

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0013

王佳,张新华,雷晓辉,等. 分布式水文模型对水质监测数据的补充及污染源分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 92-97. WANG J, ZHANG X H, LEI X H, et al. Study on supplement of water quality monitoring data and analysis of pollution source by distributed hydrological model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 92-97. (in Chinese)

分布式水文模型对水质监测数据的补充及污染源分析

王佳¹, 张新华¹, 雷晓辉², 王浩², 王立新³, 王旭²

- (1. 四川大学 水力学及山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;
2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
3. 西山煤电集团有限责任公司, 太原 030205)

摘要:水质现状监测对水环境影响评价、水环境治理具有重要作用。目前,水质现状监测数据存在监测频率低、监测难度大、影响因素复杂及信息化程度低等问题。为此,采用了分布式水文模型对水质监测数据进行补足,并追根溯源分析污染物来源。以都市市剑江河流域为例,基于水文气象、下垫面数据及仅有的2010—2014年的4个断面不同步的水质数据,建立SWAT分布式水文模型模拟总磷污染物。结果表明:使用分布式水文模型不仅可以补足剑江河流域四个监测断面同期的总磷数据,还可以追根溯源得出该流域总磷污染主要来源于面源污染,同时可以分析出面源污染的空间分布情况以及不同污染类别的占比,该流域中肥料流失为主要污染源,尤其是丰水年的污染占比高达近66%。

关键词:水质监测数据;分布式水文模型;剑江河流域;插补延长;面源污染

中图分类号:X52 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on supplement of water quality monitoring data and analysis of pollution source by distributed hydrological model

WANG Jia¹, ZHANG Xinhua¹, LEI Xiaohui², WANG Hao², WANG Lixin³, WANG Xu²

- (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. Xishan Coal Electricity Group Co., Ltd, Taiyuan 030205, China)

Abstract: Water quality monitoring plays a significant role in water environment impact assessment and water environment management. The current water quality monitoring data have the following problems: low monitoring frequency, difficulties in monitoring, complexity of influencing factors, and low level of informatization. To make up for the above disadvantages, we used the distributed hydrological model to supplement the water quality monitoring data and trace the source of pollutants. A case study was conducted in the Jianjiang River basin. We established a SWAT model to simulate the total phosphorus pollutants based on the hydrometeorology, the underlying surface data, and the water quality data of four sections from 2010 to 2014. Results indicated that: the distributed hydrological model can not only complement the total phosphorus data of the four monitoring sections in the same period, but also trace the source of total phosphorus pollution in this basin to non-point source pollution, and reveal the spatial distribution of the non-point source pollution and the proportions of different pollution categories. Fertilizer loss is

收稿日期: 2018-06-07 修回日期: 2018-10-29 网络出版时间: 2018-12-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181210.1447.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404405); 国家自然科学基金(51379137; 51579162)

作者简介: 王佳(1990—), 女, 山西太原人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wozhixiwang@126.com

通信作者: 王旭(1986—), 男, 辽宁营口人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文预报与水库优化调度研究。E-mail: wangxu_04@126.com

the main pollution source in this basin, particularly in wet years, in which it accounted for up to 66% of pollution.

Key words: water quality monitoring data; distributed hydrological model; Jianjiang River basin; interpolating and extension method; non-point source pollution

水质监测数据不仅用于评估水环境现状,也可以检验水质改善效果,为水环境治理与保护提供数据支撑^[1]。然而我国国土面积大,地形地貌较为复杂,水质监测站点分布不均,尤其在河流上游源头地区及山丘区小流域等发展中地区分布较为稀疏,导致这些地区水质监测数据较为局限,缺乏长序列、连续的水质数据;同时这些地区正处于城市化快速发展时期,需要掌握水质污染的来源与分布,才能使经济与环境齐头并进。

在水文研究中,降雨、径流数据的插补延长较为成熟,常采用统计学模型和物理模型^[2]进行补足。但针对水质数据插补延长的研究相对较为局限,主要基于污染物扩散输移原理的水动力水质模型对水质进行模拟,例如刘柏君等^[3]采用 MIKE11 模型对台州市区水质数据做了插补延长,分析水质变化的趋势;冷辉^[4]使用一维水动力水质模型以江宁区牛首山河流域为例对无资料地区水质模拟进行了研究。虽然水动力模型可以对水质数据进行补足,然而无法追踪污染物的空间分布及来源,不便于水环境污染调控管理。目前,分布式水文模型 SWAT 模型^[5]可以用于不同土地利用、不同土壤类型及管理条件地区,利用仅有的气象及水质监测数据率定模型,从而动态模拟流域内各断面的产水、产沙、污染物等物质的迁移过程,并对点源和面源污染进行模拟分析^[6]。针对污染物分布来源分析,葛怀凤等^[7]使用 SWAT 模型对河海干流污染关键源区和污染类别进行了分析;张楠等^[8]与李丹等^[9]也分别用 SWAT 模型对天津市和太湖流域的非点源污染分布特性进行了分析。故本文拟采用 SWAT 模型在缺资料地区辅助水质监测工作,对水质监测数据进行补足,并追根溯源分析污染物的分布及来源。

1 分布式水文模型基本原理

1.1 水循环原理

SWAT 模型模拟流域内所有的过程始终都是以水量平衡作为驱动力,保证了水文循环与流域实际情况的一致性。SWAT 模型的水循环模拟基于如下水量平衡公式为^[10]

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

式中: SW_t 为土壤最终含水量(mm); SW_0 为第 i 天的土壤初始含水量(mm); t 为时间(d); R_{day} 为第 i 天的降水量(mm); Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量(mm); E_a 为第 i 天的蒸散发量(mm); W_{seep} 为第 i 天从土壤剖面进入包气带(即离开土壤剖面底部渗透水流和旁通水流)的水量(mm); Q_{gw} 为第 i 天回归流的水量(mm)。

1.2 水土流失及污染物循环原理

SWAT 模型中各个 HRU 中由降水和径流产生的土壤侵蚀量和产沙量由 MUSLE 方程(Modified Universal Soil Loss Equation)计算^[11-12],其方程为

$$m_{\text{sed}} = 11.8 \times (Q_{\text{surf}} \times q_{\text{peak}} \times A_{\text{hru}})^{0.56} \times K_{\text{USLE}} \times C_{\text{USLE}} \times LS_{\text{USLE}} \times CFRG \quad (2)$$

式中: m_{sed} 为土壤侵蚀量(t); Q_{surf} 为地表径流(mm/h); q_{peak} 为洪峰流量(m^3/s); A_{hru} 为 HRU 面积(hm^2); K_{USLE} 为土壤侵蚀因子; C_{USLE} 为植被覆盖和管理因子; P_{USLE} 为保持措施因子; LS_{USLE} 为地形因子; $CFRG$ 为粗碎屑因子。

流域水体中污染物负荷量迁移与土壤侵蚀量息息相关,尤其是面源污染。流域中的污染物进入河道的主要途径:降雨后侵蚀的泥沙中携带、水库水体中的含量、不同形态污染物之间的相互转化、生物的生化作用等等。这些途径都是影响河道中污染量的因素。SWAT 模型可模拟整个污染物的转化和迁移过程。污染物由陆地进入水体的过程主要由于土壤风化侵蚀作用而产生,此过程的污染物对水体造成污染,严重影响人类的生活。

2 实例分析

2.1 研究区概况

本文以贵州省黔南州剑江河作为研究区。剑江河为清水江流域发源地之一,也是都匀市的母亲河。近年来,都匀市经济发展较快,给剑江河流域水环境带来较大压力,但由于流域面积较小,且位于清水江流域源头,海拔较高,故水质监测数据有限,多处断面仅有数年的丰、平、枯期三个水质数据。该流域的水质监测断面及各类站点分布见图 1,水质现状数据监测时间汇总见表 1。

表 1 都匀市剑江河流域水质监测断面水质数据监测时间序列汇总

Tab. 1 Summary of monitoring time series of water quality data at monitoring sections in Jianjiang River basin in Duyun City

断面名称	水质数据	
	丰、平、枯期	12 个月
茶园水库	2010—2012	2013—2014
油行		2010—2014
营盘	2010—2014	
甲登	2013—2014	



图 1 都匀市剑江河流域站点及断面分布

Fig. 1 Location of stations and sections in Duyun City

2.2 模型基础数据

DEM 数据: 来源于中国科学院镜像站点 (<http://www.gscloud.cn/>), 数据精度 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 分辨率较高。

土地利用: 基于 GlobeLand 30-2010 遥感数据, 分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。

土壤数据: 基于世界和谐土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集, 数据精度为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。

气象数据: 由中国气象科学数据共享服务网收集到, 独山站、凯里站两个站点 1985—2014 年的日最高气温、日最低气温、日均相对湿度、日均风速等数据; 周边 9 个雨量站的 1985—2014 年的逐日降雨量数据。

水文水质数据: 下司站 1985—2012 年的月均流量数据, 由当地水务局提供; 2010—2014 年不同断面(茶园、油行、营盘、甲登)的各水期水质数据由都

匀市当地环保部门提供。

其他: SWAT 模型建立所需的水库数据、农业耕种管理措施主要来自实地调研及文献资料的收集^[13], 库区工业、生活点源数据来自 2011 年统计年鉴的分析、核算。

2.3 模型的率定和验证

(1) 径流模拟

本研究将下司水文径流数据分为三部分: 1990 年 1 月—1992 年 12 月作为模型预热期^[14], 1993 年 1 月—2012 年 12 月作为径流模拟的率定期, 1985 年 1 月—1992 年 12 月作为验证期。模型采用相关系数 R^2 ^[15]、Nash-Suttcliffe 系数^[16] E_{ns} 来指标评价模型的适用性, 当 $R^2 \geq 0.6$ 且 $E_{ns} \geq 0.5$ 时, 则认为模型的模拟精度令人满意。径流模拟的率定期: $R^2 = 0.85$, $E_{ns} = 0.90$, 验证期 $R^2 = 0.90$, $E_{ns} = 0.90$, 模拟效果好, 精度较高。

(2) 泥沙模拟

由于缺乏剑江河流域的泥沙实际监测值, 已知年均输沙模数约为 $100 \sim 200\text{ t}/\text{km}^2$, 下司站多年平均年含沙量为 $0.19\text{ kg}/\text{m}^3$, 经多次手动调参后, 模拟下司水文站出口的年平均输沙模数为 $118.9\text{ t}/\text{km}^2$, 多年平均年含沙量为 $0.19\text{ kg}/\text{m}^3$, 满足年均输沙模数范围。

(3) 污染物模拟

以油行断面 2010 年 1 月—2012 年 12 月的总磷数据率定, 以油行断面 2013 年 1 月—2014 年 12 月、甲登断面 2013 年、2014 年不同水期的水质数据进行验证。油行率定期的效果 $R^2 = 0.72$, $E_{ns} = 0.61$; 验证期 $R^2 = 0.89$, $E_{ns} = 0.60$; 茶园水库断面、甲登断面和营盘断面的验证期评价指标分别为: $R^2 = 0.89$, $E_{ns} = 0.85$, $R^2 = 0.93$, $E_{ns} = 0.80$, $R^2 = 0.81$, $E_{ns} = 0.73$, 模拟效果较好。

2.4 水质数据分析

根据率定好的水质模型, 可输出流域不同断面的水质数据, 弥补各断面某些年份只有丰、平、枯水期水质数据的情况。如图 2 所示, 使用率定好的 SWAT 模型对 2009—2014 年茶园、营盘、甲登、油行四个断面的总磷数据进行了补足, 可以看出尤其是甲登断面总磷的高负荷期水质数据基本都是通过模型模拟得到的, 为水环境污染控制提供数据支撑。

同时进一步分析了污染物与降雨量之间的关系(见表 2、图 3)以及污染物的来源分布(见图 4、图 5)。由图 3 可以看出, 总磷与降雨量呈较强正相关关系, 故总磷主要来源于面源污染, 面源污染主要是

以降雨为驱动力,降雨冲刷地面,面源污染随地表径流及泥沙进入水体。根据表 2 可知,该流域汛期(4—9 月)降水量为全年降水量的 77%,该时期的总磷占

全年负荷量的 82.4%。其中 6 月份污染物负荷量均为最大,枯水期污染物含量均较小,少于全年污染物含量的 5%。

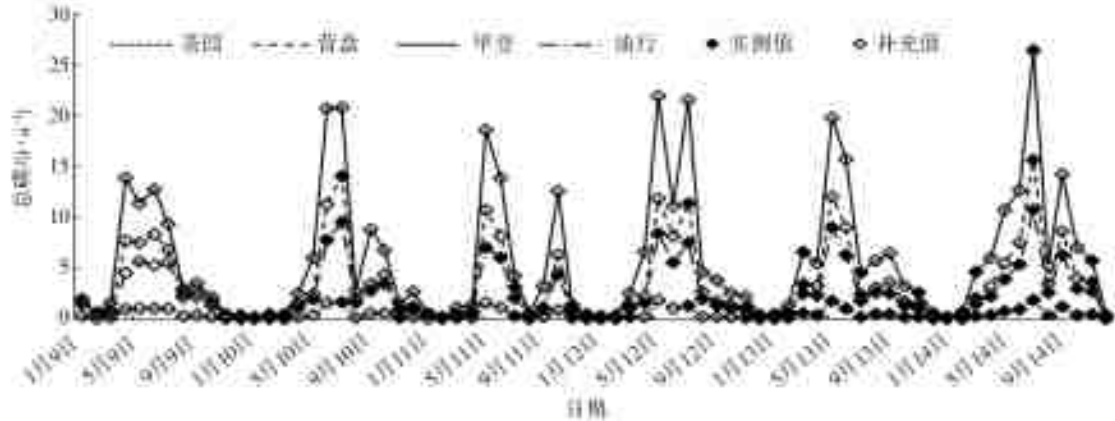


图 2 不同断面总磷数据的实测值与模型弥补的水质数据

Fig. 2 Measured data of total phosphorus in different sections and water quality data supplemented by the model

表 2 1990—2014 年多年月均总磷输出负荷量计算成果

Tab. 2 Calculation results of monthly mean total phosphorus output load during 1990 to 2014

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
降雨量/mm	35.3	38.4	67.4	116.8	209.3	286.2	270.6	110.3	105.1	99.5	55.0	26.8
总磷/t	1.6	2.2	2.5	5.1	14.3	18.2	17.7	7.4	4.9	4.6	2.4	1.3
降雨量比例/%	2.5	2.7	4.7	8.2	14.7	20.1	19.0	7.8	7.4	7.0	3.9	1.9
总磷比例/%	1.9	2.6	3.0	6.2	17.4	22.1	21.6	9.1	6.0	5.6	3.0	1.6

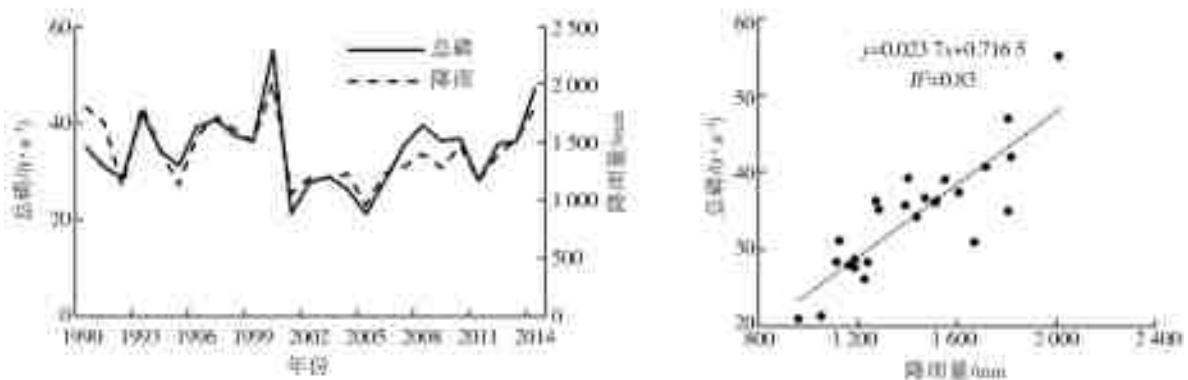


图 3 降雨量与总磷趋势及相关关系

Fig. 3 Trend and correlation diagrams between rainfall and total phosphorus

面源污染的主要分布与降雨分布及流域的下垫面特征(土地利用、土壤和坡度)密切相关。根据 SWAT 模型输出的 1988—2014 年该流域各子流域多年平均总磷负荷量,绘制总磷贡献的空间分布见图 4。通过该图可追溯源地寻找污染物的来源分布,从而为水环境的监管治理提供了科学的依据。由图 4 可以看出,剑江河源头区总磷负荷量最少,主要由于该区为森林覆盖,无耕地及大量人口居住,故污染较少;流域中部为都匀市城区,城区无耕地且生活污水为集中处理排放故总磷排放量较少;其余部分为都匀市区周边乡镇,土地利用多以耕种为主,且

农村生活污染及牲畜养殖多为散养,未经处理排放至土壤河流,故污染较为严重,尤其是该流域北部地区总磷污染最严重。

从图 5 可以分析出不同代表年面源污染源分类的总磷贡献率,从而可根据不同的水文年对污染物进行有目的的削减,确保河流水质达标。都匀市剑江河流域面源污染物最大来源是肥料的流失,约占 50%左右,尤其是丰水期,占比近 60%。其次是人类生活污水与畜禽散养,占 30%左右,仅有 20%左右来源于自然背景。由此可知,总磷污染负荷主要因素为人为造成,人类的生产生活给生态环境带



图 4 都匀市剑江河流域子流域总磷输出分布

Fig. 4 Total phosphorus output distribution in the sub-basin of Jianjiang River basin

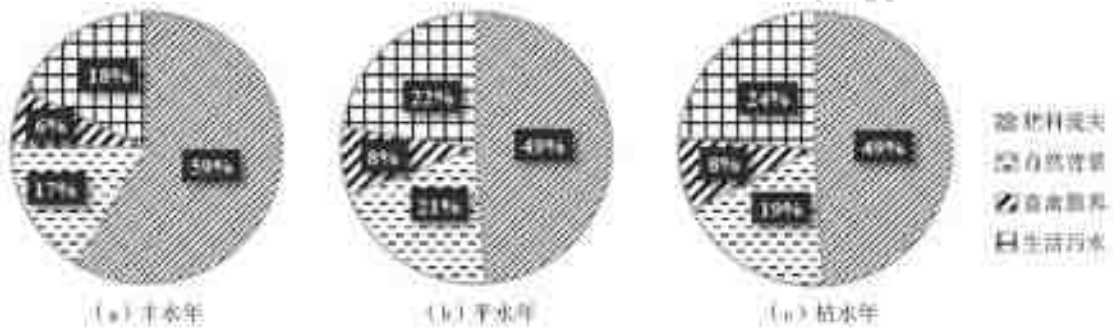


图 5 丰、平、枯代表年内面源污染的总磷贡献率

Fig. 5 Contribution rates of non-point source pollution to total phosphorus in typical wet, normal, and dry years

3 结 语

分布式水文模型可对水质监测数据进行插补延长,并对污染源进行分析,模型综合了水文、气象、下垫面等多因素,考虑了不同污染源对水质的影响,具有较强的物理意义及可靠性,适应于水质监测断面较少、监测能力有限的地区,可以有效的节省人力、物力及财力,在水环境管理及水质保护工作具有一定的应用前景。

参考文献(References):

[1] 高娟,华璐,滑丽萍,等. 地表水水质监测现状分析与对策[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2006,27(1): 75-80. (GAO J, HUA L, HUA L P. Analysis of surface water quality monitoring condition and its countermeasures [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2006, 27(1): 75-80. (in Chinese)). DOI:10.3969/j.issn.1004-9398.2006.01.018.

[2] 李红军,刘锐,张建元,等. 资料缺乏地区水功能区纳污能力计算:以都匀市清水江为例[J]. 节水灌溉,2015,

来很大的负担。肥料流失的污染物负荷量随着降雨量的增加而增加,其主要的驱动力为降雨。化肥流失的污染负荷可通过减少化肥的施用量以及优化耕作措施的方法削减;除化肥流失外,畜禽散养与农村生活污水也占较大的比例,其丰平枯年的比例变化规律与肥料流失相反,丰水年比例最小,平水年其次,枯水年最大,故随降雨量的增多,占比减少。该部分面源可通过排放方式及养殖方式、增加节能减排意识等措施改善水环境,从而增加水环境的承载力;面源的另一部分来源于自然本身,其主要原因是自然条件下水土流失,不同的土地利用对水土的保持力不同,不同的土壤其氮磷的含量也不同,故通过降雨的冲刷而导致土地的土壤流失污染物挟带到水体中污染水环境。针对自然背景污染,可采取退耕还林等方式防治水土流失。

(5):49-51. (LI H J, LIU R, ZHANG J Y, et al. Calculation of water environmental carrying capacity in ungauged region: A case study in Qingshui River of Duyuan City, Guizhou Province[J]. Water Saving Irrigation, 2015, (5): 49-51. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2015.05.014.

[3] 刘柏君,管仪庆,刘光裕,等. 资料插补对河流水质变化趋势影响分析——以台州市区河流为例[J]. 中国农村水利水电,2014,(12): 35-39. (LIU B J, GUAN Y Q, LIU G Y, et al. An analysis of data interpolation's effect on rivers' water quality change trend: Taking rivers in Taizhou for example[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, (12): 35-39. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2014.12.010.

[4] 冷辉. 无资料地区水量水质模拟研究:以江宁区牛首山河流域为例[D]. 南京:南京大学,2013. (LENG H. Research on simulation of water quantity and water quality in no-data area: A case study of Niushoushan River basin in Tiangning district[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese))

[5] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al.

- SWAT: model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the Asabe, 2012, 55(4): 1345-1352.
- [6] ARNOLD J G, ALLEN P M, MUTTIAH R, et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques[J]. Groundwater, 2010, 33(6): 1010-1018.
- [7] 葛怀凤, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于污染迁移转化过程的海河干流天津段污染关键源区及污染类别分析[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 61-67. (GE H F, QIN D Y, ZHOU Z H, et al. Analysis of key source areas and pollution type in the lower Haihe River based on pollution loading movement and transformation[J]. 2011, 42(1): 61-67. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.01.002.
- [8] 张楠, 张占庞, 周祖昊, 等. 基于 SWAT 的天津市非点源污染分布特性分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 60-61. (ZHANG N, ZHANG Z P, ZHOU Z H. Analysis of distribution characteristics of non-point source pollution in Tianjin based on SWAT[J]. Yellow River, 2008, 30(4): 60-61 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2008.04.028.
- [9] 李丹, 薛联青, 郝振纯. 基于 SWAT 模型的流域面源污染模拟影响分析[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(3): 4-7. (LI D, XUE L Q, HAO Z C. SWAT simulation of effect of stream water quality on non-point source pollution[J]. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(3): 4-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2008.03.003.
- [10] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation, version 2000 [R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2002.
- [11] WILLIAMS J R. Sediment routing for agriculture watersheds[J]. Water Resource, 2010, 11(5): 965-974.
- [12] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool user's Manual Version 2000 [D]. Agriculture Research Service and Blackland Research Center, 2001.
- [13] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005. (WU S X. Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from livestock and poultry farming in China's rural areas and their effects on agricultural non-point source pollution[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.Y756604.
- [14] JASMEET, LAMBA, ANITA, et al. Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model[J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(4): 386-394.
- [15] DAVID R. LEGATES, GREGORY J. MCCABE JR. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. Water Resources Research, 1999, 35(1): 233-241.
- [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(3): 282-290.

(上接第 75 页)

- [14] 刘景春, 严重玲, 胡俊. 水体沉积物中酸可挥发性硫化物(AVS)研究进展[J]. 生态学报, 2004(4): 812-818. (LIU J C, YAN Z L, HU J. Research progress of acid volatile sulfide (AVS) in water sediments[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004(4): 812-818. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.04.024.
- [15] 杨旭楠, 潘汉平, 许玫英, 等. 一种修复黑臭河道底泥的环保型硝酸钙缓释颗粒及其制备方法[P]. 广东: CN105800899A, 2016-07-27. (YANG X N, PAN H P, XU M Y, et al. An environmentally friendly calcium nitrate slow release granule for repairing black mud river bottom sediment and its preparation method [P]. Guangdong: CN105800899A, 2016-07-27. (in Chinese))