

# 基于分布式水文模型的嘉陵江流域氮磷非点源污染负荷预测

吴磊<sup>1,2</sup>, 龙天渝<sup>1,2\*</sup>, 王玉霞<sup>1,2</sup>, 卢齐齐<sup>1,2</sup>

(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. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 为研究在大尺度流域上以降雨径流为载体的非点源污染, 以基于土地利用的分布式水文模型 (SLURP Hydrological model) 为基础, 提出氮磷负荷预测模型及未来气象参数和土地利用分布图的构建方法。就嘉陵江流域土地利用、畜禽养殖和农业人口未来变化产生的总氮与总磷的月负荷量进行模拟和预测分析。结果表明, 预测年降雨径流、畜禽养殖量的增加导致污染负荷增大, 与基期年相比, 氮磷负荷的月均值最大增幅均在 6 月, 分别为 28.6% 和 22.5%; 因退耕还林等措施使土地利用调整后产生的负荷总量变化不大, 但其贡献率依然最大。

**关键词:** 氮, 磷, 负荷, 非点源污染, 模拟分析, SLURP 水文模型, 嘉陵江流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.010

中图分类号: X506

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0055-06

吴磊, 龙天渝, 王玉霞, 等. 基于分布式水文模型的嘉陵江流域氮磷非点源污染负荷预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 55-60.

Wu Lei, Long Tianyu, Wang Yuxia, et al. Prediction of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in Jialing River watershed based on distributed hydrological model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 55-60. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

随着三峡水库的建成, 受水位壅升、回水顶托的影响, 近年来, 大部分次级河流爆发了严重的水华, 且呈现加重、扩大的趋势, 富营养化问题已成为三峡库区最主要的水环境问题, 受到社会的广泛关注和高度重视<sup>[1]</sup>。水环境中, 氮磷是制约水体营养程度的主要因子, 嘉陵江是库区最大支流, 其流域经济以农业为主, 坡耕地较多, 由于土地利用方式不合理、畜禽养殖粪便未能有效的处理与利用、以及管理措施不利等, 氮磷非点源污染引发的水环境污染严重, 已经成为嘉陵江的主要污染来源, 近年来, 嘉陵江出口段水质仅能保持地表水Ⅲ类水质<sup>[2]</sup>。因此, 开展对嘉陵江流域氮磷非点源污染负荷的预测研究, 对于保障三峡水库乃至整个长江的水环境安全、促进库区生态环境的可持续发展具有重要的意义。

应用模型进行模拟研究是非点源污染研究的一种主要方法。嘉陵江流域为大尺度流域, 在适应大尺度流域的模型中, 体积-浓度法因利用相对容易得到的流域土地利用类型等资料, 直接建立流域土地利用类型与非点源污染输出量的关系, 降低了对试验和资料的依赖性, 从而应用较广<sup>[3-4]</sup>。但该方法的精度很大程度上依赖降雨在流域各种土地利用类型上产生的地表径流量的计算精

度, 而地表径流量又依赖于降雨与气温等气象参数, 以及地形、地貌和土地利用类型等。目前国内外常用的非点源污染模型, 如 AGNPS、SWAT 等, 其有关地表径流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)<sup>[5-6]</sup>。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, 鉴于美国的情况与中国的差异, SCS 法是否完全适合中国的实际情况, 还需要进行充分的验证。贺宝根等<sup>[7]</sup>的研究已表明在将 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。

基于数字高程 (DEM) 和土地覆盖/土地利用类型遥感 (NOAA/AVHRR) 数据、具有物理机制的 SLURP (semi-distributed land use based runoff processes) 分布式水文模型<sup>[8]</sup>, 借助地理信息技术 (GIS) 和遥感技术 (RS), 对大尺度流域地表径流的模拟效果良好, 如果选用该模型替代 SCS 法进行降雨径流计算, 可提高地表径流量的计算精度; 更为重要的是, SLURP 水文模型和体积-浓度法都是以土地利用类型为基本研究单元, 易于耦合, 耦合后可基于同样的土地利用类型划分, 进行产流、产污计算; 此外, 该模型还能在获得流域未来气候和土地利用变化的情况下, 预测流域相应的地表径流量, 可用于非点源污染负荷的预测; 为此, 本研究将二者耦合构建了非点源氮磷负荷预测模型。

为应用所构建的预测模型分析未来非点源污染负荷的变化, 需要有预测时段的气象资料和土地利用分布图, 而目前尚无可直接使用的相关资料, 笔者提出形成未来气象参数和土地利用分布图的近似方法。选择最符合未来气候模式的英国气象局 HADLEY 中心预测的 B2 气候情景<sup>[9]</sup>作为未来气象参数预测的依据, 在该情景系列中, 假设未来世界着重于区域性解决经济、社会和环境可持续发展, 全球人口持续增长, 但增长速度有所减缓,

收稿日期: 2010-07-06 修订日期: 2011-01-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104-001 和 2009ZX07104-002); 江苏省环境科学与工程重点实验室开放课题 (Zd91201); 国家科技支撑计划“长江上游坡耕地整治与高效生态农业关键技术试验与示范”(CSTS2009AB7036)

作者简介: 吴磊 (1981—), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事水污染控制与 GIS 技术下非点源污染模拟研究。重庆 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 400045。Email: conquer2006@126.com

\*通信作者: 龙天渝 (1960—), 女, 重庆人, 教授, 博士, 主要从事水污染控制与水环境模拟研究。重庆 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 400045。Email: longty128@yahoo.com.cn

经济发展速度中等, 技术进步的速度存在较大区域差异, 全球致力于环境保护和社会公平。将基期年各天的实际温度和降雨量等与 B2 气候情景中未来各月的降雨、气温等的平均变化率线性叠加作为本研究所需的预测年中各天的温度和降雨量的近似处理方法; 而土地利用分布图按照基期年的分布图在 GIS 平台上对流域土地利用变化特性进行分析, 采用 Markov 转移矩阵进行预测年土地利用变化量的计算, 结合流域各区域中长期土地利用规划和地形与地貌, 计算绘制未来土地利用近似分布图。以嘉陵江流域为例, 应用所建立的预测模型和所得出的未来气象参数和土地利用图, 对嘉陵江流域氮磷非点源污染进行了预测, 本文的研究方法可为大尺度流域非点源污染的研究提供参考, 研究成果可为三峡库区水环境管理提供依据。

## 1 嘉陵江流域概况

嘉陵江是长江北岸的一级支流, 也是三峡水库集水面积最大的一级支流。嘉陵江发源于秦岭, 正源为白龙江, 主要包括西汉水、白龙江、渠江和涪江 4 大水系, 流经陕西、甘肃、四川、重庆 4 个省级行政区, 在重庆朝天门汇入长江, 全长 1 280 km (图 1)。流域位于东经 102°33'~109°00', 北纬 29°40'~34°30' 之间, 地势为西、北、东高, 东南面最低, 流域面积约为 16 万 km<sup>2</sup>。流域大部分属亚热带湿润季风气候, 平均气温 16~18℃; 平均年降雨量 1 098 mm, 主要集中在 5—9 月, 平均年蒸发量 709.4 mm; 流域出口控制站北碚水文站年平均径流量 701 亿 m<sup>3</sup>。流域以紫色土和棕壤以及黄棕壤为主。至 2007 年, 流域内总人口数约为 4 787 万人, 其中农业人口占总人口的 83.5%, 流域内人口分布极不均衡, 中下游的重庆地区最为稠密。

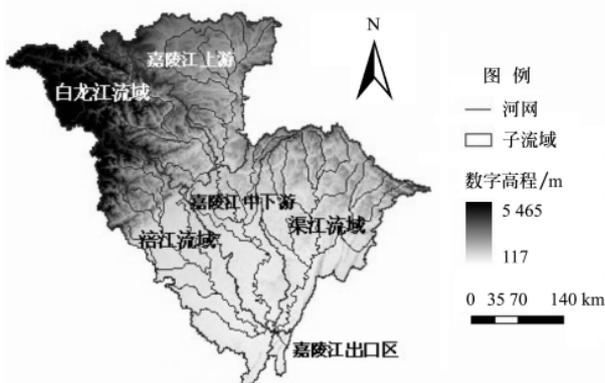


图 1 嘉陵江流域地形、水系与子流域划分

Fig.1 Digital elevation, river, sub-basins of Jialing River watershed

## 2 分布式水文模型

### 2.1 SLURP 水文模型

准确的模拟降雨径流量是定量研究以降雨径流量为载体的非点源污染及其负荷的前提条件, 为此, 选用以日为时间步长、具有物理机制的 SLURP 水文模型进行流

域各种土地利用类型上降雨产生的地表径流量的计算。模型所涉及的水文物理过程主要包括降水、植被截留、蒸散发、融雪、下渗、地表径流和地下径流, 模型输入的资料有降水、气温等气象要素, 以及地形、地貌和土地覆盖/土地利用特性、分布和面积等资料, 输出量包括土壤蒸发、植被蒸腾、冠层拦截、积雪、地表径流、壤中流和地下水等。在应用中, SLURP 模型通过输入地形高程 (DEM) 数据, 利用模型内嵌的地形分析工具 (topographic parameterization, TOPAZ), 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, 再利用土地利用与气象数据分析工具把每个子流域细分为多个不同的土地覆盖/土地利用单元, 并分配气象站点权重。在径流模拟中, 首先在各单元用 4 个非线性蓄水库—冠层蓄水、积雪、土壤水和地下水—来模拟从降雨到径流水循环过程并建立垂向水量平衡关系, 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<sup>[8]</sup>。本研究中, 根据该流域河网中主要支流的分布情况, 把流域划分为白龙江、嘉陵江上游、嘉陵江中下游、渠江、涪江和嘉陵江出口区 6 个子流域 (图 1)。

### 2.2 流域基础数据库的构建

选取 1997—2007 年为模拟的基期年、2020—2030 年为预测年, 为计算基期年和预测年降雨在流域各种土地利用类型上形成的地表径流量和非点源污染, 需要构建相关的流域基础数据库。

#### 2.2.1 基期年流域基础数据库

通过 GIS 软件和 RS 影像图, 建立嘉陵江流域基期年自然状况和社会经济状况的环境数据库 (表 1)。流域自然状况主要包括数字高程 (图 1)、重分类后的 6 种土地利用类型 (图 2)、气象、水文、水质等, 社会经济状况主要包括人口、行政区划、经济水平等。

结合气象数据和土地利用分布图, 经 SLURP 模型运行和 GIS 统计分析, 基期年嘉陵江流域重分类后各种土地利用类型面积所占的比例分别为: 城镇用地 4.01%, 农田 35.2%, 草地 26.2%, 林地 20.3%, 水域 8.39%, 荒地 5.94%。

表 1 嘉陵江流域环境数据种类和来源

Table 1 Sources and sorts description of environmental data in Jialing River watershed

种类	格式	说明	来源
数字地形高程	栅格图	90 m 分辨率长江上游数字高程模型 (DEM)	中国地球系统科学数据共享网
土地利用	栅格图	城镇、农田、草地、林地、水域、荒地	美国地质勘测局 (USGS)
气象	数据库文件	气象站点的降雨、温度、日照等气象数据	中国气象科学数据共享服务网
水质	Excel	北碚断面的 TN、TP 等水质数据	历年重庆市环境质量报告书
径流	Excel	嘉陵江北碚水文站径流量日值数据	中国水文水资源科学数据共享网
社会经济	数据库文件	按行政区划人口、畜禽、施肥量等数据	流域各省市历年统计年鉴和统计报告等

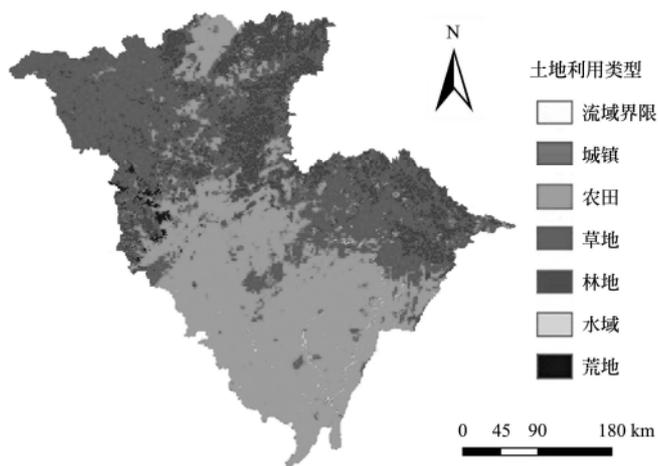


图 2 嘉陵江流域土地利用分布图

Fig.2 Land use types map in Jialing River watershed

### 2.2.2 预测年流域基础数据库

选用 B2 气候情景系列中代表未来 2021—2050 年的气候变化方案。由于方案中给出的是各月的温度和降雨量变化率的平均值，为应用水文模型分析未来地表径流以及非点源污染，采用将方案中基准年各天的实际温度和降雨量与未来相应月的降雨、气温等的平均变化率线性叠加作为本研究所需的预测年 2021—2030 年中各天的温度和降雨量的近似处理方法。经计算得到，随着气候变暖，年降雨量有增高的趋势，预测年全年总降雨量比基期年增加 6.39%。丰水期的 5—10 月的月平均降雨量明显高于基期年同期的降雨量，最大增加率在 6 月为 20.3%；而枯水期的 11 月到来年 4 月，降雨量变化不大。

土地利用分布图按照基准年的分布图在 GIS 平台上对流域土地利用变化特性进行分析，采用 Markov 转移矩阵进行预测年土地利用变化量的计算<sup>[10-11]</sup>，结合流域各区域中长期土地利用规划和地形与地貌，绘制未来土地利用近似分布图。经统计可知，预测年在基期年的基础上城镇用地平均增加 1.07%，农田平均减少 1.34%，草地平均增加 0.43%，林地平均增加 0.95%，水域平均减少 0.87%，荒地平均减少 0.24%。

预测年流域人口数据库的构建是通过把基期年人口数和统计年鉴中人口增长率较为稳定年份的均值作为预测未来年人口的增长率<sup>[12]</sup>，经计算分析，预测年农业人口年均值比基期年减少 14.8%。

根据流域历年统计年鉴，同时将农业部颁发的畜牧业中长期发展规划及其增长率作为畜禽养殖规模预测的增长率<sup>[13]</sup>，经统计计算分析，猪、牛、羊和家禽养殖量分别比基期年增长 18.1%、20.7%、32.1%、37.2%，畜禽养殖平均增长 29.5%。

## 3 流域非点源污染负荷预测模型

### 3.1 体积-浓度法

假定流域非点源总氮和总磷负荷来源于土地利用、畜禽养殖和农业人口，选用体积—浓度法进行非点源污染负荷的模拟分析，考虑到嘉陵江流域为大型流域，在常用的体积—浓度法<sup>[14]</sup>中引入污染物入河系数，综合表征非点源污染物在输移到流域出口过程中产生的损失，有

$$L_N = \lambda_N \sum_j Q_{d,j} \cdot C_{N,j} \quad (1)$$

$$L_P = \lambda_P \sum_j Q_{d,j} \cdot C_{P,j} \quad (2)$$

式中， $L_N$ 、 $L_P$  分别为流域上产生的非点源总氮和总磷负荷，t；下标  $j$  表示土地利用类型、或畜禽种类、或农业人口； $Q_{d,j}$  为降雨在第  $j$  类土地利用类型上形成的地表径流量  $m^3$ ，或第  $j$  类畜禽数量、或第  $j$  类农业人口数量，人或头； $C_{N,j}$  和  $C_{P,j}$  分别为第  $j$  类土地利用类型上地表径流中总氮和总磷的浓度， $mg/L$ ，或第  $j$  类畜禽、或农业人口总氮和总磷的输出系数， $kg/(头 \cdot a)$  或  $kg/(人 \cdot a)$ ； $\lambda_N$ 、 $\lambda_P$  分别为总氮和总磷污染的入河系数，无量纲。

### 3.2 总氮和总磷浓度与输出系数

根据研究流域的土地使用和畜禽养殖的实际情况，将流域的土地利用类型分为城镇用地、农田、草地、林地、荒地和水域 6 种类型；畜禽类型分为牛、猪、羊和家禽。对于各类型的总氮和总磷浓度的取值，城镇用地来源于施为光对成都市的研究结果<sup>[15]</sup>；农田来源于黄真理等对三峡库区典型流域的研究结果<sup>[16]</sup>；草地、林地和荒地来源于朱波等对三峡库区盐亭农业生态实验站的研究结果<sup>[17]</sup>；水域从干湿沉降考虑，按氮和磷的年干湿沉降量计算方法得出<sup>[18]</sup>。牲畜的输出系数的取值按各类牲畜每年排泄物中的氮、磷含量及其损失折合计算<sup>[19]</sup>；农村人口输出系数按照农村生活污水和人粪尿的排放量折算计算<sup>[20]</sup>。浓度和输出系数的具体值见表 2。

表 2 各种类型对应的非点源污染的总氮和总磷浓度或输出系数

Table 2 Non-point source total nitrogen and total phosphorus concentration or output coefficient in various types

分类	土地利用类型/( $mg \cdot L^{-1}$ )						畜禽养殖/( $kg \cdot 头^{-1} \cdot a^{-1}$ )				农村人口/( $kg \cdot 人^{-1} \cdot a^{-1}$ )
	城镇	农田	草地	林地	水域	荒地	牛	猪	羊	家禽	
总氮	7.3	13.6	6.08	4.95	0.98	5.2	11.652	2.304	0.786	0.057	1.955
总磷	0.6	1.9	0.078	0.061	0.0035	0.024	0.623	0.159	0.084	0.008	0.214

### 3.3 总氮和总磷污染的入河系数 $K$

流域非点源污染的入河系数，表征降雨、产流等将流域上产生的非点源污染物转化成流域出口污染负荷的

强弱程度。由于流域无单独的非点源污染监测资料，采用水文估算方法<sup>[21]</sup>，应用嘉陵江流域出口控制站-北碚水文站的水文、水质监测数据，对入河系数进行估算。通

过回归分析,发现流域非点源氮磷污染的月平均入河系数  $\bar{\lambda}_N$  与  $\bar{\lambda}_P$  和流域上月地表径流深度  $Y$  (mm) 存在良好的相关关系<sup>[17]</sup>,即

$$\bar{\lambda}_N = 0.2051e^{0.0054Y} \quad (R^2=0.852) \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_P = 0.1854e^{0.0067Y} \quad (R^2=0.865) \quad (4)$$

流域不同空间位置处的入河系数,按照其到流域出口的距离与高程差对平均入河系数进行加权。

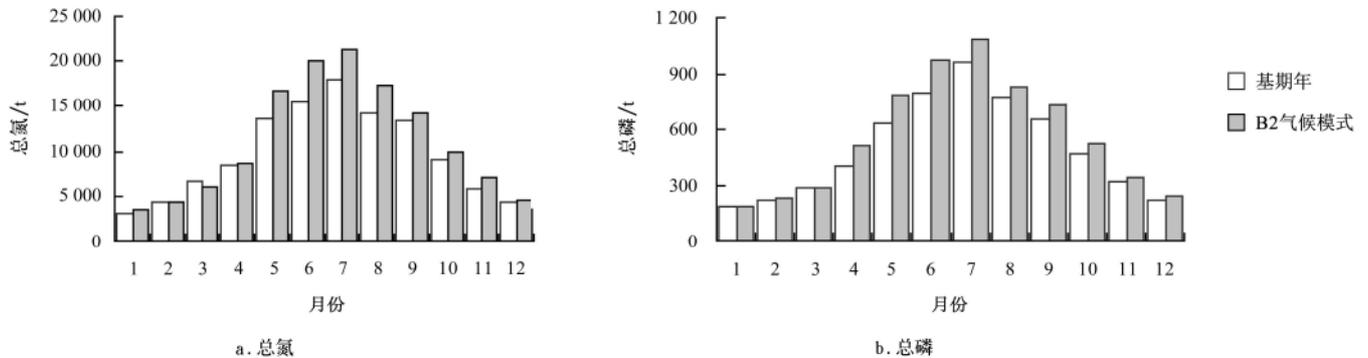
#### 4 结果与分析

利用嘉陵江流域 1997—2007 年北碚水文站的实测日值径流数据对模型进行参数率定和优化,并对模型参数优化的结果进行验证,Nash-Sutcliffe 系数为 0.87,平均相对误差为-0.98%,最大相对误差为-13.34%。由水文估算法<sup>[21]</sup>得到的流域出口 1997—2007 年实际非点源氮磷污

染负荷值与模拟计算的负荷值对比,平均相对误差小于 6%,最大相对误差是-14.75%,模拟效果较好。具体优化验证过程见前期的研究成果<sup>[22]</sup>。

#### 4.1 预测年与基期年总氮、总磷负荷量月均值对比分析

使用预测年气象与土地利用类型变化数据,借助 SLURP 水文模型模拟预测得到各种土地利用类型上因降雨产生的地表径流量,同时根据计算的预测年平均人口数与畜禽养殖数量的变化情况,得到预测年与基期年 TN、TP 月均值负荷量的对比结果见图 3。从图中可以看到,流域出口预测年的氮磷负荷总体有所增加,丰水期的 5—10 月的月氮磷负荷量明显高于基期年同期的负荷量,而枯水期的 11 月到次年 4 月,变化不大。最大增幅月均出现在 6 月,分别达到 28.6%与 22.5%。



注: B2 气候模式,在该情景系列中,假设未来世界着重于区域性解决经济、社会和环境的可持续发展

图 3 总氮和总磷负荷量月均值对比

Fig.3 Comparison of monthly mean values of total nitrogen load and total phosphorus load

#### 4.2 总氮、总磷负荷来源及其贡献率分析

随着未来气候的变化,以及流域土地利用类型、畜禽养殖规模和农业人口的变化,预测年流域内非点源污染负荷来源构成的贡献率也相应发生变化(表 3),因流域畜禽养殖量的增多和降雨量的增加,畜禽养殖产生的负荷明显增加;土地利用产生的负荷因退耕还林等措施

使负荷总量变化不大,但贡献率依然最大;随着城市化进程的发展,农业人口产生的负荷有下降的趋势。总氮和总磷的来源贡献有所差别,但总氮和总磷的主要来源是土地利用和畜禽养殖。因此,进一步加强嘉陵江流域退耕还林还草和发展生态农业等生态环境建设措施是未来发展的迫切要求。

表 3 基期年与 HADLEY 中心预测的 B2 气候模式下嘉陵江流域多年平均非点源氮磷负荷来源构成

Table 3 Source composition of average non-point source nitrogen and phosphorus load in the Jialing River watershed under the base year and B2 climate model predicted by Hadley Center

类别	出口总氮负荷来源/t				出口总磷负荷来源/t			
	土地输出	畜禽养殖	农业人口	合计	土地输出	畜禽养殖	农业人口	合计
基期年	64 717.92	34 293.22	11 663.56	110 674.70	4 012.63	1 287.36	646.84	5 946.82
B2 气候模式	75 266.32	47 958.66	10 046.83	133 271.80	4 903.52	1 765.03	492.46	7 161.02

嘉陵江各子流域氮磷污染负荷分布如表 4, B2 气候模式下流域氮磷污染平均负荷模数分别达到 0.92 和 0.05 t/km<sup>2</sup>。氮磷污染负荷贡献最大的地区分别为涪江流域和渠江流域,分别达到 28.1%和 28.5%,其次是嘉陵

江中下游地区,白龙江流域局部地区贡献也很大。结合土地利用空间分布图看出,上述地区是农田的主要集中地。

表4 HADLEY 中心预测的 B2 气候模式下嘉陵江各子流域多年平均非点源氮磷污染负荷、模数及贡献率

Table 4 Average non-point source nitrogen and phosphorus pollution load, modulus, and the contribution rate in the sub-basins of Jialing River watershed under B2 climate model predicted by Hadley Center

流域	面积/km <sup>2</sup>	污染负荷/t		污染负荷模数/t·km <sup>-2</sup>		贡献率/%	
		总氮	总磷	总氮	总磷	总氮	总磷
白龙江流域	28 080	21 456.76	1 138.60	0.76	0.04	16.1	15.9
嘉陵江上游流域	32 028	15 459.53	1 095.64	0.48	0.03	11.6	15.3
嘉陵江中下游流域	20 780	22 256.39	1 124.28	1.07	0.05	16.7	15.7
渠江流域	38 302	35 050.48	2 040.89	0.92	0.05	26.3	28.5
涪江流域	35 668	37 449.38	1 697.16	1.05	0.05	28.1	23.7
嘉陵江出口区流域	1 285	1 599.26	64.45	1.24	0.05	1.2	0.9
总计(平均)	156 142	133 271.80	7 161.02	0.92	0.05	100	100

## 5 结论

1) 为研究大尺度流域上以降雨径流为载体的非点源污染负荷, 将 SLURP (semi-distributed land use based runoff processes) 分布式水文模型与体积-浓度法有机耦合, 以土地利用类型为研究单元, 构建基于 GIS 的大尺度流域非点源污染负荷动态预测模型; 为分析未来流域产生的非点源污染负荷的变化, 提出未来气象参数值和土地利用分布图的近似形成方法。研究方法可为大尺度流域非点源污染负荷的预测研究提供参考。

2) 在预测年, 由于降雨径流量和畜禽养殖的增加, 导致预测年 2020—2030 比基期年 1997—2007 污染负荷总体有所增加, HADLEY 中心预测的 B2 气候模式下嘉陵江流域土地利用产生的总氮负荷的贡献率由基期年的 58.1% 下降到 56.4%, 畜禽养殖由 32% 上升到 36%, 而农村人口由 9.9% 下降到 7.5%; 土地利用产生的总磷负荷的贡献率由基期年的 67.5% 上升到 68%, 畜禽养殖由 21.6% 上升到 24.6%, 而农业人口由 10.9% 下降到 6.9%。因此, 防治流域水土流失, 实施农田生态施肥减污技术, 合理处置畜禽养殖粪便, 对农村居民点污水进行集中处理重复利用是减少嘉陵江流域乃至整个三峡库区非点源污染的关键所在。

### 【参考文献】

- [1] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 64—69.  
Zhang Sheng, Li Chongming, Zheng Jian, et al. Seasonal variation of trophic states in backwater areas of tributaries in three gorges reservoir[J]. Environmental Science, 2009, 30(1): 64—69. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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.
- [3] Park M H, Swamikannu X, Stenstrom M K. Accuracy and precision of the volume-concentration method for urban stormwater modeling[J]. Water Research, 2009, 43(11): 2773—2786.
- [4] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375—383.

- Hao Fanghua, Yang Shengtian, Cheng Hongguang, et al. A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(3): 375—383. (in Chinese with English abstract)
- [5] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watershed[J]. J Soil and Water Cons, 1989, 44(2): 168—173.
- [6] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation[M]. Texas: USDA, Agriculture Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory, 2002.
- [7] 贺宝根, 周乃晟, 胡雪峰, 等. 农田降雨径流污染模型探讨: 以上海郊区农田氮素污染模型为例[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(2): 159—164.  
He Baogen, Zhou Naisheng, Hu Xuefeng, et al. On farmland precipitation-runoff non-point pollution model: Farmland nitrogen pollution model in Shanghai suburbs[J]. Resources and Environmental in the Yangtze Basin, 2001, 10(2): 159—164. (in Chinese with English abstract)
- [8] Geoff K. Manual for the SLURP Hydrological Model Version 12.2[M]. Canada: NHRI Publ, 2002.
- [9] IPCC, Emissions scenarios, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [10] López E, Bocco G, Mendoza M, et al. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city, Mexico[J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 55(4): 271—285.
- [11] 陈书卿, 刁承态. 三峡库区生态经济区用地结构及演变趋势: 以重庆市梁平县为例[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 160—173.  
Chen Shuqing, Diao Chengtai. Landuse structure change and its evolving tendency of ecological economic zone in the Three Gorges reservoir area: A case study of Liangping County, Chongqing Municipality[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(5): 160—173. (in Chinese with English abstract)
- [12] 宋健, 田雪原, 于景元, 等. 人口预测和人口控制[M]. 北京: 人民出版社, 1981.
- [13] 中华人民共和国农业部. 全国畜牧业发展第十一个五年规划(2006—2010年)[R]. 2006.

- [14] 龙天渝, 梁常德. 基于SLURP模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574—581.  
Long Tianyu, Liang Changde. Forecasting the pollution load of non point sources imported to the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 574—581. (in Chinese with English abstract)
- [15] 施为光. 街道地表物的累积与污染特征: 以成都市为例[J]. 环境科学, 1991, 12(3): 20—25.  
Shi Weiguang. Sediment on the Urban Street: Accumulation and Characteristics[J]. Environmental Science, 1991, 12(3): 20—25. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄真理, 李玉樑. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 87—95.
- [17] 朱波, 汪涛, 况福虹. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 525—533.  
Zhu Bo, Wang Tao, Kuang Fuhong. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 525—533. (in Chinese with English abstract)
- [18] 曹广明, 张金霞. 高寒草甸生态系统磷素循环[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 515—518.  
Cao Guangming, Zhang Jinxia. The phosphorus cycling in an alpine meadow ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(4): 515—518. (in Chinese with English abstract)
- [19] 卞有生. 生态农业中废弃物的处理与再生利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 96—97.
- [20] 高龙华. 遥感和GIS支持下的流域非点源污染模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006: 74—76, 111—114.
- [21] 陈友媛, 惠二青, 金春姬, 等. 非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 10—13.  
Chen Youyuan, Hui Erqing, Jin Chunji, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李继承. 嘉陵江流域非点源污染负荷研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 24—28, 59—61.

## Prediction of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in Jialing River watershed based on distributed hydrological model

Wu Lei<sup>1,2</sup>, Long Tianyu<sup>1,2\*</sup>, Wang Yuxia<sup>1,2</sup>, Lu Qiqi<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Area Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** To study non-point source pollution carried by rainfall runoff in the large-scale basins, based on semi-distributed land use runoff processes (SLURP) model, the construction method for prediction models of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) load, and the future meteorological parameters and land-use map were proposed respectively. By application of the proposed approaches, the monthly TP and TN loads of land use, livestock and agricultural population on the Jialing River watershed in the future were simulated and analyzed. The results showed that the increased volume of rainfall runoff, livestock and poultry in predicting year led to increased pollution load. Compared with the base year, the monthly maximum increases of nitrogen and phosphorus load were both in June, which were 28.6% and 22.5% respectively. The total land-use output load changed little together with changes of land-use types due to measures such as returning farmland to forests, but it was still the largest contribution.

**Key words:** nitrogen, phosphorus, loads, non-point source pollution, simulation analysis, SLURP hydrological model, Jialing River watershed

吴磊, 等. 基于分布式水文模型的嘉陵江流域氮磷非点源污染负荷预测 (图1、2)  
Wu Lei, et al. Prediction of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in Jialing River watershed based on distributed hydrological model (Figure 1, 2)

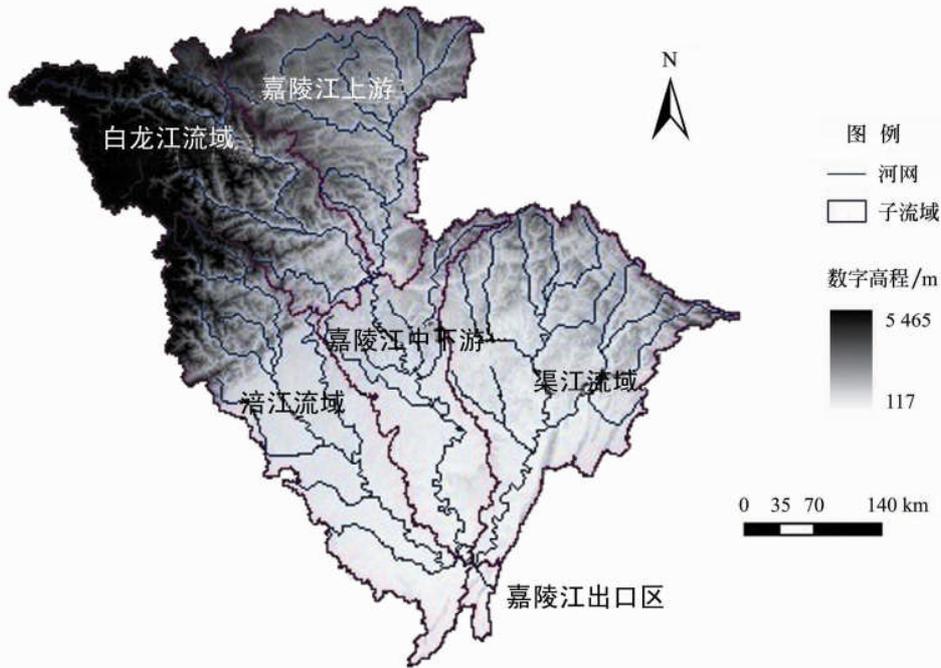


图1 嘉陵江流域地形、河系与子流域划分

Fig.1 Digital elevation, river, sub-basins of Jialing River watershed

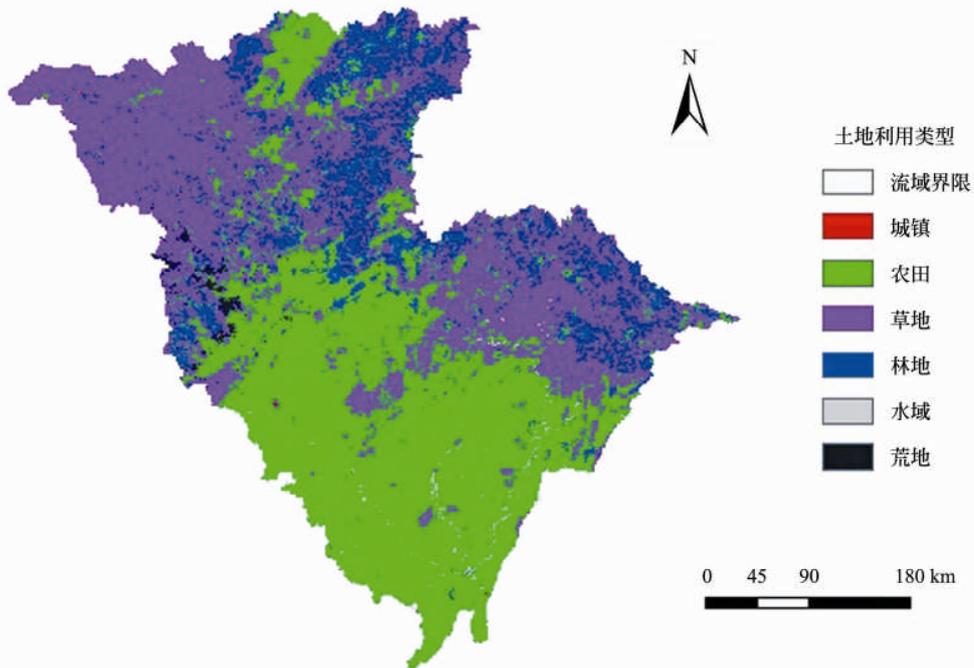


图2 嘉陵江流域土地利用分布图

Fig.2 Land use types map in Jialing River watershed