

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

基于改进的SWAT模型的山地流域吸附态总磷负荷模拟

龙天渝, 钟少荣, 李业盛, 郑岐全, 刘敏

引用本文:

龙天渝,钟少荣,李业盛,等. 基于改进的SWAT模型的山地流域吸附态总磷负荷模拟[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1314-1320.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0046

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区季节性吸附态磷负荷的空间分布特征

龙天渝, 王海娟, 刘佳, 刘敏 农业环境科学学报. 2015(3): 538-545 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.017

湖北省三峡库区1991—2014年农业非点源氮磷污染负荷分析

王萌, 王敬贤, 刘云, 李春蕾, 肖文发 农业环境科学学报. 2018, 37(2): 294-301 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0600

巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间差异及关键影响因子研究

王赵飞,林晨,许金朵,金平华,熊俊峰,闵敏,马荣华 农业环境科学学报.2019,38(3):659-670 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0188

土地利用驱动下洪泽湖支流流域非点源颗粒态磷流失时空变化特征 叶祖鑫,林晨,安艳玲,吴起鑫,刘斌,隋雪艳,马荣华 农业环境科学学报.2017,36(4):734-742 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1371

基于AnnAGNPS模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究

涂宏志,侯鹰,陈卫平 农业环境科学学报.2017,36(7):1345-1352 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1562



关注微信公众号,获得更多资讯信息

龙天渝,钟少荣,李业盛,等.基于改进的SWAT模型的山地流域吸附态总磷负荷模拟[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1314-1320.

LONG Tian-yu, ZHONG Shao-rong, LI Ye-sheng, et al. Simulation of adsorbed phosphorus load in a mountainous watershed based on an improved SWAT model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1314–1320.



基于改进的SWAT模型的山地流域吸附态总磷负荷模拟

龙天渝,钟少荣,李业盛,郑岐全,刘 敏

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘 要:SWAT模型模拟的产沙量为流域总产沙量,而无法获得产沙量的空间分布以及与产沙量关联的吸附态负荷的空间分布。 为此,针对山地流域,提出"径流连通性因子",基于该因子,形成改进的产沙量以及吸附态总磷负荷的时空分布模型,并对模型进 行验证。应用所构建的模型,采用小流域推广法,将非完整流域的行政区域三峡库区中所包含的小流域模型及其模型参数分别 扩大模拟范围,总体覆盖整个库区,实现对三峡库区产沙量和吸附态总磷负荷时空分布的模拟,确定出产沙和产生吸附态总磷负 荷的关键源区。所构建的模型可用于其他山地流域。

关键词:坡面泥沙输移比;时空分布;总磷;吸附态负荷

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)06-1314-07 doi:10.11654/jaes.2020-0046

Simulation of adsorbed phosphorus load in a mountainous watershed based on an improved SWAT model

LONG Tian-yu, ZHONG Shao-rong, LI Ye-sheng, ZHENG Qi-quan, LIU Min

(Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China) **Abstract**: In the SWAT model, the simulated sediment yield is the total sediment yield of the basin; thus, it is impossible to obtain the spatial distribution of the sediment yield and the spatial distribution of the adsorbed load associated with sediment yield. For this reason, a runoff connectivity factor was proposed for a mountainous basin, based on which a temporal and spatial distribution model of improved sediment yield and total adsorbed phosphorus load was formed and verified. By using the model and the method of small watershed expansion, the small watershed model and its model parameters in the Three Gorges Reservoir area of the administrative region of the incomplete watershed were expanded to cover the whole reservoir area in order to realize the simulation of the temporal and spatial distribution of the sediment yield and total adsorbed phosphorus load in the Three Gorges Reservoir area and to determine the key source areas of the sediment yield and total adsorbed phosphorus load. The model constructed in this study can be applied to other mountain basins. **Keywords**; hillslope sediment delivery ratio; spatial-temporal distribution; total phosphorus; adsorbed phosphorus load

随着点源污染管控力度的加大,非点源污染已成 为水体污染的主要原因¹¹。2015年,国家正式发布 《水污染防治行动计划》,提出要全面控制工业、农业 和城镇污染物排放,深化污染物总量控制。明确非点 源污染的时空效应,研究非点源污染的产生和运移机 制,识别关键污染源区是开展非点源污染治理的关 键。非点源污染从形式上可划分为吸附态和溶解态 两种类型。吸附态非点源污染是指污染物以陆面上 被侵蚀泥沙为载体,在径流的作用下迁移进入水体所 形成的污染。磷主要以吸附态的形式进入水体,在三 峡水库,80%以上的磷是以吸附态形式存在^[2]。

非点源污染具有起源分散、随机性强、污染范围

收稿日期:2020-01-09 录用日期:2020-02-21

作者简介:龙天渝(1960—),女,重庆人,博士,教授,主要从事水环境污染控制与水环境模拟研究。E-mail:longty128@cqu.edu.en

基金项目:国家自然科学基金项目(41877472)

Project supported : The National Natural Science Foundation of China(41877472)

广等特点,因此,监测识别非常困难,特别是大型流域 或区域。应用数学模型进行模拟和分析是研究非点 源污染最有效、最直接的方法。通过构建数学模型, 从景观生态学和系统动力学角度出发,研究自然特性 和人类活动对水环境的影响已成为当前非点源污染 研究的热点之一。在流域尺度的非点源污染模型中, SWAT模型被广泛采用^[3-7]。吸附态污染是陆面上被 侵蚀土壤在降雨形成的地表径流的迁移作用下伴随 着入河泥沙所形成的污染,因此,产沙量的模拟是吸 附态污染负荷模拟的基础。由于被侵蚀的土壤在迁 移过程中会产生部分沉积,因此最终进入水体的泥 沙量总是小于被侵蚀的土壤量。在SWAT模型中, 产沙量的模拟采用的是修正的土壤流失方程 (MUSLE)。在该方程中,涉及到陆面泥沙输移比(陆 面上被侵蚀的土壤进入水体的比例)的因子"峰值流 量"和"地表径流量",其通常采用小流域出口值,出 口值不能反映泥沙输移比的空间异质性或空间分 布,仅能反映整个流域形成的地表径流随时间变化 所引起的泥沙输移比的变化,因此模拟结果无法确 定陆面上产生泥沙以及吸附态非点源污染的关键区 域,这显然不利于从源头控制和有效治理产沙和吸 附态非点源污染。

为此,本文针对山地流域,提出坡面(山地流域的 陆面)泥沙输移比的时空分布式,对SWAT模型中的 泥沙模型进行改进,并在此基础上,构建吸附态总磷 负荷模型,以山地流域,即三峡库区包含的御临河流 域、小江流域、大宁河流域和香溪河流域为例,对它们 的吸附态总磷负荷进行模拟。由于三峡库区为行政 区域,而不是完整的流域,因此为模拟三峡库区产生 的吸附态总磷负荷,采用了小流域扩大法,将库区分 为御临区、小江区、大宁区和香溪区4个小区,将其中 包含的流域负荷模型及其模型参数扩大到整个小区 进行模拟。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域及数据来源

三峡库区(105°44′~110°39′E,28°32′~31°44′N) 处于长江上游向中游过渡的平原和四川盆地的结合 地区,面积广阔,总面积约为5.8万km²。库区包括御 临河流域、小江流域、大宁河流域和香溪河流域。库 区内地形以丘陵、山地为主,丘陵约占总面积的 21.7%,山地约占74.0%¹⁸。该区域属于亚热带季风性 湿润气候,多年平均气温17~19℃。降水丰富,年平 均降雨量为1150.26 mm,但其空间分布不均,不同年 份相差颇大,降雨主要集中在夏季,多为暴雨或大暴 雨,导致库区水土流失严重。

模拟所需资料包括空间数据和属性数据等,具体 来源见表1。数字高程图(DEM)和重分类的土地利 用类型图见图1和图2。

1.2 坡面输沙模型

1.2.1 坡面产沙模型构建

在陆面上被侵蚀的土壤在降雨径流的作用下迁 移进入水体,形成入河泥沙。由于被侵蚀的土壤在迁



Figure 1 DEM diagram of the Three Gorges Reservoir area

表1 数据及来源 Table 1 Data and sources

				_
数据Data	类型Type	数据描述 Data description	来源Source	
数字高程(DEM)	栅格	高程、坡度、坡长、坡向	长江科学院1:50 000数字高程模型	
土地利用	栅格	分为林地、草地、旱地、水田、建设用地、水域和未利用地共7类	1:250 000 土地利用数据库	
土壤数据	矢量	土壤类型与分布	中国地球系统科学数据共享网络	
行政区划图	矢量	三峡库区区县级行政区划	中国地球系统科学数据共享网络	
气象数据	DBF	2001—2016年逐日降雨量	中国气象科学数据共享服务网	
实地监测数据	DBF	逐日水文水质资料	相关文献、统计年鉴及水务局提供	
社会经济数据	DBF	库区人口、经济等数据	中国统计信息网	



Figure 2 Land use map of the Three Gorges Reservoir area

移过程中将产生部分沉积,因此最终进入水体的泥沙 量小于被侵蚀量。对于山地流域,坡面被侵蚀的土壤 进入水体的比例通常称为坡面泥沙输移比 HSDR (The hillslope sediment delivery ratio),即

$$HSDR = Y/E \tag{1}$$

$$Y = HSDR \cdot E \tag{2}$$

式中:*HSDR*为坡面某单元泥沙输移比,无量纲;*Y*为 产沙量,t;*E*为坡面某单元的土壤侵蚀量,t。显然, 不同时刻、不同空间位置的*HSDR*不同,其随时空的 变化而变化。对于陆面上某空间单元的土壤侵蚀量 *E*,通常采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)进行 计算:

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{3}$$

式中:R为降雨侵蚀力因子,MJ·mm·hm⁻²·h⁻¹;K为土 壤可蚀性因子,t·h·MJ⁻¹·mm⁻¹;LS为坡长坡度因子, 无量纲;C为植被覆盖度因子,无量纲;P为水土保持 措施因子,无量纲。由式(2)和式(3)可得:

$$Y = HSDR \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{4}$$

在SWAT模型中,采用改进的通用土壤流失方程(MUSLE)计算产沙量。

$$Y = 11.8 \left(Q \cdot q_p \right)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{5}$$

式中:Q为地表径流量,m³;q_p为峰值流量,m³·s⁻¹。在 现有文献中,q_p和Q基本上采用流域出口的实测值。

对比式(4)与式(5)可知,在 MUSLE 中与泥沙输 移比 HSDR 以及降雨侵蚀力因子 R 有关的因子为地 表径流量 Q 和峰值流量 q_p,因常采用出口值计算,因 此代表的是流域空间上的平均值,不能反映产沙量的 空间变异性或空间分布,以及对应的吸附态非点源污 染负荷的空间分布。为此,本文针对山地流域,构建 具有时空分布特性的坡面泥沙输移比 HSDR,并在此 基础上形成时空分布的产沙模型以及吸附态总磷负 农业环境科学学报 第39卷第6期

荷模型,模拟产沙量和吸附态磷负荷的时空分布,识 别产沙和形成污染负荷的"关键源区"。

1.2.2 泥沙输移比的时空分布式

针对山地流域,在分析和研究了现有有关坡面泥 沙输移比计算式的基础上,Broselli等¹⁹提出了"流动 连通性"因子 *IC*(Flux connectivity),并由其形成了 *HSDR*的计算式。Broselli等认为,坡面某空间单元上 被侵蚀土壤进入水体的比例取决于该单元与坡上单 元和坡下单元的水力连通状况。坡上单元指汇流于 该单元的所有单元,而坡下单元指从该单元进入到水 体所经过的所有单元。假定坡上单元水力连通的程 度与坡上各单元的植被覆盖率、坡度和总汇流面积成 正比,而坡下单元水力连通的程度与坡长成正比、与 坡下各单元的植被覆盖率和坡度成反比,得到:

$$IC = \lg \frac{D_{up}}{D_{dn}} = \lg \frac{\overline{C_{up}} \ \overline{S_{up}} \sqrt{A_{up}}}{\sum_{w=1}^{dn} \frac{l_w}{C_w S_w}}$$
(6)

式中:D_{up}为坡上单元水力连通分量;D_{du}为坡下单元 水力连通分量;C_{up}为坡上各单元平均植被覆盖率,无 量纲;S_{up}为坡上各单元平均坡度,无量纲;A_{up}为坡上 单元的总汇流面积,m²;*l_w为坡*下单元*w*的长度,m;*C_w* 为坡下单元*w*的植被覆盖率,无量纲;*S_w为坡*下单元*w* 的坡度,无量纲。由于0<*HSDR*<1,且*HSDR*应随*IC* 非线性地单调增加,因此可近似假定*HSDR*与*IC*之间 满足玻尔兹曼S形关系,即

$$HSDR_{IC} = HSDR_{\max} (1 + \exp \frac{IC_0 - IC}{k_{IC}})^{-1}$$
(7)

式中:ICo和 kic为参数,由实测数据率定;HSDRmax为 HSDR最大值,取决于表层土壤的类型,其数值范围 为0.7~0.9^[10]。研究表明,采用式(7)的坡面泥沙输移比 与式(3)的RUSLE结合模拟的产沙量精度明显提高^[10]。

分析式(6)和式(7)可以发现,HSDR_l 表征了坡面 泥沙输移比的空间变化,即在坡面不同位置被侵蚀的 土壤进入水体的比例不同,但无法表征降雨产生的径 流等随时间变化而导致的变化。鉴于径流是迁移被 侵蚀土壤的动力,且径流随时间的变化是引起坡面泥 沙输移比随时间变化的最重要因素,定量表示径流强 度和径流随时间变化的单元累积地表降雨径流深能 综合反映坡上各单元的植被覆盖率、坡度和总汇流面 积对"流动连通性"的作用,因此,采用径流深来表征 与坡上各单元的水力连通程度应比式(6)更精确,这 也解决了"HSDR_l 无法表征降雨产生的径流随时间 变化引起的坡面泥沙输移比变化"的问题。为此,假 定坡上单元水力连通程度与该单元的累积地表降雨 径流深成正比,而坡下单元水力连通程度与式(6)相 同,重新定义"流动连通性"因子。新定义的"流动连 通性"因子称为"径流连通性"*RC*(Runoff connectivity),*RC*以及相应的*HSDR_{nc}*的计算式为:

$$RC = \lg \frac{H}{\sum_{w=1}^{\ln} \frac{l_w}{C_w S_w}}$$
(8)

$$HSDR_{RC} = HSDR_{\max} \left(1 + \exp \frac{RC_0 - RC}{k_{RC}}\right)^{-1}$$
(9)

式中:H为某单元的累积地表降雨径流深,m;RC₀和 k_{Rc}为参数,由实测数据率定。式(9)为具有时空分布 特性的HSDR_{Rc}计算式。

1.2.3 模型的验证

为对比HSDR_{RC}与HSDR_{IC}的模拟效果,应用式(4) 和式(9)或式(7)分别对三峡库区中的山地流域——大 宁河流域和小江流域的产沙量进行模拟,并将模拟结 果与实测值进行对比。对于大宁河流域,根据巫溪站 2006—2009年各年中4—10月泥沙观测值(1—3月为 枯水期,产沙量近似为0)对模型参数进行率定,采用 巫溪站2010—2013年各年中4—10月的泥沙观测值 来检验HSDR的合理性和精确性。对于小江流域,选 用宝塔窝站2002—2003年各年3—10月的泥沙观测 值对模型参数进行率定,采用2004年3—10月的泥沙 观测值进行检验。使用纳什系数(Nash-Sutcliffe efficiency,NS)和决定系数R²评价模型的合理性和精度。

本文式(3)中各因子的计算方法与现有研究成 果^[11-12]相同,式(8)中累积地表降雨径流深 H 的计算 采用分布式径流曲线(SCS-CN)的方法^[11],并借助 ArcGIS 中加权累积流函数得出其值,HSDRmax依据土 壤数据分别赋值。由于三峡水库蓄水后支流的流速 不大,因此不计河道内河床侵蚀产生的泥沙,坡面入 河泥沙在河道内的沉积采用改进的 Bagnold 泥沙输移 方程进行计算^[13]。

表2为HSDR_{Rc}和HSDR_{Ic}的模拟精度对比。由表

2可知,基于 HSDR_{RC} 的产沙量模拟效果比基于 HS-DR_{IC} 的模拟效果更佳。对于大宁河流域,在模型检 验期应用 HSDR_{RC}模拟产沙量的 NS 值和 R²值相比 HSDR_{IC}提高了 14.1% 和 7.8%。各流域 HSDR_{RC} 中参 数率定结果见表 3。

1.3 吸附态总磷负荷的时空分布模型

在改进了SWAT模型的产沙量计算方法后,采用 SWAT模型中由产沙量计算吸附态总磷负荷的方法, 用式(10)和式(11)计算该单元产生的吸附态总磷负 荷^[14]。

$$L_{\rm P} = Y \cdot A \cdot C_{\rm s} \cdot \eta \tag{10}$$

$$\ln\eta = 2 - 0.2\ln E \tag{11}$$

式中:L_P为吸附态总磷负荷,t;A为单元面积,hm²;C_s 为土壤中磷背景含量,g·kg⁻¹;η为富集比,无量纲。 由于改进的产沙模型为时空分布模型,由此形成的吸 附态总磷负荷模型也变为时空分布模型。

1.4 小流域分区推广法

三峡库区为行政区域,而非完整的流域,为模拟 三峡库区的产沙量以及吸附态总磷负荷的时空分布, 参考有关文献^[15-16],选用小流域分区推广法对三峡库 区进行模拟。首先,对库区所包含的4个小流域,即御 临河流域、小江流域、大宁河流域和香溪河流域,分别 根据各自流域出口实测的泥沙数据率定其模型参数 (*HSDR_{RC}*中的*RC*₀和*k_{RC}*),并对其模拟效果进行验证(表 3),然后将4个小流域模型模拟的区域分别推广到相应 的御临区(YL)、小江区(XJ)、大宁区(DN)和香溪区

表 2 模拟精度对比 Table 2 Comparison of simulating precision

流域	指标	率定期 Calibration period		检验期 Validation period	
Watershed	Index	NS	R^2	NS	R^2
大宁河	IC	0.77	0.81	0.71	0.77
	RC	0.87	0.90	0.81	0.83
小江	IC	0.84	0.86	0.70	0.88
	RC	0.89	0.91	0.76	0.89

	Table 3 HSDR parameter rate setting and accuracy of each zone				
运动	会 粉 r		拟合精度 Fitt	ting accuracy	
Watershed	参致 Parameter	率定期 <i>NS</i> NS on calibration period	率定期 <i>R</i> ² <i>R</i> ² on calibration period	验证期 <i>NS</i> NS on validation period	验证期 <i>R</i> ² <i>R</i> ² on validation period
御临河	$RC_0=2.8, k_{RC}=1.2$	0.74	0.77	0.65	0.70
小江	$RC_0=2.4, k_{RC}=1.5$	0.89	0.91	0.76	0.89
大宁河	$RC_0=2.2, k_{RC}=1.5$	0.87	0.90	0.81	0.83
香溪河	$RC_0=2.1, k_{RC}=1.6$	0.82	0.85	0.79	0.81

1318

(XX)4个区域(图3),4个区域覆盖了整个三峡库区。

2 结果与分析

2.1 三峡库区输沙量模拟

以2016年为例,4个区域的产沙量如图4所示。 4个区域产沙量的空间差异明显,产沙最多的区域为 大宁区,其东北部为产沙的关键源区,该区域单位面 积产沙量峰值为2154.26 t·hm⁻²,平均值为18.03 t· hm⁻²;产沙最少的区域为香溪区,其峰值为1245.27 t· hm⁻²,平均值为5.98 t·hm⁻²。

2.2 三峡库区吸附态总磷负荷模拟

2.2.1 负荷的空间分布

依据小流域扩大法汇总获得的三峡库区产沙量 分布,由式(10)可以模拟出三峡库区吸附态总磷负 荷,2016年的模拟结果如图5所示。从图5中可以看 到,总体上负荷的空间变化较大,小江区北部负荷最





高,最高达到144.6 kg·hm⁻²,此外,大宁区部分地域和 御临区东部的负荷也较高,这些地区是负荷形成的关 键源区。表4为各分区总磷负荷量和平均负荷强度 (单位面积上的负荷量)。总体来说,大宁区产生的污



图4 4个区域的产沙量分布

Figure 4 Distribution of slope sediment transport capacity in four regions

2020年6月 龙天渝,等:基于改进的SWAT模型的山地流域吸附态总磷负荷模拟

染负荷最多,其次为小江区。整个库区平均吸附态总 磷负荷强度为0.49 kg·hm⁻²。 2.2.2 负荷随时间的变化

由于库区各年以及同一年中各月的降雨量不同, 导致产沙量和吸附态总磷负荷随时间发生变化。图 6为2007—2016年库区产沙量和总磷负荷的年际变 化,图7为2007年4月—2017年6月库区总磷各月间 的变化。从图6中可以看到,产沙量和吸附态总磷年 际差异显著,产沙量峰值出现在2016年,约6020万 t,最小的年份为2012年,约3610万t;吸附态总磷负 荷峰值出现在2014年,约2890t,最小为2012年,约 1750t。吸附态总磷负荷不仅年际差异大,由于同一 年内各月降雨量不同,各月的差异也十分明显。由于 每年1—3月及11—12月降雨少、雨量低,基本不产生 地表径流,产沙量和总磷负荷可认为是0。从图7中 可以看到,全年的污染负荷主要来源于夏季。

3 结论

(1)针对山地流域,提出"径流连通性"因子,基于 "径流连通性"因子形成坡面泥沙输移比的时空分布







Table 4 Adsorbed phosphorus load and load intensity of each region

区域 Region	面积 Area/hm ²	负荷量 Load/kg	负荷强度 Load intensity/kg•hm ⁻²
御临区	2.21×10 ⁶	6.46×10 ⁵	0.29
小江区	1.37×10 ⁶	9.45×10 ⁵	0.69
大宁区	1.05×10^{6}	8.52×10 ⁵	0.81
香溪区	1.18×10 ⁶	3.95×10 ⁵	0.33
总计	5.81×10 ⁶	2.84×10 ⁶	0.49











式,对SWAT模型中产沙量的计算方法进行了改进, 构建了时空分布的山地流域坡面产沙模型以及吸附 态总磷负荷模型。产沙量的模拟结果表明,改进后 的模型不仅能模拟产沙量的时空分布,而且模拟精 度高。

(2)应用所构建的吸附态总磷负荷模型,采用小流域推广法,对三峡库区进行分区模拟,实现了对吸附态总磷负荷的模拟。模拟结果显示三峡库区的吸附态总磷负荷的时空差异性大,在空间上,负荷强度从0到144.6 kg·hm⁻²,在大宁区和小江区,平均负荷强度较大,分别为0.81 kg·hm⁻²和0.69 kg·hm⁻²;同一年内各月的吸附态总磷负荷差异明显,全年的污染负荷主要来源于夏季。

(3)本文基于"径流连通性"因子所形成山地流域 产沙量和吸附态负荷时空分布的计算方法可用于其 他山地流域,通过模拟,获得产沙和产生吸附态负荷 的关键区域,有利于吸附态负荷的有效治理。

- 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等.汉江流域农业面源污染的源解析[J]. 农业环境科学学报,2018,37(10):2242-2251.
 - TANG Xiao-yang, TANG De-shan, LU Jia-hui, et al. Source apportionment of agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (10) : 2242-2251.
- [2] Wu L, Long T, Cooper W J. Temporal and spatial simulation of adsorbed nitrogen and phosphorus nonpoint source pollution load in Xiaojiang Watershed of Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Environmental Engineering Science*, 2012, 29(4):238–247.
- [3] 李朝月,方海燕. 基于 SWAT模型的寿昌江流域产沙模拟及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6):127-135, 142.
 LI Chao-yue, FANG Hai-yan. Simulation of sediment yield and analysis of influencing factors in the Shouchang River Basin based on SWAT model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6):127-135, 142.
- [4]陈 岩,赵琰鑫,赵 越,等.基于SWAT模型的江西八里湖流域氮磷污染负荷研究[J].北京大学学报(自然科学版),2019,55(6): 1112-1118.

CHEN Yan, ZHAO Yan-xin, ZHAO Yue, et al. Estimating nitrogen and phosphorus pollution load in Bali Lake Basin of Jiangxi Province based on SWAT model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(6):1112–1118.

- [5] 孙丽娜, 卢文喜, 杨青春, 等. 东辽河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8):1459-1467. SUN Li-na, LU Wen-xi, YANG Qing-chun, et al. Effect of future land use caused change on the non-point source pollution in Dongliao River watershed[J]. China Environmental Science, 2013, 33(8):1459-1467.
- [6] Xu Z X, Pang J P, Liu C M, et al. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(25):3619–3630.
- [7] Djebou S, Clement D. Assessment of sediment inflow to a reservoir using the SWAT model under undammed conditions: A case study for the Somerville Reservoir, Texas, USA[J]. International Soil and Water Con-

农业环境科学学报 第39卷第6期

servation Research, 2018, 6(3):222-229.

[8] 洪 倩. 三峡库区农业非点缀污染及管理措施研究[D]. 北京:北京 师范大学, 2011:15-16.

HONG Qian. Study on agricultural non embellishment pollution and management measures in the Three Gorges Reservoir area[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011:15-16.

- [9] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. *Cate*na, 2008, 75(3):268–277.
- [10] Vigiak O, Borselli L, Newham L T H, et al. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio[J]. *Geomorphology*, 2012, 138(1):74–88.
- [11] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1):35-41.

ZHANG Wen-bo, FU Jin-sheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. *Resources Science*, 2003, 25(1):35-41.

[12] 龙天渝,刘 佳,王海娟,等.流域吸附态磷时空分布模型的构建与应用[J].农业工程学报,2015,31(3):255-261.
LONG Tian-yu, LIU Jia, WANG Hai-juan, et al. Modeling spatial-temporal variation of particulate phosphorus at regional scales[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3):255-261.

- [13] Noori N, Kalin L. Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 141– 151.
- [14] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation, version 2009[R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [15] Hong Q, Sun Z, Chen L, et al. Small-scale watershed extended method for non-point source pollution estimation in part of the Three Gorges Reservoir Region[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2012, 9(4):595–604.
- [16] Shen Z, Chen L, Hong Q, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of the Total Environment, 2013, 454/455(5):383-392.