

基于 SWAT 模型的植草河道对非点源污染控制效果的模拟研究

张培培¹, 李 琮², 阚红涛², 王嘉薇¹, 于雯雯¹, 刘瑞民^{1*}

(1.北京师范大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875; 2.宜昌市水文局, 湖北 宜昌 443000)

摘要:以三峡库区香溪河流域为研究区, 基于 SWAT 模型, 通过收集整理香溪河流域 2011 年 DEM、土壤、土地利用数据和 1970—2011 年的气象数据, 在模型得到满意的率定和验证的基础上, 模拟分析了流域内农业非点源污染的空间分布特征, 评价了植草河道措施对于农业非点源污染的削减效果。模拟结果表明, SWAT 模型能够较好地模拟研究区非点源污染, 研究区 TN 和 TP 污染负荷集中分布在南阳水系, 以及古夫、高岚水系的下游区域。全流域 TN 和 TP 污染总负荷分别高达 1388 t 和 239 t。实施植草河道措施之后, TN 和 TP 污染负荷分别降到 1120 t 和 157 t, 共削减了 16.7% 的 TN 负荷和 34% 的 TP 负荷。因此, 从控制效果来看, 植草河道能够很好地控制三峡库区香溪河流域的农业非点源污染, 尤其是对 TP 污染控制效果更加明显。

关键词:非点源污染; SWAT 模型; 最佳管理措施; 植草水道

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)06-1204-06 doi:10.11654/jaes.2014.06.022

Effectiveness of Vegetated Waterway in Controlling Non-Point Source Pollution Based on SWAT Model

ZHANG Pei-pei¹, LI Qiong², KAN Hong-tao², WANG Jia-wei¹, YU Wen-wen¹, LIU Rui-min^{1*}

(1.State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Yichang Hydrologic Bureau, Yichang 443000, China)

Abstract: Non-point source (NPS) pollution is considered to be a major contributor to local water degradation in the Three Gorges Reservoir Area of China. Xiangxi River, which is a large watershed near the Three Gorges Reservoir, was selected to investigate the effectiveness of vegetated waterway in alleviating agricultural NPS pollution using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. DEM, soil data, land use data in 2011 and the meteorological data from 1970 to 2011 were input to the SWAT model to simulate total N (TN) and total P (TP) pollution loads before and after applying vegetated waterway management in 2011. The pollution loads were divided into five classes with Jenk optimal methods. The SWAT model generated satisfying results. Total N and TP pollution loads were 1388 t and 239 t, respectively, which were both concentrated in Nanyang River and the downstream of Gufu and Gaolan River. Applying vegetated waterway reduced TN and TP pollution loads to 1120 t and 157 t, respectively. The reduction rates of TN and TP were 16.7% and 34%, respectively. These results could help local managers design effective management practices to improve water quality in similar watersheds.

Keywords: non-point source pollution; SWAT model; best management practices; vegetated waterway

当前非点源污染在美国地表水总污染中已占 60% 以上, 我国的非点源污染现状也十分严峻, 国内外已经针对非点源问题展开了一系列研究^[1-4]。非点源污染不同于来源固定且易监测的点源污染, 因为它的

来源往往很难界定^[5], 农业活动已经成为最重要的非点源污染来源。国内外较为认可的治理农业面源污染的方法主要是最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPs)^[6], 包括工程类 BMPs 和非工程类 BMPs。其主要评估方法是实地监测、养分平衡理论、风险评估和模型模拟^[7], 其中模型模拟的方法较为常用且效率较高, 适用于较大流域的农业非点源污染的评估工作^[1, 8-10]。在众多的农业非点源模型中, SWAT 模型是一个被广泛认可和应用的模型^[3, 11], 它能够很好地模

收稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金 (41001352); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 张培培 (1988—) 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要研究方向为水流域管理。E-mail: zhangpei@bnu.edu.cn

* 通信作者: 刘瑞民 E-mail: liurmi@bnu.edu.cn

拟和评价梯田、瓦管排水、等高种植、等高条植、火烧、植被过滤带和植草河道管理措施在流域面源污染方面的效果^[12]。但是当前的研究大多偏向于非工程类 BMPs 模拟,在工程类 BMPs 的模拟研究上较为匮乏^[13]。

植草河道是一种工程管理措施,通过设计植草的河道,输送田地的径流,借助河道中的植被可以降低流速,保护水道不受汇集水流的潜在冲刷^[14]。国外有学者基于 SWAT 模型研究发现植被过滤带可以有效削减水中的粪便细菌和泥沙含量^[15],也有学者发现植草河道可以有效削减河流中的杀虫剂含量^[16],此外植草河道还能有效削减径流和非点源氮磷污染^[17-18]。但是国内外目前多偏向于微观实验研究,相关宏观模拟评估工作研究较少^[19-21]。本研究以香溪河流域为研究区,基于 SWAT 模型模拟评价植草河道工程型管理措施对于三峡流域农业非点源污染的治理效果。该研究将为三峡流域的农业非点源工程治理措施提供科学的指导,对于 SWAT 在国内的应用和推广有很好的示范意义。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

香溪河是位于三峡流域湖北省境内一条重要的一级支流,发源于神农架,全长 33 km(图 1)。全流域跨东经 110°25′~111°06′,北纬 31°04′~31°34′之间,流域面积 3099 km²,属典型山区季节性河流,多年平均流量 65.5 m³·s⁻¹。湿润亚热带大陆性季风气候,春季冷暖多变,夏季雨量集中,秋季多阴雨,冬季多雨雪,

年均降雨量 1015 mm,年平均气温为 16.6℃。香溪河位于三峡大坝下游仅 38 km 处,包括南阳、古夫和高岚三条重要水系,受三峡蓄水影响较大,富营养化严重^[22]。近年来由于流域内兴山县土地利用变化较大,大量坡耕地被开发,植被破坏和陡坡开垦造成严重的水土流失而引发的非点源污染也日渐严重^[23]。

1.2 模型与方法

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)^[24]模型是由美国农业部(USDA)农业研究中心开发的较为成熟的半分布式流域模型,主要用于连续模拟水文、水质和杀虫剂的迁移转化过程。SWAT 模型需要输入大量的参数,但若调整每个参数的值几乎是不可能的,因此模型的敏感性分析是调参之前参数选取的先决条件。本研究选择 LHS 法和 OAT 法相结合的方式确定参数敏感性,采用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI2 方法对 SWAT 模型进行率定和验证。SUFI2 方法具有较高的参数率定效率^[25],并且在一定程度上考虑了输入数据的不确定性,它通过由计算机按照一定的规则自动优选,系统地找到一组参数,使给定的目标函数达到最优^[26]。本研究选取 R^2 (决定系数)和 Nash 系数(E_{NS})^[27]作为模型的评价指标。具体公式为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (1)$$

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

通过调研,收集到 2007—2011 年兴山水文站的流量和水质数据(数据来源于宜昌市水利局和水文局)。其中,2007—2009 年的月监测数据用于模型的参数率定,2010—2011 年的月监测数据用于模型验证。根据前人研究总结^[28-29],当 $E_{NS} > 0.5$,且 $R^2 > 0.6$ 时视为模型结果满意。

SWAT 模型所用的输入地理数据全部为 2011 年数据,分别是 30 m 分辨率的土地利用,DEM 数据和土壤数据。输入气象数据为兴山和秭归两县的气象监测站点 1980—2012 年的气象数据。模型模拟时间为 2005—2011 年,其中 2005—2006 年为模型预热期,2007—2011 年为模型率定和验证期,2011 年模拟结果又分为实施植草河道前和实施植草河道后两种,作为治理效果讨论所用数据。

植草河道通过降低流速来增加颗粒状污染物的沉积,拦截泥沙和其他污染物,它将在香溪河流域所有子流域设置。SWAT 中的植草水道的渠道边坡比为 8:1,宽度为 5 m,渠深为 0.3 m。所有模拟结果将采用

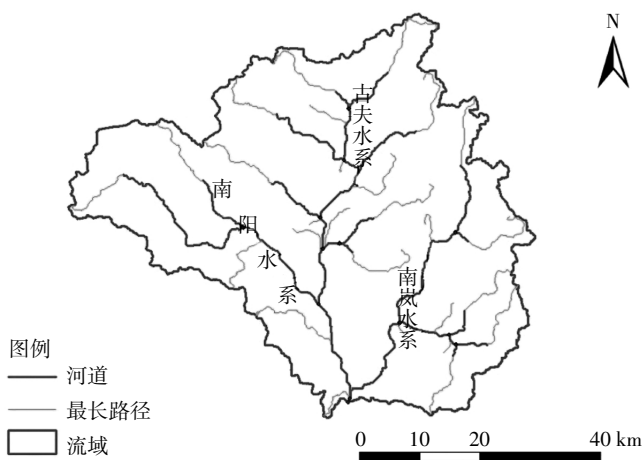


图 1 香溪河流域地理位置和水系图

Figure 1 Location of Xiangxi River Watershed and three major rivers

詹金斯优化方法(Jenk optimal method)^[30]分成五类,并借助 ArcGIS10.1 形成非点源污染的空间分布图。通过比较植草水道实施前后的 SWAT 模型模拟的 TN 和 TP 输出结果,评价其治理非点源污染的效果。

2 结果与讨论

2.1 率定和验证结果

根据收集和整理的基础数据,SWAT 模型率定和验证结果如表 1 所示。模型在率定期流量、TN 和 TP 都取得了满意的结果,Nash 效率系数和 R^2 都大于 0.6,流量的率定结果要略好于 TN 和 TP。这是因为 TN 和 TP 跟流量相关性较大,先率定流量后才率定 TN 和 TP。根据以往文献总结^[31],模型在验证期的各项指标指示 SWAT 模型能够成功地用于研究区,Nash 效率系数和 R^2 也都大于 0.6,因此本研究采用 SWAT 模型运行获得的结果较为可信。

表 1 模型率定和验证指标结果

Table 1 Results of SWAT calibration and validation

指标	率定期		验证期	
	E_{NS}	R^2	E_{NS}	R^2
流量	0.88	0.70	0.74	0.67
TN	0.79	0.60	0.62	0.67
TP	0.81	0.75	0.78	0.73

2.2 管理措施效果与讨论

基于 SWAT 模型的率定和验证结果,本研究对香溪河流域 2011 年的 TN 和 TP 污染负荷进行了模拟和分析,并在所有子流域内设置最佳管理措施——植草河道,预测模拟 2011 年的香溪河流域实施最佳

管理措施后的水质情况。

2.2.1 总氮削减效果分析

模拟结果表明,2011 年的香溪河流域 TN 污染负荷总量达到 1388 t,从图 2(左)可以看出,污染主要集中在流域的中下游区域,如子流域 5、8、14、17、18、25、26 和 27。污染最严重的是子流域 27(TN 负荷为 318.5 t),其次是子流域 25(TN 负荷为 244.3 t),再次是子流域 18(TN 负荷为 148 t),其他子流域 TN 污染负荷均在 10 t 以内。这主要由以下原因造成:(1)子流域 5、8、14、17、18、25、26 和 27 主要分布在干流上,汇集了其他流域迁移来的污染物质;(2)这些子流域是农民聚居的主要区域,相对不完善的环境基础设施使得农村生活成为非点源污染的一个重要来源;(3)此地分布有大片的紫色土,紫色土易淋溶,较脆弱;(4)农耕活动集中此地,水费的不合理也加剧了非点源污染的形成。

通过最佳管理措施——植草河道模拟结果分析,TN 流域总负荷削减到 1120 t,削减比例高达 16.7%,其中各个子流域的削减比例略有不同,结果如图 2(右)所示。各个子流域的污染负荷分布在 4.6~265.3 t 之间,污染较为严重的子流域 27、25、18、14、26 的 TN 负荷分别从 318.5、244.3、148、88.6、76.2 t 削减到 265.3、190、112.3、75、53.2 t,所有子流域的 TN 削减百分比为 6%~27%,幅度较大,与前人研究结果一致^[32-34]。

2.2.2 总磷削减效果分析

模拟结果表明,2011 年的香溪河流域 TP 污染负荷总量达到 239 t,从图 3(左)可以看出,污染主要集中在中下游区域,如子流域 8、14、17、18、25、26 和 27,它们的污染负荷大于 10 t。污染最严重的是子流域 27

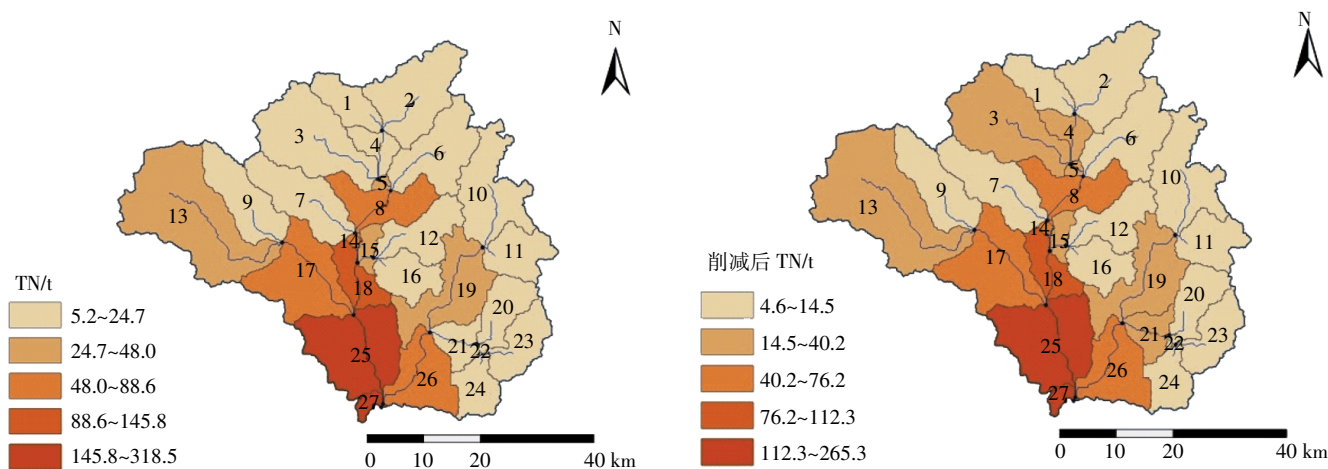


图 2 实施最佳管理措施——植草河道前后的 TN 污染负荷

Figure 2 Total N loads of studied area before and after application of vegetated waterway in 2011

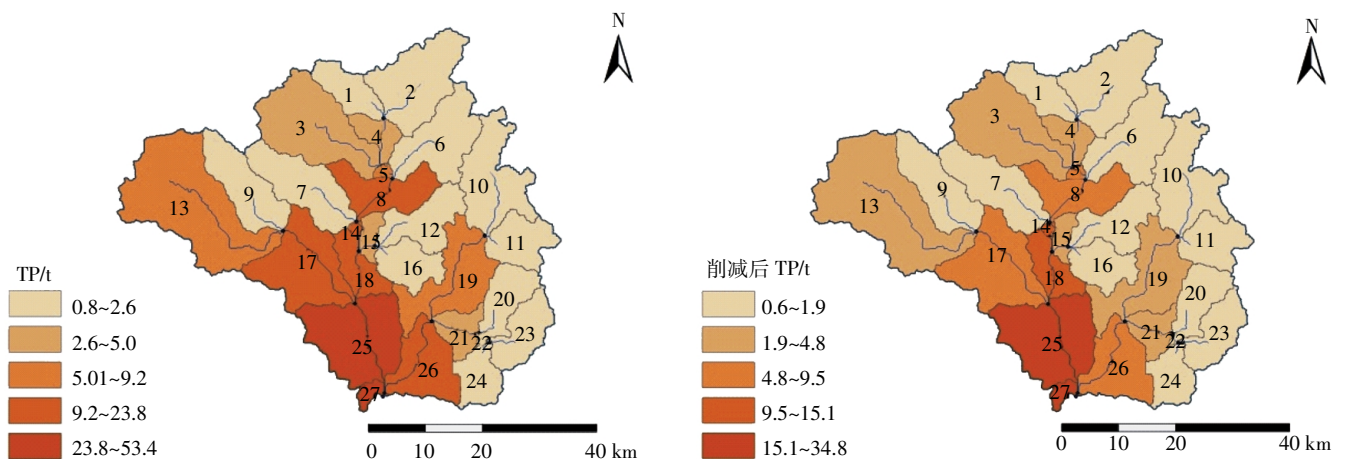


图3 实施最佳管理措施——植草水道前后的 TP 污染负荷

Figure 3 Total P loads of studied area before and after application of vegetated waterway in 2011

(TP 负荷为 53.4 t), 其次是子流域 25 (TP 负荷为 40.6 t), 再次是子流域 18 (TP 负荷为 23.8 t), 其他子流域 TP 负荷均低于 16 t。TP 的污染负荷也主要集中在河流主干道上, 其主要原因除了农村生活和农业活动带来的面源污染之外, 还有可能是由于这些区域富含磷矿但磷矿开采不合理。

通过对植草河道模拟结果进行分析发现, TP 流域总负荷削减到 157 t, 全流域总削减比例高达 34%, 其中各个子流域的削减比例略有不同, 结果如图 3 (右) 所示, 各个子流域的污染负荷分布在 0.6~34.7 t 之间。污染较为严重的 5 个子流域 27、25、18、14 和 26 分别从 53.4、40.6、23.8、16.3、12.6 t 削减到 34.8、25.5、15.1、11.5、7.8 t, 削减百分比高达 39%。这与 TN 研究结果一致, 在污染较为严重的区域设置植草河道措施效果更佳。植草河道在香溪河流域对于农业非点源起到了很好的削减控制作用, TN 和 TP 的平均削减百分比分别为 16.7% 和 34%, 对于 TP 的控制效果优于 TN, 几乎相当于 TN 效果的两倍, 说明植草河道对于控制 TP 污染更加有效, 与前人的研究结果一致^[13, 17, 35-36]。但是由于植草河道主要作用是通过削减径流, 进而降解和吸收 TN 和 TP, 更加适用于暴雨较多、径流较大或者山区流域, 因此推广使用时需要注意。

此外, 2011 年香溪河流域 TN 和 TP 污染的空间分布比较相似, 大都集中在南阳水系以及古夫、高岚水系的下游区域。每个子流域削减效果差异较大, 污染负荷较大的子流域的效果一般较好, 使用最佳管理措施的潜力较大。这也佐证了前人关于最佳管理措施应设置在关键源区的理论^[37]。

3 结论

研究表明, SWAT 模型能够较好地模拟实施植草河道措施前后三峡香溪河流域的非点源污染的负荷空间分布 (Nash 效率系数和 R^2 也都大于 0.6)。2011 年香溪河流域 TN 模拟污染负荷总量达到 1388 t, 集中在子流域 5、8、14、17、18、25、26 和 27。TP 模拟污染总量达到 239 t, 集中在子流域 8、14、17、18、25、26 和 27。TN 和 TP 的污染空间分布基本一致, 集中在中下游区域, 并且它们在每一个子流域的模拟污染负荷都大于 10 t。在研究区采用宽度为 5 m、渠深为 0.3 m 的植草河道措施, 模拟发现可以成功削减 16.7% 的 TN 负荷和 34% 的 TP 负荷。这证明 SWAT 能够很好地用于香溪河流域的非点源污染模拟, 并且能够有效的评价植草河道治理非点源污染的环境效果, 值得推广。植草河道在削减非点源氮磷污染方面对于 TP 的削减效果更好。该研究能够给三峡流域农业非点源污染植草河道工程治理提供一定的科学合理指导, 本研究中所用的方法体系对其他工程措施的效果实时评价也有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] Liu R M, Zhang P P, Wang X J, et al. Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River watershed[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 9-18.
- [2] 张维理, 冀宏杰, KOLBE H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1018-1025.

ZHANG Wei-li, JI Hong-jie, KOLBE H, et al. Estimation of agricultur-

- al non-point source pollution in China and the alleviating strategies: II. Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1018-1025.
- [3] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 84: 104-111.
- [4] 侯孝宗. 农业非点源污染的研究进展与治理对策[J]. 工程与建设, 2013, 27(4): 440-442.
- HOU Xiao-zong. The research advances and countermeasures advances of agricultural non-point pollution[J]. *Engineering and Construction*, 2013, 27(4): 440-442.
- [5] 贺维生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 88-92.
- HE Chan-sheng, FU Bo-jie, CHEN Li-ding. Non-point source pollution control and management[J]. *Environmental Science*, 1998, 19(5): 88-92.
- [6] 金婧靓. 农业非点源污染的管理及控制对策研究[J]. 今日科苑, 2010(21): 109-110.
- JIN Jing-liang. Study on management and control countermeasures of agricultural non-point source pollution[J]. *Modern Science*, 2010(21): 109-110.
- [7] Cherry K A, Shepherd M, Withers P J A, et al. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(1-2): 1-23.
- [8] Tuppad P, Kannan N, Srinivasan R, et al. Simulation of agricultural management alternatives for watershed protection[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(12): 3115-3144.
- [9] Shen Z, Hong Q, Yu H, et al. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8): 1971-1978.
- [10] Niu L, Hao J, Zhang B, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 813-820.
- [11] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 124-128.
- HU Xue-tao, CHEN Ji-ning, ZHANG Tian-zhu. A study on non-point source pollution models[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(3): 124-128.
- [12] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 941-952.
- XIA Jun, ZHAI Xiao-yan, ZHANG Yong-yong. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 941-952.
- [13] 王良民, 王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2074-2080.
- WANG Liang-min, WANG Yan-hui. Research and application advances on vegetative filter strip[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [14] 蔡婧, 李小平, 陈小华. 河道生态护坡对地表径流的污染控制[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1326-1334.
- CAI Jing, LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua. The effects of ecological riverbank slopes on surface runoff pollution control[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(7): 1326-1334.
- [15] Parajuli P B, Mankin K R, Barnes P L. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(10): 1189-1200.
- [16] Zhang X, Zhang M. Modeling effectiveness of agricultural BMPs to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(10): 1949-1958.
- [17] Humberto Blanco-Canqui C J G S. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss[J]. *Soil Science Society of America*, 2004, 68: 1670-1678.
- [18] Sahu M, Gu R R. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(8): 1167-1177.
- [19] 章茹. 流域综合管理之面源污染控制措施(BMPs)研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 159.
- ZHANG Ru. Study on best management practices: Non-point source pollution control for watershed management[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008: 159.
- [20] Yahyapour S, Golshan A, Ghazali A H B. Removal of total suspended solids and turbidity within experimental vegetated channel: Optimization through response surface methodology[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2013.
- [21] 孙棋棋, 张春平, 于兴修, 等. 中国农业面源污染最佳管理措施研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 772-778.
- SUN Qi-qi, ZHANG Chun-ping, YU Xing-xiu, et al. Best management practices of agricultural non-point source pollution in China: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 772-778.
- [22] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 7-11.
- CAI Qing-hua, HU Zheng-yu. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 7-11.
- [23] Wang X J, Liu R M, Gong Y W. Simulation of the effect of land use/cover change on non-point source pollution load in Xiangxi River watershed[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(5): 1194-1200.
- [24] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment Part 1: Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [25] 魏丹, 刘智勇, 李小冰. SWAT模型及SUFI-2算法在秃尾河上游流域径流模拟中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 200-206.
- WEI Dan, LIU Zhi-yong, LI Xiao-bing. The application of SWAT and SUFI-2 to runoff simulation in Tuweihe(upper) watershed[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6): 200-206.
- [26] Abbaspour K C, Johnson C A, van Genuchten M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(4): 1340-1352.

- [27] 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.
- [28] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological*, 2007, 50(3):885-900.
- [29] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Baltas E, et al. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(19):3500-3512.
- [30] 南哲. 北京小流域非点源污染风险评价及 BMPs 选择研究[D]. 北京:首都师范大学, 2013:68.
NAN Zhe. Research on the assessment of the non-point source pollution risk and the selective of BMPs[D]. Beijing:Capital Normal University, 2013:68.
- [31] Niraula R, Kalin L, Wang R, et al. Determination nutrient and sediment critical source area with SWAT:Effect of lumped calibration[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(1):137-147.
- [32] 张汪寿. 平原区非点源污染特征及关键源区的识别:以武清区为例[D]. 北京:首都师范大学, 2012:57.
ZHANG Wang-shou. The characteristic of non-point source pollution and identification of critical source areas for plain area: A case study in Wuqing District[D]. Beijing:Capital Normal University, 2012:57.
- [33] 周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别:农业非点源污染控制方法[J]. *生态学报*, 2005, 25(12):3368-3374.
ZHOU Hui-ping, GAO Chao, ZHU Xiao-dong. Identification of critical source areas: An efficient way for agricultural nonpoint source pollution control[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2005, 25(12):3368-3374.
- [34] Tripathi M P, Panda R K, Raghuwanshi N S. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 85(3):365-379.
- [35] Rahman A, Shafiqur R, Larry C. Efficacy of vegetative filter strips (VFS) installed at the edge of feedlot to minimize solids and nutrients from runoff[J]. *Agricultural and Biosystems Engineering*, 2012, 4(14):9-21.
- [36] Bhattarai R, Kalita P K, Patel M K. Nutrient transport through a vegetative filter strip with subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(5):1868-1876.
- [37] Frey M, Konz N, Stamm C, et al. Identification of critical source areas for diffuse water pollution[J]. *Agrarforschung Schweiz*, 2011, 2(4):156-161.