

基于盲数理论与 GIS 的小江流域吸附态磷污染负荷模拟研究

龙天渝¹, 吴磊¹, 刘腊美¹, 蒙国湖¹, 李崇明²

(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:根据三峡库区小江流域水文、地理和非点源污染等特点,通过分析引起流域吸附态污染负荷年际变化的主要因素,提出了流域土壤侵蚀模数、输沙模数的动态计算方法。鉴于与吸附态污染负荷有关的流域降雨、土壤、地形、植被、水土保持、泥沙输移比等因素具有空间不确定性的特点,构建了基于盲数理论的非点源吸附态磷污染负荷动态分布模型。应用所构建的模型,借助 GIS 技术,模拟和定量计算了小江流域 1997—2007 年各年的土壤侵蚀模数和吸附态磷负荷量。模拟结果表明,降雨侵蚀力因子和地表径流量是流域内吸附态磷负荷年际变化的重要因素;而吸附态非点源磷负荷的空间变化与土地利用类型关系密切,不同土地利用类型输出磷负荷的大小依次为:旱田及混合地、草地、水田、林地和城镇用地。通过验证表明,所建模型合理,运用盲数理论来研究流域非点源吸附态负荷可行。

关键词:三峡库区;非点源污染模型;不确定性信息;吸附态磷;盲数

中图分类号:X144 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)09-1880-08

The Simulation of Adsorbed Phosphorus Pollution Load Based on GIS and the Theory of Blind Number in Xiaojiang River Watershed

LONG Tian-yu¹, WU Lei¹, LIU La-mei¹, MENG Guo-hu¹, LI Chong-ming²

(1.Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Area Ecological Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045,China; 2. Chongqing Research Institute of Environmental Science, Chongqing 400020,China)

Abstract: The dynamic calculation methods of soil erosion modulus and sediment discharge modulus were brought forward by analyzing the key factors of yearly adsorbed load variation for Xiaojiang River Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. The dynamic distribution model of annual adsorbed non-point source phosphorus load, based on the watershed characteristics of hydrology, geography and non-point source pollution, was built up. In view of space uncertainty characteristics for parameters in the model which are related to rainfall, soil, topography, vegetation, soil and water conservation, sediment delivery ratio and so on, the theory of blind number was introduced to deal with them. Applying GIS technology, the soil erosion modulus and adsorbed phosphorus load of Xiaojiang River Watershed from 1997 to 2007 were simulated and quantitatively calculated. The simulation results showed that the factor of rainfall erosion and runoff are the important factors which effect annual variation of adsorbed phosphorus pollution load, and that the space distribution of adsorbed non-point source phosphorus was closely related to the types of land-use, and the size of contribution rate was glebe and mix-ground, grassland, paddy field, woodland and urban land in turn. The validation revealed that the established model in which parameters were taken as the factors of blind number can be successfully applied for the assessment of the adsorbed non-point source pollution load for the watershed.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; non-point source pollution model; uncertainty information; adsorbed phosphorus; blind number

收稿日期:2009-01-19

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);重庆市科技攻关计划项目“三峡库区面源管理技术与农村生活污染控制示范”(CSTS2008AB7083)

作者简介:龙天渝(1960—),女,重庆人,博士,教授,主要研究方向为水环境模拟与水污染控制。E-mail:longty128@yahoo.com.cn

联系人:吴磊 E-mail:conquer2006@126.com

随着三峡水库的建成,受水位雍升、回水顶托的影响,近年来,大部分次级河流暴发了严重的水华,富营养化问题成为当前库区最为严重的生态环境问题之一。小江(亦称彭溪河)地处四川盆地东部边缘,位于距三峡大坝 660 km 的水库中心地带,是库区中部北岸流域面积最大的一级支流,该流域具有大巴山脉以西、川东丘陵区的典型地理地质特性。小江回水河段枯水期平均流速由建库前的 $0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降到三峡水库 175 m 水位时的 $0.006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均水深一般也仅为 10 m 左右,具备发生富营养化的水文条件,水库蓄水后年年暴发水华。有关研究^[1]指出,水环境中,氮磷是制约水体营养程度的主要因子,三峡水库中有 80% 左右的磷以吸附态形式存在,水体中总磷的含量与泥沙悬移质的含量密切相关。小江流域经济以农业为主,坡耕地较多,水土流失所引起的吸附态磷污染负荷成为流域的主要磷素污染来源,因此,开展对该流域吸附态磷污染的研究具有重要的现实意义。

吸附态非点源污染的实质在于土壤流失。目前,国内外有关区域土壤流失以及与土壤流失密切相关的吸附态非点源污染的研究中,应用最广的是美国通用土壤流失方程(USLE)及其修正方程(RULSE)^[2],一些功能比较强大的非点源污染负荷模型,如 SWAT、AnnAGNPS、LASCAM、EPIC 以及 SWMM 模型等^[3-5],也都是用 USLE 方程进行区域土壤流失量的计算。由于 USLE 方程是针对静态的多年平均状况,而不是动态的逐年变化过程,用该方程来研究土壤流失和吸附态非点源污染负荷的年际变化规律有所不足。此外,在对土壤流失和吸附态非点源污染负荷进行定量分析计算时,相关参数,如土壤降雨侵蚀因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖因子、水土保持因子、泥沙输移比因子等的处理几乎都是在假定因子为确定性因子的基础上进行的,而实际上这些因子明显具有灰性和未确知性^[6]。

为了分析流域泥沙吸附态非点源污染负荷的时空分布状况,本研究首先从静态 USLE 方程出发,通过分析引起流域非点源污染负荷年际变化的主要因素,提出土壤侵蚀模数与输沙模数在流域空间上的动态计算模型;在此基础上,考虑到模型中的各参数在空间上具有客观随机性和主观不确定性的特点,将其定义为盲因子^[7],结合 GIS 技术,运用盲数理论进行分析研究,构建了小江流域非点源吸附态磷污染负荷动态分布模型,进而模拟和估算了小江流域 1997—

2007 年各年的吸附态磷负荷,以期对小江流域吸附态磷非点源污染的控制和治理提供科学的依据。

1 研究区域概况

小江发源于重庆市开县白泉乡钟鼓村,经云阳县城以西 24.7 km 处的双江镇汇入长江,主河长约 182.4 km,河道平均坡降 0.125%,小江东河为正源,主要支流有南河、浦里河、桃溪河,流域位于东经 $107^{\circ}42' \sim 108^{\circ}54'$,北纬 $30^{\circ}41' \sim 31^{\circ}42'$ 之间,集水面积 5 276 km^2 。见图 1。流域呈东西长、南北短的扇形,流域北部为大巴山南坡高山深丘,南部属川东平行岭谷地带,地势北高南低。流域气候为亚热带季风气候区与华西秋雨期,具有冬暖夏热,春季较早,夏季多雨、伏旱等特点,多年平均气温 18.6°C ,多年平均径流总量 35.8 亿 m^3 ,多年平均降雨量 1 100~1 500 mm。流域内的土壤主要由紫色土、水稻土等组成,其中砂质土所占比重较大,坡耕地、薄土面积多。为研究需要,把流域划分为 7 个子流域,考虑到三峡水库蓄水,把流域出口划定在距新华水文站约 5 km 处,而把土地利用分为 5 种土地利用类型(图 2)。

2 流域吸附态磷负荷动态模型

2.1 年土壤侵蚀量和泥沙输出量模型

Wischmeier 等^[2]提出的 USLE 方程是国际上广泛

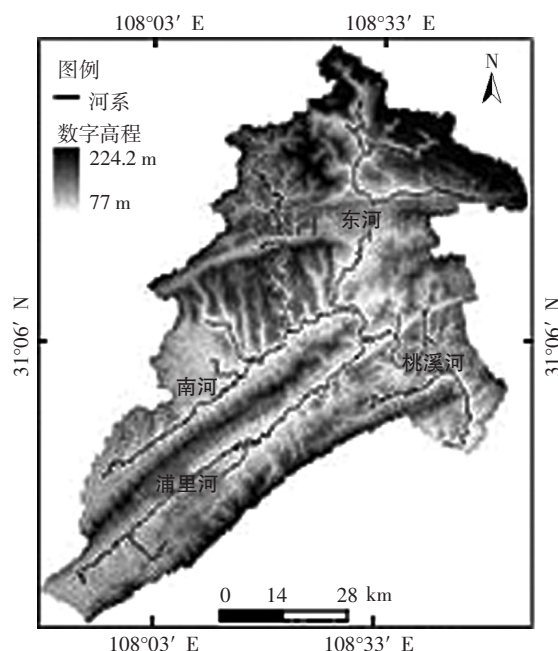


图 1 小江地理位置、地形、河网

Figure 1 Geographical location, topography, river network of Xiajiang River

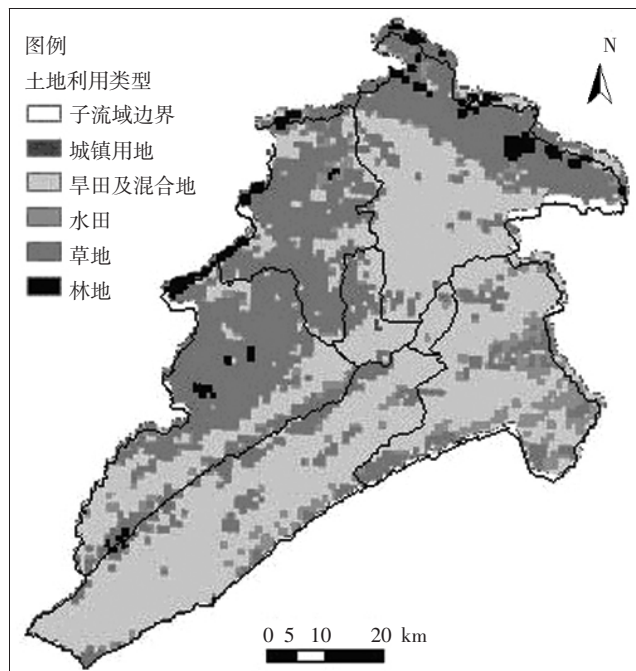


图 2 小江流域土地利用分类

Figure 2 Land use of Xiaojiang Watershed

使用的比较成熟的土壤侵蚀模型。其表达式为:

$$X=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: X 为土壤侵蚀模数, $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$; R 为降雨侵蚀动力因子; K 为侵蚀对象土壤可蚀性因子; LS 为加速侵蚀动力的地形因子(坡长坡度因子); C 为抑制侵蚀动力的植被覆盖管理因子; P 为抑制侵蚀动力的水土保持因子。

泥沙输出量为坡面上的侵蚀土壤被地表径流输送到主河道并最终到达流域出口的量, 计算公式为:

$$Q_s = A \cdot X \cdot \lambda = A \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \cdot \lambda \quad (2)$$

式中: Q_s 为泥沙输出量, t ; A 为计算区域面积, km^2 ; λ 为泥沙输移比。

由于 USLE 方程针对的是静态的多年平均状况, 而不是动态的逐年变化过程, 为研究水土流失引起的吸附态非点源污染负荷随时间的变化过程, 需构建逐年泥沙输出量的动态计算式。流域泥沙输出量年际变化主要与流域年内降雨产流等水文因素的变化以及人类土地管理活动造成流域内侵蚀、产沙和输沙环境等的改变有关^[8-9]。从分析方程(2)中的因子组成可以看出, K 因子、 LS 因子是由区域下垫面的土壤类型和地形特征决定的, 它们随区域空间位置的变化而变化, 但在一段时期内随时间近似不发生变化; C 因子、 P 因子与土地覆被管理和水土保持措施等人类土地管理活动有关, 对于本文所研究的小江流域, 在一定

时段内可近似认为 C 因子、 P 因子随时间几乎不发生变化; 而因流域降雨-径流时空分布的差异等带来的 R 因子和输移系数 λ 的变化才是导致土壤流失逐年变化的主导因素。因此, 可将方程(2)改为计算年泥沙输出量的方程:

$$Q_{s,i} = A \cdot X_i \cdot \lambda_i = R_i \cdot \lambda_i \cdot A \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3)$$

式中: 符号意义同前, 无下标的量为多年平均值; 有下标 i 的量表示第 i 年的值。

R_i 的年际变化主要是由于年降雨量和降雨强度等水文条件改变造成的; 而流域泥沙输移比 λ_i 的年际变化实际上受到水文和土地管理活动双重因素的影响, 因为径流大小与径流的携沙、输沙能力密切相关, 径流量越大, 其输沙能力越强, 同时, 由于人类土地管理活动造成的流域下垫面条件变化, 直接改变了流域输沙环境。将 λ_i 分为受水文因素影响的 $\lambda_{q,i}$ 和受土地管理影响的 $\lambda_{m,i}$ 两部分, 同样, 因流域近期下垫面特性基本不随时间变化, 而近似取 $\lambda_{m,i}$ 为常数, 将该常数放入 $\lambda_{q,i}$ 中, 即 $\lambda_i = \lambda_{q,i}$, 式(3)变为:

$$Q_{s,i} = A \cdot X_i \cdot \lambda_i = R_i \cdot \lambda_{q,i} \cdot A \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P = T_{s,i} \cdot \lambda_{q,i} \quad (4)$$

式中: $T_{s,i}$ 为年土壤侵蚀量, t 。

$$T_{s,i} = A \cdot X_i = R_i \cdot A \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (5)$$

2.2 土壤侵蚀方程各因子算式

模型(4)中各因子算式来自小江流域或地理气候特性相似流域的研究成果或实测数据。

2.2.1 $\lambda_{q,i}$ 因子

流域平均年泥沙输移比 $\bar{\lambda}_{q,i}$ 为流域年均输沙量与年均土壤侵蚀量之比。应用方程(5)计算年土壤侵蚀量, 而年输沙量的计算由该流域实测资料所得的统计公式得出:

$$S_j = 0.002 \ 04 Q_j^{2.5} \quad (6)$$

式中: S_j 为年均输沙率, $kg \cdot s^{-1}$; Q_j 为年均流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ 。通过分析, 发现 $\bar{\lambda}_{q,i}$ 与年降雨量 r_i 可近似用下列回归方程表示:

$$\bar{\lambda}_{q,i} = 0.065 \ 4 e^{0.001 \ 1 r_i} \quad (R^2 = 0.834 \ 8) \quad (7)$$

流域局部空间的年泥沙输移比 $\lambda_{q,i}$ 根据其到河道的距离与坡度建立缓冲区, 然后用流域平均泥沙输移比进行加权平均而得^[15]。

2.2.2 R_i 因子

参考有关的研究成果^[16-18], 采用周伏健提出的通过常规降雨资料计算、适合我国南方地区的降雨侵蚀力 R 值的简易计算公式计算:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-2.639 \ 8 + 0.304 \ 6 P_i) \quad (8)$$

式中: P_i 为月降雨量, mm; R 为年降雨侵蚀力指标值, $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。

2.2.3 K 因子

按 Wischmeier 等^[2,19]给出公式计算:

$$K = (2.1 \times 10^{-6}) \cdot (12 - OM) \cdot (N_1 \times N_2)^{1.14} + 0.0325 \cdot (S - 2) + 0.025 \cdot (P - 3) \quad (9)$$

式中: OM 为有机物百分含量; N_1 为泥沙和细沙百分含量; N_2 为泥沙、细沙和沙百分含量; S 为土壤结构代码; P 为土壤渗透性等级。结合流域土壤属性图和土壤图, 得到三峡库区小江流域土壤分类及其可蚀性 k 值分别为南方水稻土(青格田)0.26; 黄壤(黄壤、表潜黄壤)0.3; 紫色土(碳酸盐紫色土)0.33。

2.2.4 LS 因子

采用 Brown 的经验公式^[19]进行计算:

$$LS = \left(\frac{L}{22.13} \right)^m \cdot (0.065 + 0.046S + 0.0065S^2) \quad (10)$$

式中: L 为坡长, m; S 为坡度, %; 指数 m 依赖于坡度, 对于坡度 $S > 5.0$ 、 $3.5 < S < 5.0$ 、 $1.0 < S < 3.5$ 和 $S < 1.0$ 分别取值为 0.5、0.4、0.3 和 0.2。

2.2.5 C 因子

C 因子的确定根据蔡崇法等^[19-20]通过坡面产沙量与植被覆盖度相关关系的研究而建立的 C 因子与植被覆盖度 c 之间的数学关系:

$$\begin{cases} C=1 & c=0 \\ C=0.658-0.3436lgc & 0 < c < 78.3\% \\ C=0 & c \geq 78.3\% \end{cases}$$

2.2.6 P 因子

P 因子是采用某一特定的水土保持措施决定, 一般介于 0.25~1.0 之间, 通常不采取任何水土保持措施的自然植被和坡耕地的值取 1。参考相关研究^[21-22], 通过调查该流域内不同土地利用类型采取的水土保持措施, 按土地利用类型给定不同的值(表 1)。

表 1 不同土地利用类型的 P 值

Table 1 The P value of different land use

土地利用类型	城镇用地	旱田及混合地	水田	草地	林地
P 值	0.35	0.36	0.3	0.8	1

2.3 基于盲数理论的吸附态磷污染物负荷动态模型

在信息混沌类中, 凡具有随机性、模糊性、灰性、未确知性中两种或两种以上较为复杂的不确定性信息, 称为盲信息。盲数^[7]就是表达和处理盲信息的数学工具。

设 $H(I)$ 为一系列灰区间 x_i 构成的区间型灰数集

合, 则 $x_i \in H(I)$ 。若 $x_i \in [0, 1]$, $i=1, 2, \dots, n$, $\varphi(x)$ 为定义在 $H(I)$ 上的灰函数, 且

$$\varphi(x) = \begin{cases} \alpha_i, x=x_i & (i=1, 2, \dots, n) \\ 0, x \notin \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \text{ 且 } x \in R \end{cases} \quad (12)$$

当 $i \neq j$ 时, $x_i \neq x_j$, 且 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = \alpha \leq 1$, 则称函数 $\varphi(x)$

为一个盲数, 并可用 $\{[x_i, x_n], \varphi(x)\}$ 表示, 称 α_i 为 $\varphi(x)$ 的值的可信度, 称 α 为 $\varphi(x)$ 的总可信度, 称 n 为 $\varphi(x)$ 的阶数。

在式(4)中, 将各因子视为盲数, 即

$$\begin{aligned} R_i &= \{[R_{1,i}, R_{m,i}], \varphi_1(R_i)\} & K &= \{[K_1, K_n], \varphi_2(K)\} \\ LS &= \{[LS_1, LS_n], \varphi_3(LS)\} & C &= \{[C_1, C_s], \varphi_4(C)\} \\ P &= \{[P_1, P_k], \varphi_5(P)\} & \lambda_i &= \{[\lambda_{1,i}, \lambda_{u,i}], \varphi_6(\lambda_i)\} \end{aligned} \quad (13)$$

得到以盲数形式表示的土壤侵蚀量与输沙量计算模型, 即

$$Q_{S,i} = \{[R_{1,i}, R_{m,i}], \varphi_1(R_i)\} \times \{[K_1, K_n], \varphi_2(K)\} \times \{[LS_1, LS_n], \varphi_3(LS)\} \times \{[C_1, C_s], \varphi_4(C)\} \times \{[P_1, P_k], \varphi_5(P)\} \times \{[\lambda_{1,i}, \lambda_{u,i}], \varphi_6(\lambda_i)\} \times A \quad (14)$$

盲数运算包括盲数可能值与可信度计算两个方面, 关于盲数性质和运算的具体内容参考相关文献[7]。

吸附态非点源污染物以土壤侵蚀过程为输送载体, 其流域出口的污染负荷决定于流域坡面上产生的土壤侵蚀量、污染物元素在土壤中的背景含量和流失过程的富集比例, 以及泥沙输移到流域出口的输移比。在分析相关文献^[10-14]的基础上, 采用以下公式计算流域出口吸附在泥沙中的吸附态磷污染负荷:

$$L_{S_{s,i}} = Q_{S,i} \cdot C_{S_{s,i}} \cdot \eta_i \quad (15)$$

$$\eta_i = 7.4 \cdot Q_{S,i}^{-0.2} \cdot T_f \quad (16)$$

式中: $L_{S_{s,i}}$ 为流域出口第 i 年吸附态磷污染负荷, $t \cdot a^{-1}$; $C_{S_{s,i}}$ 为土壤中磷元素的背景含量, $g \cdot kg^{-1}$, $C_{S_{s,i}}$ 由中国科学院土壤信息空间数据库获得: $C_{S_{s,i}} = 0.35 g \cdot kg^{-1}$; η_i 为第 i 年污染物富集率(无量纲); T_f 为土壤质地综合因子, 根据土壤中各级颗粒配合比例比重计算得到。

3 基于 GIS 与盲信息的流域污染负荷估算与分析

3.1 流域各年土壤侵蚀模数与输沙模数的计算

3.1.1 流域因子信息基本资料

在分析了各子流域地理条件、生态状况以及管理水平的的基础上, 根据上述参量确定方法, 结合 GIS 技

术生成各因子空间分布图后统计得到流域各因子信息。以某年降雨侵蚀 R_i 因子为例,将小江流域相关气象站点记录的降雨量值代入公式(8)计算 R_i ,作成 DBF 文件,然后通过 ArcGIS9.2 把其转化为 SHP 矢量文件,最后通过 GIS 的空间插值功能生成 R_i 因子栅格空间分布图(图 3),进而提取各因子可能值区间和可信度信息(取各灰区间内数据出现的频率作为相应区间的可信度),结果为

$$\varphi_i(R)=\begin{cases} 0.050\ 825,R=[287.985,342.734] \\ 0.153\ 656,R=[342.734,357.482] \\ 0.228\ 184,R=[357.482,362.231] \\ 0.209\ 67,R=[362.231,396.98] \\ 0.197\ 877,R=[396.98,421.729] \\ 0.159\ 67,R=[421.729,476.477] \\ 0,其他 \end{cases}$$

降雨侵蚀因子 R 总可信度 $\alpha=\sum_{i=1}^n\alpha_i=0.998$ 。

其他因子根据流域环境数据库资料(表 2)采用与 R_i 相同的处理方法。

3.1.2 土壤侵蚀模数与输沙模数的计算

根据各因子已知信息和盲数乘法运算法则,计算

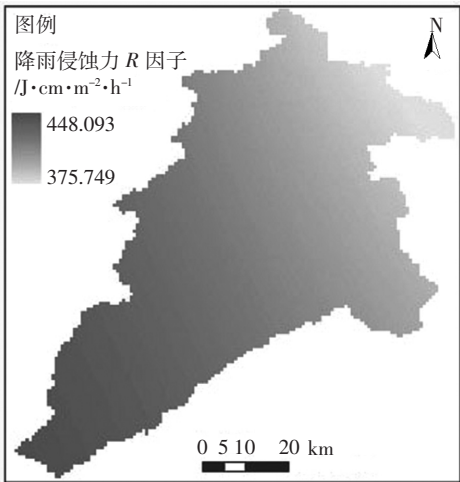


图 3 小江流域多年均降雨侵蚀因子 R
Figure 3 Average R factor of the watershed

出土壤侵蚀模数和输沙模数。通过对相关数据的计算,得到如表 3 计算结果。

在下垫面条件基本不随时间变化的情况下,各年土壤侵蚀模数主要受降雨和降雨强度引起的降雨侵蚀力因子和年径流量的影响。泥沙输移比与径流量是一种升幂函数的关系,因此,各年的输沙模数和输沙

表 2 小江流域环境数据库
Table 2 Environmental database of Xiaojiang River Watershed

数据名称	类 型	说 明	来 源
DEM(90 m)	raster	90 m 分辨率小江流域 DEM,提取坡长和坡度	地球系统科学数据共享网
土 壤	vector	1:400 万流域土壤类型及分布图	
土地利用	raster	城镇、旱地、水田、草地、林地(图 2)	美国地质勘测局(USGS)
NDVI	raster	1998 年各月归一化植被指数	
降 雨	DBF	1955—2007 年日值降雨量	中科院自然资源数据库
土壤属性	DBF	土壤有机质、总氮、总磷含量等背景数据	中科院土壤土种数据库

表 3 流域各年现实土壤侵蚀量与输沙量
Table 3 Actual soil erosion and sediment discharge in the watershed

年份	径流总量/亿 m³	土壤侵蚀模数/t·km²·a⁻¹	土壤侵蚀量/万 t	各年输沙模数/t·km²·a⁻¹	各年输沙量/t	各年含沙量/kg·m⁻³
1997	29.00	2 951.0	1 557.0	562.8	2 969 106.0	1.023 8
1998	45.29	4 624.1	2 439.7	1 683.2	8 880 497.7	1.960 8
1999	30.55	3 115.4	1 643.7	640.8	3 381 012.8	1.106 7
2000	42.09	4 296.8	2 267.0	1 405.9	7 417 554.5	1.762 3
2001	27.48	2 795.3	1 474.8	492.8	2 600 119.0	0.946 2
2002	29.76	3 033.9	1 600.7	600.7	3 169 349.7	1.065 0
2003	39.34	4 017.3	2 119.5	1 191.9	6 288 579.7	1.598 5
2004	52.31	5 339.4	2 817.1	2 394.2	12 631 743.1	2.414 8
2005	44.93	4 582.0	2 417.4	1 648.1	8 695 527.2	1.935 3
2006	30.57	3 110.0	1 640.8	640.0	3 376 792.4	1.104 6
2007	39.37	4 017.0	2 119.4	1 193.1	6 294 573.7	1.598 8

量受地表径流量的影响更大。由表 3 可知,由于径流量年际差异较大,导致土壤侵蚀模数、输沙模数和输沙量有较大的年变化,尤其是输沙模数和输沙量年际变化更突出。

3.2 流域出口吸附态磷年污染负荷

通过盲数计算输沙量,由动态吸附态磷污染负荷计算模型,计算得到磷负荷量(表 4)。

由表 4 可知,流域出口的吸附态磷负荷逐年变化明显,虽然污染物富集比与各年输沙量是降幂函数关系,但是指数绝对值小于 1,富集比变化趋势不明显,污染物磷的变化趋势仍然是随降雨径流量的增加而增加,只是污染负荷随径流量的变化比输沙量的变化较缓。1998 年、2000 年和 2004 年突然变大的情况与这三年降雨总量较大、降雨强度大、降雨侵蚀力因子大有关,2004 年地表径流量达到高峰。可见,降雨侵蚀力因子和地表径流量是流域内吸附态磷负荷的年际变化的重要因素。

以 2007 年流域磷负荷空间分布图(图 4)为例,结合子流域分布图和重分类后流域土地利用图,流域非点源磷污染最严重的地区主要分布在浦里河流域,尤其是浦里河上游、东河下游、南河沿岸人口聚集区,开县县城周边人口聚集区以及彭溪河流域,这些地区

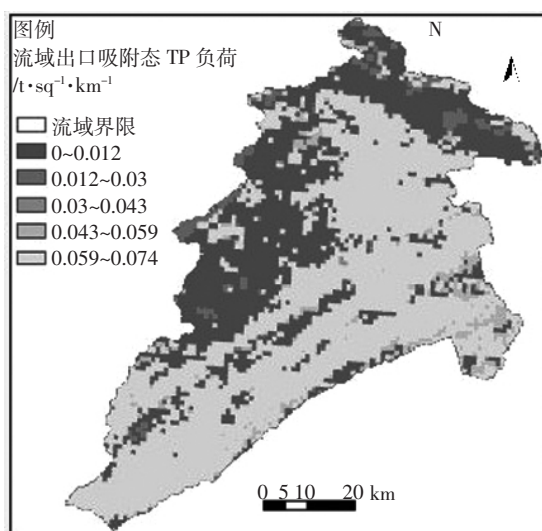


图 4 2007 年吸附态 TP 负荷空间分布

Figure 4 Spatial distribution of adsorbed phosphorus load in 2007

土地利用类型中旱田和混合地、水田等占绝对优势;而桃溪河流域、东河上游、南河下游周边因草地和林地面积广大,磷污染输出负荷相对较小。非点源磷污染负荷的空间分布主要受流域内土地利用类型的空间分布差异的影响,还与人为活动有关。总体来说,旱田及混合地带来的磷污染负荷严重,水田次之,草地带来的污染负荷最少,即:旱田及混合地>草地>水田>林地>城镇用地。合理控制农业化肥和粪肥的施用量,是控制农村非点源和流域非点源磷污染的关键所在。

3.3 模型的验证

3.3.1 土壤侵蚀模数和输沙模数

由于只有多年平均的土壤侵蚀模数资料,而无各年的资料,故选用平均数据对模拟结果进行间接验证。参照相关研究成果^[24-26],根据中科院《长江三峡生态与环境地图集》中的“三峡库区不同土地利用土壤侵蚀等级图”进行量取计算得出,小江流域平均土壤侵蚀模数为 $3\,968.8\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,与近十年各年采用盲数理论计算的土壤侵蚀模数(表 3)得出的均值 $3\,797.74\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相对误差为 4.31%;通过新华站月水沙关系计算新华站多年平均输沙量为 822 万 t,利用面积比关系,推测设定流域出口模拟输沙量与实测值的相对误差为 8.32%。研究结果表明,模型具有科学合理性。

3.3.2 总磷负荷

由于没有非点源污染的实测资料,采用水文估算法进行估算。水文估算法是根据水文学原理,考虑到点源和非点源污染的形成和运移规律,把由河川基流(非汛期径流)推求的 TP 污染负荷作为排放量相对稳定的点源污染负荷,把河川径流产生的 TP 污染负荷减去基流负荷即是非点源污染负荷近似作为实测值,

表 5 流域出口总磷负荷计算值与实测值对比

Table 5 The calculation and measured value contrast of TP load in the export of watershed

年份	2003	2004	2005	2006	2007	平均值
吸附态 TP 负荷/t	284.73	497.46	369.0	173.14	284.95	321.86
水文估算法 TP 负荷/t	319.21	634.95	378.94	246.4	322.79	380.46

表 4 流域出口各年吸附态磷负荷

Table 4 Absorbed phosphorus load each year of the Watershed export

年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	平均
TP/t	156.2	375.3	173.3	324.9	140.5	164.6	284.7	497.5	369.0	173.1	284.9	267.6

河川径流 TP 污染负荷采用实测值。由计算得知,吸附态 TP 污染负荷占有非点源污染总负荷绝对优势,本文计算结果为 84.6%(表 5),与实际情况基本相同,符合磷素的吸附、溶解等物理化学变化规律。2004 年水文估算法 TP 负荷突然增高与实测的 TP 浓度突然增高一致。

4 结语

通过分析引起流域非点源污染负荷年际变化的主要因素,提出小江流域土壤侵蚀模数与输沙模数模型。鉴于在一定的条件下,研究区域内的植被覆盖状况和水土保持管理技术等随空间位置的变化发生不确定性的变化,土壤属性和地形条件也因空间位置的变化客观上具有一定的未知性,采用 GIS 技术,应用盲数理论将每个因子由离散的点数据结合成连续的灰区间,每个区间内点数据出现的频率作为灰区间可信度的大小。运用本文所建的非点源污染负荷模型和盲数理论进行的污染负荷研究,考虑了因子时间、空间方面的变异,分别计算了流域各年的土壤侵蚀量和输沙量,进而计算了流域出口吸附态磷污染负荷,从计算结果看,所建立的模型合理,运用盲数理论来研究流域非点源吸附态负荷可行。

研究结果表明,小江流域的土壤侵蚀与泥沙流失相当严重。因此,采用合理的等高耕作等农业耕作措施;退耕还林、造林种草等水土保持林草措施;农田梯化、山沟治理等水土保持工程措施势在必行。

参考文献:

- [1] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京:海洋出版社, 2003:1-5.
WANG Xiao-yan. Non-point source pollution and its management[M]. Beijing: Ocean Publishing Company, 2003:1-5.
- [2] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall-erosion losses from crop-land east of the Rocky Mountains[M]. USDA Agriculture Handbook, 1965.
- [3] Wei Ouyang, Fang-hua Hao, Xue-lei Wang, et al. Non-point source pollution responses simulation for conversion cropland to forest in mountains by SWAT in China[J]. *Environmental Management*, 2008, 41:79-89.
- [4] 陈国湖. 农业非点源污染模型 AGNPS 及 GIS 的应用[J]. 人民长江, 1998, 29(4):20-22.
CHEN Guo-hu. The application of agricultural non-point source pollution model AGNPS and GIS[J]. *Yangtze River*, 1998, 29(4):20-22.
- [5] Wenjing LU, Hongtao WANG. Role of rural solid waste management in non-point source pollution control of Dianchi Lake catchments, China[J]. *Front Environ Sci Engin China*, 2008, 2(1):15-23.
- [6] 王光远. 未知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4):1-10.
WANG Guang-yuan. Unascertained information and its mathematical treatment[J]. *Journal of Harbin Architecture and Civic Engineering Institute*, 1990, 23(4):1-10.
- [7] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定性信息的数学处理及应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.
LIU Kai-di, WU He-qin, PANG Yan-jun, et al. The mathematical treatment and application of unascertained information[M]. Beijing: Scientific Publishing Company, 1999.
- [8] 刘晓燕, 张国珍. 中国水环境非点源污染负荷的估算研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(4):63-66.
LIU Xiao-yan, ZHANG Guo-zhen. Water environment non-point source pollution loading estimation methods in China[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(4):63-66.
- [9] 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 T, Meng W, Edwin Ongley, et al. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3):401-407.
- [10] 孟丹. 基于 GIS 的石头口门水库流域农业非点源污染研究[D]. 沈阳:东北师范大学, 2005, 27-29.
MENG Dan. Study of rural non-point source pollution in Shitoukoumen reservoir reach based on GIS[D]. Shenyang: Northeast Normal University, 2005, 27-29.
- [11] 薛金凤, 夏军, 梁涛, 等. 颗粒态氮磷负荷模型研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(3):334-337.
XUE Jin-feng, XIA Jun, LIANG Tao, et al. Research on load model of particulate nitrogen and phosphorus[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3):334-337.
- [12] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(2):434-439.
LI Xue-ping, SHI Xiao-jun. Dynamic characteristics of phosphorus in purple paddy soil and its environmental impact[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2):434-439.
- [13] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2):310-315.
CAO Cheng-jin, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, et al. Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2):310-315.
- [14] 陆海明, 尹澄清, 等. 于桥水库周边农业小流域氮素流失浓度特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2):349-355.
Lu H M, Yin C Q, et al. Nitrogen loss from agricultural catchments by drinkingwater sources-A case study of the Yuqiao Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2):349-355.
- [15] Rustomji P, Prosser I. Spatial patterns of sediment delivery to valley floors: Sensitivity to sediment transport capacity and hillslope hydrology relations[J]. 2001, 15(6):1003-1018.
- [16] 周伏建, 等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1):13-18.
ZHOU Fu-jian, et al. The index of rainfall erosivity -R in Fujian

- Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(1):13-18.
- [17] 张建国, 范建容, 王玉宽, 等. 重庆市降雨侵蚀力(R 值)的时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1):56-59.
- ZHANG Jian-guo, FAN Jian-rong, WANG Yu-kuan, et al. Temporal and spatial characteristics of R value in Chongqing City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(1):13-18.
- [18] 曹彦龙, 李崇明, 郭劲松, 等. 重庆三峡库区非点源污染来源分析及负荷计算[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4):1-5.
- CAO Yan-long, LI Chong-ming, GUO Jin-song, et al. Pollutant source analysis and pollution loads estimation from non-point source in Chongqing Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(4):1-5.
- [19] 陆雍森. 环境评价[M]. 第2版. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- LU Yong-sen. Huan Jing Ping Jia[M]. secondly publishing. Shanghai: Tongji University Publishing Company, 1999.
- [20] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19-24.
- CAI Chong-fa, DING Shu-wen, SHI Zhi-hua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2):19-24.
- [21] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4):473-477.
- SHI Zhi-hua, CAI Chong-fa, DING Shu-wen, et al. Research on nitrogen and phosphorus load of agricultural non-point sources in middle and lower reaches of Hanjiang River based on GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4):473-477.
- [22] 蔡崇法, 丁树文, 张光远, 等. 三峡库区紫色土坡地养分状况及养分流失[J]. 地理研究, 1996, 4(1):665-668.
- CAI Chong-fa, DING Shu-wen, ZHANG Guang-yuan, et al. A preliminary study on the conditions and losses of nutrients of purple soils in Three Gorge Reservoir Area[J]. *Geographical Research*, 1996, 4(1):665-668.
- [23] 李如忠, 钱家忠, 孙世群, 等. 不确定性信息下流域土壤侵蚀量的计算[J]. 水利学报, 2005, 36(1):89-94.
- LI Ru-zhong, QIAN Jia-zhong, SUN Shi-qun, et al. Calculation of basin soil erosion load according to uncertain information[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(1):89-94.
- [24] 张继生, 王平义, 刘亚辉. 三峡库区中小流域产沙数学模型[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(4):117-120.
- ZHANG Ji-sheng, WANG Ping-yi, LIU Ya-hui. Mathematical model on sediment yield of middle/small watershed at the area of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2004, 23(4):117-120.
- [25] 柳建龙, 谭正明. 开县库区水土流失浅析[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(5):24-26.
- LIU Jian-long, TAN Zheng-ming. Preliminary analysis of water and soil erosion in Kaixian Section[J]. *Chongqing Environmental Science*, 1999, 21(5):24-26.
- [26] 余炜敏. 三峡库区农业非点源污染及其模型模拟研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005:60-63, 68, 73.
- YU Wei-min. Modeling study of non-point source pollution of watershed in Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005:60-63, 68, 73.