

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.012

岳城水库流域污染源模拟

林晓娟¹, 黄津辉¹, 林超², 郭勇², 侯思琰³

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 海河流域水资源保护局, 天津 300170;
3. 海河水利委员会水资源保护科学研究所, 天津 300170)

摘要: 基于 SWAT 模型对岳城水库流域污染源进行模拟研究。利用流域出口的观台水文站 2006—2009 年的水量、水质等实测数据对经过校准的 SWAT 模型进行验证。结果表明: 岳城水库流域年均入库非点源污染负荷 TN 为 3 025 t, TP 为 234 t, 年均非点源污染贡献率不足 50%; 点源污染中, TN 以工业点源污染为主, 其贡献率达 31.9%, TP 则以城镇生活点源为主, 其贡献率为 36%; 非点源污染中, 农业非点源污染源占主要比重, 化肥贡献率最大为 16.9%, 禽畜养殖污染次之, 贡献率为 10.5%, 农村生活污染最小; 非点源污染的主要来源是耕地, TN 和 TP 年均负荷分别达到 2.77 kg/hm² 和 0.397 kg/hm², 模拟成果可为岳城水库水源地保护和流域综合管理提供新的技术方法及科学依据。

关键词: SWAT 模型; 污染源; 点源; 非点源; 污染贡献率; 岳城水库

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2015)01-0074-06

Simulation of pollution sources of Yuecheng Reservoir Basin

LIN Xiaojuan¹, HUANG Jinhui¹, LIN Chao², GUO Yong², HOU Siyan³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Water Resources Protection Bureau of Haihe River Basin, Tianjin 300170, China;

3. Research Institute of Water Resources Protection, Haihe Water Conservancy Committee, Tianjin 300170, China)

Abstract: The pollution sources of Yuecheng Reservoir Basin was simulated based on SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. A calibrated SWAT model was verified by the measured data of water quantity and water quality of hydrological station in the basin exists in the year 2006—2009. The results show that the average contribution of non-point source was less than 50% with the average annual loadings of TN and TP 3,025t and 234t respectively. In the pollution sources, TN, with its contribution of 31.9%, was mainly from point source pollution of industry, and TP, with its contribution of 36%, was mainly from urban life point source; Non-point source pollution was mainly from agricultural non-point source pollution, with 16.9% contribution of fertilizer and 10.5% contribution of Livestock breeding pollution. Rural domestic pollution was the minimum. The main source of non-point source pollution is from farmland, with its average annual loadings of TN and TP 2.770 kg/hm² and 0.397 kg/hm² respectively. The simulation results can provide a new technology method and scientific basis for water source protection of Yuecheng Reservoir and integrated management of basin.

Key words: SWAT model; pollution sources; point source; non-point source; pollution contribution rate; Yuecheng Reservoir

2010 年我国对 420 座水库的营养状态进行了评价。结果表明: 69% 的水库处于中营养状态, 31% 的水库处于富营养状态^[1]。海河流域水源地状态

更为严峻, 2010 年海河流域 20 座大型水库中, 有 14 座达到富营养水平, 占比为 70%。岳城水库是海河流域重要的饮用水水源地之一, 尽管其水质总体较

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201101018, 201201114); 新世纪优秀人才支持计划基金(NCET-09-0586)

作者简介: 林晓娟(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: linoxiaojuan_jeney@126.com

好,但富营养水平多年来在中营养与轻度富营养化水平之间波动^[2]。氮磷营养盐是造成水库富营养化的主要污染物^[3],与农业非点源污染加剧的关系越来越密切^[4]。

SWAT(soil and water assessment tool)模型^[5-6]是当今应用最为广泛的,具有物理机制的流域分布式水文模型,其模拟流域污染负荷方面的能力已得到了国内外学者的证实^[3,7-8]。该模型已多次在岳城水库流域所处的漳卫南流域得到应用。于磊等^[9]利用SWAT模型对漳卫南流域水量过程和水量平衡进行了模拟分析;孙永亮等^[10]应用SWAT模型,分析漳卫南流域内的径流量、总氮、总磷质量以及流域蒸散发在不同情景下的响应;徐华山等^[11]针对SWAT模型的取用水模块在中国的应用中存在限制,对其源代码进行修改,使其能反映模型模拟子流域在不同年份、不同月份用水量的差异。然而,上述研究均未对污染源模拟进行深入探讨。

因此,本文采用SWAT模型对岳城水库流域氮磷污染进行模拟研究,估算该流域的非点源污染负荷,分析不同污染源对岳城水库水体污染的贡献率,以期对岳城水库水源地保护和流域综合管理提供新的技术方法和科学依据。

1 研究区域

岳城水库流域地处海河流域南部,位于漳卫河水系上游的漳河干流,地理位置为东经 114°9' ~ 114°12',北纬 36°14' ~ 36°18',地势较高,平均海拔 1000 m 以上,总面积 18 072 km²,详见图 1。岳城水库建于 1959 年,库容近 13 亿 m³,它既是兼具防洪、灌溉、供水等多功能的水利枢纽工程,也是河北省邯郸市和河南省安阳市重要的城市水源地。

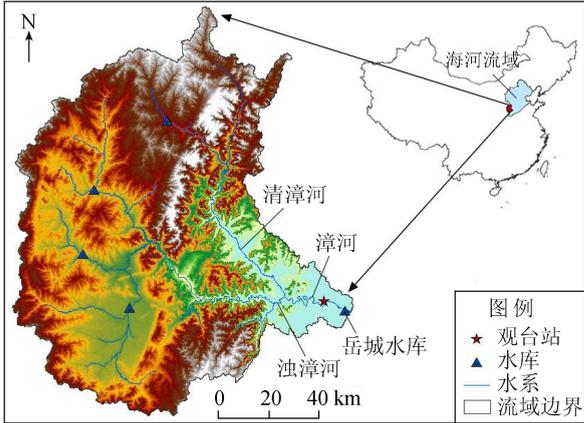


图 1 岳城水库流域地理位置及其 DEM 示意图

研究区涉及山西省长治市、晋中市和顺、榆社、左权 3 县以及河北省涉县,总人口 397 万人,国内生产总值为 1 834 亿元。研究区域有清漳河、浊漳河

两大支流,在合漳汇合形成漳河干流,在观台进入岳城水库。流域位处北温带半干旱半湿润大陆性季风型气候,四季分明,雨热同期,多年平均降水为 569 mm,年均气温为 7.5 ~ 12℃。水资源时空分布不均,年内分配多成单峰型,春冬季节干旱少雨,年内约 70% 的降水集中在汛期。区内土地利用类型以耕地为主,是典型的农业发达的山区流域。区内还有关河、后湾、漳泽 3 座大型水库及红旗渠等 4 大引水渠。

2 SWAT 模型构建

2.1 数据采集

研究所采用的主要数据有:①30 m 分辨率的数字高程地形图(digital elevation model-DEM)、1 km 分辨率的 2005 年土地利用类型分布图和 2000 年土壤类型分布图等空间数据文件,见图 1 ~ 3。②气象

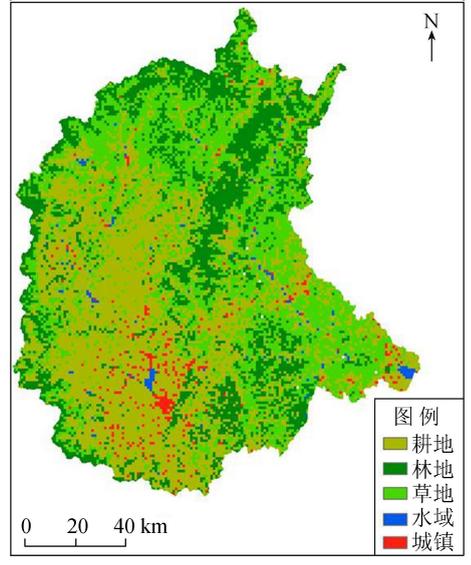


图 2 土地利用类型分布

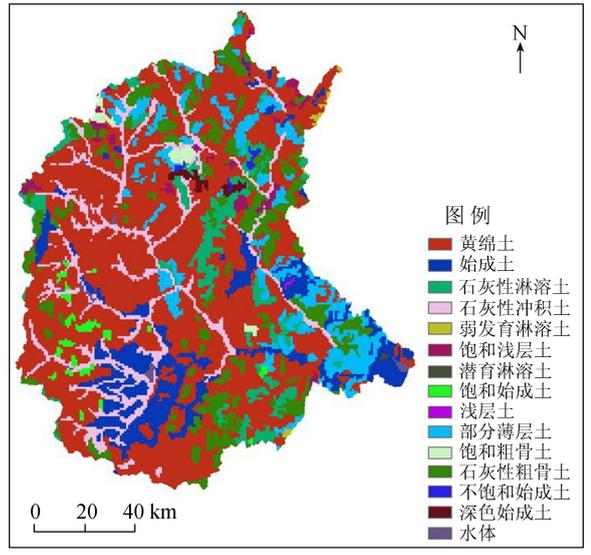


图 3 土壤类型分布

数据、土壤物理和化学属性等非空间数据库文件。其中,气象输入数据包括整年的日最高/最低气温、日降水量、相对湿度、风速、太阳辐射等基本数据。其中日降水量采用 43 个雨量站的数据,其他气象要素的输入数据来源于国家气象信息中心,共 4 个站点,其空间位置分布见图 4。③农业管理措施相关资料,包括农作物种植时间、施肥制度和施肥量,其中施肥量主要涉及化肥、禽畜粪便及农村生活污水等污染源,主要通过统计年鉴资料获得;④城镇生活工业点源、水库和引水等相关数据。研究区域内主要点源排放量来自位于浊漳河流域的长治市。根据 2010 年海河流域入河排污口调查资料,研究区内共有 109 个人河排污口,年入河废污水量为 17 670.5 万 t,其中长治市的人河排污口总共 76 个,年入河废污水量为 12 065.7 万 t。

流域中水库和引水工程对径流具有重要调控作用。研究搜集到流域内石匣、关河、后湾、漳泽和岳城 5 个大型水库的 2006—2009 年的逐日出流数据,将其作为水库出流控制文件,具体位置分布见图 1。红旗渠、跃进渠、跃峰渠等引水信息采用点源的方式添加,实现其取用水量不同年份、不同月份的差异。

2.2 子流域及水文响应划分

首先,综合考虑 DEM 分辨率、实际水系等因素,选定集水面积阈值为 24 200 hm^2 ,提取流域内的水系。然后,在模型中添加水文、水质站点作为子流域出口点^[11-12],最终划分为 50 个子流域,见图 4。考虑到模型的运算效率,根据子流域内不同土地利用、土壤类型及坡度,按照土地利用、土壤类型和坡度分级阈值均为 6% 的设定,进行水文响应单元(hydrologic response unit, HRU)的划分,最终得到 911 个 HRU。



图 4 气象站和雨量站分布

2.3 模型的校准与验证

利用观台站 2005—2009 年的水文、水质月数据,以 2005 年为模型“预热”期,2006、2008 年为校准期,2007 年、2009 年为验证期,对模型进行校准和验证。需要说明的是,因为研究模拟期较短,所以采用随机选取年份进行率定和验证的方式;此外,2006 年、2007 年的降水均比 2008 年、2009 年多,若采用连续年份进行率定,比如率定期为 2006 年、2007 年,验证期为 2008 年、2009 年,这样会导致降水多的年份集中在率定期而降水较少的年份集中在验证期。交叉率定和验证是为提高模型的适用性和准确性。模型模拟效果的评价指标采用 Nash-Sutcliffe efficiency (E_{NS})^[13] 及确定性系数 (R^2)^[14],其计算公式如下。

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (2)$$

式中: O_i 、 S_i 分别为第 i 个实测值和模拟值; \bar{O} 、 \bar{S} 分别为所有实测值和模拟值的均值。 E_{NS} 、 R^2 越接近于 1,表明模型模拟效果越好,月尺度模拟精度一般要求 $E_{NS} > 0.5$ 且 $R^2 > 0.6$ ^[15-16]。

径流、TN、TP 月均值拟合过程线见图 5~7。径流模拟中,校准期 E_{NS} 、 R^2 分别是 0.88 和 0.93,验证期 E_{NS} 、 R^2 分别是 0.86 和 0.92,模拟精度较高。所掌握的泥沙数据非常有限,不足以说明由于研究中泥沙模拟的可信度,故未使用泥沙数据进行校准和验证。另外,由于研究区域内营养物的实测数据较少,研究中只是对其模拟结果作全局指标评价。TN 的 E_{NS} 、 R^2 分别为 0.52 和 0.79,基本满足精度要求;TP 的 E_{NS} 、 R^2 分别是 0.81 和 0.94,模拟效果较好。

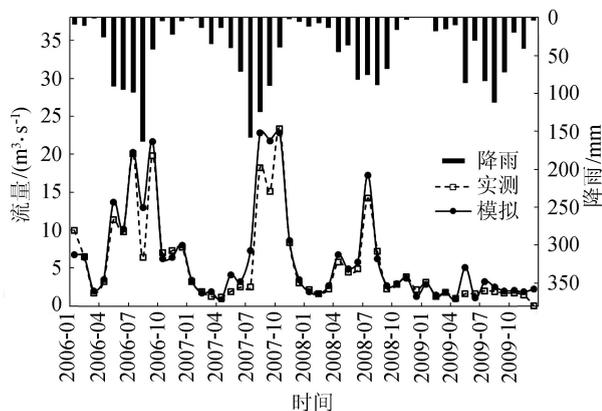


图 5 2006—2009 年观台站月平均径流拟合过程线

从拟合过程线来看,总体模拟效果较好,但个别峰值差值较大。究其原因,似与5年的模拟期中2007年降雨径流量最大有关。综合来看,校准和验证后的SWAT模型适用于岳城水库流域污染源模拟研究。

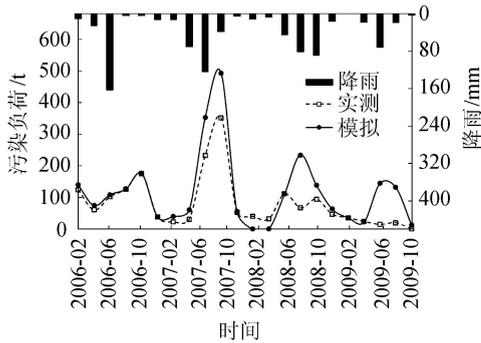


图6 2006—2009年观台站月平均TN拟合过程线

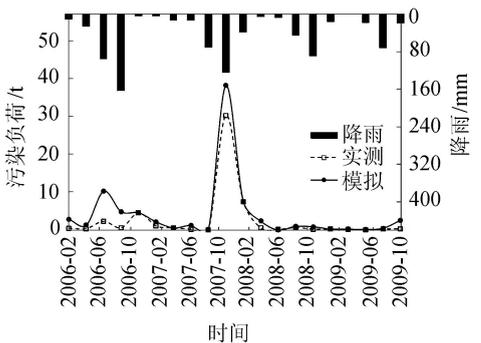


图7 2006—2009年观台站月平均TP拟合过程线

3 污染源模拟结果分析

污染源一般分为点源和非点源。点源主要指城镇生活污水及工业排污,非点源主要包括农村生活污水、畜禽养殖、化肥等农业非点源。

3.1 入库非点源污染

为保持校准后的模型参数不变,在模型输入数据中除去点源数据,重新运行模型,得到2006—2009年岳城水库流域入库非点源污染负荷及其贡献率,结果见表1。可以看出,入库TN最大负荷为4238t,为最小负荷量1775t的2.4倍,年平均负荷为3025t,相应的贡献率分别为61.1%、39.4%和48.6%;TP最大负荷为342t,为最小负荷量115t的3倍,年平均负荷为234t,相应的贡献率分别为59.2%、30.7%和42.9%。

表1 岳城水库流域非点源污染结果

年份	降雨/ mm	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	TN		TP	
			入库负荷/t	贡献率/%	入库负荷/t	贡献率/%
2006	552	9.8	2858.9	52.5	250.8	44.8
2007	595	8.5	4237.8	61.1	341.5	59.2
2008	445	4.8	3229.6	39.4	228.0	30.7
2009	486	2.2	1774.5	41.4	115.4	36.9
均值	523	6.3	3025.2	48.6	233.9	42.9

最大入库非点源污染负荷及贡献率出现在2007年,该年降水量也为最大值595mm,虽然入库年均流量比2006年小 $1.3 m^3/s$,但从流量过程线(图5)可知,2007年入库水量集中在汛期(6—9月),汛期平均流量比2006年的大 $2.5 m^3/s$,而2006年入库流量年内分配较平均,非汛期平均流量又比2007年大 $3.2 m^3/s$ 。因此,汛期降雨径流大,非点源污染负荷也大。最小入库非点源污染负荷出现在2009年,该年在2008年降雨少的情况下,降雨又比多年平均少13%,故其入库流量不论是汛期还是非汛期均比2008年小,其年均流量不到2008年的1/2,所以入库污染负荷也小。

由此可见,非点源污染主要来自于降水量充沛的汛期,降水径流量越大,非点污染负荷越大,贡献率越高,这与其他学者认为非点源污染物流失一般发生在降雨和地表径流产生期间^[17-18]的结论一致。对于流域而言,降水是非点源污染的主要驱动力;对于流域出口而言,径流决定了污染负荷,汛期径流决定了非点源污染负荷。

综合来看,岳城水库流域的非点源污染与降雨存在正相关,入库流量是入库非点源污染负荷量的关键制约因素,而水库上游的蓄水及引水工程直接影响到入库流量及非点源污染负荷^[19];岳城水库的年均非点源污染贡献率不足50%,这一方面反映出上游水库的蓄水及引水渠引水对非点源污染负荷产生的消纳作用,另一方面也说明该区域点源治理仍需要进一步加大力度。

3.2 不同污染源贡献率

模型不仅考虑了流域内的点源和非点源,还考虑了土壤背景值。其中,土壤背景的氮磷流失量与土壤的物理化学性质、土地利用类型、地形、气候以及过去地表沉积物的积累等因素有关^[20]。通过分别模拟有相应污染源输入和无输入时入库水质的变化,可以估算出岳城水库流域内不同污染源对入库TN、TP的污染贡献率(图8)。

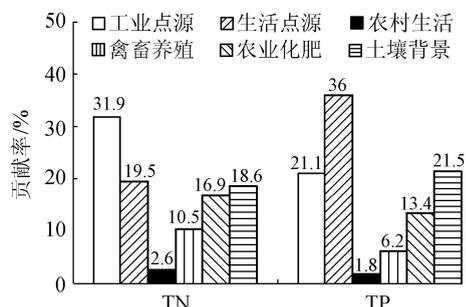


图8 不同污染源对入库TN、TP污染的贡献率

由图8可知,对岳城水库TN污染贡献最大的是工业点源,其贡献率达31.9%,比生活点源高约

12个百分点。农业非点源污染源中,化肥贡献率最大为16.9%,禽畜养殖污染次之,贡献率为10.5%,农村生活污染最小。岳城水库TP负荷的最大污染源是城镇生活点源排放,其贡献率为36%,比工业点源高出约15个百分点。农业非点源污染源贡献率的排序与TN一致,TP污染贡献率最大的是化肥为13.4%,是农村生活污染最小贡献率的7.4倍。本文所说的土壤背景,某种意义上是农业非点源的长年累加所产生的,其TN、TP污染贡献率不可忽视,分别为18.6%、21.5%。

总之,岳城水库点源污染中,TN以工业点源污染为主,TP则以城镇生活点源为主;非点源污染中,农村生活、禽畜养殖、化肥等农业非点源污染源占主要比重,其TN污染贡献率为30%,比土壤背景贡献率大约11个百分点;TP的农业非点源污染贡献率为21.4%,与土壤背景贡献率相当。

3.3 不同土地利用贡献率

将911个HRU的模拟结果按耕地、草地、林地、城镇用地4种土地利用类型分别计算TN、TP年均单位面积负荷及总负荷量,结果见表2,其贡献率直观图见图9。

表2 不同土地利用类型的TN、TP负荷

土地利用	面积/ km ²	TN			TP		
		负荷/ (kg·hm ⁻²)	总量/ t	比例/ %	负荷/ (kg·hm ⁻²)	总量/ t	比例/ %
耕地	7808	2.77	2162.9	86.3	0.397	310.0	88.3
草地	5989	0.43	257.5	10.3	0.058	34.7	9.9
林地	4083	0.19	77.6	3.1	0.013	5.3	1.5
城镇	154	0.47	7.2	0.3	0.069	1.1	0.3
总计	18034	3.86	2505	100	0.537	351.1	100

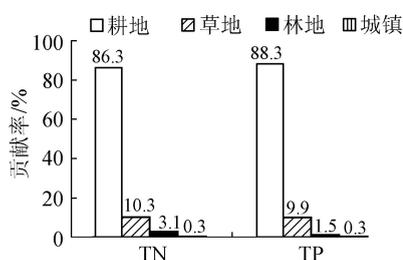


图9 不同土地利用类型的TN、TP贡献率

由表2可知,岳城水库流域土地利用类型中耕地面积最大,占总面积的41.9%,其次是草地、林地,分别占32.5%、22.8%,城镇面积所占比例较小,仅为2%。流域内耕地的年均TN负荷最高,占流域年均总负荷的86.3%,单位面积耕地的TN年均负荷达到2.77 kg/hm²,是草地的6.4倍,远超过林地;流域内耕地的年均TP负荷最高达88.3%,其单位面积负荷为0.397 kg/hm²,是草地的7倍,远超过林地。城镇用地的单位面积TN、TP负荷与草地

相当,因其所占面积较小,总负荷贡献率仅为0.3%,远小于其他土地利用类型。

图8显示出耕地所产生的污染物负荷远大于其他土地利用类型,是流域内非点源污染的主要发生地,与以往研究结论一致^[21-22]。这与耕地土壤疏松且化肥施用量较多等因素有关,在降雨的作用下,耕地土壤中所含有的氮磷元素,随着径流和泥沙进入河道,致使耕地成为非点源污染贡献率最高的土地利用类型。

4 结论

a. 岳城水库流域年均入库非点源TN负荷为3025 t,TP负荷为234 t,非点源污染与降雨存在正相关;年均非点源污染贡献率不足50%,这一方面反映出上游水库的蓄水及引水渠引水对非点源污染负荷产生的消纳作用,另一方面也说明该区域点源治理仍需要进一步加大力度。

b. 点源污染中,TN以工业点源污染为主,其贡献率达31.9%,比生活点源高约12个百分点。TP则以城镇生活点源为主,其贡献率为36%;非点源污染中,农村生活、禽畜养殖、化肥等农业非点源污染源占主要比重。农业非点源污染源中,化肥贡献率最大为16.9%,禽畜养殖污染次之,贡献率为10.5%,农村生活污染最小。

c. 流域非点源污染的主要来源是耕地,其次是草地、林地。耕地的年均TN、TP负荷最高,分别占流域年均总负荷的86.3%和88.3%,TN、TP单位面积年均负荷分别达到2.77 kg/hm²和0.397 kg/hm²。

致谢:感谢天津市龙网科技发展有限公司和海河流域水土保持监测中心站给予的技术资料支持。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2010年中国水资源公报[R]. 北京:2011.
- [2] 海河流域水资源保护局. 2010年海河流域水资源质量公报[EB/OL]. [2011-03-05]. http://www.hwcc.gov.cn/pub/hwcc/wwgj/haihexinxi/gonggaolan/201103/t20110305_329076.html.
- [3] 刘博,徐宗学. 基于SWAT模型的北京沙河水库流域非点源污模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(5):52-61. (LIU Bo, XU Zongxue. Simulation of non-point source pollution in the Shahe Reservoir catchment in Beijing by using SWAT model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5):52-61. (in Chinese))
- [4] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报,2008,24(4):290-

295. (GUO Hongpeng, ZHU Jingya, YANG Yinsheng. Research status and development of technologies for controlling agricultural non-point source pollution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4) :290-295. (in Chinese)
- [5] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1) :73-89.
- [6] LEE M S, PARK G A, PARK M J, et al. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6) :826-833.
- [7] NIRLAULA R, KALIN L, SRIVASTAVA P, et al. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF [J]. Ecological Modelling, 2013, 268: 123-133.
- [8] 赖格英, 于革. 太湖流域富营养物质输移的模拟评估研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2) : 140-144. (LAI Geying, YU Ge. Simulation assessment on nutrient transport in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(2) : 140-144. (in Chinese)
- [9] 于磊, 邱殿明. 基于 SWAT 模型的漳卫南流域水量模拟 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(5) : 949-954. (YU Lei, QIU Dianming. Water quantity simulation of the Zhangweinan Basin based on SWAT model [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(5) : 949-954. (in Chinese)
- [10] 孙永亮, 徐宗学, 苏保林, 等. 变化情景下的漳卫南运河流域水量水质模拟 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3) : 387-394. (SUN Yongliang, XU Zongxue, SU Baolin, et al. Simulation of water quantity and quality under changing scenarios in the Zhangweinan River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3) : 387-394. (in Chinese)
- [11] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 强烈人类活动影响流域的水量水质模拟 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(5) : 542-549. (XU Huashan, XU Zongxue, TANG Fangfang, et al. Integrated simulation of water quantity and quality in river basins strongly affected by human activities [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012, 48(5) : 542-549. (in Chinese)
- [12] CHO J, LOWRANCE R R, BOSCH D D, et al. Effect of watershed subdivision and filter width on SWAT simulation of a coastal plain watershed [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(3) : 586-602.
- [13] 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.
- [14] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Trans ASABE, 2007, 50(3) : 885-900.
- [15] DROLIC A, ZAGORC K J. Estimation of sources of total phosphorus in a river basin and assessment of alternatives for river pollution reduction [J]. Environment International, 2002, 28(5) : 393-400.
- [16] SANTHI C, ARNOLD J G, WILLIAMS J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources [J]. Journal of Hydrology, 2001, 37(5) : 1169-1188.
- [17] 金婧靓, 王飞儿, 戴露莹, 等. 茗溪流域非点源污染特征及其影响因子 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(8) : 2119-2125. (JIN Jingliang, WANG Feier, DAI Luying, et al. Characteristics of non-point source pollution in Tiaoxi watershed and related affecting factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8) : 2119-2125. (in Chinese)
- [18] 蒋昌波, 楚贝, 胡世雄, 等. 涟水流域非点源污染特征 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2012, 8(4) : 64-70. (JIANG Changbo, CHU Bei, HU Shixiong, et al. Non-point source pollution of the Lianshui upper basin [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2011, 8(4) : 64-70. (in Chinese)
- [19] 于涛, 孟伟, ONGLEY E, 等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨 [J]. 环境科学学报, 2008(3) : 401-407. (YU Tao, MENG Weng, ONGLEY E, et al. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(3) : 401-407. (in Chinese)
- [20] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟 [D]. 北京: 北京师范大学, 2007.
- [21] 刘瑞民, 杨志峰, 丁晓雯, 等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(12) : 2407-2414. (LIU Ruiming, YANG Zhifeng, DING Xiaowen, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin [J]. Environmental Science, 2006, 27(12) : 2407-2414. (in Chinese)
- [22] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算 [J]. 环境科学, 2009, 30(3) : 668-672. (LI Zhaofu, YANG Guishan, LI Hengpeng. Estimated nutrient export loads based on improved export coefficient model in Xitiaoxi Watershed [J]. Environmental Science, 2009, 30(3) : 668-672. (in Chinese)

(收稿日期: 2014-05-21 编辑: 高渭文)