

# 基于 SWAT 模型的汤浦水库流域非点源污染模拟

施练东, 俞海平, 朱建坤, 方 勇, 魏张文

(汤浦水库有限公司, 浙江 绍兴 312364)

**摘要:**在对汤浦水库流域内污染调查的基础上,建立了基于 GIS 技术的 SWAT 模型,建立了汤浦水库流域非点源污染空间和属性信息基础数据库,在 GIS 技术和 ArcScene、Arcview 等软件支持下,研究流域非点源污染分布规律、主要污染因子、各溪各镇的污染贡献率以及流域污染负荷总量等。结果表明,在空间尺度上,南溪和双江溪流域营养物质贡献量最高,泥沙量较大;不同土地利用类型污染流失负荷不同,灌溉水田是总氮负荷的主要来源,水田和茶园是总磷负荷的主要来源,其次是居民点,最小是林地。在时间尺度上,年内总氮、总磷负荷随季节呈不规则的“W”形态变化。

**关键词:**SWAT 模型;汤浦水库;非点源污染;模拟

**中图分类号:**X830.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)03-0066-05

近年的研究表明,非点源污染是饮用水源水库和湖泊水质富营养化的主要原因之一(沈荣根等, 2009)。非点源污染具有不确定性,时空差异大、影响因素及作用过程复杂、监测困难。建立基于 GIS 系统的非点源污染模型,可定量研究流域非点源污染的污染过程和分布规律、主要污染因子、各溪各镇的污染贡献率以及流域污染负荷总量。目前,应用较多的非点源模型有 ANSWERS、WEPP、GLEAMS、AGNPS、SWAT 等。SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂大流域,并能在资料缺乏的地区建模,广泛应用于流域的泥沙、径流量和非点源污染控制等方面(郭生练等, 2000; 王中根等, 2003; 孙峰等, 2004; 张东等, 2005; 秦耀民等, 2009)。利用 SWAT 模型进行大型饮用水源流域模拟,在国内尚不多见。

汤浦水库位于曹娥江支流小舜江,汇入干流的支流分别是王化溪、万宝溪、双江溪、北溪和南溪,流域面积 460 km<sup>2</sup>,水域面积 14 km<sup>2</sup>,涉及 6 个乡镇,是虞绍平原唯一的饮用水源地,设计日供水规模 100 万 t,供水受益人口约 200 万人。流域点源污染已全部搬迁,非点源污染主要为生活污染、农业面源污染和大气湿沉降等。目前,水库水质总体较好,但总氮总磷含量较高,水体营养程度为中营养。本文基于 SWAT 模型的非点源污染模拟,分析了汤浦水

库流域非点源污染的时空分布,为该饮用水源地水库污染治理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 流域基础数据库建立

模型所需的数据按照存储方式和在建模时的作用可以分为空间数据和属性数据。空间数据主要包括数字高程模型(DEM)、土地利用图、土壤图等,主要利用 ArcView 和 ArcGIS 等软件完成,把它们转化为模型所需要的 ESRI Grid 格式。属性数据主要包括气象、水文、污染源、农业管理和山塘水库等信息。模型基础数据库建立说明见表 1。

### 1.2 模型建立

1.2.1 流域划分 流域的描绘过程包括:导入 DEM、DEM 预处理、确定最小亚流域面积、编辑河网、进行亚流域参数的计算、定位点源位置和水库位置。

本次流域描绘采用汤浦水库流域 1: 5 万 DEM 数据,设定的子流域面积阈值为 900 hm<sup>2</sup>,设置 3 个子流域出水口,6 个子水库,最终将汤浦水库流域划分为 33 个子流域。划分结果见图 1。

SWAT 模型采用了不确定空间位置的水文响应单元划分,得到子流域不同土壤和土地利用组合的面积,使得模型可以模拟反映出其不同组合间的水文差异,根据研究区域土地利用和土壤类型的组合和分布特征,确定土地利用面积阈值和土壤面积阈值为 0,整个流域被分成 2 254 个 HRU(水文响应单元是亚流域的一部分,含有唯一的土地利用、管理和土壤属性,被假定在亚流域中有统一的水文行为)。

收稿日期:2010-11-09 收修改稿日期:2011-03-30

基金项目:浙江生态省建设重大科技攻关项目(2005C13002)。

作者简介:施练东,男,1978 年生,主要从事水质保护管理。

表1 SWAT模型输入参数及获取途径

Tab.1 Input parameters of SWAT model and data obtaining ways

数据类型	包含参数	获取途径
地形	子流域面积、子流域平均坡长和坡度、平均高度、河道长度、河道宽度、河道坡度、高程、地形因子等	数字高程模型(DEM)现场勘测
土壤	土壤类型的空间分布、土壤物理属性、土壤化学属性、土壤可蚀性因子	绍兴1:20万土壤分布图、野外采样、实验室内试验
土地利用和植被覆盖	流域土地利用类型及空间分布状况	1:10万的绍兴市土地利用现状图经过格式与投影转化获得
气象	日降水数据、日最高最低温、风速、相对湿度和太阳辐射等	1986-2005年嵊州气象站观测资料;2001-2009年流域雨量点逐日降雨资料
农业管理	种植时间、化肥施用过程、农药施用过程、灌溉过程、收割过程	现场调查、有关部门统计资料
山塘水库	径流值、出流速率(日、月、年)、水文特征值、用途	现场调查、有关部门水文统计资料
湿地	面积、占流域的比重、储水体积、初始氮磷浓度	现场调查、分析

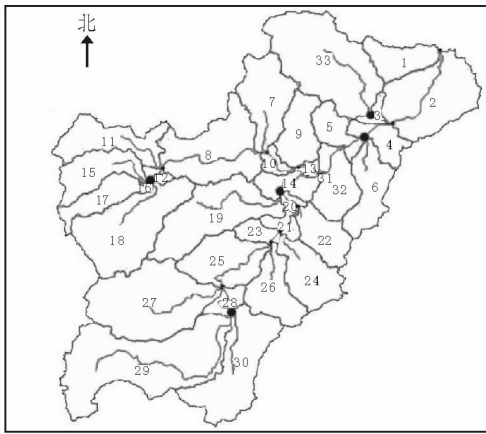


图1 汤浦水库子流域划分

Fig.1 Sub-basin division in Tangpu Reservoir Basin

1.2.2 模型校正 经过计算和查阅相关资料发现, CN2值(潮湿条件II下的初始SCS径流曲线数)、土壤中植被可利用水量(SOL\_AWC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)等3个因子最为敏感。其中, CN2值与总水量成正比, SOL\_AWC与水量成反比, ESCO与水量成反比。校准时应先调整CN2值,若调整后径流量还是不合理则需要调整另外2个参数。校准过程大部分为经验校准,只要模拟数据与实测数据拟合较好即可,无固定的校准方法。校准方案见表2。

2001-2009年的径流量模拟与实测拟合效果较好,最高准确度为99.44%,最低为67.83%,平均准确度为87.48%,氮磷模拟误差在15%左右,模拟效果较好,总体反映了实际情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 非点源污染负荷空间分布

2.1.1 各水系非点源污染负荷贡献 2001-2009年的模拟结果显示,南溪的总氮、总磷和泥沙流失贡献率均最大(见图2)。南溪和北溪共同汇入双江

溪,南溪的高污染贡献导致了双江溪污染量的提高。

表2 校准方案

Tab.2 Calibration program

校准变量	校准值	变量含义
NPERCO	-10%	硝酸盐渗透系数
PPERCO	15%	磷渗透系数
SOL_ORGN	40%	土壤中有机的初始浓度
SOL_ORGP	-100%	土壤中有机的初始浓度
SOL_NO3	-75%	土壤中NO <sub>3</sub> 的初始浓度
ALPHA_BF	0.7	基流α系数
GW_REVAP	0.2	浅层地下水再蒸发系数
ESCO	100%	土壤蒸发补偿系数
CN2	-8	潮湿条件II下的初始SCS径流曲线数
USLE_P	-3	USLE方程的水土保持因子P
SOL_AWC	0.05	土层中的可用含水量

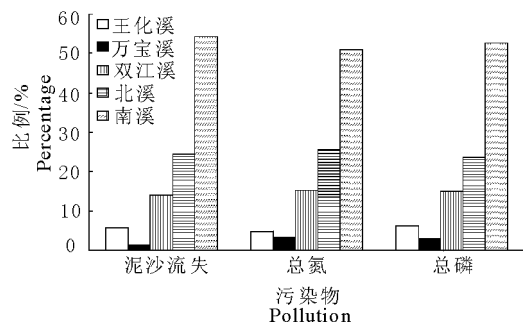


图2 各水系污染负荷贡献率

Fig.2 Percentage of pollution loading from each river system

2.1.2 各乡镇污染负荷贡献 泥沙贡献率和总氮贡献率谷来镇最高,总磷贡献率王坛镇最高。王坛镇和谷来镇的总氮和总磷的贡献值均明显高于其他镇,见图3。

流域的氮磷流失量最高出现在南溪(含谷来、王坛、竹溪等3镇),其次是北溪,最低是万宝溪,呈现南北高、中间低的空间分布。南溪是氮磷污染的

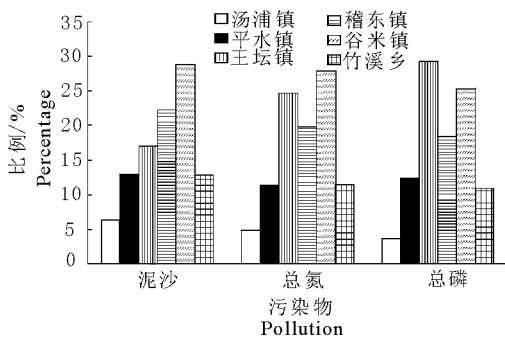


图3 各乡镇污染负荷贡献率

Fig. 3 Percentage of pollution loading from each county

重点治理区域,其原因一是控制流域的面积大,降雨量多且集中,二是该地区人口多,生活生产量大。

## 2.2 非点源污染负荷时间分布

2.2.1 氮磷负荷年内分布特点 就全年而言,总氮趋势在10月出现最高值,所有年份在3月和6月都出现较小的波峰(2003和2004年枯水年稍有异

常),而这些月份均为研究区域主要施肥时间,说明总氮负荷与施肥存在很大关系,农业污染是汤浦水库地区最主要的污染来源。

总磷负荷在5月、8-9月有2个波峰,其他时间变化较小,起伏平缓。总的趋势每年从10月开始逐渐减小。

2.2.2 氮磷负荷的季节分布特点 由于2001年总氮和总磷实测数据缺失,所以数据对比分析从2002年开始(见图4)。

通过模拟和实测数据对比分析,研究区域实测及模拟总氮值和总磷值均与径流量没有明显的相关关系,实测氮磷值和径流量的相关系数为0.2308和0.085,模拟氮磷值和径流量相关系数分别为-0.237和0.312,说明氮磷负荷的污染并不主要是由水土流失引起的。年内总氮、总磷负荷随季节呈不规则的“W”形态变化:一般在雨季前期(5~6月),氮磷的输出会有一个“小高峰”,分析原因多为

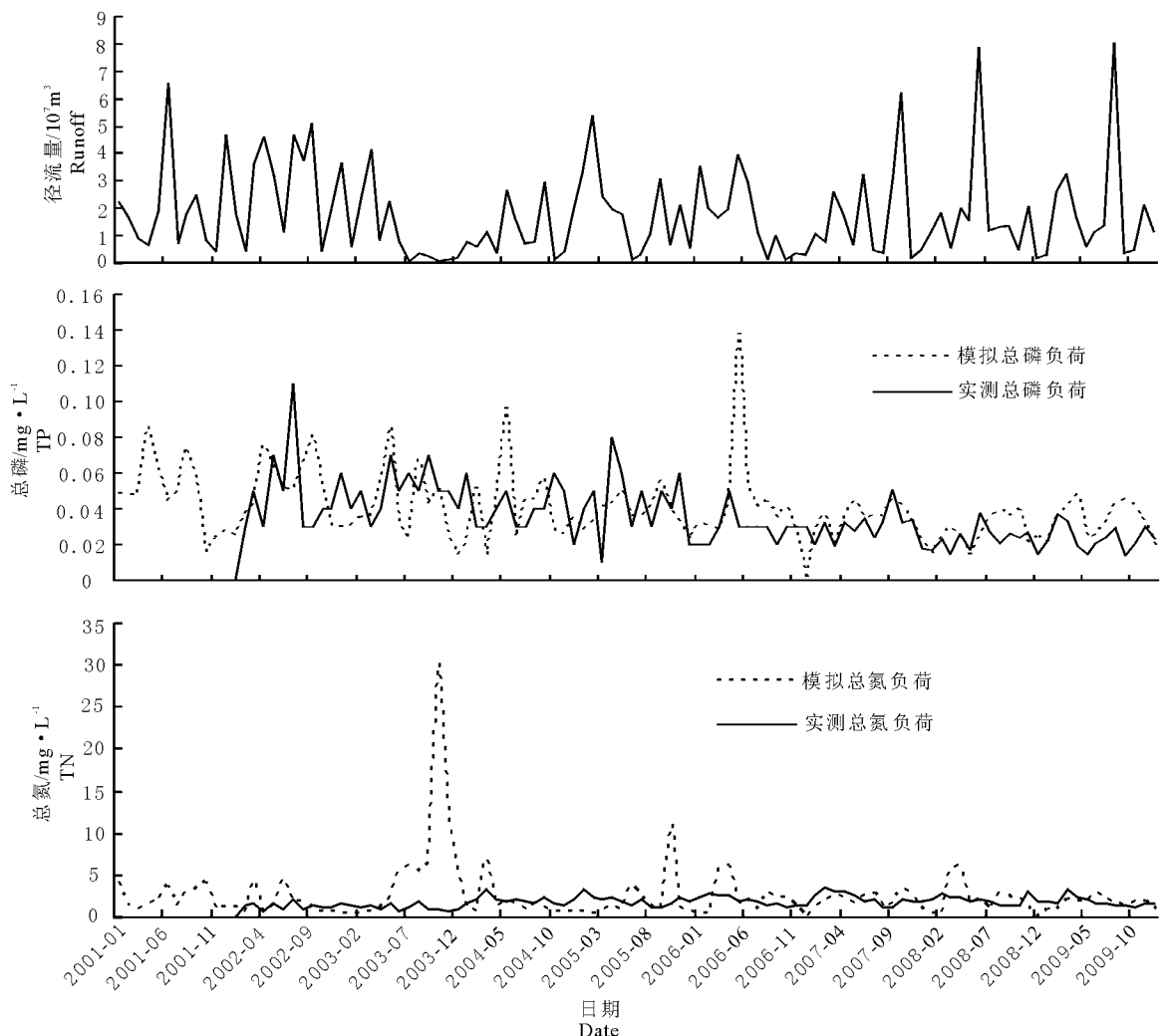


图4 双江溪氮磷负荷与径流量季节分布

Fig. 4 Seasonal distribution of TN and TP loading and runoff in Shuangjiangxi River

少量降雨侵蚀土壤表面所致;雨季降雨量与降雨强度增大,土壤侵蚀加深;10月秋季作物收获,加之植物落叶等影响,流域内氮、磷的流失会达到每年的最大值;雨季过后,流失量有所回落,11月-次年2月当地进入枯水期,则又产生年度的第三个“峰”。

## 2.3 不同土地利用类型非点源污染负荷贡献量

33个流域的水文响应单元中,旱地和灌溉水田是氮、磷的主要贡献者,以灌溉水田贡献值最高,见图5。

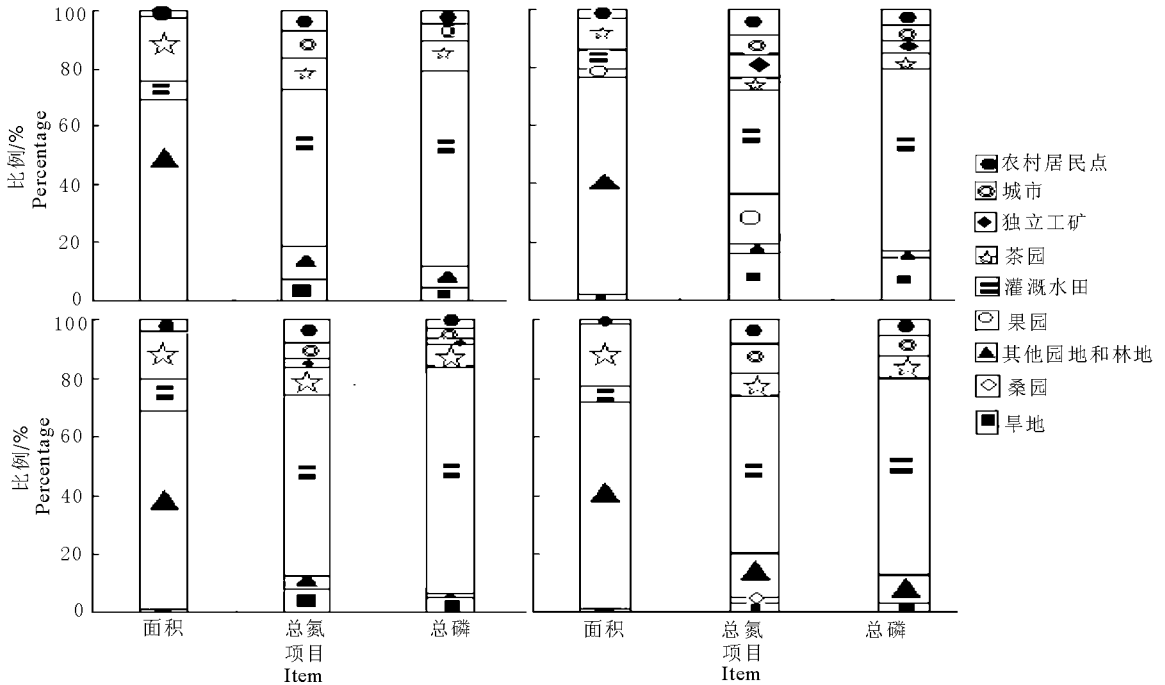


图5 不同土地利用类型氮、磷贡献量

Fig.5 Nutrition loadings of different land uses

灌溉水田是总氮负荷的主要来源,水田和茶园是总磷负荷的主要来源;总氮和总磷负荷的主要贡献者均为面积10%左右的旱田和水田,它们的总氮和总磷贡献值分别占整个流域的78.18%和76.60%。

## 3 讨论

基于ArcScene、Arcview等GIS系统,建立汤浦水库流域SWAT模型,对汤浦水库流域径流量和污染负荷进行模拟,并与实测资料进行对比分析,验证模型精度。结果表明,SWAT在流域基础数据库的支持下,对汤浦水库流域的应用研究是可行的,研究结果可为汤浦水库流域水质管理提供依据,为富营养化防治提供对策和建议,也可为国内类似工作提供参考。

根据模拟结果,需改进汤浦水库流域农业管理措施,改进施肥方式,减少农药化肥施用的量和次数,避免氮肥的过量供应,实行有机肥还田和节水灌溉,以减少流域内氮、磷污染的输入。

SWAT模型所需模型参数较多,为了提高模拟精度,应尽量用多年的水文资料来进行参数率和模型检验,因此,需要完善流域范围内各项基础资料的监测。

## 参考文献

- 郭生练,熊立华,杨井,等. 2000. 基于DEM的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报,33(6):1-5.
- 秦耀民,胥彦玲,李怀恩. 2009. 基于SWAT模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报,29(2):440-448.
- 沈荣根,肖理生,杨肖娥. 2009. 汤浦水库水质环境数字流域管理模型研究[R].
- 孙峰,郝芳华. 2004. 基于GIS的官厅水库流域非点源污染负荷计算研究[J]. 北京水利,(1):22-24.
- 王中根,刘昌明,黄友波. 2003. SWAT模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,22(1):79-86.
- 张东,张万昌,朱利,等. 2005. SWAT分布式流域水文物理模型的改进及应用研究[J]. 地理科学,5(4):434-440.

## SWAT-Based Simulation on Non-point Source Pollution in the Tangpu Reservoir Basin

SHI Lian-dong, YU Hai-ping, ZHU Jian-kun, FANG Yong

(Shaoxing Tangpu reservoir Co. , LTD Zhejiang 312364, China)

**Abstract:** A SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model based on GIS technology was established in Tangpu Reservoir Basin, as well as its basic database for information of non-point pollution source space and properties. Distribution of non-point pollution, main pollution factors, contribution rate from different rivers and towns and gross pollution load of the valley were studied using GIS technology and softwares such as ArcScene, Arcview and so on. The results showed Nanxi River and Shuangjiang River valleys contribute the most nutrients, as well as large sediment in spatial scale. The load of pollution loss varies with different land use types. Nitrogen load was mainly from irrigated farmland. Tea garden and irrigated farm were the primary sources for phosphor, followed by settlement, and then woodland. In time scale, the nitrogen and phosphor load varied in irregular W shape as seasons change.

**Key words:** SWAT model; Tangpu Reservoir; non-point source pollution; simulation