

沙河流域非点源溶解态氮负荷模拟及源解析

张亚尼¹, 李泽利², 邓小文², 赵兴华², 梅鹏蔚², 张环¹

(1. 天津工业大学 环境与化学工程学院, 天津 300387; 2. 天津市环境监测中心, 天津 300191)

摘要:利用通用流域负荷模型(GWLF)对沙河流域2006—2012年的溶解态氮(DN)负荷进行了定量分析和来源解析,并基于模型分析了各污染源的季节性差异。模型在沙河流域适用性良好,月径流和DN负荷在校准期和验证期的 E_{NS} 和 R^2 都大于0.6,模型具备可靠的模拟能力。模拟结果表明,沙河流域DN年均负荷以非点源污染为主,占总污染负荷的82.7%。在所有土地利用类型中,耕地的DN负荷贡献率最大(64.5%),表明人类影响下的农业生产活动是流域非点源污染最主要的来源。同时,沙河流域DN负荷污染源组成表现出明显的季节性差异,丰水期地表径流是最主要的污染源(47.0%),而枯水期农村生活污染源(45.0%)和点源(23.1%)贡献相对显著。因此,在制定负荷削减方案时,应考虑氮污染源的季节性。

关键词:沙河流域; GWLF; 非点源; 溶解态氮; 污染源解析

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0352-05

Simulation and Source Apportionment of Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load in Shahe Watershed

ZHANG Yani¹, LI Zeli², DENG Xiaowen², ZHAO Xinghua², MEI Pengyu², ZHANG Huan¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Environmental Monitoring Centre, Tianjin 300191, China)

Abstract: Generalized Watershed Loading Functions (GWLF) was employed to estimate dissolved nitrogen (DN) load and perform source apportionment in Shahe Watershed from 2006 to 2012. The seasonal variation of pollution source was also analyzed based on model results. Satisfactory performance of GWLF was revealed by the E_{NS} and R^2 of greater than 0.6 in calibrating and validating streamflow and DN. The result indicated that the nonpoint source pollution had the highest ratio of the annual average DN load, accounting for 81.6%. Among all the land uses, farmlands contributed most to DN load in Shahe watershed, indicating that agricultural activities dominated by human were the major contributor of nonpoint source pollution. Besides, seasonal differences of the contribution ratio from DN pollution source were significant. Runoff was the major pollution source in the wet season; however, septic system and point source were more significant in the dry season. In order to efficiently reduce and control nitrogen pollution in Shahe Watershed, it is necessary to consider the difference of pollution source constitution between wet season and dry season with respect to the formulation of pollution reduction plan and control measure preference.

Keywords: Shahe Watershed; GWLF; nonpoint source; dissolved nitrogen; source apportionment of pollution

随着工业废水和城市生活污水等点源污染控制水平的提高,非点源污染的防治问题成为环境工作者关注的焦点^[1],作为氮磷负荷的重要来源,非点源污染已成为引起水体富营养化^[2]、水体生态功能降低^[3]和饮用水源污染等问题的主要因素^[4]。由于非点源污染的形成过程较复杂,机理模糊,影响因子复杂^[5],

且与流域水文过程关系紧密^[6],这使得对非点源污染负荷及其来源构成的判断变得十分困难^[7]。在定量估算非点源污染负荷方面,流域污染负荷模型是重要的技术手段,目前多采用的有结构简单的统计模型、基于经验的输出系数模型和基于水文过程的机理模型^[8-9]。统计模型无法对污染物的来源和传输过程进

行模拟;而输出系数模型是根据不同土地利用类型的污染物排放量与输出系数的乘积之和进行计算,不考虑非点源污染发生的具体过程,不能提供逐年或逐月的污染物负荷估算值^[10];机理模型通过水文过程、土壤侵蚀和污染物的输移过程等,应用非点源污染发生的物理机制定量估算污染物负荷产出^[11],但其输入数据及参数需求量大,机理复杂,使这类模型的推广和应用受到了限制,尤其在资料稀缺地区无法实现其应用。

通用流域负荷模型(Generalized Watershed Loading Functions, GWLF)是一个靠水文驱动的准经验性集总参数模型^[12-14],相比于复杂机理模型,其复杂程度适中^[15],所需数据量相对较少^[16],能够广泛应用于流域径流与污染负荷模拟;相比输出系数模型,其考虑水文过程,能够提供逐年逐月的污染物负荷估算值及负荷来源,结果可靠且能满足一般的环境管理需求。由于 GWLF 模型原始算法已经在不同平台进行了二次开发,本研究采用其在微软 Excel 平台下开发的 ReNuMa2.2.2 版本,选取我国北方于桥水库流域上游最大水系沙河流域作为研究对象,由于目前水库流域总氮水平显著偏高(浓度为 0.1~15.5

mg/L),且水体中的氮主要以溶解态形式存在。因此,对沙河流域 2006—2012 年月径流和溶解态氮(dissolved nitrogen, DN)负荷进行模拟,定量对 DN 负荷进行分析和来源解析,确定不同土地利用类型的 DN 负荷贡献率,并对流域内 DN 负荷的来源及其季节性特征进行探讨。

1 研究方法

1.1 研究区概况

沙河是于桥水库流域上游最大的水系,源于河北省兴隆县大青山,流域面积 890.3 km²,全长 70 km,沙河干流自东北斜贯西南直入于桥水库,它沿程接纳了房山沟、蒲池河、马兰河等主要大小支流,构成较典型的羽状水系。流域内主要土地利用类型为耕地和林地。该流域多年平均气温 12.9℃,最高月均气温 27.2℃,最低月均气温 -5.7℃;沙河呈现季节性河流特征,年平均降水量为 650.7 mm,但降水高度集中在汛期的 7—9 月份,占年平均降水量的 70%~80%。

1.2 模型数据

ReNuMa 模型所需的原始数据来源及处理步骤见表 1。

表 1 ReNuMa 模型输入数据来源及处理

| 数据项目 | 数据来源 | 数据处理 |
|---------|---|--|
| 河网和流域边界 | 中国科学院科学数据库 DEM 图(90 m×90 m) | 利用获得的 DEM 图,使用基于 ArcGIS 10.1 平台的 Arc Hydro 1.3 插件生成,获得沙河流域基础属性信息 |
| 土地利用 | 地球系统科学数据共享平台 1 km 格网全国土地利用数据 | 利用 ArcGIS 10.1 计算流域内不同土地利用面积加和,得到流域内 9 种土地利用类型,本研究不考虑土地利用面积的改变导致 DN 负荷变化 |
| 人口 | 地球系统科学数据共享平台 1 km 格网全国人口空间化数据 | 利用 ArcGIS 10.1 以河道周边 1000 m 为界划分缓冲区,分别计算缓冲区内的人口数,用于计算生活污染源 DN 负荷。 |
| 降水量 | 蓟县气象局提供的流域内沙河水平口站、遵化站和大河局站 3 个雨量站点 2006—2012 年逐日降水量 | 利用 ArcGIS 10.1 进行泰森多边形插值获得流域平均降雨量 |
| 气温 | 中国气象科学数据服务网提供的蓟县和遵化市 2 个地面交换站 2006—2012 年日均气温 | 2 个站点日均气温平均值为流域日均气温 |
| 施肥量 | 天津市环境监测中心提供的污染源普查数据和 2006 年《天津市统计年鉴》 | — |
| 水量 | 天津市水务局提供的沙河水平口站 2006—2012 年的逐日径流数据 | 对水文站流量数据进行逐月汇总,利用逐月数据除以相应的流域面积,得到模型所需的径流深数据 |

1.3 模型参数校准和验证

采用模型自带的规划求解加载宏对模型参数进行校准,此时径流和 DN 负荷的逐月实测值和模型模拟值的差值平方和最小。用于校准的径流实测值来自沙河流域的沙河水平口站点, DN 负荷实测值来自流域出口的沙河桥断面^[17-18]。

模型的验证主要是利用纳什系数(Nash-Sutcliffe) E_{NS} 和相关系数 R^2 对模型的模拟结果进行评价。 E_{NS} 是国际上通用的模型校准目标函数,它表示

模型预测值和监测值的拟合程度(如公式 1), E_{NS} 的取值范围在 $-\infty \sim 1$ 之间,当 E_{NS} 小于 0 时,表示模型预测值的准确度不如直接采用监测平均值,该模拟结果不可靠; E_{NS} 的值越接近 1,表示计算值与监测值匹配度越好。通常取 E_{NS} 大于 0.5 作为模型模拟效果较好的评价标准。相关系数主要是对模拟值和实测值的吻合程度进行评价,根据模拟值和实测值的线性函数关系 $y=kx$ 经过回归分析得到,一般认为 R^2 大于 0.6 时模型的模拟结果可接受。

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

式中: O_i 表示实际监测值; P_i 表示模型预测值; \bar{O} 表示实际监测值的算术平均值; MSE 指预测值与实测值之间的误差平方和的均值; $\text{var}(O)$ 则表示实测值的方差。

2 模拟结果与分析

2.1 参数校准

选取沙河水平口站 2006—2012 年共 7 a 的逐月水量和水质数据, 作为校准和验证模型有效的依据。其中, 将 2006—2009 年共 4 a 的数据用于对模型参数的校准; 将 2010—2012 年共 3 a 的数据作为验证

数据, 用于对校准所得参数集的有效性进行独立检验。校准过程按照先水文参数后水质参数的顺序进行。利用校准所得到的参数对沙河流域进行逐月水量和 DN 负荷的模拟。

2.2 河川径流量模拟结果

利用模型基础数据集以及校准得到的模型水文参数集, 模拟得到 2006—2012 年沙河流域出口断面的逐月水量(图 1)。将模拟结果与沙河流域沙河水平口监测站实测值对比, 在校准期模型纳什效率系数 E_{NS} 为 0.83, 线性决定系数 R^2 为 0.85; 而验证期, 纳什系数也达到 0.86, R^2 达到 0.89, 说明经校准后地模型能够很好地模拟流域的水文过程, 可依据该结果和参数数据进一步进行面向典型污染物负荷通量的水质模拟。

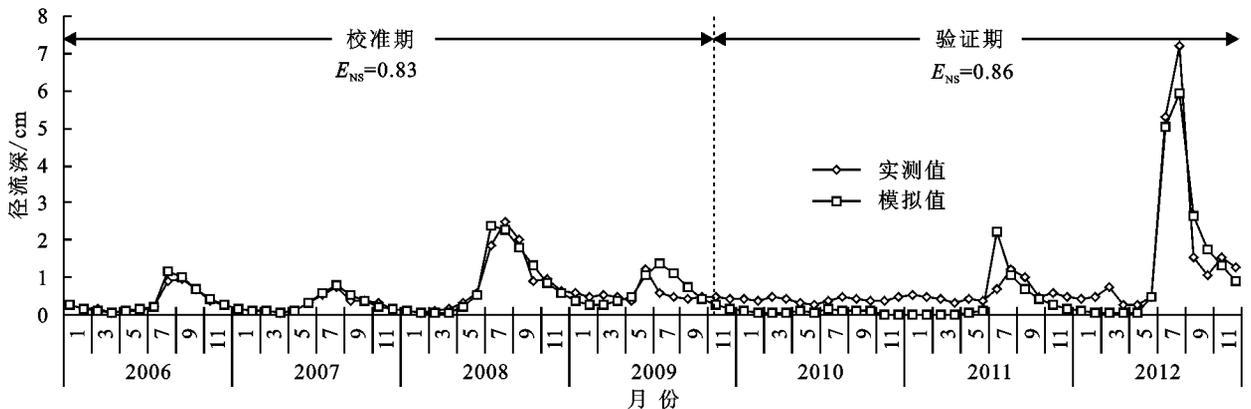


图 1 沙河流域水量模拟值和实测值拟合图

2.3 水质模拟结果

与水文过程类似, 利用模型基础数据集以及校准得到的模型水文、水质参数, 模拟得到 2006—2012 年沙河流域出口断面的逐月 DN 负荷(图 2)。

将模拟结果与沙河流域沙河水平口监测站实测值

对比, 在校准期模型纳什效率系数 E_{NS} 为 0.65, 线性决定系数 R^2 为 0.68; 而验证期, 纳什系数也达到 0.64, R^2 达到 0.78, 说明经校准后的模型能够较好地模拟流域 DN 负荷的水文化学过程, 可依据模型结果和参数数据集进一步进行污染源解析及其特征分析。

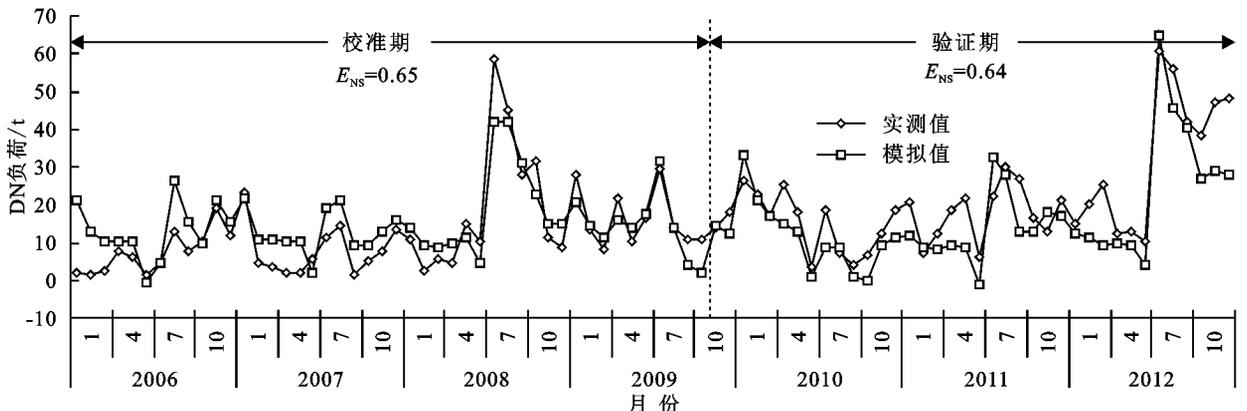


图 2 沙河流域 DN 负荷模拟值和实测值拟合图

3 污染源解析及特征分析

3.1 DN 负荷来源解析

根据 2006—2012 年均 DN 负荷计算结果, 沙河流域 DN 年均负荷以非点源污染为主, 占总污染负荷

的 82.7%。对多年平均 DN 负荷解析, 结果见图 3。图 3A 表示的是 DN 的来源大类, 图 3B 表示的是针对农业用地的 DN 解析结果。从图 3A 可知, 农村生活污染源为 DN 负荷的主要来源, 贡献率大约为 33.7%, 这可能与沙河沿岸居住人口较多, 农村生产活动密集关系密

切;此外,地下水源同样不可小视,贡献率为 29.4%,事实上,由于浅层地下水易受到来自地表化肥施用过程的污染^[19],随着降水和径流的淋溶渗透作用,硝酸盐 N 很容易在土壤层迁移并进入地下水当中^[20],这造成地下水成为重要 DN 负荷来源的主要原因;其他 DN 负荷来源依次为点源、地表径流源和大气沉降源。显然,由陆域向水体迁移过程中产生的 DN 负荷要远高于大气沉降源产生的 DN 负荷,是沙河流域最主要的非点源污染来源,因此在量化分析流域污染负荷时,需对各种土地利用类型进行细分,以识别对 DN 负荷贡献最大的土地利用类型。

从不同土地利用类型来看,耕地对 DN 负荷的贡献率最大(64.5%),这主要与农业生产活动和过量施肥有关,由于降水的很大一部分比例会形成地表径流,而该地区很大一部分农田沿河岸分布,水利传输距离较短且没有良好的生态河岸过滤带,会使耕地对河流 DN 负荷带来较大影响;其次,结合流域不同土地利用类型面积

所占比例(表 2),耕地和灌木林面积在沙河流域占比较大,导致两者对流域 DN 负荷贡献较大。从图 3B 还可看出,河渠的 DN 负荷贡献比例占到 10.6%,这主要是因为河渠的 CN 值较高,达到 100,降水全部形成地表径流,使河渠对 DN 负荷贡献率较高。

因此,由 2006—2012 年均 DN 负荷污染源解析结果,要实现对沙河流域氮污染进行有效的管理与控制,可减少流域沿岸居住人口数,由于流域内河岸周边的人口密度相对较高,特别是在农村地区没有污水管网和化粪池系统,导致大量的农村居民生活污水和畜禽养殖废物随着降水直接入河,因此减少流域内人口数是控制农村生活污染 N 负荷的有效措施之一;其次,耕地比例相对较大,加之过量化肥可随着丰富的降水从地表径流和地下水污染中流失,因此,合理规划耕地面积,调整土地结构,并积极贯彻科学的施肥技术,提高当地居民的生态环保意识可在控制流域非点源污染中发挥作用。

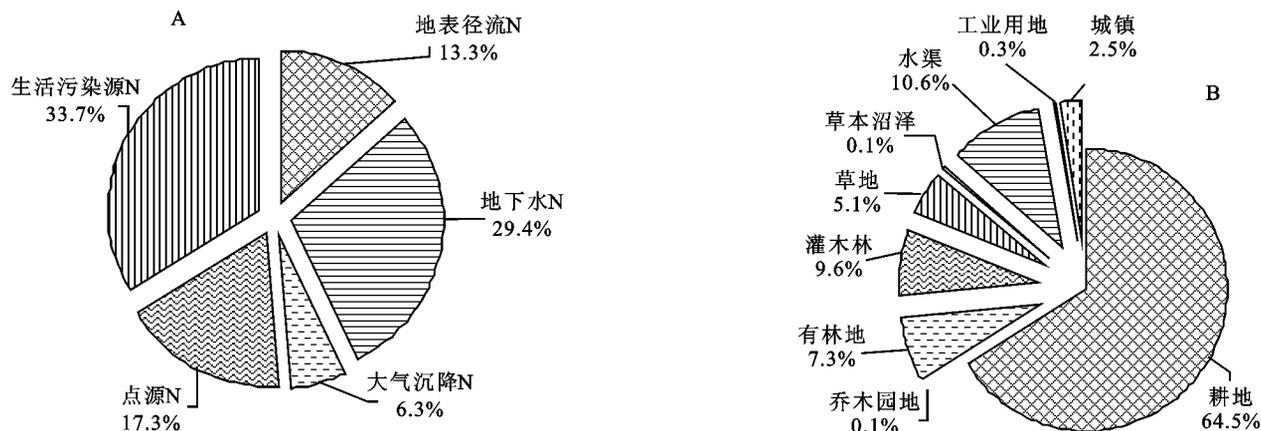


图 3 2006—2012 年不同来源 DN 负荷贡献率

表 2 土地利用结构

| 项目 | 土地面积 | | DN 负荷 | |
|------|--------------------|----|-----------|----|
| | 面积/hm ² | 次序 | DN 负荷比例/% | 次序 |
| 耕地 | 32483.23 | 1 | 62.8 | 1 |
| 灌木林 | 21436.95 | 2 | 10.6 | 2 |
| 有林地 | 14728.41 | 3 | 8.3 | 4 |
| 草地 | 12279.50 | 4 | 6.1 | 5 |
| 居住地 | 5566.74 | 5 | 2.2 | 6 |
| 水渠 | 934.78 | 6 | 9.8 | 3 |
| 草本沼泽 | 679.14 | 7 | 0.1 | 9 |
| 乔木园地 | 643.51 | 8 | 0.1 | 8 |
| 工业用地 | 280.71 | 9 | 0.2 | 7 |

3.2 DN 负荷来源的季节性差异

为分析污染源组成的季节性变化,得到不同水情条件下的沙河流域 DN 负荷构成特征,对不同月份组内的 DN 负荷贡献构成分别展开解析(表 3)。分析结果可知,地表径流源在水量丰沛时期贡献率最高,且其贡献率随水量减少而下降,到枯水期最低;与地表径流源相反,点源和农村生活源的贡献率随水量的减少而上升,虽然点源

年总贡献率较低,但在枯水期两者的影响较为显著;而地下水源和大气沉降源在全年贡献比例基本稳定。总体上,流域内年降水分配不均,产生非点源污染的径流事件主要集中在雨量充沛的丰水期;在枯水期,生活污水源为最主要的污染源;同时,点源负荷在枯水期的贡献率要高于丰水期。DN 负荷的污染源贡献率体现出明显季节性差异,因此,在制定负荷削减方案时,应考虑氮污染源的季节性差异,丰水期优先控制非点源污染,枯水期优先控制点源污染。

表 3 2006—2012 年不同时期 DN 负荷来源构成

| 不同时期 | 地表径流源/% | 地下水源/% | 大气沉降源/% | 点源/% | 农村生活源/% |
|-------------|---------|--------|---------|------|---------|
| 丰水期(7—9月) | 47.0 | 27.6 | 4.4 | 12.0 | 9.0 |
| 平水期(10—12月) | 18.3 | 21.8 | 8.9 | 16.4 | 34.7 |
| 少水期(1—3月) | 2.5 | 25.1 | 8.7 | 22.1 | 41.6 |
| 枯水期(4—6月) | 2.1 | 27.7 | 2.2 | 23.1 | 45.0 |
| 多年平均 | 17.5 | 25.6 | 6.1 | 18.4 | 32.6 |

4 结论

(1) 沙河流域 DN 年均负荷以非点源污染为主, 占总污染负荷的 82.7%。

(2) 农村生活污染源对沙河流域 DN 负荷的贡献最大, 表明人类农业生产及农村活动是流域非点源污染的最主要来源。不同土地利用类型的 DN 负荷贡献率排序为: 耕地 > 灌木林 > 水渠 > 有林地 > 草地 > 居住地 > 工业用地 > 乔木园地 > 草本沼泽。非点源污染负荷不仅与不同土地利用类型有关, 还与各自的面积密切相关。

(3) 沙河流域 DN 负荷污染源组成表现出明显的季节性差异, 地表径流污染源的贡献率在丰水期要远高于枯水期, 而点源和农村生活源在枯水期的贡献率随水量的降低而升高, 枯水期达到最大, 生活污染源是枯水期最主要的污染源。

参考文献:

- [1] Leigh C, Burford M A, Roberts D T, et al. Predicting the vulnerability of reservoirs to poor water quality and cyanobacterial blooms [J]. *Water Research*, 2010, 44 (15): 4487-4496.
- [2] 马放, 姜晓峰, 王立, 等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (2): 610-618.
- [3] 李翠梅, 张绍广, 姚文平, 等. 太湖流域苏州片区农业面源污染负荷研究 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23 (3): 354-359.
- [4] 钟科元, 陈莹, 陈兴伟, 等. 基于农业非点源污染模型的桃河流域日径流泥沙模拟 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (6): 130-134.
- [5] 宋林旭, 刘德富, 崔玉洁, 等. 三峡库区香溪河流域非点源氮磷负荷分布规律研究 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36 (2): 428-434.
- [6] 陈海洋, 滕彦国, 王金生, 等. 晋江流域非点源氮磷及污染源解析 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (5): 213-219.
- [7] 梁钊雄, 王兮之, 王军. SWAT 模型在粤北连江流域的应用研究 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20 (6): 140-144.
- [8] 王慧亮, 孙志琢, 李叙勇, 等. 非点源污染负荷模型的比较与选择 [J]. *环境科学与技术*, 2013, 36 (5): 176-182.
- [9] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158 (5): 1159-1168.
- [10] Chen H, Teng Y, Wang J. Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: a case study in the Jinjiang River, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185 (2): 2009-2021.
- [11] 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.
- [12] 李明涛. 流域非点源污染模型的比较与不确定性分析 [D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [13] Ning S K, Jeng K Y, Chang N B. Evaluation of non-point sources pollution impacts by integrated 3S information technologies and GWLF modeling [J]. *Water Science & Technology*, 2002, 46 (6/7): 217-224.
- [14] 何因, 秦保平, 李云生, 等. GWLF 模型的原理、结构及应用 [J]. *城市环境与城市生态*, 2009 (6): 24-27.
- [15] Lee K Y, Fisher T R, Rochelle N E. Modeling the hydrochemistry of the Choptank River basin using GWLF and Arc/Info: 2. Model validation and application [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56 (3): 311-348.
- [16] Li X Y, Weiler D E, Jordan T E. Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380 (3): 277-288.
- [17] Wu W, Hall C A, Scaten F N. Modelling the impact of recent land-cover changes on the 25 stream flows in north-eastern Puerto Rico [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21 (21): 2944-2956.
- [18] Cohn T A, Caulder D L, Gilroy E J, et al. The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28 (9): 2353-2363.
- [19] Sheeder S A, Evans B M. Estimating nutrient and sediment threshold criteria for biological impairment in pennsylvania watersheds [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40 (4): 881-888.
- [20] 朱继业, 高超, 朱建国. 不同农地利用方式下地表径流中氮的输出特征 [J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2007, 42 (6): 621-627.