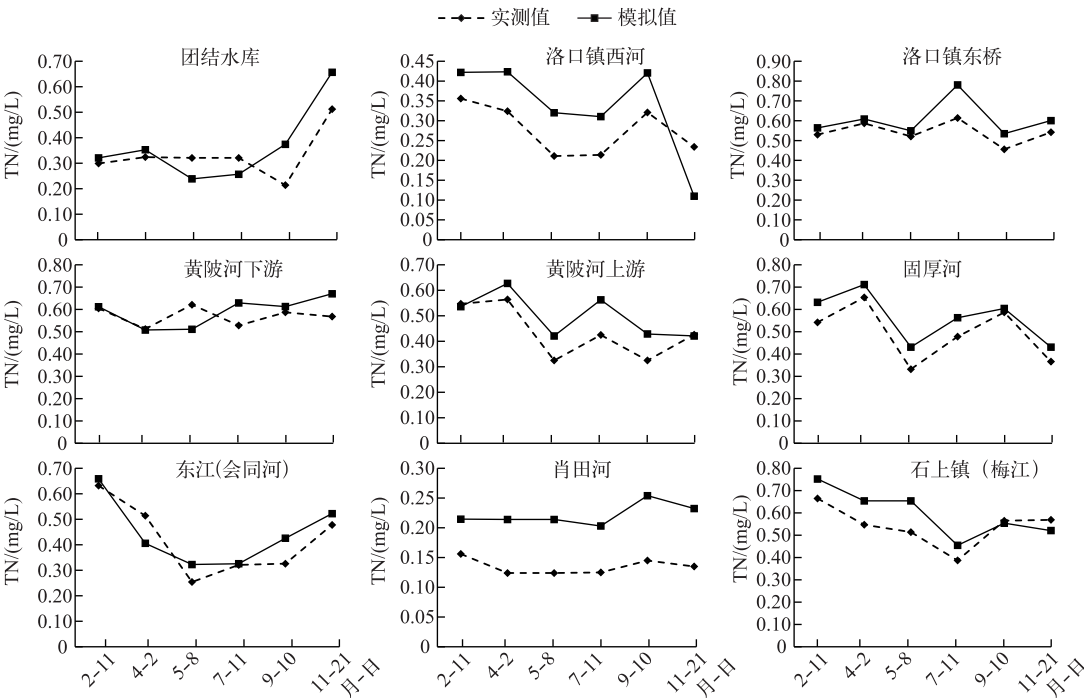


图 13 修正模型在模拟 TN 浓度的时空流与实测的时空流对照
Fig.13 Comparison of the temporal-spatial flow between the modified model simulation TN concentration and the measurement

表 6 修正模型在模拟营养盐负荷方面的有效性分析
Tab.6 The effectiveness analysis of the modified model of the nutrient loading

变量	平均值/(m^3/s)	最大值/(m^3/s)	最小值/(m^3/s)	标准差/(m^3/s)	样本数	$R^2(\alpha=0.01)$	NS
TP 实测值	0.038	0.145	0.001	0.040	54	0.82	0.71
TP 模拟值	0.044	0.152	0.001	0.043	54		
TN 实测值	0.416	0.665	0.124	0.161	54	0.66	0.69
TN 模拟值	0.444	0.803	0.047	0.162	54		

从模型对流量和营养盐的模拟结果来看,修正后的 SWAT 模型在模拟峰值流量和 TN、TP 时,效果优于原始的模型.说明相较于原始 SWAT 模型采用平均森林植被密度和单一的植物生长模式估算生物累积量,修正的 SWAT 模型采用变化密度、多种类和多种类混杂的森林生长模型,更能反映森林生长的真实情况,因而在进行森林植被景观对非点源污染影响的模拟中,可以有效利用植被覆盖度、森林组份丰度和叶面积指数等变量从不同角度来描述森林植被景观的不同状态.

5 结语

以农林系统的非点源污染模拟为目标,通过研究并建立变化密度及多种类混杂的森林生长模型,修正了 SWAT 模型采用平均森林植被密度和单一植物生长模式估算生物累积量的问题.同时,根据间作套种下的辐射能利用 Keating 方程,引入间作套种指数变量,修正 SWAT 模型原有的单一生物量日积累模型.以亚热带季风湿润区红壤背景下的鄱阳湖流域为试验区,以野外实测数据为基础,探讨修正 SWAT 模型的有效性.结果表明:

1) 在流量的峰值模拟方面,修正模型有较大的改善,说明修正模型能够较好地反映地表径流方面的实际情况;从模拟的流量平均值、最大值、最小值、流量总量来看,修正模型的模拟结果更接近实测值. 相关系数由原始模型的 0.753 增加到修正模型的 0.863,而 NS 系数则由 0.686 增加到 0.740,分别增加了 14.6% 和 7.8%. 说明修正模型的流量模拟效果比原始模型的流量模拟效果要好.

2) 在模拟营养盐负荷方面,修正模型在模拟 TP 浓度时效果好于模拟 TN,相关系数与 NS 系数分别为 0.82、0.78 和 0.71、0.69. 对比原始模型,修正模型在模拟 TP 和 TN 浓度的相关系数和 NS 系数,分别增加了 3.8%、4.4% 和 6.4% 和 6.1%.

3) 修正的 SWAT 模型采用植被覆盖度、针叶林、阔叶林及稀疏灌丛等不同森林组份丰度和植被叶面积指数等变量,比原始 SWAT 模型更真实和更有效地反映了森林植被景观的宏观与微观特征,因而修正的 SWAT 模型在模拟流量和营养盐方面比原始模型有更好的有效性.

6 参考文献

- [1] Krysanova V, Arnold JG. Advances in ecohydrological modelling with SWAT—A review. *Hydrological Sciences Journal-des Sciences Hydrologiques*, 2008, **53**(5): 939-947.
- [2] Lai GY, Wu DY, Zhong YX *et al.* Progress in development and applications of SWAT model. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, **40**(3): 243-251. [赖格英, 吴敦银, 钟业喜等. SWAT 模型的开发与应用进展. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(3): 243-251.]
- [3] Gassman PW, Reyes MR, Green CH *et al.* The soil and water assessment tool: Historical development, applications and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(4): 1211-1250.
- [4] Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C *et al.* Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrol Process*, 2005, (19): 749-762.
- [5] Muttiath RS, Wurbs RA. Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water Resources Assoc*, 2002, **27**(3): 407-419.
- [6] Watson B, Coops N, Selvalingam S. Integration of 3-PG into SWAT to simulate growth of evergreen forests. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2005, **19**(3): 827-838.
- [7] MacDonald DJ, Kiniry J, Arnold R *et al.* Developing parameters to simulate trees with SWAT. 3rd International SWAT Conference, 2005.
- [8] Kiniry JR, MacDonald JD, Kemanian AR. Plant growth, and simulation for landscape-scale hydrological modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, **53**(5): 1030-1042.
- [9] Dai JF, Cui YL. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT I. Principle and method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(2): 145-152. [代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型——I. 模型构建的原理与方法. 水利学报, 2009, **40**(2): 145-152.]
- [10] Xie XH, Cui YL. Analysis of scaling variation of irrigation water use efficiency under typical irrigation regimes. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, **42**(5): 653-660. [谢先红, 崔远来. 典型灌溉模式下灌溉水利用效率尺度变化模拟. 武汉大学学报: 工学版, 2009, **42**(5): 653-660.]
- [11] Shi YZ, Zhang C, Zhou HC *et al.* Development and application of SWAT model to paddy district in watershed scale. *Water Resources and Power*, 2010, **28**(7): 18-22. [仕玉治, 张弛, 周惠成等. SWAT 模型在水稻灌区的改进及应用研究. 水电能源科学, 2010, **28**(7): 18-22.]
- [12] Zheng J, Li GY, Han ZZ *et al.* Application of modified SWAT model in plain irrigation district. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(1): 88-97. [郑捷, 李光永, 韩振中等. 改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用. 水利学报, 2011, **42**(1): 88-97.]
- [13] Tsubo M, Walker SR, Ogindo HO. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions I. Model development. *Field Crops Research*, 2005, **93**(1): 10-22.
- [14] Gao Y, Duan AW, Liu ZG. Effect of monoculture and intercropping on radiation use efficiency and yield of maize and soybean. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(1): 7-12. [高阳, 段爱旺, 刘祖贵等. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响. 中国生态农业学报, 2009, **17**(1): 7-12.]
- [15] Keating BA, Carberry PS. Resource capture and use in intercropping: solar radiation. *Field Crops Res*, 1993, **34**: 273-301.
- [16] Zhang HX, Fang HY, Tu XB *et al.* eds. Investigation and assessment of biodiversity. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2010. [张海星, 方红亚, 涂晓斌等. 江西生物多样性调查与评估. 南昌: 江西科学技术出版社, 2010.]

- 社, 2010.]
- [17] Administrative Office of Ganzhou in Jiangxi Province Forestry Bureau of Reclamation ed. Gannan trees. Ganzhou; Administrative Office of Ganzhou in Jiangxi Province Forestry Bureau of Reclamation, 1981. [江西省赣州地区行署林垦局. 赣南树木. 赣州: 江西省赣州地区行署林垦局, 1981.]
 - [18] Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR *et al.* Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2005, 2004.
 - [19] Hill JH. Monitoring 20 years of increased grazing impact on the Greek Island of Crete with earth observation satellites. *Journal of Arid Environments*, 1998, **39**: 165-178.
 - [20] Adams JB. Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I Site1. *Geophys Res*, 1986, **91**: 8098-8112.
 - [21] Chen XZ, Lai GY, Pan RX *et al.* Extract forest information using the mixed end-members from images and field survey data. Lanzhou, Gansu, China; 2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management, 2012: 2134-2139.
 - [22] Chen XZ, Lai GY. Abundance extraction of end-members of forest based on linear mixed model-A case study of Meijiang Basin. Nanjing, China; The 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2012), 2012: 203-206.
 - [23] Chen XZ, Lai GY, Pan RX *et al.* Vegetation abundance remote sensing information extraction based on linear spectral mixed model in the Hilly Area. *Jiangxi Science*, 2012, **30**(4): 473-479. [陈绪志, 赖格英, 潘瑞鑫等. 基于线性混合模型的丘陵山区植被丰度遥感信息提取研究——以江西梅江流域为例. 江西科学, 2012, **30**(4): 473-479.]
 - [24] Lai GY, Zeng XG, Liu Y *et al.* Retrieving leaf area index and extinction coefficient of dominated vegetation canopy cover in Meijiang Watershed of China using image-fusion and Landsat ETM Data. *Remote Sensing Technology And Application*, 2013, **28**(4): 697-706. [赖格英, 曾祥贵, 刘影等. 基于 ETM 和图像融合的优势植被冠层叶面积指数和消光系数的遥感反演. 遥感技术与应用, 2013, **28**(4): 697-706.]
 - [25] Peng DL, Huang JF, Jin HM. The Monitoring for sequential cropping index of arable land in Zhejiang Province using MODIS-NDVI. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, **39**(7): 1352-1357. [彭代亮, 黄敬峰, 金辉民. 基于 MODIS-NDVI 的浙江省耕地复种指数监测. 中国农业科学, 2006, **39**(7): 1352-1357.]
 - [26] Yan HM, Liu JY, Cao MK. Remotely sensed multiple cropping index variations in China during 1981-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **50**(6): 559-566. [闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎等. 近 20 年中国耕地复种指数的时空变化. 地理学报, 2005, **50**(6): 559-566.]
 - [27] Yan HM, Cao MK, Liu JY *et al.* Characterizing spatial patterns of multiple cropping system in China from multi-temporal remote sensing images. *Transactions of the CSAE*, 2005, **21**(4): 85-90. [闫慧敏, 曹明奎, 刘纪远等. 基于多时相遥感信息的中国农业种植制度空间格局研究. 农业工程学报, 2005, **21**(4): 85-90.]
 - [28] Pan RX, Lai GY, Li XJ *et al.* A methodology for multiple cropping index extraction of Mei Jiang Basin based on MODIS/NDVI. *Jiangxi Science*, 2012, **30**(6): 764-768. [潘瑞鑫, 赖格英, 李秀娟等. 基于 MODIS-NDVI 的梅江流域耕地复种指数提取研究. 江西科学, 2012, **30**(6): 764-768.]
 - [29] Soil Survey Office Nanjing County in Jiangxi Province, Nanjing County soil ed. Nanchang; Jiangxi People's Publishing House, 1988. [江西省宁都县土壤普查办公室. 宁都县土壤. 南昌: 江西人民出版社, 1988.]
 - [30] Wei HB, Zhang ZP, Yang JP. Establishing method for soil database of SWAT model. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, **38**(6): 15-18. [魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法. 水利水电技术, 2007, **38**(6): 15-18.]
 - [31] Pang JP, Xu ZX, Liu CM. Weather generator and database in the SWAT Model. *Journal of China Hydrology*, 2007, **27**(5): 25-30. [庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证. 水文, 2007, **27**(5): 25-30.]
 - [32] Yi FZ, Lai GY, Zhang L *et al.* Estimation and spatial distribution of the potential load of Three-Yellow Chicken Feces in Meijiang Watershed in China. Lanzhou, Gansu, China; 2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management, 2012.
 - [33] Zeng XG, Lai GY, Yi FZ. A study population data spatialization of small river basin based on GIS: Take Meijiang River Basin as the example. *Geography and Geo-Information Science*, 2013, **29**(6): 40-44. [曾祥贵, 赖格英, 易发钊等. 基于 GIS 的小流域人口数据空间化研究——以梅江流域为例. 地理与地理信息科学, 2013, **29**(6): 40-44.]
 - [34] SWAT-CUP4; SWAT Calibration and Uncertainty Programs—A User Manual. Eawag; Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2009.