

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.05-11

# 基于 SWAT 模型的无资料地区径流模拟及生态流量计算 ——以杨溪河为例

刘树锋, 陈记臣, 关 帅

(广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635;  
广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635)

**摘 要:**利用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型对武江流域 2008~2013 年的月径流量进行模拟,并根据犁市(二)站的实测径流资料对模型参数进行率定和验证;以武江支流杨溪河上的横溪、钓鱼台与银溪水电站 3 座梯级电站坝址为流域出口模拟得到其径流量,并以此为依据运用 Tennant 法计算各控制断面的生态流量.结果表明:SWAT 模型对武江流域的径流模拟整体适应性较好,犁市(二)站率定期月径流模拟值和实测值的  $R^2$  和  $NS$  分别为 0.77 和 0.91,验证期的  $R^2$  和  $NS$  分别为 0.75 和 0.92;杨溪河上的横溪、钓鱼台和银溪 3 座水电站坝址处的多年平均流量分别为  $10.2\text{m}^3/\text{s}$ 、 $11.7\text{m}^3/\text{s}$  和  $12.0\text{m}^3/\text{s}$ ;根据模拟径流量和 Tennant 法,计算得到横溪水电站的最小、适中和最佳生态流量分别为  $1.02\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3.37\text{m}^3/\text{s}$  和  $5.40\text{m}^3/\text{s}$ ;钓鱼台水电站的最小、适中和最佳生态流量分别为  $1.17\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3.82\text{m}^3/\text{s}$  和  $6.15\text{m}^3/\text{s}$ ;银溪水电站的最小、适中和最佳生态流量分别为  $1.20\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3.91\text{m}^3/\text{s}$  和  $6.31\text{m}^3/\text{s}$ .

**关键词:**SWAT 模型;Tennant 法;生态流量;杨溪河

**中图分类号:**X143 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2019)05-0368-08

## 0 引 言

目前,我国许多河流生态系统结构被破坏,导致其功能退化,出现河道断流、水质恶化和水生生物多样性降低等问题<sup>[1]</sup>.河道生态需水量是为维持地表水体特定的生态环境功能而必须蓄存和消耗的最小水量,主要包括河道生态基流、河流水生生物需水量和保持河道水流泥沙冲淤所需输沙水量等<sup>[2]</sup>.

为了更好地对流域水资源进行合理开发利用和保护,需要进行生态流量计算.但很多中小流域没有实测径流资料,因此需要进行径流模拟<sup>[3]</sup>.径流模拟的方法较多,如李友辉等<sup>[4]</sup>运用随机模拟模型对云南潇湘水库的入库径流进行模拟,虞慧等<sup>[5]</sup>运用新安江模型对江西白山水库进行了径流模拟,许剑辉等<sup>[6]</sup>运用 SCS-CN

(Soil Conservation Service Curve Number)模型对广州市主城区的降雨产流过程进行定量模拟分析,赵奕等<sup>[7]</sup>运用 DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)模型对西北高寒山区进行了径流模拟适用性分析.但对于复杂流域 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型的应用更加广泛<sup>[8-9]</sup>.SWAT 模型是在 20 世纪 90 年代中后期,由美国农业部农业研究中心开发的分布式流域水文模型<sup>[10]</sup>,可应用于无资料地区的径流模拟,进而推求生态流量.如汪银龙等<sup>[11]</sup>运用 SWAT 模型对黄河中游无资料地区进行径流模拟并得到较好的模拟效果;罗吉中等<sup>[12]</sup>运用 SWAT 模型对赣江袁河流域进行研究并分析下游无资料流域的径流资料,结果亦表明这是一种无资料地区进行径流模拟比较好的方法;李志强等<sup>[13]</sup>通过设计赣江濂水流域在 SWAT 模型中水文响应单元的划分方法,说明了 SWAT 模型适用于中小

收稿日期:2019-06-09

项目来源:广东省水利科技创新项目(2017-12).

作者简介:刘树峰(1978-),男,博士,高级工程师.

流域。

水电站的蓄水运行与河流的梯级开发在带来社会效益和经济效益的同时,也对生态环境造成了严重的负面影响,造成下游河道缺水断流,使天然水生生态系统遭受破坏,因此为保护河流生态健康,需要对其进行生态流量计算<sup>[14]</sup>。河流生态流量的计算方法大致分为水文学法、水力学法、生境模拟法和整体分析法 4 类<sup>[15]</sup>。其中,水文学法中的 Tennant 法具有方法简单、便于操作、数据易得以及对生态系统的描述较为科学等优点,适用于缺少水文站点的中小流域的生态流量计算<sup>[16,17]</sup>。

韶关市作为全国首批 6 个生态文明建设试点地区之一,其水生态环境的良性循环对水资源的可持续利用尤为重要<sup>[18]</sup>,因此开展河流生态流量的研究尤为必要。本研究首先通过 SWAT 模型对武江流域进行径流模拟,然后对杨溪河的横溪、钓鱼台和银溪 3 个梯级电站坝址处的来水量进行分析计算,最后运用 Tennant 法对各梯级电站所在河段进行生态流量的计算,以期为杨溪河等梯级开发河流的流域管理和生态环境保护提供依据。

## 1 研究区域概况与数据处理

### 1.1 研究区域概况

武江位于珠江流域北江水系上游,集水面积 7079km<sup>2</sup>,干流长 260km,属山区性河流,两岸高山峡谷,滩多流

急,是水电资源开发条件较好的河段。杨溪河发源于广东省韶关市乳源瑶族自治县西北部五指山老鹏顶,属于武江的一级支流。杨溪河总流域面积为 498km<sup>2</sup>,河流全长 64km,河道平均坡降 10.9‰<sup>[19]</sup>。

杨溪河流域属中亚热带季风气候,多年平均降雨量为 1700.0mm,降雨量年内分布不均匀,汛期(4~9 月)降雨量占全年降雨量的 71%,非汛期(10 月~次年 3 月)降雨量占全年降雨量的 29%。

水电站建设要考虑水力资源中的流量和落差两个要素<sup>[20]</sup>。杨溪河属于山区性河流,流量不大,但天然河道的落差较大(10.9‰),适合于修建引水式水电站。因此在杨溪河干流上修建的横溪、钓鱼台与银溪 3 座水电站均为引水式水电站,各水电站的基本特性见表 1。

### 1.2 数据处理

本研究采用的数据包括数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据、土地利用数据、土壤类型数据、气象数据和径流数据。

武江流域的 DEM 来源于航天飞机雷达地形测绘数据(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM),水平分辨率为 90m。

土地利用数据为中国 2000 年 1:100 000 土地利用资料。根据 SWAT 模型中土地利用/植被覆盖分类标准进行重分类,最终得到 5 种土地利用类型,见图 1 和表 2。武江流域的主要土地利用类型为常绿林(SWAT 代码为 FRSE),其面积占了武江流域面积的 56.93%。

表 1 杨溪河干流上的梯级水电站基本特性表

名称	坝上集雨面积/km <sup>2</sup>	总装机容量/MW	年发电量/万 kW·h
横溪水电站	416	50	11 527
钓鱼台水电站	476	25	7 985
银溪水电站	489	20	7 032

表 2 武江流域土地利用类型重分类代码

编码	名称	描述	SWAT 代码	百分比/%
1	常绿林	Forest-Evergreen	FRSE	56.93
2	灌木	Range-Bush	RNGB	33.99
3	草地	Range-Grasses	RNGE	2.01
4	水域	Water	WATR	0.53
5	农田	Agricultural Land-Row Crops	AGRRC	6.53

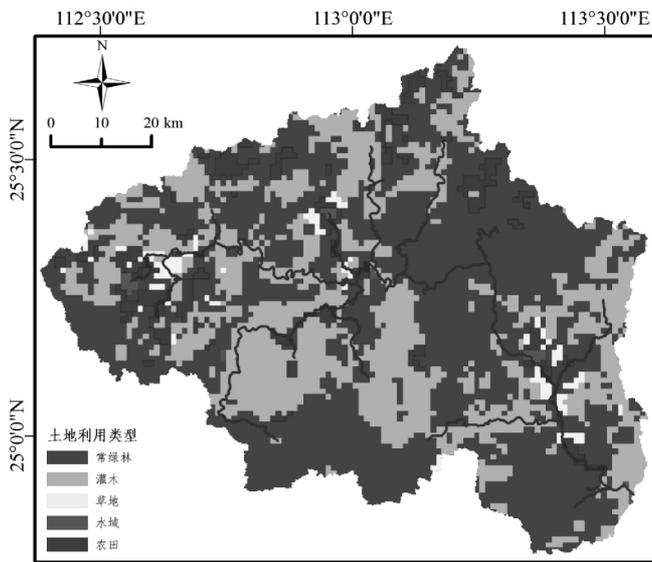


图1 武江流域土地利用图

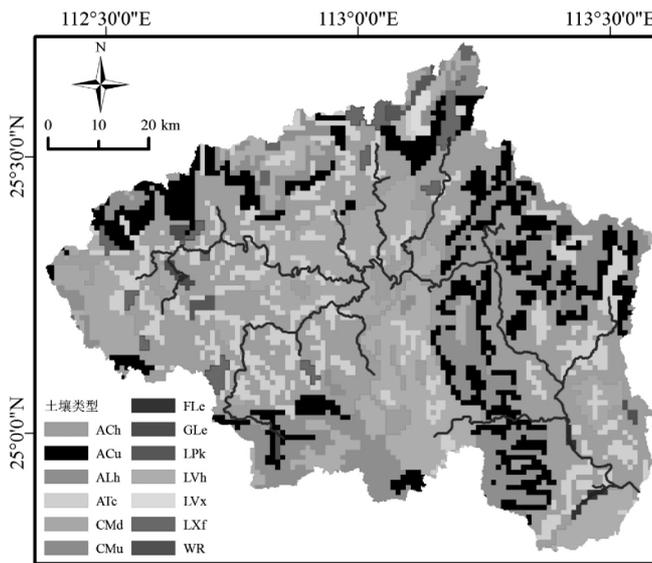


图2 武江流域土壤类型图

不同的土壤类型会有不同的产汇流特征, 对水文循环过程有着重要的作用<sup>[21]</sup>。本研究的土壤数据来自世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD), 重分类后共 13 种, 见图 2 和表 3。武江流域的土壤类型以典型 Haplic Acrisols (Ach) 为主, 其面积占了武江流域面积的 32.58%。

由于监测站点数量少等原因以及为了更准确地模拟气候对水文过程的影响, 需要构建天气发生器, 用于模拟给定气候条件下的随机天气情形。本研究利用坪石、麻坑、沙坪和城口 4 个雨量站 2006 年 1 月 1 日~

表3 武江流域土壤类型代码

编码	类型	SWAT 代码	百分比/%
1	Haplic Acrisols	ACh	32.58
2	Humic Acrisols	ACu	14.00
3	Haplic Alisols	ALh	14.12
4	Cumulic Anthrosols	ATc	13.84
5	Dystric Cambisols	CMd	10.41
6	Humic Cambisols	CMu	0.28
7	Eutric Fluvisols	FLe	0.24
8	Eutric Gleysols	GLe	0.40
9	Rendzic Leptosols	LPk	0.55
10	Haplic Luvisols	LVh	11.05
11	Chromic Luvisols	LVx	0.34
12	Ferric Lixisols	LXf	2.08
13	Water	WR	0.10

2013 年 12 月 31 日的逐日降雨数据, 制作 SWAT 模型内建 WXGEN 天气发生器参数数据库, 需要输入的平均降雨天数、月内干日日数、月内湿日日数、露点温度、最高气温、最低气温和平均气温等气候因素通过 SWAT Weather 等相关软件计算获得<sup>[22]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 SWAT 模型原理

SWAT 模型模拟过程分为陆面阶段和汇流阶段, 陆面阶段描述了子流域内水流和泥沙等向主河道汇入的过程, 汇流阶段则描述了流域河网中水流和泥沙等的输移过程。使用 SWAT 模型时一般根据 DEM 以及实际水网将流域划分为多个子流域, 子流域内再根据土地利用类型和土壤属性等划分为不同的水文响应单元 HRUs (Hydrologic Response Units)<sup>[23]</sup>。HRU 是 SWAT 模型进行水文模拟的基本单位, 一个子流域可划分为一个或者多个 HRU。SWAT 对水文过程的模拟是基于水量平衡方程进行的, 其公式<sup>[24]</sup>如下:

$$SW_i = SW_0 + \sum_{i=1}^i (R_{day} - Q_{surf} - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中:  $SW_i$  表示土壤最终含水量;  $SW_0$  表示第  $i$  天土

表 4 Tennant 法河流临界生态流量标准

生态流量标准及相应生态状况描述	最大	最佳范围	极好	非常好	好	一般	差或最小	极差
枯水期(10月~次年3月)	200	60~100	40	30	20	10	10	<10
丰水期(4~9月)	200	60~100	60	50	40	30	10	<10

壤初始含水量;  $t$  表示时间;  $R_{day}$  表示第  $i$  天的降水量;  $Q_{surf}$  表示第  $i$  天地表径流;  $E_a$  表示第  $i$  天的蒸散发量;  $W_{seep}$  表示第  $i$  天离开土壤剖面底部的渗透水流和旁通水流量;  $Q_{gw}$  表示第  $i$  天的回归流的水量。

### 2.2 生态流量计算方法

Tennant 法是 Tennant<sup>[25]</sup>通过对美国 3 个州的 11 条河流实施了详细研究后提出的一种生态流量标准设定法。Tennant 法以多年平均流量均值为依据,用多年平均流量乘以保护水生态和水环境的河流流量推荐值来表示河流生态需水,具有宏观指导意义,是我国河流生态流量研究中的一种常用方法<sup>[26,27]</sup>,其推荐的河流临界生态流量标准见表 4。

当河道流量处于多年平均流量的 10% 以下时,生态系统严重受损,不适合水生生物的生存;当河道流量增大到多年平均流量的 30%~60% 时,水生生物数量增多,生态结构的稳定性明显增强,河宽、水深和流速能基本满足水生生物生长繁育的需要;当流量大于多年平均流量的 60% 时,认为是极为适合的生态径流量<sup>[28]</sup>。Tennant 法一般取河段多年平均流量的 10%、30%~50% 和 40%~60% 分别作为最小、适中和最佳生态流量<sup>[29,30]</sup>,因此本研究将 Tennant 法中第 7 级的“差或者最小”、第 5 级的“好”和第 3 级的“极好”分别作为各河段的最小、适中和最佳生态流量。

## 3 基于 SWAT 模型的径流模拟

### 3.1 模型建立

输入 SRTM 90m 规格的 DEM 基础数据,生成河网,设定集水面积阈值为 10km<sup>2</sup>,将武江流域划分为 36 个子流域(包括在杨溪河 3 个梯级电站所形成的子流域),总流域出口为犁市(二)站。再根据不同土地利用类型、土壤类型和坡度,将武江流域划分为 240 个水文响应单元 HRUs(图 3)。

### 3.2 模型率定与验证

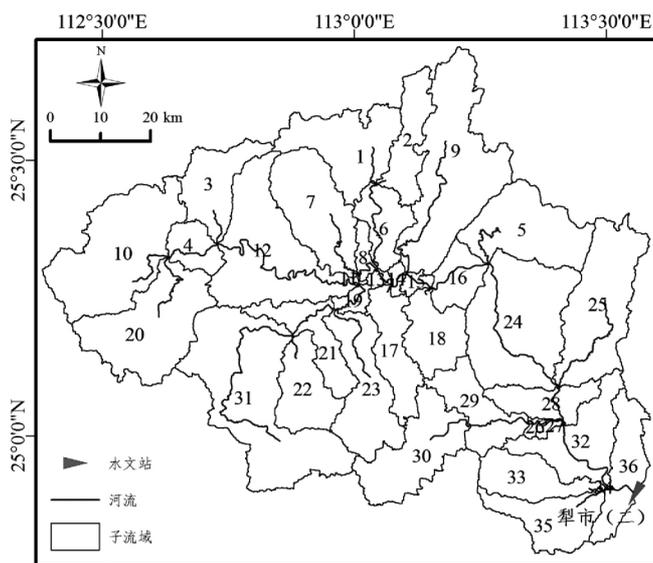


图 3 武江子流域划分

选取决定系数(Coefficient of Determination,  $R^2$ )与纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Coefficient,  $NS$ )<sup>[31]</sup>对 SWAT 模型模拟精度进行评价。其中,  $NS$  的计算公式<sup>[31]</sup>为:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

式中:  $n$  为实测序列长度;  $X_i$  和  $\bar{X}$  分别表示实测时间序列和序列的均值;  $Y_i$  表示预测或模拟的时间序列值。

$R^2$  与  $NS$  越接近 1, 说明模拟值与实测值越接近, 模拟效果越好<sup>[10]</sup>。一般认为  $R^2 > 0.6$ ,  $NS > 0.6$  的模拟情况是可以接受的<sup>[22]</sup>。

本研究选取犁市(二)站 2006 年 1 月~2013 年 12 月的逐月流量数据对模型进行率定和验证, 其中 2006~2008 年为模型预热期, 2008~2010 年为模型率定期, 2011~2013 年为模型验证期。模拟径流拟合结果见图 4, 模型适应性评价指标见表 5。

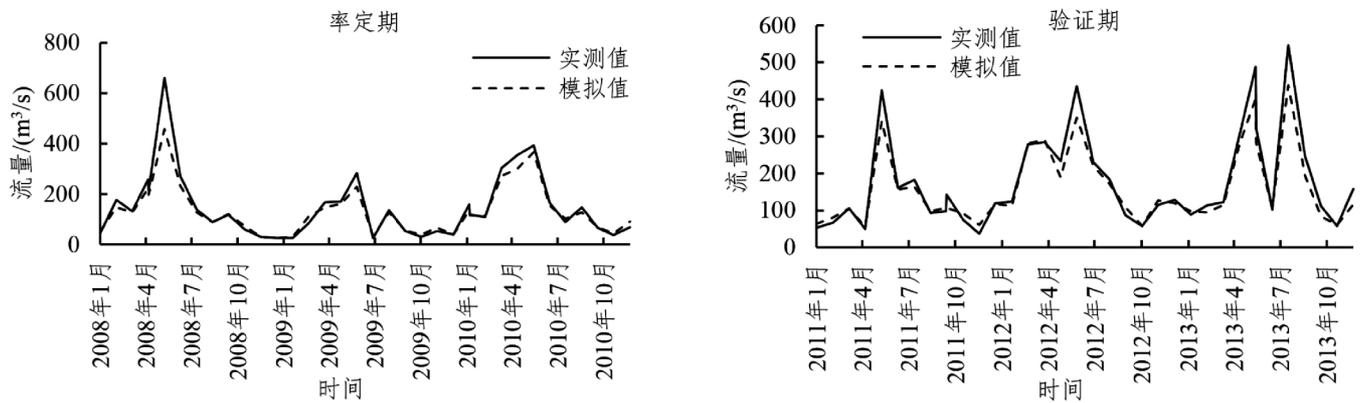


图4 犁市(二)站月径流模拟结果图

表5 犁市(二)站月径流模拟适应性评价表

模拟期	$R^2$	NS
率定期	0.77	0.91
验证期	0.75	0.92

从图4和表5可知,犁市(二)站率定期月径流模拟值和实测值的 $R^2$ 和NS分别为0.77和0.91,表明犁市(二)站的月径流模拟值与实测值流量过程线拟合程度较好。参数率定后,将率定得到的参数值带回SWAT模型进行验证,验证期的 $R^2$ 和NS分别为0.75和0.92,表明SWAT模型在该研究区有较好的适应性。因此,可以认为SWAT模型能较好地模拟武江流域的水文过程。

## 4 生态流量计算

### 4.1 来水量计算

通过在杨溪河上的横溪、钓鱼台和银溪3座水电站坝址处设置流域出口,得到这3座水电站坝址处2008年~2013年的月径流量(见图5)。根据坪石、麻坑、沙坪和城口4个雨量站2008~2013年的年平均降雨量进行算术平均,得到其多年平均降雨量为1442.5mm,与武江流域大部分区域所在的乐昌市的多年平均降雨量(1425.0mm<sup>[32]</sup>)仅相差1.23%,与武江流域的多年平均降雨量(1497.7mm<sup>[32]</sup>)仅相差3.69%,因此可将根据这4个雨量站2008~2013年的降雨量所得到的径流模拟结果当作多年平均情况。因为武江流域的大部分区

域位于乐昌市,而本文的重点研究区域杨溪河流域位于乳源瑶族自治县,因此乐昌市的多年平均降雨量(1425.0mm)与杨溪河流域的多年平均降雨量(1700mm)有一定的差别。根据图5的月径流模拟结果,计算得到横溪、钓鱼台和银溪水电站坝址处的多年平均流量分别为10.2m<sup>3</sup>/s、11.7m<sup>3</sup>/s和12.0m<sup>3</sup>/s。横溪水电站枯水期和丰水期的多年平均流量分别为7.15m<sup>3</sup>/s和13.3m<sup>3</sup>/s;钓鱼台水电站枯水期和丰水期的多年平均流量分别为8.53m<sup>3</sup>/s和14.8m<sup>3</sup>/s;银溪水电站枯水期和丰水期的多年平均流量分别为8.82m<sup>3</sup>/s和15.2m<sup>3</sup>/s。

### 4.2 生态流量计算结果

依据计算得到的横溪、钓鱼台和银溪3座水电站坝址处的多年平均流量,根据表4中Tennant法的临界生态流量标准,将各控制断面枯水期平均流量的10%与丰水期平均流量的10%的平均值作为最小生态流量,将各控制断面枯水期平均流量的20%与丰水期平均流量的40%的平均值作为适中生态流量,将各控制断面枯水期平均流量的40%与丰水期平均流量的60%的平均值作为最佳生态流量,计算得到各控制断面在枯水期和丰水期的最小、适中和最佳生态流量(见表6)。

表6 生态流量计算结果

控制断面	m <sup>3</sup> /s		
	最小	适中	最佳
横溪水电站	1.02	3.37	5.40
钓鱼台水电站	1.17	3.82	6.15
银溪水电站	1.20	3.91	6.31

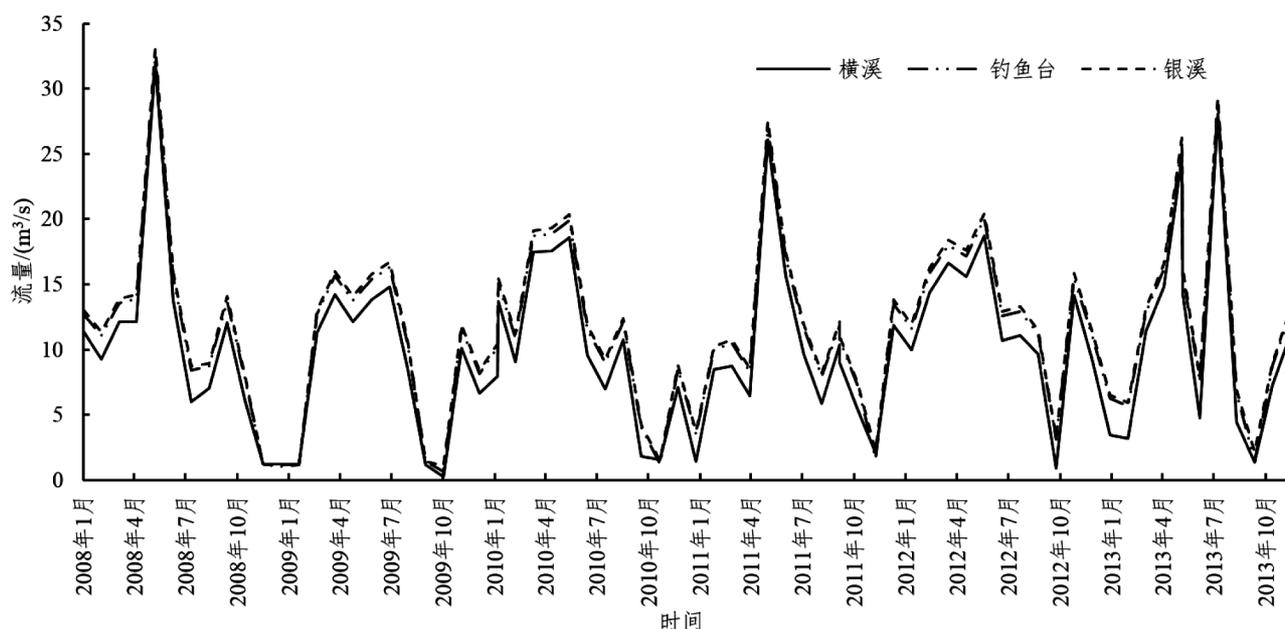


图 5 横溪、钓鱼台和银溪 3 座水电站坝址处的月径流模拟结果

根据表 6 可知,横溪水电站的最小、适中和最佳生态流量分别为  $1.02\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3.37\text{m}^3/\text{s}$  和  $5.40\text{m}^3/\text{s}$ ; 钓鱼台水电站的最小、适中和最佳生态流量分别为  $1.17\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3.82\text{m}^3/\text{s}$  和  $6.15\text{m}^3/\text{s}$ ; 银溪水电站的最小、适中和最佳生态流量分别为  $1.20\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3.91\text{m}^3/\text{s}$  和  $6.31\text{m}^3/\text{s}$ 。

#### 4.3 讨论

通过对图 5 杨溪河上的横溪、钓鱼台和银溪 3 座水电站坝址处 2008~2013 年的月径流量进行分析,4~9 月是杨溪河流域来水量最为丰沛的时段,这 6 个月的多年平均流量占到了多年平均总流量的 65% 左右,因此根据 Tennant 法将 4~9 月确定为丰水期、将 10 月~次年 3 月确定为枯水期是合理的。杨溪河流域内没有特别保护的生物种群,4~9 月为当地水生生物的生长繁殖期<sup>[7]</sup>,因此表 6 中各控制断面丰水期的适中和最佳生态流量均大于枯水期是合理的。同时,10% 的多年平均流量是支撑河道短期生存栖息地的最小瞬时流量<sup>[28]</sup>,因此各控制断面的最小生态流量均取多年平均流量的 10% 亦具有一定的合理性。

横溪、钓鱼台和银溪 3 座引水式水电站引水发电,在枯水期极易造成引水口至电站尾水之间的形成减脱水河段<sup>[3]</sup>。加之杨溪河属于山区性流域,河道落差大,汇流快,即使不考虑水电站引水发电,杨溪河也较难维持较大流量。考虑水电站的发电功能,本研究认为在枯水期各水电站至少需要保证最小生态流量,以平衡河流

生态系统和水资源开发利用的关系。

## 5 结论

目前,国内许多中小河流中建有小水电,小水电引水发电会对河流生态环境有重要不利影响,河流的健康与经济社会的发展密切相关,开展无资料地区的径流模拟和生态流量研究具有重要意义。本研究以杨溪河为例,运用 SWAT 模型对流域月径流进行模拟,并采用 Tennant 法计算各梯级水电站的最小、适中和最佳生态流量,为维持河流生态健康提供数据支持。主要结论如下:

(1) SWAT 模型适用于我国南方降雨充沛的武江流域,流域出口犁市(二)站率定期月径流模拟值和实测值的  $R^2$  和  $NS$  分别为 0.77 和 0.91,验证期的  $R^2$  和  $NS$  分别为 0.75 和 0.92,模型整体适应性较好。

(2) 通过武江犁市(二)站的率定和验证,计算得到武江支流杨溪河上的横溪、钓鱼台和银溪 3 座水电站坝址处的多年平均流量分别为  $10.2\text{m}^3/\text{s}$ 、 $11.7\text{m}^3/\text{s}$  和  $12.0\text{m}^3/\text{s}$ 。

(3) 根据模拟径流量和 Tennant 法,计算得到杨溪、钓鱼台和银溪 3 座水电站坝址处的最小、适中和最佳生态流量。生态流量的确定,能够为梯级开发流域水资源的合理开发利用提供依据。

## 参考文献:

- [1] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 适宜生态流量计算方法研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 745~750.
- [2] 张立华, 董新美, 刘志钢. 水库下游河道生态需水量分析计算[J]. 山东水利, 2012(2): 5~6.
- [3] HOLVOET K, GRIENSVEN A V, SEUNTJENS P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2005, 30(8): 518~526.
- [4] 李友辉, 孔琼菊, 张友权. 潇湘水库入库径流随机模拟[J]. 江西水利科技, 2002, 28(4): 218~221.
- [5] 虞慧, 李友辉, 孔琼菊, 等. 新安江模型在白云山水库日径流模拟的应用[J]. 江西水利科技, 2017, 43(4): 293~296.
- [6] 许剑辉, 赵怡, 钟凯文, 等. 基于改进线性光谱解混和 SCS-CN 模型的广州主城区降雨产流模拟[J]. 热带地理, 2016, 36(6): 969~975.
- [7] 赵奕, 南卓铜, 李祥飞, 等. 分布式水文模型 DHSVM 在西北高寒山区流域的适用性研究[J]. 冰川冻土, 2019, 1(41): 1~11.
- [8] GOVENDER M, EVERSON C S. Modelling Streamflow from Two Small South African Experimental Catchments Using the SWAT Model [J]. 2005, 19(3): 683~692.
- [9] 渠勇建, 成向荣, 虞木奎, 等. 基于 SWAT 模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 130~134.
- [10] 王林, 张明旭, 陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域径流模拟[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 28~33.
- [11] 汪银龙, 冯民权, 张杰. 基于相似流域法的 SWAT 模型模拟黄河中游无资料地区径流 [J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 81~87.
- [12] 罗吉忠, 张新华, 肖玉成, 等. 基于 SWAT 模型的缺资料流域径流模拟研究 [J]. 西南民族大学学报 (自然科学版), 2013, 39(1): 80~86.
- [13] 李志强, 朱超霞, 刘贵花. SWAT 模型下基于 DEM 的水文响应单元划分——以濂水流域为例 [J]. 江西水利科技, 2017, 43(6): 438~442.
- [14] 王珩, 肖昌虎, 黄站峰. 河流生态流量研究进展[J]. 江西水利科技, 2018, 44(3): 230~234.
- [15] 樊皓, 闫峰陵. 基于生态水力学法的金沙电站最小下泄流量计算[J]. 水文, 2016, 36(3): 40~43.
- [16] 郑从奇, 庄会波, 陈干琴, 等. 基于改进 Tennant 法的大沽河河道内生态水量分析研究[J]. 治淮, 2018(12): 40~41.
- [17] 俞科慧, 王浩. 杨溪水库下游河道生态需水量分析与计算 [J]. 浙江水利科技, 2010(3): 7~9.
- [18] 吕兰军. 九江市城市水生态文明建设水文服务探讨 [J]. 江西水利科技, 2018, 44(2): 125~128.
- [19] 秦东旭, 吴耕华, 刘煜, 等. 不同类型河岸缓冲带水质净化效果研究[J]. 水土保持应用技术, 2017(4): 1~3.
- [20] 李华. 闽清小水电开发的现状与前景 [J]. 亚热带资源与环境学报, 1998, 13(2): 46~49.
- [21] OMRAN E E. Hydrological Simulation of a Rainfed Agricultural Watershed Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [M]. Sustainability of Agricultural Environment in Egypt: Part I: Soil -Water -Food Nexus. Cham: Springer International Publishing, 2019: 317~347.
- [22] 陈祥, 刘卫林, 熊翰林, 等. SWAT 模型在赣江流域径流模拟中的应用研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(12): 31~35.
- [23] 肖军仓, 罗定贵, 刘爱樟, 等. 抚河流域降雨、地形变化特征及其对非点源污染影响的初步分析 [J]. 江西水利科技, 2008, 34(2): 102~107.
- [24] 吕乐婷, 彭秋志, 郭媛媛, 等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1746~1757.
- [25] TENNANT D L. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6~10.
- [26] 温天福, 游文菽. 江口水库最小生态需水研究[J]. 江西水利科技, 2010, 36(4): 247~250.
- [27] 左莎莎, 李荣昉, 吴敦银, 等. 赣江中下游河道内生态环境需水研究[J]. 江西水利科技, 2013, 39(2): 105~109.
- [28] 陈南祥, 张丹, 蒋晓辉. 基于改进 Tennant 法的花园口生态径流量计算[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(6): 23~25.
- [29] 杨蕊, 冯民权, 孙小平, 等. 基于改进 Tennant 法的汾河中游环境流量计算方法 [J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 13~15.
- [30] 张泽聪, 韩会玲, 陈丽. 基于改进的 Tennant 法的大凌河生态基流计算[J]. 水电能源科学, 2013, 31(9): 29~31.
- [31] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282~290.
- [32] 韶关市水务局. 2017 年韶关市水资源公报[R]. 韶关市水务局, 2017.
- [33] 王煌, 周买春, 刘远, 等. 水力学法估算广东省山区小水电站减脱水河段生态需水量的探讨 [J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 154~161.

编辑: 张绍付

## Runoff simulation of ungauged basin base on SWAT model and ecological flow calculation

### ——a case study of Yangxi river

LIU Shufeng, CHEN Jichen, GUAN Shuai

(Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

State-province Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China;

Guangdong Provincial Key Laboratory of Hydrodynamics, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to simulate the monthly runoff of Wujiang watershed from 2008 to 2013. The observed runoff data of Lishi (2) station was used to calibrate and validate the model parameters. The runoff of Hengxi, Diaoyutai and Yinxi hydropower stations on Yangxi river, a tributary of Wujiang watershed, was simulated by taking the dam sites of these three cascade hydropower stations as the outlets of the basin. And the ecological flow of these three control sections was calculated by Tennant method according to the simulation results. The results showed: 1) SWAT model had good adaptability to runoff simulation in Wujiang watershed. The coefficient of determination ( $R^2$ ) and Nash-Suttcliffe coefficient (NS) of monthly runoff between simulated values and observed values of Lishi (2) station were 0.77 and 0.91 respectively in calibration period, while  $R^2$  and NS were 0.75 and 0.92 respectively in validation period. 2) According to the runoff simulation results, the average annual inflow at the dam sites of Hengxi, Diaoyutai and Yinxi hydropower stations on Yangxi river were  $10.2\text{m}^3/\text{s}$ ,  $11.7\text{m}^3/\text{s}$  and  $12.0\text{m}^3/\text{s}$ , respectively. 3) According to the runoff simulation results and Tennant method, the minimum, moderate and optimum ecological flows of Hengxi hydropower station were  $1.02\text{m}^3/\text{s}$ ,  $3.37\text{m}^3/\text{s}$  and  $5.40\text{m}^3/\text{s}$ , respectively. The minimum, moderate and optimum ecological flows of Diaoyutai hydropower station were  $1.17\text{m}^3/\text{s}$ ,  $3.82\text{m}^3/\text{s}$  and  $6.15\text{m}^3/\text{s}$ , respectively. The minimum, moderate and optimum ecological flows of Yinxi hydropower station were  $1.20\text{m}^3/\text{s}$ ,  $3.91\text{m}^3/\text{s}$  and  $6.31\text{m}^3/\text{s}$ , respectively.

**Key words:** SWAT model; Tennant method; Ecological flow; Yangxi river

翻译: 刘树锋

(上接第334页)

the permeability coefficient of surrounding rock, the larger the hydraulic gradient around the cave. The hydraulic gradient of the surrounding rock of the caverns on both sides is larger than that of the middle cavern. The initial water level has little effect on the hydraulic gradient of the surrounding rock. (3) Affected by the excavation drainage, the water level of the surrounding rock of the cavern is reduced rapidly, and the rainfall recharge does not have a significant impact on the groundwater level, but the formed suspension saturation zone still has a certain retardation effect on the escape of oil and gas.

**Key words:** Water seal cavern; Non-steady seepage; Permeability coefficient; Variation of water level; Numerical analysis

翻译: 喻 麒