DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.03

# GWLF 模型的改进及其在新安江流域的应用研究

齐作达<sup>1</sup>, 亢戈霖<sup>2</sup>, 王玉秋<sup>2</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所,港口水工建筑技术国家工程实验室,工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456; 2. 南开大学 环境科学与工程学院 天津市跨介质复合污染环境治理技术重点实验室,天津 300350)

摘 要:通用流域污染负荷方程(generalized watershed loading function,简称 GWLF)作为一个简单有效的集总参数 流域模型已经受到了国内外研究者的广泛认可。在笔者前期研究成果的基础上,对原始 GWLF 模型的算法和已有 水文框架进行了深入修改,添加了河道模块内泥沙悬浮、沉积过程以及污染物衰减过程,进一步增加了模型在空间 属性基础上的通用性。以安徽省新安江屯溪监测站为收口断面的上游流域为研究区域,对改进后的 GWLF 模型 (revised GWLF)进行了应用测试,并在月尺度上针对流量、泥沙量、溶解性氮负荷量和溶解性磷负荷量的模型输出 结果与原始 GWLF 模型进行了比较。3 项统计学指标和时间序列图表明,改进版模型能够在不添加额外数据需求 的前提下,更好地重现流域内水文、泥沙和水质的循环过程。

## Improvement of GWLF model and its application to Xin'anjiang River Watershed

QI Zuoda<sup>1</sup>, KANG Gelin<sup>2</sup>, WANG Yuqiu<sup>2</sup>

 (1. National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
 2. Tianjin Key Laboratory of Environmental Technology for Complex Trans-media Pollution, College of

Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The generalized watershed loading function (GWLF) has been widely recognized as a simple and effective lumped parameter watershed model by researchers at home and abroad. On the basis of the previous work of the authors, the original GWLF model algorithm and the existing hydrological framework were further modified with the addition of the suspension and deposition process of sediment, and the attenuation process of pollutants in the river channel, which enhanced the applicability of the model spatially. Then the revised GWLF model was tested in the simulation of the upstream of Xin' anjiang River (bounded by Tunxi monitoring station) in Anhui Province and the simulation results of monthly flow, sediment, dissolved nitrogen and dissolved phosphorous were compared with those of the original model. The time series analysis of three commonly used statistical indexes show that the revised model performs better at reflecting the cycle of hydrology, sediment and water quality in the watershed without the requirement of additional data.

Key words: non-point source model; generalized watershed loading function (GWLF); flow; sediment; dissolved nitrogen; dissolved phosphorus

## 1 研究背景

当今社会,水污染问题越来越受到人们的重视。

近些年来,世界范围内许多国家和政府逐步增加了 对于水资源保护的投资。考虑到地表水监测人力、 财力和物力的花费,非点源流域模型作为一种关键

收稿日期:2019-12-15; 修回日期:2020-04-30

基金项目:国家重大科技专项(水专项)项目(2017ZX07301-001-06)

作者简介:齐作达(1990-),男,辽宁营口人,理学博士,研究方向为流域水文水质数值模拟。

**通讯作者:**王玉秋(1965-),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,教授,博士生导师,研究方向为流域(区域)水环境评估与管理决 策支持。

而有效的决策工具应运而生[1-3]。

非点源污染已经成为当前流域污染的重要组成 部分,对于这类污染来源的控制与削减迫在眉 睫<sup>[4-5]</sup>。与点源排放不同的是,非点源污染具有间 接性的特征,并且与水文过程密切相关,因此识别起 来更加困难和复杂<sup>[6-7]</sup>。为了能够更加准确而简洁 地描述流域中水文循环和污染物归趋,恰当的模型 框架和适用性高的方程显得尤其关键<sup>[8]</sup>。到目前 为止,人们已经提出了许多能够概化流域水文和污 染物循环的方程,如 SCS – CN 径流曲线方程、Green – Ampt 方程、Muskingum 洪水演进方程等<sup>[9-11]</sup>。

通用流域污染负荷方程 GWLF (generalized watershed loading function)是一个集总参数流域负荷 模型,被美国 TMDL 计划所推荐和采纳,并且在全世 界各地得到了广泛应用。模型在考虑一定的水文循 环和污染物归趋的基础上,对于数据的需求量较 小<sup>[12]</sup>,同时可以在月尺度上提供较为可靠的模拟结 果,能够为管理决策提供极大的便利和支持。近些 年来,GWLF 不仅在美国、欧洲等地区取得了较好的 模拟结果<sup>[13-16]</sup>,在国内新安江流域、天津市于桥水 库上游流域、滦河流域等地区也有了诸多成功的应 用案例<sup>[17-20]</sup>。

本次研究在水文框架改进的基础上,进一步为 GWLF 模型添加了河道传输过程中泥沙的沉积、悬 浮过程以及污染物的降解过程。在新安江流域的应 用结果表明,改进版 GWLF 模型与原始 GWLF 模型 相比,能够更加准确地模拟流域内流量、泥沙量、溶 解性氮负荷量和溶解性磷负荷量<sup>[21]</sup>。

## 2 GWLF 原始模型及其改进方法

## 2.1 原始 GWLF 模型

GWLF模型是一个集总参数流域模型,模型需要输入逐日的气温和降水数据,然后在日尺度上对流域的水文平衡进行连续模拟,最终累计到月尺度并输出水量结果,泥沙和营养盐则基于月尺度模拟并逐月输出模拟结果。模型不考虑河道传输过程,并假设当月流域内产生的污染物全部传输到流域出口。水文产流计算采用了 SCS - CN 径流曲线方程,泥沙计算公式采用了 USLE 通用土壤流失方程,营养盐计算使用了经验系数方程。更详细的模型理论描述可以参考 GWLF 理论参考手册。

## 2.2 GWLF 模型的改进

2.2.1 GWLF 模型的改进方法 GWLF 模型的改进包括以下几个方面:(1)将整个流域划分为若干

子流域,每个子流域内地表和地下的水文和营养盐 独立计算,并汇入子流域对应的河道内;(2)模型的 水文、泥沙、营养盐基于日尺度计算;(3)添加河道 传输过程,河道来水包括上游汇入、本子流域地表和 地下水汇入以及点源的排放,河道的水文循环使用 曼宁方程和变量存储法进行描述,采用巴格诺德简 化方程表征泥沙在河道中的悬浮和沉积过程,营养 盐衰减使用与滞留时间相关的一阶指数方程进行描 述。改进后的模型框架示意图见图1。



图1 改进后的模型框架示意图

2.2.2 GWLF 改进模型的水文、泥沙、营养盐相关计算

(1) 河道日平均流量计算

河道的日平均流量计算公式如下[22]:

 $FlowRate_{i,i} = FlowSt'_{i,i}/86400$ (1)

式中: $FlowRate_{i,t}$ 为河道的平均流量, $m^3/s$ ;  $FlowSt'_{i,t}$ 为第 t 天河段 i 无流出前的总水量, $m^3$ 。

将河道假设为河岸坡度为2:1的梯形(见图1), 河道中的水深可以用如下方程计算:

$$H_{j} = \frac{(FlowRate_{i} \cdot n_{i})^{0.6} \cdot (B_{i} + 2\sqrt{5}H_{j-1})^{2.5}}{Slope_{i}^{3/10}[B_{i} + 2H_{j-1}]}$$
(2)

式中:H 为河道水深,m,其下标j 为迭代次数, $H_0 = 0$ ;  $B_i$  为河段i 的河底宽度,m;  $n_i$  为河段i 的曼宁系数; *Slopei* 为河段i 的河岸坡度。

河段内的平均流速和传输时间可以使用如下方 程表示:

$$V_{i,i} = \frac{Slope_i^{1/2} \cdot [(B_i + 2H)H]^{5/3}}{n_i \cdot [B_i + 2\sqrt{5}H]^{2/3}}$$
(3)

TravelTime<sub>*i*,*i*</sub> = length<sub>*i*</sub> · 1000/( $V_{i,i}$  · 3600) (4) 式中: $V_{i,i}$  为第 *t* 天河段 *i* 的平均流速,m/s; TravelTime<sub>*i*,*i*</sub> 为第 *t* 天河段 *i* 的传输时间,h; length<sub>*i*</sub> 为河段 *i* 的长度,km。

存储系数 SC<sub>i</sub>,使用如下方程计算:

 $SC_{i,\iota} = \min(1,48/(2 \cdot TravelTime_{i,\iota} + 24))$ (5) 最终河段的流出水量为  $FlowOut_{i,\iota}(\mathbf{m}^3)$ :

 $FlowOut_{i,t} = SC_{i,t} \cdot FlowSt'_{i,t}$ (6)

(2)河道泥沙浓度计算
河道中的泥沙浓度计算公式如下:
SedC<sub>i,t</sub> = SedSt<sub>i,t</sub>/ FlowSt'<sub>i,t</sub>
(7)
式中:SedC<sub>i,t</sub> 为第 t 天河段 i 的泥沙浓度,t/m<sup>3</sup>;
SedSt<sub>i,t</sub> 为第 t 天河段 i 进水后的泥沙总量,t。
河道中的峰值流速计算公式如下;

 $velocityPk_{i,i} = pvaf \cdot V_{i,i}$  (8) 式中: $velocityPk_{i,i}$ 为第 t 天河段 i 的峰值流速,m/s; pvaf为峰值径流调整系数。

河段最大可传输泥沙浓度计算公式如下: SedCmax<sub>i,i</sub> = linear<sub>i</sub> · velocityPk<sub>i,i</sub> <sup>exponent<sub>i</sub></sup> (9) 式中:SedCmax<sub>i,i</sub> 为第 t 天河段 i 的最大可传输泥沙 浓度,t/m<sup>3</sup>; linear<sub>i</sub> 和 exponent<sub>i</sub> 分别为线性系数和 指数系数。

$$SedDep_{i,t} = \begin{cases} (SedC_{i,t} - SedCmax_{i,t}) \cdot FlowSt'_{i,t} \\ (SedC_{i,t} > SedCmax_{i,t}, 泥沙沉积) \\ (SedCmax_{i,t} - SedC_{i,t}) \cdot FlowSt'_{i,t} \\ (SedC_{i,t} \leq SedCmax_{i,t}, 泥沙悬浮) \end{cases}$$
(10)

式中:*SedDep<sub>i,t</sub>*为第*t*天河段*i*的泥沙沉积量或泥沙 悬浮量,t。

(3) 河道中的营养盐计算。

河道中的营养盐衰减过程描述方程如下:

 $NtrOut'_{i,t} = NtrOut_{i,t} \cdot \exp(\theta_i \cdot TravelTime_{i,t})$  (11) 式中: $NtrOut'_{i,t}$ 为第 t 天河段 i 经过衰减作用后排出 的营养盐总量,kg;  $NtrOut_{i,t}$ 为第 t 天河段 i 未经过 衰减作用时能够排出的营养盐总量,kg; $\theta_i$ 为河段 i的营养盐衰减系数。

## 3 研究区域概况及数据来源

#### 3.1 研究区域概况

本次研究选取新安江屯溪监测站上游流域作为 研究区域,研究区域概况如图 2 所示。所选研究区 面积约为 2 683 km<sup>2</sup>,是中国第一个跨省生态补偿示 范区,包括率水和横江两条主要支流(图 1(a)),长 度分别为 97 km 和 55 km,主河道总长 385 km,下游 汇入千岛湖,为杭州市主要饮用水源地。流域被分 为 13 个子流域,共有 14 个雨量监测站(图 1(b))。 流域海拔在 96~1 622 m 之间(图 1(c)),气候以亚 热带湿润季风气候为主,1997 - 2013 年期间年平均 气温为 17.2℃,年平均降水量为 1 741 mm,大部分 降水集中在 3 - 8 月。研究区域内的主要土地利用 类型及面积占比为林地 81%、耕地 14.9%、草地 3%(图 1(d))。

#### 3.2 数据来源

本次研究的 14 个降水站逐日数据和屯溪监测 站的逐日流量、逐月泥沙数据来自《中华人民共和 国水文年鉴》,逐日的气温数据来自中国气象数据 网,数字高程数据(DEM:30 m×30 m)来自地理空 间数据云,土地利用数据来自国家第二次土地利用 调查数据,逐月的溶解性氮和溶解性磷监测数据由 黄山市环境监测站提供。模拟时间范围为 1997 – 2013 年,其中 1997 – 1999 年的数据用于模型预热。 具体数据的格式和详细内容参见表1。



## 4 结果与分析

## 4.1 模型校准方法与结果讨论

模拟值与实测值之间的比对评价,使用了3个 国际公认的统计学指标,分别为纳什系数(NSE)、 决定系数(R<sup>2</sup>)和观测标准偏差率(RSR),其计算公 式如下:

$$NES = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{obs} - \overline{Y}^{obs})^2}$$
(12)

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (Y_{i}^{obs} - \overline{Y}^{obs}) (Y_{i}^{sim} - \overline{Y}^{sim})\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i}^{obs} - \overline{Y}^{obs})^{2} \sum_{i=1}^{n} (Y_{i}^{sim} - \overline{Y}^{sim})^{2}}$$
(13)

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{obs} - \overline{Y}_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i^{obs} - \overline{Y}^{obs})^2}}$$
(14)

式中: $Y_i^{obs}$ 为实测值; $Y_i^{sim}$ 为模拟值; $\overline{Y}_i^{obs}$ 为所有实 测值的平均值; $\overline{Y}_i^{sim}$ 为所有模拟值的平均值。

模型的校准方法采用了基于贝叶斯理论的广义 似然不确定性估计法(GLUE),按照流量、泥沙、溶 解性氮、溶解性磷的顺序依次校准相关参数,综合3 项统计学指标选出最优参数组,校准后得到的参数 数值如表2所示。

由表2可以看出,原始GWLF模型与改进模型 校准后的各参数数值存在差异,但是差别较小,主要 参数如径流曲线系数、通用土壤流失方程系数、地表 径流氮、磷浓度和地下水氮、磷浓度差值保持在5% 范围以内,两个模型的参数结果均在合理范围之内, 校准后的参数组可以用于模拟屯溪流域的流量、泥 沙和营养盐负荷量。

原始 GWLF 模型与改进后模型的各项模拟结 果的统计学指标如表 3 所示。

表 1      数据类型及米源								
数据类型	数据描述	来源	时间范围					
气象数据	逐日降水	中华人民共和国水文年鉴	1997 - 2013 年					
	逐日气温	中国气象数据网	1997 - 2013 年					
数字高程图	30 m×30 m栅格数据	地理科学数据云	2009 年					
土地利用分类	矢量数据	黄山市环境监测站	2010 年					
水文站	屯溪站逐月和逐日流量	由化人民廿和国水文年收	2000-2013 年					
	屯溪站逐月泥沙量	十十八氏共和国小文十金						
水质	屯溪站逐月溶解性氮	黄山市环境监测站	2000-2013 年					
	屯溪站逐月溶解性磷	黄山市环境监测站						
点源	年总排放量	黄山市环境监测站	2000-2013 年					

表1 数据类型及来源

表 2 原始 GWLF 与改进后的模型参数校准结果

参数	土地分类	改进后	原始
	林地	53.1	54.4
行计出体工程	草地	62.7	60.9
<b></b>	水体	98.9	99.5
	耕地	75.2	73.6
土壤持水量/cm		10.9	10.9
不饱和层渗透率		0.06	
植被覆盖系数		0.63/0.99	0.63/0.99
退水系数		0.092	0.094
渗透系数		0	0
曼宁系数		0.014	
	林地	0.0032	0.0034
通用土壤流失方程系数	草地	0.0041	0.0047
	耕地	0.0122	0.0118
峰值径流调整系数		1.3	
线性系数		0.00018	
指数系数		1.5	
	林地	0.35,0.006	0.34,0.006
地表径流氮、磷浓度/(mg・L <sup>-1</sup> )	草地	2.5,0.1	2.6,0.1
	耕地	3.00,0.26	2.90,0.26
地下水氮、磷浓度/(mg・L <sup>-1</sup> )		0.508.0.01	0.496,0.01
氮、磷营养盐衰减系数		0.025,0.002	

模拟项	时间步长	模型	统计学指标		
		类型	NES	$R^2$	RSR
流量	逐日尺度	原始	0.601	0.684	0.690
		改进	0.894	0.901	0.310
	逐月尺度	原始	0.899	0.902	0.267
		改进	0.959	0.967	0.201
泥沙	逐月尺度	原始	0.770	0.777	0.480
		改进	0.920	0.932	0.264
溶解性氮	逐月尺度	原始	0.781	0.813	0.489
		改进	0.912	0.907	0.262
溶解性磷	逐月尺度	原始	0.695	0.765	0.587
		改进	0.732	0.803	0.436

表 3 模拟结果的各项统计学指标

由表3可知,改进模型的流量模拟统计学指标 优于原始 GWLF 模型, NES、R<sup>2</sup> 值均大于原始 GWLF模型,尽管模拟逐日尺度流量结果不是 GWLF模型原有的功能,但是改进模型的 NES 依然 在 0.9 左右,表明改进模型在屯溪流域能够提供较 为精确的逐日流量模拟结果;原始模型泥沙的 NES 和 R<sup>2</sup>均小于 0.8,而改进后模型的 NES 和 R<sup>2</sup>均大于 0.9,同时改进模型的 RSR 值小于原始 GWLF 模型, 表明改进模型在计算泥沙方面有所优化;溶解性氮 的模拟结果统计学指标差异与泥沙相似,改进模型 要明显优于原始 GWLF 模型,但是溶解性磷的模拟 结果统计学指标方面,改进模型与原始 GWLF 模型 的差别较小,除 RSR 以外,另外两项指标改进模型 仅高出不到 5%。

#### 4.2 流量模拟结果

2000-2013 年逐月流量实测值与模型模拟结 果对比如图 3 所示。从图 3 整体上看,两个模型的 模拟计算结果令人满意,几乎再现了实测流量的变 化趋势,且模拟值与实测值的峰值保持一致。此外, 改进模型在枯水期的模拟效果要明显好于原始 GWLF 模型,原始 GWLF 模型倾向于低估枯水期的 流量,这种差异在月尺度的模拟结果中并不是十分 显著。但是在日尺度上,二者的流量模拟结果差异 较大,改进后的模型极大地提高了模拟的准确性。



图 3 2000-2013 年逐月流量实测值与模型模拟结果对比

由于 2000 - 2013 年 14 a 的日尺度模拟结果时 间序列图清晰度较差,所以选择以 2005 年为例,展 示两个模型之间逐日流量模拟结果的详细差异,如 图 4 所示。由图 4 可见,无降雨时期,两个模型均无 法完全重现流量的变化趋势,但是原始 GWLF 模型 过分地低估了流量,几乎接近于零,并且过于平缓, 对于较少降水的响应较差;而在大多数情况下,改进 后的模型模拟结果与实测数据非常接近,并且基本 捕捉了流量的变化趋势。这种差异的重要原因是改 进模型增加了河道过程,并引入了子流域概念。原 始 GWLF 模型还存在高估暴雨事件流量峰值的现 象,同时也会高估随后的流量,这主要是因为没有河 道过程,缺少河道存水,当日的子流域产生的径流全 部转化为流域出口的排水量。



图 4 2005 年逐日流量实测值与模型模拟结果对比

#### 4.3 泥沙量模拟结果

2000-2013 年逐月泥沙量实测值与模拟结果 对比如图 5 所示。由图 5 可看出,两个模型对泥沙 量的模拟效果较好,基本捕捉到了泥沙产量的波动 性。但是原始 GWLF 模型对峰值模拟准确性较低, 往往极大地高估或低估了极值,改进后的模型模拟 值更加接近于实测值,其对峰值模拟结果有了明显 的改善。结合表 3 中的统计学指标可知,改进后 GWLF 模型对于泥沙的模拟效果要明显优于原始 GWLF 模型对于泥沙的模拟效果要明显优于原始 优化了泥沙模拟结果,增加河道泥沙悬浮沉积过程, 使得改进后模型能够对河道泥沙的携带能力做出相 应调整,模拟效果更好,适应性更强。



图 5 2000-2013 年逐月泥沙量实测值与模拟结果对比

2000-2013 年逐月溶解性氮负荷量实测值与

### 4.4 溶解性氮模拟结果



图 6 表明,与实测数据相比,原始 GWLF 模型和 改进模型的模拟结果重现性较好,均能很好地再现 实测数据变化趋势。但原始 GWLF 模型对极值的 模拟效果不甚理想,倾向于高估峰值而低估极小值, 在枯水期模型响应较差,对低值的波动性捕捉较差。 改进后的模型不仅优化了水文模拟过程,还新增了 污染物河道衰减指数,对峰值和低值的模拟更加准 确,波动极端性得到改善。同时改进后的模型模拟 结果统计指标 NES 和 R<sup>2</sup> 均大于 0.9, RSR 小于 0.3, 明显优于原始 GWLF 模型模拟结果。修正后的模 型在一定程度上解决了原始 GWLF 模型对极值模 拟的缺陷问题,模型模拟效果得到进一步优化。

#### 4.5 溶解性磷模拟结果

2000-2013 年逐月溶解性磷负荷量实测值与 模拟结果对比如图 7 所示。由图 7 可见,虽然对溶 解性磷的模拟结果与溶解性氮相比不甚理想,但两 个模型基本上可以反映溶解性磷的历史变化趋势。 原始 GWLF 模型对峰值模拟往往偏低,平水期模拟 偏高,枯水期时间序列过于平缓,无法准确捕捉到观 测数据的每一次波动。改进后模型对极值的模拟在 一定程度上弥补了原模型的不足,模拟效果得到了 一定的改善。这种差异可能来自于模型机理的改 进:在水文过程优化的基础上,将原始 GWLF 模型 中城市营养盐负荷为固态的假设改为城市总磷营养 盐负荷的 1/4 为溶解性磷<sup>[23]</sup>,并添加了污染物河道 衰减过程。



## 5 结 论

(1) 在原始 GWLF 模型中加入以变量存储法和 污染物衰减为主要核心的污染物河道传输模块, 使 GWLF 模型可以进行多子流域水质模拟, 从而拓宽 模型使用流域范围。

(2)在屯溪流域对原始 GWLF 模型和改进后的 模型进行模拟性能比较,主要校准指标为流量、泥 沙、溶解性氮和溶解性磷。通过对模型模拟结果进 行详细对比发现,改进后的模型明显克服了原始模 型对极值模拟存在较大偏差的缺点,显著提高了模 型模拟精度。

(3)改进后的模型具有模拟结果可靠、用户友 好、数据需求较少等优点,可作为我国流域科学管理 的支持工具之一,为流域科学和精细化的水环境管 理提供技术支持。

## 参考文献:

- BORAH D K, BERA M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications
   [J]. Transactions of the Asae, 2004, 47(3):789 - 803.
- [2] KORFMACHER K S. The politics of participation in watershed modeling[J]. Environmental Management, 2001, 27 (2):161-176.
- [3] TUO Y, CHIOGNA G, DISSE M. A multi-criteria model selection protocol for practical applications to nutrient transport at the catchment scale[J]. Water, 2015, 7(6): 2851-2880.
- [4] ONGLEY E D, ZHANG Xiaolan, TU Tao. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158 (5):1159-1168.
- [5] 吴义根,冯开文,李谷成.我国农业面源污染的时空分 异与动态演进[J].中国农业大学学报,2017,22(7): 186-199.
- [6] 郝改瑞,李家科,李怀恩,等.流域非点源污染模型及 不确定分析方法研究进展[J].水力发电学报,2018, 37(12):54-64.
- [7] 欧阳威,刘迎春,冷思文,等.近三十年非点源污染研究发展趋势分析[J].农业环境科学学报,2018,37
   (10):2234-2241.
- [8] FU Congsheng, JAMES A L, YAO Huaxia. SWAT CS: Revision and testing of SWAT for Canadian shield catchments [J]. Journal of Hydrology, 2014, 511:719 - 735.
- [9] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil phyces [J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1):1-24.
- [10] OVERTON D E. Muskingum flood routing of upland streamflow[J]. Journal of Hydrology, 1966, 4:185 - 200.
- [11] CRONSHEY R. Urban hydrology for small watersheds number [R]. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.
- [12] QI Zuoda, KANG Gelin, CHU Chunli, et al. Comparison of SWAT and GWLF model simulation performance in humid south and semi-arid north of China [J]. Water, 2017, 9(8):567.
- [13] AYELE H S, LI M H, TUNG C P, et al. Assessing climate change impact on Gilgel Abbay and Gumara Water-

shed hydrology, the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia
[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences,
2016, 27(6):1005 - 1018.

- [14] JENNINGS E, ALLOTT N, PIERSON D C, et al. Impacts of climate change on phosphorus loading from a grassland catchment: Implications for future management [J]. Water Research, 2009, 43(17):4316-4326.
- [15] NIRAULA R, KALIN L, SRIVASTAVA P, et al. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF [J]. Ecological Modelling, 2013, 268:123-133.
- [16] SHARIFI A, YEN H, BOOMER K M B, et al. Using multiple watershed models to assess the water quality impacts of alternate land development scenarios for a small community[J]. Catena, 2017, 150:87-99.
- [17] SHA Jian, LI Zeli, SWANEY D P, et al. Application of a Bayesian watershed model linking multivariate statistical analysis to support watershed-scale nitrogen management in China [J]. Water Resources Management, 2014, 28 (11):3681-3695.
- [18] 李国光,赵兴华,沙健,等.面向行政区的总氮污染源解析——以新安江流域重点区县 GWLF 模型应用为例[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):118-123.
- [19] 张睿昊,朱龙基,王佰梅.柳河流域特征污染物负荷 模拟及污染源解析[J].南水北调与水利科技,2018, 16(4):120-127.
- [20] 赵 越,齐作达,赵康平,等.基于 GWLF 模型的新安 江上游练江流域面源污染特征解析[J].水资源与水 工程学报,2015,26(3):5-9.
- [21] HAITH D A, MANDEL R, WU R S. GWLF, Generalized watershed loading functions, version 2. 0, user's manual number [R]. Dept. of Agricultural Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 1992.
- [22] QI Zuoda, KANG Gelin, SHEN Minli, et al. The improvement in GWLF model simulation performance in watershed hydrology by changing the transport framework
  [J]. Water Resources Management, 2019, 33(3):923 -937.
- [23] SCHNEIDERMAN E M, PIERSON D C, LOUNSBURY D G, et al. Modeling the hydrochemistry of the cannonsville watershed with generallzed watershed loading functions (GWLF) [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2002,38(5):1323 - 1347.