

嘉陵江流域非点源溶解态氮污染负荷模拟研究

刘腊美¹, 龙天渝¹, 李崇明², 李继承¹

(1.重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2.重庆市环境科学研究院, 重庆 400020)

摘要:嘉陵江流域是三峡水库最大的支流,为研究嘉陵江流域非点源溶解态氮污染负荷的年际变化规律及其来源的空间分布情况,以流域土地利用类型为研究单元,通过引入具有物理机制的半分布式水文模型——SLURP 水文模型,并推导溶解态氮的流域输移损失系数,建立了流域非点源溶解态氮污染年负荷模型。借助 GIS 技术,应用所建模型,对嘉陵江流域各土地利用类型上的年地表径流量和溶解态氮污染负荷进行了模拟。模拟结果表明,以旱地和水田为主的涪江流域的溶解态氮流失情况最为严重,其次是渠江下游流域和西汉水流域,1990—2005 年嘉陵江流域各土地利用类型上产生的非点源溶解态氮年均负荷为 $35\,726\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,约占流域出口总氮负荷的 32%。

关键词:嘉陵江流域;非点源污染模拟;溶解态氮;半分布式水文模型

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)04-0808-06

Simulation of Dissolved Nitrogen Load in Jialing River Basin

LIU La-mei¹, LONG Tian-yu¹, LI Chong-ming², LI Ji-cheng¹

(1.Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2.Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 400020, China)

Abstract: Dissolved nitrogen (DN) on land is washed away into waters by runoff, forming the pollution load of non-point source. Therefore, simulation of runoff from each land use or land cover type plays a very important part in estimated pollution load of dissolved nitrogen. Soil conservation service (SCS) runoff curve method was widely used for simulation of land runoff in popular non-point source pollution model, such as SWAT and AGNPS, etc. However, SCS model had a major limitation, that is, it was a statistical model for America, so there were some problems applying to Chinese basin directly. In this study, a physically-based and hydrological watershed model called Semi-Distributed Land Use-based Runoff Processes (SLURP) hydrological model, was used to simulate runoff from each land use or land cover type in order to estimate the DN load. Taking the Jialing River Basin as a research case, the DN model was formed. Considering the DN loss during the transport process from land to waters, a coefficient of transport loss was introduced in the DN model, and its statistical equation was deduced by the monitoring data. Consequently, by using DN model and SLURP model, the spatial distribution of output capacity of the basin DN pollution was simulated, and the DN pollution load at the watershed outlet from 1990 to 2005 was estimated by means of GIS. The results indicated that pollution in Fujiang River sub-basin which mainly consisted of dry farmland and paddy field was the most serious, and the followings were the sub-basin of downstream watershed of Qujiang River and Xihanshui River sub-basin. The annual average DN load in the basin was so high that it reached $35\,726\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ from 1990 to 2005 and accounted for about 32% of the total nitrogen load at the watershed outlet.

Keywords: Jialing River Basin; simulation of non-point source pollution; dissolved nitrogen; semi-distributed hydrological model

三峡水库是全国重要的淡水水源基地,是实现南水北调中线方案的水源补给地。水质监测结果显示,目前库区水体总氮浓度为 $1.10\sim 1.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氮营养水平

偏高^[1]。库区水体中的氮主要以溶解态形式存在^[2],因此,有效控制溶解态氮污染源是降低库区水体氮含量、防止富营养化的关键措施之一。随着点源污染的有效治理,非点源污染将成为库区水体的主要污染源。嘉陵江是三峡水库最大的支流,流域内农业种植以坡耕地为主,由于该区雨量丰沛且多集中在农业活动密集的 5 月至 9 月,因而随地表径流流失的非点源溶解态氮污染十分严重^[3],是三峡水库氮污染主要的

收稿日期:2008-07-07

基金项目:中国科学院西部行动计划“三峡库区水土输出与面源污染控制试验示范”(KZCX2-XB2-07)

作者简介:刘腊美(1981—),女,湖北仙桃人,博士研究生,主要从事三峡库区水环境方面的研究。

背景输入之一^[4]。但目前关于嘉陵江流域非点源污染的研究甚少,且相关研究多采用对典型小流域进行现场监测的方式^[5],推广应用到大流域尺度还需较多工作要完成。本文试图通过建立大流域尺度模型的方式对嘉陵江流域非点源溶解态氮污染的时空变化规律进行研究。

非点源污染具有明显的地域特征,因其来源的广泛性及其载体的动态性,决定了其输移转化的复杂性和输出的不确定性。目前,对于非点源污染的研究主要采用野外试验、室内模拟试验、水质监测分析和应用模型等方法,其中将 GIS 技术与模型相结合是目前大流域尺度非点源污染定量研究的重要手段^[6-7]。

溶解于径流中的污染物伴随降雨-径流输出与流失,因此,地表径流这一水文水力条件的准确模拟是模拟与分析土地输出的溶解态污染物时空分布以及污染负荷的基础。目前国内外常用的非点源污染模型,如 AGNPS、SWAT 等^[8-9],其地表径流部分的模拟基本上采用美国农业部土壤保持局的曲线数字法 (SCS Curve Number Method)^[10]。SCS 法是一统计模型,模型中参数及其取值来源于美国的地理和气候环境,鉴于美国的情况与我国的差异,SCS 法是否完全适合我国的实际情况,还需要进行充分的验证。贺宝根等的研究^[11]已表明在将 SCS 法直接应用于我国的上海郊区时,误差较大,需要进行本地化修正。考虑到上述原因,本研究引入一个具有物理机制的半分布式水文模型——SLURP 水文模型替代 SCS 法,用来提高地表径流量的模拟精度,从而提高非点源溶解态污染负荷估算的准确性。选用 SLURP 水文模型用于非点源溶解态污染模拟研究主要基于两个方面:其一,SLURP 水文模型具有物理机制,它考虑了地表径流形成的物理过程,包括降水、植被截留、蒸散发、融雪、下渗等,它适合于大、中型的山地流域,已在加拿大和北美等地区的多个流域以及我国长江上游流域的水文模拟中获得了良好的效果^[12-14],该模型不仅可以对过去进行重建,还可对未来气候变化或土地利用类型变化引起的水文变化进行预测;其二,SLURP 水文模型以土地利用类型为研究单元,易于与同样基于土地利用类型来分析并计算流域非点源溶解态污染的方程相结合,形成完整的非点源溶解态污染模型,模拟因降雨-径流产生的流域溶解态污染量及其负荷。

为研究嘉陵江流域土地输出的非点源溶解态氮污染的时空分布规律及其入库负荷的年际变化,通过引入 SLURP 水文模型,并考虑污染物在流域上的输移损失,引入输移损失系数,构建了流域非点源溶解

态氮负荷模型,借助 GIS 技术,数值模拟了 1990—2005 年地表径流中溶解态氮的时空分布,定量计算了流域非点源溶解态氮负荷,以期为嘉陵江流域非点源污染的有效治理以及水土保持方案的选用等提供依据。

1 研究流域概况

嘉陵江发源于陕西省秦岭南麓,流经陕西、甘肃、四川 3 省,在重庆朝天门汇入长江。嘉陵江流域面积 15.79 万 km²,全长 1 120 km,包括嘉陵江干流、白龙江、渠江和涪江等子流域(图 1)。流域处于亚热带季风气候区,夏秋多雨且夜雨频繁,5—9 月的雨量占全年雨量的 70%~90%。流域出口控制站——北碚水文站的年均降雨量为 1 098 mm,年均蒸发量为 709.4 mm,河口年均流量为 2 120 m³·s⁻¹。

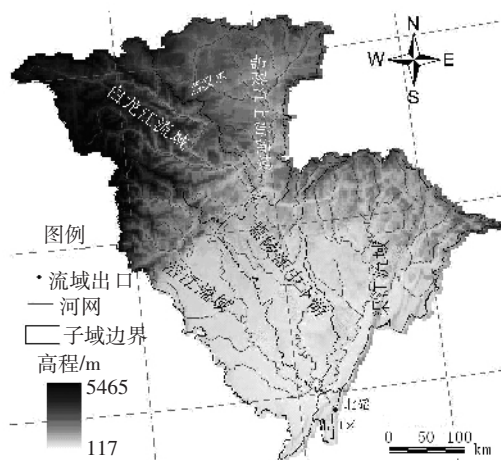


图 1 流域的地形、河网和子域

Figure 1 Watershed topography, river network and sub-basins

嘉陵江上游流域为山地丘陵区,土地利用多为灌木丛、草地、林地,中下游流域属四川盆地,地势平缓,农田集中,是四川省主要农业种植基地之一。但由于不合理的农田耕作形式以及田间管理措施,使得化肥、农药等的喷洒加剧了周围水环境的污染,因此流域各支流无论是在长度或时间上,保持Ⅲ类地表水水质的都低于 50%^[15]。

2 溶解态氮负荷模型

2.1 溶解态氮负荷模型

土壤表层的氮在降雨滴溅下析出,溶入地表径流,在径流携带下流向流域出口,因此土地输出的溶解态氮因气象条件、土地利用类型、土壤质地以及土壤表层氮含量的不同而随时空变化。参考 AGNPS、

SWAT 等非点源污染模型中的计算方法,采用下式计算流域土地输出的溶解态氮:

$$W = \sum_{j=1}^n Q_j \cdot Cr_j \quad (1)$$

式中: W 为流域溶解态氮输出量, t ; Q_j 为第 j 类土地利用类型上的地表径流量, 亿 m^3 ; Cr_j 为第 j 类土地利用类型上地表径流中溶解态氮的浓度, $mg \cdot L^{-1}$ 。

土地输出的溶解态氮在降雨径流携带下进入河道, 流向流域出口, 形成污染负荷。在输移过程中, 会出现植被截留、生化反应、向大气散发、向地下水渗透、泥沙吸附沉积等现象, 从而产生输移损失。对于大尺度流域, 由于输移环境复杂而且输移路径长, 输移损失所占比重很大, 在计算流域出口污染负荷时不可忽视。因此, 在式(1)的基础上, 引入流域输移损失系数 δ , 用以表征降水、产流、汇流等将流域上产生的非点源污染物转换成流域出口非点源污染负荷的强弱程度, 可表示为:

$$\delta = \frac{L}{W} \quad (2)$$

式中: L 为流域出口非点源污染负荷量, t 。

因此, 流域非点源溶解态氮负荷模型为:

$$L = \delta \cdot W = \delta \cdot \sum_{j=1}^n Q_j \cdot Cr_j \quad (3)$$

2.2 溶解态氮径流浓度

降雨径流中溶解态营养盐浓度受很多因素影响, 如降雨(降雨强度、降雨时间和降雨分布)、施肥(施肥种类、施肥时间、施肥数量)、地形地貌、植被覆盖、土壤属性和田间管理等, 其形成过程非常复杂。对于场次降雨径流浓度, 一般采用在不同降雨时段进行多次采样, 然后利用相应时段的流量加权平均的办法; 对于年降雨径流浓度, 则利用该年内各场降雨产生的流量对各场降雨的径流浓度进行加权平均, 因此年降雨径流浓度的监测耗时、费力, 对大尺度流域的径流浓度进行一一监测更加困难。因而本文根据研究流域内典型小流域或相近流域的径流浓度的监测值^[5, 16-17], 对比参考流域和研究流域的农业种植水平(主要是化肥施用量), 确定嘉陵江流域各种土地利用类型的溶解态氮径流浓度(表 1)。本研究中, 将流域划分为 10 种不同的土地利用类型, 分别为城镇、旱田、水田、田林草混合地、草地、灌木、稀树草原、林地、水域和荒地。

2.3 输移损失系数

分析 1996—2002 年嘉陵江流域出口控制站——北碚水文站的水文、水质数据, 发现总氮的年径流负荷与年径流总量呈指数型关系(式 4), 在枯水年总氮

表 1 嘉陵江流域溶解态氮径流浓度

Table 1 Dissolved nitrogen concentration in runoff in Jialing River basin

土地利用类型	总氮/ $mg \cdot L^{-1}$	土地利用类型	总氮/ $mg \cdot L^{-1}$
城镇	1.20	灌木	0.90
旱田	2.65	稀树草原	1.25
水田	3.10	林地	1.20
田草林混和地	1.65	水域	0
草地	1.85	荒地	0.35

的年径流负荷变化相对平稳, 随着丰水年径流量的增大, 年径流负荷急剧上升, 这与嘉陵江流域径流负荷的变化主要由降雨径流引起的情况相符。

$$L_N = 40\,956 \times e^{0.0017Q} \quad (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

式中: L_N 为流域出口总氮的年径流负荷, t ; Q 为流域出口年径流总量, $10^8 m^3$ 。

流域出口径流污染负荷为点源负荷和非点源负荷之和, 径流量等于基流量与地表径流量之和。由于流域非点源污染负荷的产生主要由降雨径流引起, 可以近似认为, 非点源污染负荷等于地表径流负荷, 而点源污染负荷等于基流负荷。因此, 流域出口年地表径流负荷应由年径流负荷扣除年基流负荷得到:

$$L_{u,N} = 40\,956 (e^{0.0017Q_d} - e^{0.0017Q_g}) \quad (5)$$

式中: $L_{u,N}$ 为流域出口总氮的年地表径流负荷, t ; Q_d 为出口年径流总量, $10^8 m^3$; Q_g 为出口年基流总量, $10^8 m^3$ 。

非点源溶解态氮污染负荷的主要来源是土地输出和畜禽污染, 利用式(1)进行流域土地输出量的计算, 根据调研所得的各种畜禽的数量和相应的污染产生系数进行畜禽污染产生量的计算, 将两者之和作为流域非点源溶解态氮污染产生量, 再由公式(5)推导出流域出口的非点源溶解态氮污染负荷, 最后由公式(2)得到各年的输移损失系数 δ 。通过曲线拟合, 发现流域非点源溶解态氮的输移损失系数 δ 与流域年地表径流模数 q 间存在下列关系(见图 2):

$$\delta = 0.0933 e^{0.1709q} \quad (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

因此, 最终建立的流域非点源溶解态氮污染年负荷模型为:

$$L = \delta \cdot W = 0.0933 e^{0.1709q} \cdot \sum_{j=1}^n Q_j \cdot Cr_j \quad (7)$$

3 SLURP 水文模型

3.1 数据输入及流域信息提取

SLURP 模型是以日为时间步长, 具有物理机制的流域尺度的半分布式水文模型。相比 AGNPS、SWAT 等非点源污染负荷模型中用于径流量模拟的

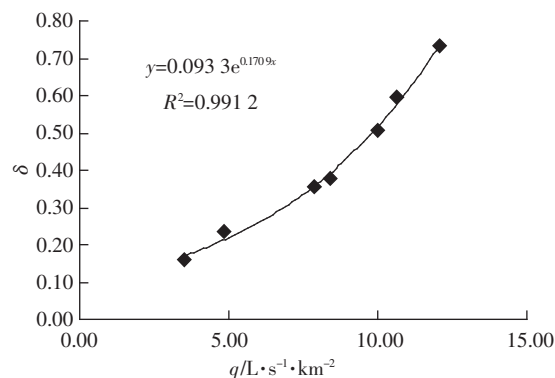


图 2 流域输移损失系数与年地表径流模数的关系

Figure 2 The relationship between transport loss coefficient and surface runoff modulus

SCS 曲线数模型,SLURP 模型能对不同土地利用类型上的地表径流、壤中流、基流进行产汇流模拟,具有物理意义明确、适用范围广、模拟效果理想等特点。在应用中,SLURP 模型通过输入地形高程(DEM)数据,利用模型内嵌的 TOPAZ、DEDNM 等地形与河网分析工具,把流域划分成多个子流域,并且根据卫星遥感(NOAA/AVHRR)获得的土地覆盖/土地利用数据,再将每个子流域细分为多个不同的土地覆盖/土地利用单元。在模型模拟中,首先对每个单元进行逐日垂向水量平衡计算,然后进行各单元间以及各子流域间的汇流计算,最终获得径流输出。

本文采用由中国地球系统科学数据共享网提供的 90 m 分辨率的 DEM 栅格数据和 1:400 万的土地覆盖/土地利用矢量数据,采用由中国气象科学数据共享网提供的气象数据。

3.2 模型参数率定与模拟结果验证

为使水文模型适用于嘉陵江流域的水文模拟,需根据流域实测流量数据进行参数率定与模拟结果验证。应用 1997—2000 年北碚水文站实测流量日值数据对模型进行参数率定,鉴于在本文的污染计算中,月径流量模拟的精度影响更大,因此采用 2001—2005 年实测月平均径流总量数据进行验证。模型验证期的 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.89,平均相对误差为 1.90%,最大相对误差在 15%以内,模拟计算的月平均径流量与实测月平均径流量拟合情况良好(图3)。由此可见,经参数优化之后的水文模型模拟效果良好,为准确模拟流域非点源污染负荷奠定了基础。

4 模拟结果与讨论

利用经过参数率定之后的水文模型,模拟各种土

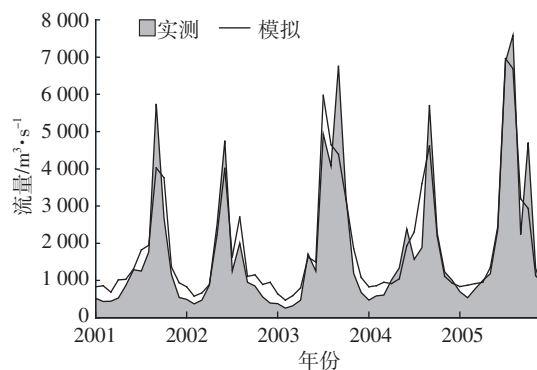


图 3 模型验证期流量模拟值与实测值的比较

Figure 3 Comparison between simulated flow and observed flow in certification period

地利用类型上的年地表径流量以及流域出口年地表径流模数,由式(7)即可估算出嘉陵江流域非点源溶解态氮负荷。由于没有非点源溶解态氮监测数据,只好利用实测水文水质数据,采用水文线分割法,即用年径流量负荷扣除年基流量负荷的方法(年径流量×总氮浓度年均值-年基流量×枯水期总氮浓度值)^[18]估算得非点源总氮负荷,再乘以溶解态氮占总氮的比例(有研究表明,嘉陵江北碚站溶解态氮的比例在 71%~93%之间,参考相关研究取 80%)^[4,19],可得到非点源溶解态氮的负荷,最后减去畜禽养殖所产生的溶解态氮负荷,即估算得土地输出的溶解态氮负荷。该结果可近似看作土地输出的非点源溶解态氮负荷的实测值,与模拟结果进行对比分析,见图 4。对比分析结果显示,实测推导值与模拟值变化趋势一致,误差相对较小,表明所建模型具有良好的模拟精度。

模拟结果显示,土地输出的溶解态氮污染负荷量较大,1990—2005 年年均负荷为 35 726 t·a⁻¹,约占流域出口总氮负荷的 32%(由实测水质流量数据计算得

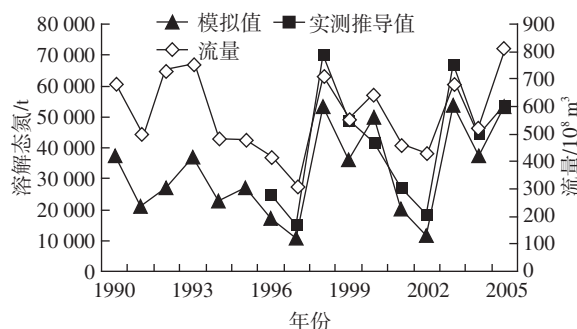


图 4 溶解态氮负荷模拟结果和实测推导值的对比

Figure 4 Comparison of simulated and deduced dissolved nitrogen loads

总氮负荷);溶解态氮污染负荷的年际变化与年径流量的年际变化趋势基本一致,降雨-径流水文条件是引起污染负荷年际变化的主要因素,存在流量大、负荷大的特点;分析各年的流量和负荷特点发现,表土氮具有枯水年累积、丰水年淋失的特点,如 1997 年为干旱年,1998 年为丰水年,1998 年的年地表径流总量是 1997 年的 3 倍,而 1998 年的负荷达到 1997 年的 4.4 倍,再对比其他相邻的年份,如干旱的 2004 年和丰水的 2005 年,这两年的降雨-径流的差异性没有 1997 年和 1998 年的大,因此负荷量的差异也不如上述明显。由此可见,在枯水年农业活动如施肥等产生的表土氮由于雨量小未能完全通过地表径流淋失,在第二年强降雨的滴溅以及大流量的携带下将上年残留和当年产生的表土氮一起冲入河道,因此大旱之后的大水年污染负荷相当大。

虽然不同年份流域出口溶解态氮的负荷量不同,但由于流域内各年土地利用空间分布情况相对稳定,因此各年溶解态氮输出的空间分布规律基本相似,限于篇幅,这里仅列出最近年份 2005 年的分布图(图 5)。由图可见,在以旱田和水田为主的涪江流域、以旱田和灌木为主的渠江下游流域以及以草地为主的西汉水流域是溶解态氮污染的主要源区,应成为未来的重点治理区。整个嘉陵江流域的旱田以坡耕地为主,所施化肥极易流失,这是流域出口溶解态氮污染负荷居高不下的主要原因,因此对嘉陵江流域坡耕地种植方式的改良将是控制流域水土保持和非点源污染的关键措施。

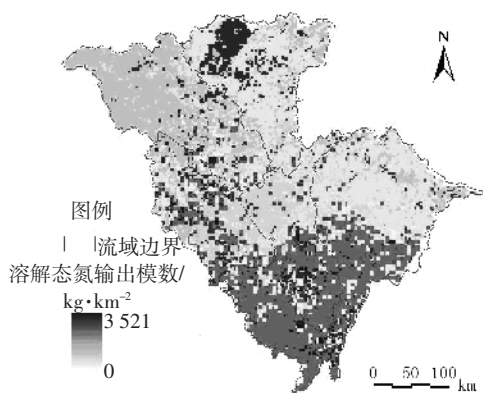


图 5 溶解态氮流失模数空间分布

Figure 5 Spatial distribution of dissolved nitrogen pollution source

5 结论

通过引入具有物理机制的半分布式水文模型,推

导流域输移损失系数,建立了流域非点源溶解态氮污染年负荷模型,借助 GIS 技术,模拟了嘉陵江流域各年溶解态氮负荷以及污染源的空间分布,主要结论如下:

(1)具有物理机制的分布式水文模型改善了非点源污染模型的水文环节的模拟,能更准确地模拟非点源污染的时空分布规律。

(2)嘉陵江流域溶解态氮流失情况严重,1990—2005 年的年均入库负荷达到 $35\,726\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$; 负荷年际变化与降雨-径流关系密切,表土氮具有枯水年累积、丰水年淋失的特点。

(3)涪江流域、渠江下游流域以及西汉水流域是嘉陵江流域氮素流失严重区,改善流域内的坡耕地种植方式与水土保持将是控制非点源氮污染的关键措施。

参考文献:

- [1] 孟春红, 赵冰. 三峡水库蓄水后水文特性和污染因素分析[J]. 人民长江, 2007, 38(8): 26-27.
MENG Chun-hong, ZHAO Bing. Analysis of hydrological characteristic and pollution factors in the Three Gorges Reservoir after impoundment[J]. Yangtze River, 2007, 38(8): 26-27.
- [2] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 7-12.
ZHANG Sheng, LI Chong-ming, FU Yong-chuan, et al. Trophic states and nutrient output of tributaries bay in Three Gorges Reservoir after impoundment[J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 7-12.
- [3] 许其功, 席北斗, 沈珍瑶, 等. 耕作措施对三峡库区土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(3): 41-45.
XU Qi-gong, XI Bei-dou, SHEN Zhen-yao, et al. Effects of farming practices on soil erosion and nutrient loss in the Three George Reservoir Area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(3): 41-45.
- [4] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 1-6.
ZHENG Bing-hui, CAO Cheng-jin, QIN Yan-wen, et al. Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 1-6.
- [5] 朱波, 汪涛, 徐泰平, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮迁移及其环境效应[J]. 山地学报, 2006, 25(5): 601-606.
ZHU Bo, WANG Tao, XU Tai-ping, et al. Non-point source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. Journal of Mountain Science, 2006, 25(5): 601-606.
- [6] Pullar D, Springer D. Towards integrating GIS and catchment models[J]. Environmental Modelling & Software, 2000, 15: 451-459.
- [7] Basnyat P, Teeter L D, Lockaby B G, et al. Non-point source critical area analysis in the Gisselo watershed using GIS[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 887-898.

- [8] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22: 1617-1627.
- [9] Easton Z M, Fuka D R, Walter M T, et al. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool(SWAT)model to predict runoff from variable source areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 348: 279-291.
- [10] Mishra S K, Singh V P. Soil conservation service curve number(SCS-CN) methodology[M]. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003.
- [11] 贺宝根, 周乃晟, 高效江, 等. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系——SCS法的修正[J]. 环境科学研究, 2001, 14(3): 49-51.
HE Bao-gen, ZHOU Nai-sheng, GAO Xiao-jiang, et al. Precipitation-runoff relationship in farmland nonpoint source pollution research: a-mending coefficient of SCS hydrologic method[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, 14(3): 49-51.
- [12] Kite G W, Dalton A, Dion K. Simulation of stream flow in a macro-scale watershed using GCM data[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(5): 1546-1559.
- [13] Linden S V D, Woo M K. Application of hydrological models with increasing complexity to subarctic catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 270: 145-15.
- [14] TIAN -YU LONG, MING -KO WOO, ROBIN THORNE. Monthly streamflow simulation for Upper Changjiang Basin above the Three Gorges in China[J]. *IAHS Publ*, 2008, 319: 93-100.
- [15] 重庆市环境监测中心. 重庆市环境质量报告书 (2001—2005)[M]. 重庆: 重庆市环境保护局, 2006: 97-152.
Chongqing Environmental Monitoring Center. Environmental quality report of chongqing city in 2001—2005[M]. Chongqing: Chongqing Environmental Protection Bureau, 2006: 97-152.
- [16] 陈克亮, 朱晓东, 朱波, 等. 川中紫色土区旱坡地非点源氮输出特征与污染负荷[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 54-58.
CHEN Ke-liang, ZHU Xiao-dong, ZHU Bo, et al. Load and output character on non-point nitrogen from purple soil farmlands in hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 54-58.
- [17] 陈西平. 三峡库区农田径流污染情势分析及对策[J]. 环境污染与防治, 1992, 14(5): 31-34.
CHEN Xi-ping. Farmland runoff pollution state in the Three Gorges Reservoir and its countermeasure [J]. *Environmental Pollution & Control*, 1992, 14(5): 31-34.
- [18] 于涛, 孟伟, Edwin Ongley, 等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 401-407.
YU Tao, MENG Wei, Edwin Ongley, et al. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 401-407.
- [19] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 326-331.
XU Qi-gong, LIU Hong-liang, SHEN Zhen-yao, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 326-331.