

# The Study of Ecological Water Supplement in Datong Lake-Polder Based on SWAT Model

Xiaodong Li<sup>1,2</sup>, Yi Xiao<sup>3</sup>, Wu Liu<sup>1,2</sup>, Xuwu Chen<sup>1,2</sup>, Xiaoqun Liu<sup>3</sup>, Jie Liang<sup>1,2</sup>, Guangming Zeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control of Ministry of Education, Hunan University, Changsha Hunan

<sup>3</sup>Administration of Dongting Lake Water Conservancy Project, Changsha Hunan

Email: 961137756@qq.com

Received: Jan. 15<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 7<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 10<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

In this study, the SWAT model was applied to simulate the annually average runoff and Non-point source nitrogen and phosphorus load in Datong Lake-polder. The results indicate that SWAT model could simulate the runoff processes and nitrogen and phosphorus distribution quite well in Datong Lake-polder. The Nash-Sutcliffe coefficient (ENS) and the coefficient of determination ( $R^2$ ) of model reach 0.79 and 0.67. Coefficient of determination ( $R^2$ ) of nitrogen and phosphorus model reaches 0.64 and 0.58. In addition, using function analysis method combined with the SWAT model calculated minimum ecological water supplement for the normal function of the ecological environment in Datong Lake-polder. The research of ecological water supplement can provide a theoretical basis for the rational use and scheduling of water resources in Datong Lake-polder.

## Keywords

Datong Lake-Polder, SWAT Model, Water Quality Prediction, Ecological Water Supplement

# 基于SWAT模型的大通湖垸生态需水量研究

李晓东<sup>1,2\*</sup>, 肖义<sup>3</sup>, 刘武<sup>1,2</sup>, 陈绪武<sup>1,2</sup>, 刘晓群<sup>3</sup>, 梁婕<sup>1,2</sup>, 曾光明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 湖南 长沙

<sup>3</sup>湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙

Email: 961137756@qq.com

收稿日期: 2017年1月15日; 录用日期: 2017年2月7日; 发布日期: 2017年2月10日

作者简介: 李晓东, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事水环境相关研究。

文章引用: 李晓东, 肖义, 刘武, 陈绪武, 刘晓群, 梁婕, 曾光明. 基于 SWAT 模型的大通湖垸生态需水量研究[J]. 水资源研究, 2017, 6(1): 18-23. <https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.61003>

## 摘要

采用SWAT模型对大通湖垸的年平均径流过程以及非点源氮磷负荷进行模拟。结果表明：SWAT模型能够较好的模拟大通湖垸自然状态下的径流过程以及非点源氮磷分布，径流模型的效率系数和决定系数达到了0.79和0.67。氨氮和总磷负荷模型的决定系数分别达到了0.64和0.58。结合SWAT模型采用功能分析法计算了维持大通湖垸内水体正常生态环境功能所需的最小生态补水量。研究不同水文时期生态补水量，可以为大通湖垸内水资源的合理利用和调度提供理论依据。

## 关键词

大通湖垸, SWAT模型, 水质预测, 生态补水量

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在目前所应用的分布式水文模型中，美国农业部(USDA)开发研制的 SWAT 模型比较成熟[1] [2] [3]。SWAT 模型是基于连续时段和流域尺度的综合水文模型。在国外，Srinivasan R.和 Arnold [4]在德克萨斯州的 Seco Creek 盆地上游应用 SWAT 模型进行了生态水文模拟；Andrea [5]和 Tripathi [6]分别应用 SWAT 模型在德国中部 Aar 流域和印度进行了径流过程以及非点源污染负荷模拟，均取得了满意的结果。近些年，随着地理信息系统(GIS)的发展 SWAT 模型在国内一些流域也得到了较好的应用，比如洱海流域[7]、长江流域[8] [9]、淮河流域[10]等都有 SWAT 应用的研究案例。

洞庭湖区垸内资源性缺水、水质性缺水日益严重，开展垸内水体生态需水的研究迫在眉睫。本研究以大通湖垸为研究对象，利用大通湖区的气象数据、水文数据、土地利用类型图以及土壤类型图等数据资料，建立 SWAT 模型，通过模拟计算得出不同水期的生态补水量。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 研究区概况

大通湖垸[11]为湖南省洞庭湖区 11 个重点垸之一，位于洞庭湖腹地，行政区域涉及大通湖区、沅江市以及南县。大通湖垸人口较为稠密且分布不均，湖区周边人口密集，低山丘陵地区人口密度相对较小。地形为典型的洞庭湖冲积平原，区内的湖泊、水面、沟渠纵横交错。土壤成土母质系河湖沉积物，地势低洼平坦，地面海拔高程 24~32 m 之间。区境属中亚热带向北亚热带过渡的大陆性季风湿润气候区，年平均气温 16.5℃，无霜期 264 天；年均降水 1240.8 mm。

### 2.2. 基础数据

SWAT 水文模型的构建需要输入空间数据和属性数据，其中空间数据主要包 DEM、土壤类型和土地利用数据等；属性数据主要包括水文数据和气象数据(见表 1) [12]。

### 2.3. SWAT 分布式水文模型

利用大通湖垸所处区域 2003 年~2012 年径流以及水质数据对模型进行率定，采用垸内实测的水文、水质数

**Table 1.** Basic data of ecological runoff model in Datong Lake  
**表 1.** 大通湖垸生态径流模拟基础数据

数据类型	数据名	数据来源
空间数据	地形图(DEM)	国际科学数据服务平台
	土地利用数据	中科院西部生态环境数据中心
	土壤数据	南京土壤所
属性数据	水网数据	湖南省洞庭湖水利工程管理局
	水文数据	湖南省洞庭湖水利工程管理局
	气象数据	中国气象科学数据共享服务网

据进行验证。模型将大通湖流域划分为多个子流域，每个子流域由不同的水文响应单元(HRU)组成，利用空间数据和属性数据信息模拟多种不同的水文物理过程，包括径流、泥沙、化学物质的转移和转化过程。

模型的率定与验证采用专门针对 SWAT 模型开发的提供敏感性分析、率验证和不确定性分析的 SWAT-CUP 计算程序，评价指标包括相对误差(Re)、决定系数(R2)和 Nash-Suttcliffe 系数(Ens) [13]。其中，Re 的绝对值越小，模拟效果越好，反之，模拟效果则较差；R2 值越接近于 1，说明模拟值与实测值越接近，即模拟值对实测值的解释度越高；Ens 的取值范围为 0~1，值越大，则模拟值越接近观测值，模拟效果越好，反之，则越差。

## 2.4. 生态补水量计算

大通湖垸地区水环境污染物包括总磷、总氮、氨氮、氯化物以及化学需氧量，污染负荷比在 10% 以上，其中大部分来源于氨氮和总磷[14]，在此次研究中污染物总量控制主要考虑氨氮和总磷 2 种污染源。

生态补水量除了受垸内氨氮和总磷污染物的影响，还与垸内径流和补给水源中污染物浓度有关，由于不同时段内垸内径流量和补给水源中污染物的浓度差异较大，因此，本研究我们分别计算了枯水期(9~12 月份)、平水期(1~4 月份)和丰水期(5~8 月份)的生态补水量。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. SWAT 模型模拟

利用 SWAT 水文模型自带的敏感性数据分析模块，对大通湖垸内径流模拟的参数进行敏感性分析，遵循先调整地表径流，再调整土壤水、蒸发、地下径流以及降雪融雪参数的原则发现：基流  $\alpha$  系数、径流曲线系数、土壤可利用水量、土壤蒸发补偿系数和浅层地下水径流系数的变化对研究区径流模拟结果的影响较大，因此在率定过程中要对这些参数进行调参。敏感性排序前 5 位的参数如表 2 所示。

SWAT 分布式水文模型和氨氮、总磷负荷模型的塞阳河典型断面的相关系数( $R^2$ )和纳什效率系数(Ens)计算结果见表 3 和图 1。

采用纳什效率系数 Ens 和相关系数  $R^2$  来分别反映模型观测值和模拟值的拟合度和相关程度。径流、氨氮和总磷模拟验证期间的相关系数  $R^2$  都接近了 0.6，说明模拟值与实测值总体趋势一致，模拟效果较好。总磷负荷模拟的相关系数则相对较低，可能是由于大通湖垸区域面积小，垸内缺乏气象站和水文、水质站，率定模型相关监测数据来源于接近的周边地区，验证数据根据典型气象条件在垸内测量得到。尽管如此，总体而言模拟结果基本都在许可的范围之内，这表明 SWAT 模型对于平原地区小流域的径流过程和非点源氮磷负荷模拟也有一定的适用性。

### 3.2. 生态补水量

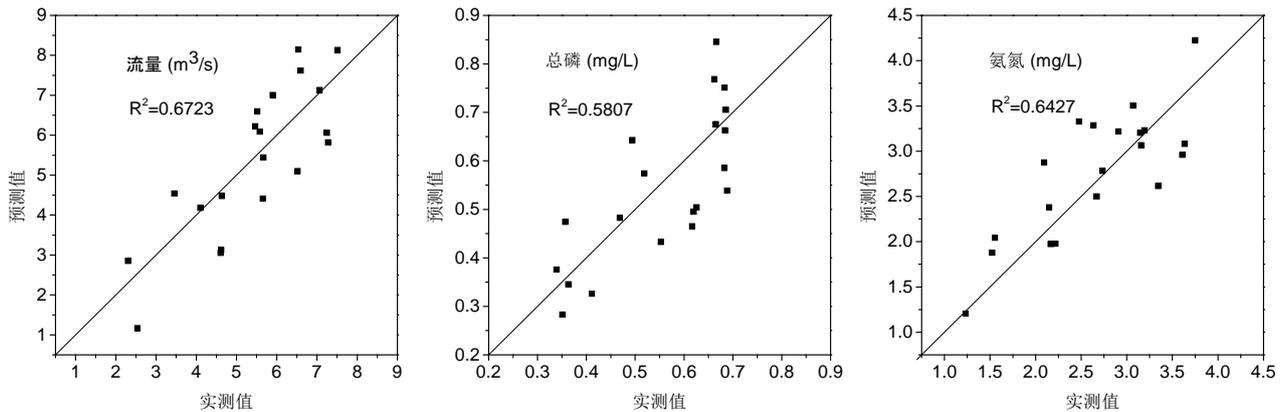
为探讨大通湖垸内维持生态环境降低水体中氨氮和总磷浓度的生态需水量，此研究在 SWAT 模型计算的基

**Table 2.** Definition and Range of parameters  
**表 2.** 参数率定及取值变化范围

序号	参数名称	参数含义	参数变化范围
1	Alpha_Bf	基流 $\alpha$ 系数	0~1.00
2	Cn2	SCS 径流曲线系数	-20%~20%
3	SoL_Awc	土壤可利用水量	-20%~20%
4	Esco	土壤蒸发补偿系数	0~1.00
5	Gwqmn	浅层地下水径流系数	-10%~10%

**Table 3.** Results of calibration and verification for regional flow and non-point source nitrogen and phosphorus model  
**表 3.** 研究区域流量与非点源氮磷模拟校准验证结果表

		Re	R <sup>2</sup>	Ens
径流	验证期	-5.52 %	0.67	0.79
氨氮	验证期	-5.96 %	0.64	0.62
总磷	验证期	-7.21 %	0.58	0.62



**Figure 1.** Measured and predicted results in the cross section at Saiyang River

**图 1.** 塞阳河断面实测与计算结果

基础上, 计算了大通湖垸内维持水体正常功能所需的最小生态需水量, 污染物控制需水量可直接从南洞庭湖引水。根据物质守恒原理, 要保持输出的污染物总量与输入的污染物总量相同, 则有:

$$(W + W_0)P = M + WP_e \tag{1}$$

式中:  $W$  为生态补水量,  $W_0$  为大通湖地区的径流量,  $P$  为达到地表水环境质量标准中三类标准的污染物浓度,  $M$  为大通湖地区目标污染物的总量(包括点源和非点源),  $P_e$  为从南洞庭湖补进来的水中污染物的背景浓度。

各不同水文时期的径流量  $W_0$  和氨氮、总磷的总量  $M$  通过 SWAT 模型计算获得。通过式(1)可以计算大通湖垸氨氮和总磷达到 III 类水标准的生态补水量: 枯水期生态补水量为 0.68 亿 m<sup>3</sup>, 平水期生态补水量为 1.02 亿 m<sup>3</sup>, 丰水期生态补水量为 1.71 亿 m<sup>3</sup>。

从结果中可以看出, 尽管丰水期大通湖垸内径流较大, 但生态补水量比枯水期和平水期大, 这主要是因为

丰水期(5~8 月份)汇水区的氨氮和总磷产生量较大,这和当地的农业种植结构有关,化肥的大量使用导致水体中氨氮和总磷的量增加。枯水期虽然氨氮和总磷的总量较小,但是由于 9~12 月份垸内的径流量较小,导致水体污染物浓度达不到标准,同样需要外源补水。通过计算枯水期、平水期和丰水期不同时段内大通湖垸的生态需水量,可以为补水及垸内水环境治理提供参考。

#### 4. 结论

1) SWAT 模型在大通湖垸的径流过程以及非点源氮磷污染负荷模拟相关系数  $R^2$  分别接近 0.80 和 0.70,这表明 SWAT 模型也可以应用于平原地区小流域的水文水质模拟。

2) 计算得出枯水期生态补水量为 0.68 亿  $m^3$ ,平水期生态补水量为 1.02 亿  $m^3$ ,丰水期生态补水量为 1.71 亿  $m^3$ 。研究可以为垸内水环境改善提供支持。

#### 基金项目

湖南省水利科技项目,国家自然科学基金(51579094, 51679082, 51521006, 51479072)。

#### 参考文献 (References)

- [1] NEITSCH, S. L., ARONLD, J. G. and WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool user's Manua 199.2. Texas: USDA, Agriculture Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory, 1999.
- [2] NEITSCH, S. L., AMOLD, J. G., KINIRY, J. R., et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. 2005.
- [3] LUO, Y., ZHANG, M. Management oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT. Environmental Pollution, 2009: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.024>
- [4] SRINIVASAN, R., ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. Water Resources Bulletin, 1994, 30(3): 453-460. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03304.x>
- [5] ANDREA, W., FOHRER, N. and MOLER, D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors—Effects on landscape structures and functions. Ecological Modeling, 2001, 140(1-2): 125-140.
- [6] TRIPATHI, M. P., PANDA, R. K. and RAGHUWANSHI, N. S. Calibration and validation of SWAT model for predicting runoff and sediment yield of a small watershed in India. Agricultural Engineering Journal, 2003, 12(1&2): 95-118.
- [7] 彭彬, 杨昆, 李建, 张韶华, 宋毅. 基于 SWAT 和 GIS 的洱海流域土地利用变化对径流影响的研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 7-11, 17.  
PENG Bin, YANG Kun, LI Jian, ZHANG Shaohua and SONG Yi. Response of runoff to land use change in Erhai basin based on SWAT and GIS. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 7-11, 17. (in Chinese)
- [8] 张小咏, 李佳, 杨艳昭, 游珍. 基于 SWAT 模型的长江源区径流模拟[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 38-44.  
ZHANG Xiaoyong, LI Jia, YANG Yanzhao and YOU Zhen. Runoff simulation of the catchment of the headwaters of the Yangtze River based on SWAT model. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 38-44. (in Chinese)
- [9] 赵新娜. 基于 SWAT 模型的湘江流域非点源污染特征研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
ZHAO Xinna. The research on characteristics of non-point source pollution in Xiangjiang river basin based on SWAT model. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [10] 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 236-242.  
LI Shuang, LI Zulu and SUN Yuanyuan. Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model. Journal of Lake Science, 2013, 25(2): 236-242. (in Chinese)
- [11] 益阳市大通湖区管理委员会. 大通湖区 2012 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2012.  
Administration Committee of Datong Lake District, Yiyang. National economy and society developed statistical bulletin 1994 in Datong Lake District. 2012. (in Chinese)
- [12] 肖军仓, 周文斌, 罗定贵, 等. 非点源污染模型 SWAT 用户应用指南[M]. 北京: 地质出版社, 2010.  
XIAO Juncang, ZHOU Wenbin, LUO Dinggui, et al. User guide of non-point source pollution modelling with SWAT. Beijing: Geologied Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [13] 韩庆, 邹武, 杨品红, 陈红文, 刘良国. 大通湖主要营养盐类的变化规律[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 88-90.  
HAN Qin, ZOU Wu, YANG Pinhong, CHEN Hongwen and LIU Lianguo. The change laws of main nutritional salts in Datong Lake. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(36): 88-90. (in Chinese)

- [14] 陈强, 苟思, 秦大庸, 等. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 113-119.  
CHEN Qiang, GOU Si, QIN Dayong, et al. A high efficiency auto-calibration method for SWAT model. Shuli Xuebao, 2010, 41(1): 113-119. (in Chinese)