

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.004

基于 SWAT 模型的盘龙江流域径流模拟

杨丽萍, 邹 进, 潘 锋

(昆明理工大学电力学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为了给日后的滇池治理和昆明市水资源保护利用提供依据, 以昆明市区的盘龙江流域为研究区域, 采用 SWAT 模型对该流域的径流进行模拟研究, 通过加载流域的 DEM、土地利用、土壤类型等数据到 SWAT 模型, 选定 1999—2004 年为模型参数率定期, 2005—2007 年为模型验证期, 对松华坝以上流域和以下流域分别进行模拟, 并对模拟结果进行比较和评价。结果表明: 松华坝以上区间流域的模拟相关系数 R^2 在 0.83 以上, E_{ns} 在 0.80 以上; 松华坝以下区域的模拟相关系数 R^2 在 0.70 以上, E_{ns} 在 0.58 以上。即该模型对盘龙江流域具有良好的适应性, 可以为盘龙江流域在不同土地利用的条件下对流域的水量、水质、泥沙进行模拟预测。

关键词: 径流模拟; SWAT 模型; 盘龙江流域

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2015)05-0019-05

Runoff simulation of Panlong River Basin based on SWAT model

YANG Liping, ZOU Jin, PAN Feng

(College of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to provide basis for the management of Dianchi Lake and for the conservation and utilization of water resource of Kunming in the coming days, taking Panlong River basin in the downtown of Kunming, Yunnan Province as the study area, adopting the SWAT model to simulate the runoff of this basin and uploading the data including DEM of the basin, earth utilization and the type of the earth to it, choosing the years from 1999 to 2004 as the model's parameter calibration period and the years from 2005 to 2007 as the model's validation period, the upstream and the downstream are simulated respectively and the results of the simulation are compared and evaluated. The results show that the R^2 and E_{ns} of upstream drainage basin are above 0.83 and 0.80 respectively, and the R^2 and E_{ns} of lower drainage basin are above 0.70 and 0.58 respectively, which means the model is of good adaptability to Panlong River basin and is able to simulate and predict the water volume, water quality, silt of the drainage basin under different land utilization circumstances.

Key words: runoff simulation; SWAT model; Panlong River Basin

滇池是国家正在努力改善的四大内地淡水湖泊之一, 而盘龙江流域则是滇池一个不可忽视的入水口。随着滇池流域经济迅速发展、水资源开发利用加大、水污染加剧以及近几年的连续干旱, 水资源的利用难度持续增加。盘龙江流域为滇池的一个主要入水口, 了解盘龙江流域的径流过程, 对滇池的治理和发展具有重要的作用。

但是过去几年来对于盘龙江流域的水文变化过

程研究, 仅局限于位于上游的松华坝流域(比如, 对松华坝水源保护区土地利用/土地覆被变化的研究^[1-2]; 松华坝水源区不同林分土壤特性及其水源涵养功能^[3], SWAT 模型对松华坝流域水文过程和泥沙情况的模拟^[4]等), 对于靠近滇池及城区流域的水文过程情况几乎没有研究。笔者对 SHE^[5]、VIC^[6]、TOPMODEL^[7]、SWAT^[8]等 4 个主要分布式水文模型进行对比, 选定在北美、西欧等国家以及我

基金项目: 国家自然科学基金(41061053)

作者简介: 杨丽萍(1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源系统分析和管理工作。E-mail: ylpcherry@126.com

国一些流域均取得很好应用效果的 SWAT 模型^[9]。SWAT(soil and water assessment tool)模型是流域分布式水文模型的一种,由美国农业部研究中心研发^[10]。它可以在无观测数据或者观测数据缺失的条件下,对大尺度复杂流域下的地表水、地下水水质及水量进行模拟,预测不同土地利用方式和管理条件对流域水文、泥沙、水质对农业、社会发展的不同影响。借助 GIS 和 RS 的强大功能,SWAT 模型可以应用在流域内部土地利用/覆被和土壤类型条件不同的复杂流域,模拟流域内复杂的水文物理过程;反映不同气候条件(降水量、蒸发量、气温等)和人类活动强度下地表水文响应过程的影响^[11]。

基于 SWAT 模型的各种模拟优势,笔者利用 ArcGIS 界面的 SWAT 分布式水文模型建立盘龙江流域的径流数据库,模拟出盘龙江流域的径流过程,在探讨 SWAT 模型对盘龙江流域的适应性的同时,亦为日后的盘龙江流域的水质模拟奠定基础,为盘龙江流域的水资源利用提供理论支撑。

1 研究区概况

盘龙江被誉为“昆明的母亲河”,全长 105 km,流域汇水面积 735 km²,是昆明市入滇河道中最大、最长的主要河道。地理区位于北纬 25°3′~25°27′,东经 102°40′~102°57′之间。它东流穿蟠龙桥、三家村至松华坝水库,出库后经上坝、落索坡、浪口、北仓等村,穿霖雨桥,经张家营等村进入昆明市区,过敷润、宝尚、得胜、双龙桥至螺狮湾村出市区,经官渡区流入氐岷。

松华坝水库位于盘龙江流域的中上游,是一座将发电、灌溉、城市供水和市政景观供水功能结合为一体的大(2)型水利枢纽工程。另外,松华坝水库以上流域基本属于自然状态,植被覆盖率较高,人为活动影响比较少;而以下流域至滇池入口处,流域都处在昆明市区中,植被覆盖率相对较低,人为活动影响明显。

基于研究区域内的水文站点分布,研究选取最靠近滇池的水文站点——敷润桥水文站(昆明水文站)以上的流域作为研究流域(图 1)。又基于自然状态与城市状态的不同,将流域分成自然状态下松华坝以上流域和城市状态下松华坝以下流域两部分分别进行模拟研究。

2 模型数据库的建立

2.1 空间数据

使用 Albers 等积圆锥投影进行空间数据处理,盘龙江流域空间数据如表 1 所示。

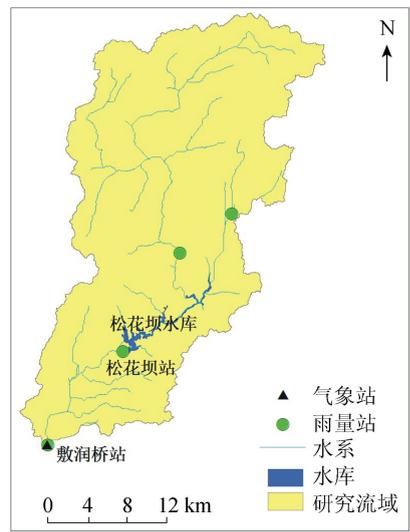


图 1 盘龙江流域区域类型

表 1 盘龙江流域空间数据

数据	分辨率	格式	来源
DEM	25 m×25 m	Grid/.img	中国科学院国际科学数据平台
土地利用图	25 m×25 m	Grid/.img	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤类型图	944.6 m×944.6 m	Grid/.img	中国科学院南京土壤研究所

a. 数字高程模型(DEM)。通过所获取的数字高程数据,在 GIS 里加载精度为 25m 盘龙江流域的地理基础数据,对该数据进行投影变换、掩膜裁剪后处理得 DEM 数据图(图 2)。

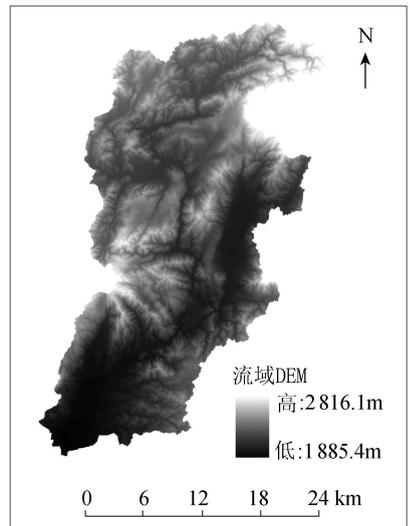


图 2 盘龙江流域 DEM 数据

b. 土地利用图(landuse)。在 2008 年流域土地利用类型图的基础上,建立 SWAT 模型所需的美国标准属性数据库。在模型模拟之前,根据土地利用类型原有分类情况,结合模型要求对土地利用类型重新分类,最终划分为 6 类,建立 landuse 查询表文件(表 2)和模型所用土地利用类型图(图 3)。

表 2 盘龙江流域土地利用类型查询表及各类型面积

模型编码	名称	SWAT 代码	面积/km ²	占总面积百分比/%
1	林地	FRST	501.95	69.25
2	草地	PAST	11.28	1.56
3	水域	WATR	4.57	0.63
4	建设用地	URHD	77.58	10.70
5	未利用地	SWRN	6.71	0.93
6	耕地	AGRL	122.75	16.93

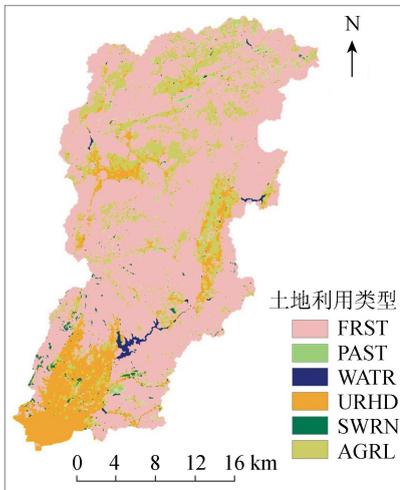


图 3 盘龙江流域土地利用

2.2 属性数据库

2.2.1 土壤属性数据库的建立

因主要针对盘龙江流域的径流进行模拟,故只需考虑土壤的物理属性数据。利用 Matlab 对土壤进行质地转换至 SWAT 模型所需的美国制后,根据土壤的渗透性将土壤划分为 A、B、C、D4 类,并利用 SPAW(soil plant air)软件估算出土壤可利用有效水量、饱和水力传导系数等参数。最后将相关的每层土壤参数输入 user-soil 中,建立土壤数据库。采用土壤类型图的 Shape 格式加载,并对其进行重新分类,总共划分为 5 类土壤(图 4),依次为水稻土(ATc)、红壤(CMx1)、亚热带山地红壤(CMx2)、棕壤(LVh)和城市不透水层(UR)。

2.2.2 气象数据库的建立

SWAT 模型的气象数据均以 DBF 文件格式存储。为了使模型模拟更贴近实际,需要输入至少连续 20 a 的逐日气象资料。而且根据相关研究可知,使用 SWAT 模型自动生成的数据比使用不连续的观测数据得到的模拟结果更好^[12]。SWAT 模型所需气象数据包括气象站平均气压、平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、平均日风速、日照时数、月平均最高气温、最高气温标准差、月平均最低气温、最低气温标准差等约 160 个参数。

本文主要采用昆明站为研究流域的气象站,缺失的气象数据采用模型自带的“天气发生器”推算

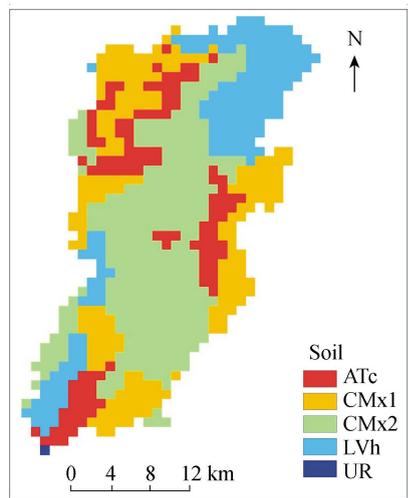


图 4 盘龙江流域土壤

欠缺的气象参数。对于天气发生器中的一些参数采用 pcpSTAT、dew02 等来计算得出。

2.3 流域划分

SWAT 模型在进行过程模拟时,根据 DEM 图结合流域阈值将流域划分成一定数目的子流域。再将每一个子流域划分为多个不同土地利用和土壤类型的组合(Multiple HRUs),即生成多个水文响应单元 HRUs(hydrologic response unit)。在本研究中,依据模型的实际运行情况以后,最后确定土地利用和土壤面积的最小阈值均为 0%,坡度的最小阈值为 10% 较为适宜,确保整个子流域的面积可以得到 100% 的模拟。最后研究确定盘龙江流域共获得 30 个子流域,790 个 HRUs。

2.4 模拟时段的选取

由于水文资料收集受限,故本研究在现有资料基础上依据作为流域的 2 个控制出水口——松华坝、敷润桥 1999—2007 年每年的实际月径流数据,确定模拟的时段为 1999—2007 年。

3 参数率定和模型校准

3.1 敏感参数的确定

采用敏感性指数来估算模型参数的敏感性^[13],选取松华坝水库以上区域的松华坝站和以下区域的敷润桥站 1999—2007 年的资料,采用 LAT-OH 法对相关的 SWAT 模型参数进行敏感性分析,确定出对该流域径流模拟影响最大的参数。该敏感性参数主要包括径流曲线系数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、浅层地下水再蒸发系数(REVAPMN)、浅层地下水回归流阈值(GWQMN)、土壤可利用水量(SOL_AWC)、基流退水系数(ALPHA_BF)等。确定完敏感性参数,紧接着对敏感性参数进行率定。参数的率定即是寻找能使模拟值与观测值最一致的参数^[14]。参数率定遵循先上游后下游,先调整水量平

衡再调整过程,先调整地表径流再调整土壤水、蒸发和地下径流的原则^[15]。

基于松华坝站及敷润桥站 1999—2007 年资料对这几个参数进行调参和率定,最终获得适合盘龙江流域的参数值。

3.2 模型结果评价指标

对于 SWAT 模型的模拟结果评价采用对径流峰值流量敏感且常见的指标:Nash—Sutcliffe 效率系数 E_{ns} ^[16]、相关系数 R^2 ^[9]。

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_{m_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_a)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_a)(Q_{m_i} - Q_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_a)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{m_i} - Q_a)^2}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: Q_{s_i} 为第 i 个实测径流量, $i=1,2,\dots,n$; Q_{m_i} 为第 i 个模拟径流量, Q_a 为平均实测径流量; n 为实测径流量数据个数。

a. 当 E_{ns} 小于 0 时,说明模型模拟值比实测值可程度低;当 E_{ns} 在 0~1 之间时, E_{ns} 值越大,表明模拟值与实测值的匹配程度越好(E_{ns} 大于 0.5,表示模拟值在可接受范围之内,而 E_{ns} 在 0.5~0.7 之间,模拟标准为丙级;在 0.7~0.9 之间,模拟标准为乙级;在 0.9~1 之间模拟标准为甲级)^[11];若 $Q_{s_i} = Q_{m_i}$,则 $E_{ns} = 1$ 。

b. 相关系数 R^2 可在 EXCEL 中应用线性回归求得,进一步用该系数评价实测值与模拟值之间的吻合程度。若 $R^2 = 1$,表明非常吻合; $R^2 < 1$,该值越低,表明模型的模拟值和实测值吻合度越低。

3.3 月径流模拟

3.3.1 自然流域

松华坝以上流域为自然条件状态下的流域。选定松华坝站为流域校准点,1999—2004 年为模型的率定期,2005—2007 年为模型验证期。由图 5 可见,该流域的模拟值和实测值的趋势拟合程度较好,模拟的径流曲线基本可以反映出真实的水文过程,对于几个降雨高峰值都可以捕捉到,并且在流量图上显现出来。率定期 72 个样本,模拟相关系数 $R^2 = 0.85$, $E_{ns} = 0.81$,属于乙等;验证期 36 个样本,模拟相关系数 $R^2 = 0.83$, $E_{ns} = 0.80$,属于乙等。

该模拟结果中,1999—2007 年平均降雨量为 978.44 mm,与实测的年平均降雨量 912.5 mm 相比偏大;径流深为 147.28 mm,地下渗流为 110.45 mm,蒸散发为 549.90 mm,后三者合计 807.63 mm,与 978.44 mm 相差 170.81 mm。由于水库对该流域有调蓄作用,可认为水量基本符合平衡状态。但是有

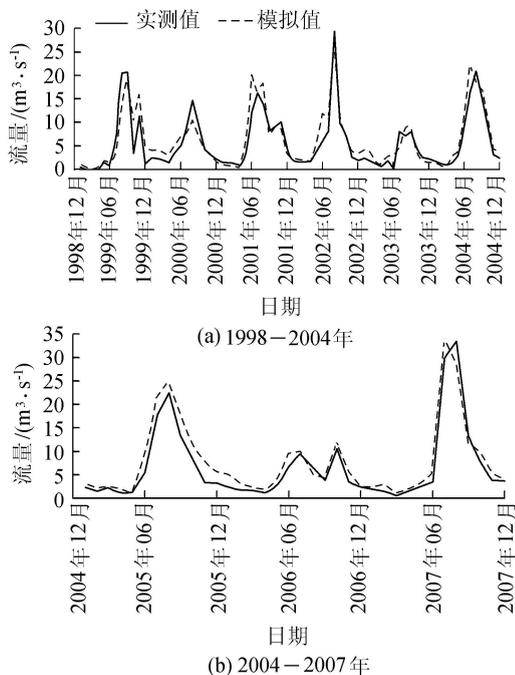


图 5 松华坝站的径流率定与校准

模拟的地表径流值有略高于实际值的现象发生。这主要是由于该部分的自然流域绝大部分位于山林地区,坡度变化比较大,而植被被乱砍滥伐现象又比较严重,故植被覆盖面出现稀缺导致土地的蓄水保水能力降低,使地表水下渗量下降。另外,流域内降水空间分布不均,在雨季虽然降水强度大,但一般持续时间都不会很长,松华坝水库调洪蓄水,在一定程度上使模拟值在雨季径流量高峰期高于实测值,符合实际情况。

3.3.2 城市流域

松华坝以下流域为人为活动影响比较明显的流域。选定敷润桥站为流域校准点,1999—2004 年为模型的率定期,2005—2007 年为模型验证期。由图 6 可见,该流域的模拟值和实测值的趋势基本拟合,模拟出来的径流曲线基本可以反映出真实的水文过程线,几个降雨高峰值都可以捕捉到,并且在流量图上显现出来。率定期 72 个样本,模拟相关系数 $R^2 = 0.75$, $E_{ns} = 0.65$,属于丙等;验证期 36 个样本,模拟相关系数 $R^2 = 0.68$, $E_{ns} = 0.58$,属于丙等。

该模拟结果中,1999—2007 年平均降雨量为 1005.3 mm,与实测的年平均降雨量 930.8 mm 相比偏大;径流深为 151.67 mm,地下渗流为 90.69 mm,蒸散发为 589.7 mm,后三者合计 832.06 mm,与 1005.3 mm 相差 173.24 mm,可认为该部分流域的水量基本保持收支平衡。对于出现模拟值与实测值出现明显偏差的情况,很大程度上都是城市化发展造成的。该区域处于昆明市区,地势比较平坦,坡度变化不大,不透水地面面积增多,植被覆盖面积远小于城市建筑面积,使部分壤中流变成了地表径流。再

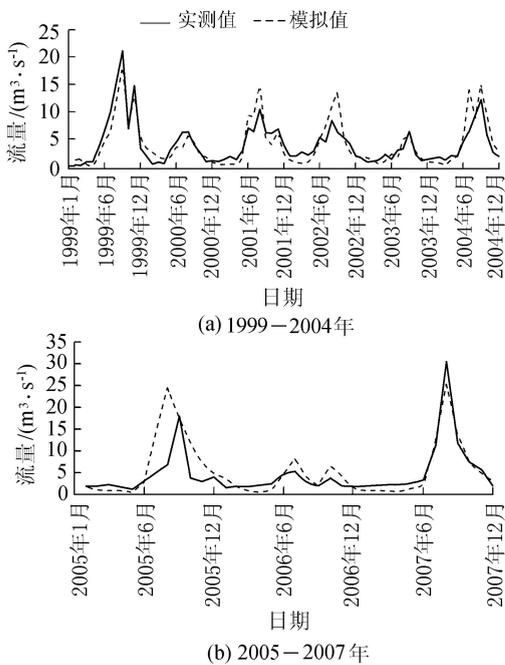


图6 敷润桥站的径流率定与校准

者降水空间分布不均,市区行洪通道、排水管网与自然状况相比,坡面汇流时间缩短,减少河道的调蓄水能力,特别是盘龙江内取水点和排水点都比较繁杂,取水量和排水量的具体情况不明朗,则相比率定期的模拟效果,处于城市快速发展期间校准期模拟的吻合程度有所降低。

4 结论

基于 ArcGIS 界面对 ArcSWAT 模块的支持,对盘龙江流域的径流过程进行模拟分析。结果表明,虽然没有对模型相应的城市模块进行改进,但是该模型对于率定期和校准期所模拟出来的径流曲线基本可以反映出真实的水文过程线,几个降雨高峰期都可以捕捉到,并且在流量图上显现出来。从相关评价指标看出,松华坝以上区间流域的模拟相关系数 R^2 在 0.83 以上, E_{ns} 在 0.80 以上,模拟结果可以评为乙级;松华坝以下区域的模拟相关系数 R^2 在 0.68 以上, E_{ns} 在 0.58 以上,模拟结果可以评价为丙级,表明该模型对盘龙江流域具有良好的适应性。松华坝以下流域主要就是昆明市区,受人类活动影响比较大,为了提高模型对该流域的模拟精度,需要对该模型相关的城市模块进行改进,使模型更加适应流域的模拟,以便对日后盘龙江流域的水资源合理利用和水质控制提供支持。

参考文献:

[1] 董铭,史正涛,李滨勇,等. 松华坝水源保护区土地利用/土地覆被变化研究[J]. 云南师范大学学报:自然科学版,2011(2):72-78. (DONG Ming, SHI Zhengtao, LI

Binyong, et al. A study on land use and land cover change (LUCC) in Songhuaba water source conservation region [J]. Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition, 2011(2):72-78. (in Chinese))

[2] 李慧,杨具瑞,刘一龙. 松华坝土地利用/覆被变化的遥感监测分析[J]. 价值工程,2012(31):73-74. (LI Hui, YANG Jurui, LIU Yilong. Remote sensing monitoring of Songhuaba land-use and land cover change [J]. Value Engineering, 2012(31):73-74. (in Chinese))

[3] 苗武,史正涛,常龙芳. 松华坝水源区不同林分土壤特性及其水源涵养功能[J]. 林业调查规划,2013,38(1):70-75. (MIAO Wu, SHI Zhengtao, CHANG Longfang. Soil characteristics of different forest stand and water conservation function in Songhuaba water source [J]. Forest Inventory and Planning, 2013, 38(1):70-75. (in Chinese))

[4] 王杰,黄英,段琪彩,等. 基于 SWAT 模型的松华坝水源区径流模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2012(9):153-157. (WANG Jie, HUANG Ying, DUAN Qicai, et al. A simulation of runoff in Songhuaba water source area by using SWAT model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(9):153-157. (in Chinese))

[5] ABBORT M B, BATHURST J C. An introduction to the European hydrological system "SHE", 1: history and philosophy of a physically-based distributed modeling system [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87:45-59.

[6] LIANG Xu, XIE Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. Advances in Water Resources, 2001, 24:1173-1193.

[7] BEVEN K J, KIRBY M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrology Science Bulletin, 1979, 24(1):43-69.

[8] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, RAMANARAYAN T S, et al. Water resources of the Texas Gulf Basin [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(3):121-133.

[9] 丁晋利,郑粉莉. SWAT 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4):128-130. (DING Jinli, ZHENG Fenli. SWAT model and its application [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4):128-130. (in Chinese))

[10] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9):1009-1017. (XU Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9):1009-1017 (in Chinese))

[11] 李晓璐. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟:以沂沭泗流域为例[D]. 济南:山东科技大学,2012.

[12] SSHUOL J, ABBASPOUR K C. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa [J]. Ecological Modelling, 2007, 201:301-311.

- Zhengkun, WANG Rui. Summary of treatment of dyestuff wastewater [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(3): 73-78. (in Chinese)
- [2] 彭一荣, 邹彩琼, 贾漫珂, 等. 黏土负载铁异相光催化降解有机染料罗丹明 B [J]. *三峡大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(6): 101-102. (PENG Yizhu, ZOU Caiqiong, JIA Manke, et al. Immobilized Fe^{3+} @ clay: An efficient heterogeneous photo-Fenton catalyst for degradation of Rhodamine B [J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2013, 35(6): 101-102. (in Chinese))
- [3] 张世龙, 胡小明, 梁诗景, 等. 纳米纤维铁氧化物柱撑蒙脱土可见光助芬顿降解罗丹明 B [J]. *催化学报*, 2012, 33(10): 1736-1737. (ZHANG Shilong, HU Xiaoming, LIANG Shijing, et al. Photo-Fenton degradation of RhB over nano-fibre oxides interacted montmorillonite under visible light irradiation [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2012, 33(10): 1736-1737. (in Chinese))
- [4] 陈燕勤, 陈德军, 景伟文. 非均相 UV/Fe-Y/Fenton 法氧化处理邻苯二甲酸二乙酯废水 [J]. *水处理技术*, 2011, 37(6): 64. (CHEN Yanqin, CHEN Dejun, JING Weiwen. Heterogeneous UV/Fe-Y/Fenton catalyst catalytic degradation of DEP [J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(6): 64. (in Chinese))
- [5] 朱奕仁, 李爱梅, 鲁玲, 等. 纳米 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 光催化法处理造纸废水的研究 [J]. *太阳能学报*, 2007, 28(10): 1125-1127. (ZHU Yiren, LI Aimei, LU Ling, et al. Study on photocatalysis treatment of wastewater from paper mill with nanosized $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2007, 28(10): 1125-1127. (in Chinese))
- [6] 姜泳波, 赵慧宏, 马婷婷, 等. 高级催化氧化法降解甲基橙模拟废水研究 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(2): 57-58. (JIANG Yongbo, ZHAO Huihong, MA Tingting, et al. Methyl orange degradation by advanced catalytic oxidation method [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(2): 57-58. (in Chinese))
- [7] 郑展望, 雷乐成, 张珍, 等. 非均相 UV/Fe-Cu-Mn-Y/ H_2O_2 反应催化降解 4BS 染料废水 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(6): 1032-1038. (ZHENG Zhangwang, LEI Lecheng, ZHANG Zheng, et al. Heterogeneous UV/Fe-Cu-Mn-Y/ H_2O_2 catalyst catalytic degradation of 4BS [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 24(6): 1032-1038. (in Chinese))
- [8] 高云燕, 李海霞, 欧植泽, 等. 多壁碳纳米管负载 Fe_3O_4 磁性纳米粒子表面吸附增强过氧化酶的催化活性 [J]. *物理化学学报*, 2011, 27(10): 2470-2472. (GAO Yunyan, LI Haixia, OU Zhize, et al. Enhancing the catalytic activity of peroxidase by adsorption onto Fe_3O_4 magnetic nanoparticle/multiwalled carbon nanotube composite surfaces [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2011, 27(10): 2470-2472. (in Chinese))
- [9] ZHU Huayue, JIANG Ru, YAO Jun, et al. Novel magnetic chitosan/poly (vinyl alcohol) hydrogel beads: preparation, characterization and application for adsorption of dye from aqueous solution [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 105: 24-30.
- [10] 于万禄, 熊振湖, 马华继, 等. Photo-Fenton 法降解水中新型污染物双氯芬酸及降解产物的毒性评价 [J]. *环境工程科学学报*, 2009, 29(10): 2071-2074. (YU Wanlu, XIONG Zhenhu, MA Huaji, et al. Degradation of the emergent pollutant diclofenac in water by Photo-Fenton and toxicity evaluation of its degradation products [J]. *Journal of Environmental Engineering Science*, 2009, 29(10): 2071-2074. (in Chinese))
- [11] 邓德明, 陈晓璐, 甘复兴, 等. 纳米累托石- TiO_2 粉末光催化降解染料废水 [J]. *武汉大学学报: 理学版*, 2007, 53(6): 691-694. (DENG Deming, CHEN Xiaolu, GAN Fuxing, et al. Photocatalytic degradation of dye waste water by nanometer rectorite- TiO_2 powder [J]. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2007, 53(6): 691-694. (in Chinese))
- [12] 侯少芹, 王海增, 孙金香, 等. “氧化镁-活性炭”新型吸附剂的制备及其 Cr(VI) 的吸附研究 [J]. *环境工程学报*, 2009, 3(12): 2133-2137. (HOU Shaoqin, WANG Haizeng, SUN Jinxiang, et al. Preparation of "MgO/AC" and its adsorption properties of Cr(VI) [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(12): 2133-2137. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-12-20 编辑: 彭桃英)

(上接第 23 页)

- [13] LENHART T, ECKHARDT K, FOHRER N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 645-654.
- [14] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟: 以密云水库水源地保护为例 [D]. 北京: 北京师范大学, 2007.
- [15] 朱新军, 王中根, 李建新, 等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究 [J]. *地理科学进展*, 2006, 25(5): 105-111. (ZHU Xinjun, WANG Zhonggen, LI Jianxin, et al. Applications of SWAT model in Zhangwei River Basin [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(5): 105-111. (in Chinese))
- [16] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models, Part I: a discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970(10): 282-290. (收稿日期: 2015-01-05 编辑: 徐娟)