

嘉陵江流域吸附态非点源污染负荷研究

龙天渝, 李继承, 刘腊美

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:以美国通用土壤流失方程为基础, 通过考虑引起流域土壤流失年际变化的水文条件和土地管理因素及泥沙输移过程的时空差异, 提出了能够反映流域泥沙输出量逐年动态变化的估算方法, 并以嘉陵江流域为研究对象进行了验证. 在此基础上, 根据流域吸附态氮磷污染年负荷与年泥沙输出量的相互关系, 建立了流域吸附态氮磷污染年负荷模型. 基于地理信息技术, 应用所建模型, 对嘉陵江流域 1990~2005 年因水土流失产生的吸附态氮磷污染负荷的空间分布进行了模拟和定量研究. 结果表明, 该流域吸附态氮磷流失较严重的地区主要分布在上游的白龙江和西汉水子流域; 近年来, 由于流域水土流失治理工作的进展, 吸附态氮磷污染负荷逐年减少, 近 5 年平均吸附态氮磷污染负荷分别为 34 423 t/a 和 1 848 t/a, 与 1990 年相比减少约 60%.

关键词:嘉陵江流域; 水土流失; 非点源污染; 氮磷污染负荷

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)07-1811-07

Adsorbed Non-point Source Pollution Load of Jialing River Basin

LONG Tian-yu, LI Ji-cheng, LIU La-mei

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on the American Universal Soil Loss Equation, focused on the two main factors that are hydrology condition and land management practice which can influence the soil loss in the watershed change yearly, and took into account the sediment transport process which can effect the soil loss differ spatially, a new sediment load evaluation method was put forward which can reflect the yearly change process of soil loss. Took Jialing River basin as a research example and validated the new evaluation method. Furthermore, according to the correlation between the sediment load and adsorbed nitrogen and phosphorus pollution load, established a yearly load evaluation model of the adsorbed nitrogen and phosphorus pollution. By virtue of the geographical information technology, the yearly load and spatial distribution of the adsorbed nitrogen and phosphorus pollution due to soil erosion in the Jialing River basin from 1990 to 2005 have been studied by the established model. The results show that adsorbed phase of nitrogen and phosphorus pollution are quite seriously in the subbasin of Bailong River and Xihanshui River. In recent years, adsorbed nitrogen and phosphorus pollution loads have declined year by year because of the conservation practices of soil and water in this basin. The average loads of adsorbed nitrogen and phosphorus pollution are 34 423 t/a and 1 848 t/a respectively in the past five years, which have reduced by about 60% from 1990.

Key words: Jialing River basin; soil erosion; non-point source pollution; nitrogen and phosphorus pollution

水体的富营养化是水环境的主要问题之一, 降雨径流形成的营养物负荷是产生富营养化的重要原因, 随着三峡水库的建成, 受水位壅升、回水顶托的影响, 近年来, 大部分次级河流暴发了严重的水华, 富营养化问题成为当前三峡库区最为严重的生态环境问题. 有关研究指出, 水环境中, 氮磷是制约水体营养程度的主要因子, 特别是三峡水库中有 80% 以上的磷是以吸附态形式存在, 水体中泥沙悬移质与磷含量的相关系数为 0.99^[1]. 因此, 流域输沙及其带来的大量吸附态氮、磷对水库水体构成了严重威胁. 嘉陵江流域是三峡水库泥沙的主要来源之一, 该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和管理措施不利, 水土流失所引起的吸附态氮磷污染负荷成为流域的主要污染. 因此, 开展对嘉陵江流域水土流失量及吸附态氮磷污染负荷的研

究, 对于保障三峡水库的水环境安全、促进库区生态环境的可持续发展具有重要的意义.

吸附态非点源污染的实质在于土壤流失, 目前, 国外在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, 应用最广的是美国的通用土壤流失方程 (USLE) 及其修正方程 (RULSE)^[2~4], 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^[5~11], 也都是以 USLE 方程作为基础对区域土壤流失量进行计算的. 在我国, USLE 方程也被广泛应用在许多流域的土壤流失及吸附态非点源污染负荷的模拟与估算中^[12~17]. 由于 USLE 方程

收稿日期: 2007-07-09; 修订日期: 2007-09-07

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-07); 重庆市自然科学基金项目 (8091)

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

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,因此,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有所不足.此外,流域坡面上土壤侵蚀量和污染负荷的产生量并不等于其输出量,只有最终进入河道的泥沙和污染负荷才会对河流水质造成危害^[18],并且不同年份、不同空间位置的泥沙和污染物经历的输移过程具有时空差异.

为了分析流域泥沙吸附态非点源污染负荷的年际变化情况,本研究以 USLE 方程为基础,从影响流域土壤流失年际变化的水文条件和土地管理活动 2 个主导因素入手,并从泥沙输移的距离与落差等方面综合考虑泥沙输移过程的时空异性,提出了能够反映流域土壤流失逐年动态变化的流域泥沙输出量估算方法,同时以嘉陵江流域为对象进行了验证.在此基础上,建立起流域吸附态氮磷污染年负荷动态模型,并在地理信息技术支持下,应用所建立的模型,对嘉陵江流域 1990~2005 年因土壤流失产生的吸附态氮磷污染负荷进行了定量估算和空间分布模拟,以期 为嘉陵江流域的水土治理和污染防治提供依据.

1 流域概况

嘉陵江发源于陕西省秦岭南麓,全流域位于四川盆地北部,水系呈扇形分布,河长1 120 km,流域控制站——北碚水文站的集水面积为156 142 km²,平均年蒸发量 709.4 mm,平均年降雨量1 098 mm.嘉陵江流域为亚热带季风气候,降雨季节分配极不均匀,夏秋多雨,冬春少雨,5~9 月雨量占全年雨量的 70%~90%.流域内水系发育,支流众多,北碚以上流域由东支渠江与西支涪江在合川附近汇入嘉陵江,干流在重庆汇入长江(如图 1).

2 年泥沙输出量的计算

Wishemier 等^[2]提出的 USLE 方程是国际上广泛使用的比较成熟的土壤侵蚀模型,该方程全面考虑了影响土壤侵蚀的各种因素,其表达式为:

$$X = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中, X 为土壤侵蚀模数 $[\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$; R 为降雨侵蚀动力因子; K 为侵蚀对象土壤可蚀性因子; LS

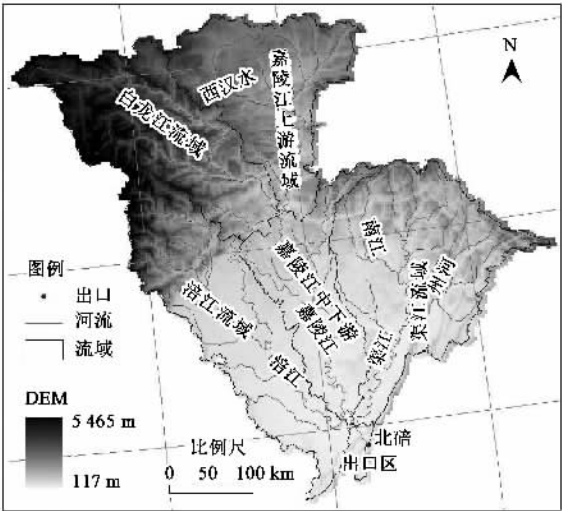


图 1 嘉陵江流域地形、河网、子流域

Fig.1 Topography, river network and sub-basins of Jialing River Basin

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:

$$Q_s = A \cdot X \cdot \lambda \tag{2}$$

式中, Q_s 为泥沙输出量 $(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$; A 为计算区域面积 (km^2) ; λ 为泥沙输移系数.由于 C 、 P 因子同为土壤侵蚀的抑制因子,与人类对土地的管理活动密切相关,为分析方便,将 $C \cdot P$ 合并为土地管理因子 M ,把式(1)代入式(2)有:

$$Q_s = A \cdot K \cdot LS \cdot R \cdot M \cdot \lambda \tag{3}$$

USLE 方程适用于计算区域特定条件下长期平均的土壤流失量.然而,分析嘉陵江流域出口北碚水文站的水沙资料(见表 1)发现,20 世纪 80 年代末之前,流域年均输沙量相对稳定,波动不大,但从 1989 年该流域实施以“长治”工程为主的大规模水土流失治理以来,年均输沙量显著减少,随着治理的不断深入,减少趋势还将继续保持^[19].鉴于嘉陵江流域近年来泥沙输出量的年际变化十分显著,要研究水土流失引起的吸附态非点源污染负荷,仅从多年平均水平的层面上分析是不够的.

表 1 北碚水文站各时段平均水沙量^[19,20]

Table 1 Temporal average of flow discharge and sediment load at Beibei hydrology station

年份	年均径流量 /亿 m ³	年均输沙量 /亿 t	平均含沙量 /kg·m ⁻³	年份	年均径流量 /亿 m ³	年均输沙量 /亿 t	平均含沙量 /kg·m ⁻³
1954~1959	674	1.48	2.20	1980~1989	764	1.40	1.83
1960~1969	750	1.82	2.43	1990~1996	573	0.49	0.86
1970~1979	604	1.07	1.77	1996~2003	509	0.30	0.59

2.1 年际泥沙输出量变化的主导因素分析

要估算具体年份的流域泥沙输出量,需将影响土壤流失状况年际变化的主导因素在相应的计算式中体现出来.流域土壤流失的年际变化,主要与流域年内降雨产流等水文因素变化以及人类土地管理活动造成的流域内侵蚀、产沙和输沙环境的改变有关^[21].从式(3)中的因子组成可以看出, L 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,在较长时期内不会发生改变,而因流域降雨量时空分布差异以及水土流失治理影响带来的 R 因子、 M 因子及输移系数 λ 的变化才是引起土壤流失逐年变化的主导因素.根据以上分析,将式(3)改为计算年泥沙输出量的方程,为:

$$Q_{s,i} = \underbrace{A \cdot K \cdot LS}_{\text{常量}} \cdot \underbrace{R_i \cdot M_i \cdot \lambda_i}_{\text{逐年变化量}} \quad (4)$$

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

R_i 的年际变化主要是由于各年降雨量和降雨强度等水文条件改变造成的; M_i 年际变化的影响因素主要是退耕造林、坡田改梯、修建水库等人类土地管理活动;而流域泥沙输移系数 λ_i 的年际变化要受到水文和人类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,直接改变了流域的输沙环境.将 λ 表示为受水文因素影响的 λ_q 和受土地管理影响的 λ_m 两部分,即 $\lambda = \lambda_q \cdot \lambda_m$,则式(4)变为:

$$Q_{s,i} = \underbrace{A \cdot K \cdot LS}_{\text{常量}} \cdot \underbrace{(R_i \cdot \lambda_{q,i})}_{\text{水文影响}} \cdot \underbrace{(M_i \cdot \lambda_{m,i})}_{\text{土地管理影响}} \quad (5)$$

λ_q 的变化可通过计算不同流量条件下的径流泥沙搬运力 TC 而得,Prosser等^[22]认为流量 q 与坡度 s 是决定泥沙搬运的主导因子,其表达式为:

$$TC = A \cdot q^a \cdot s^b \quad (6)$$

式中, TC 为径流泥沙搬运力($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); s 为坡度 θ 的正弦; a 、 b 为系数,依计算方法和空间尺度的不同而变化.水槽试验结果表明 a 和 b 变化范围介于1.0~1.8.在下垫面因素不变的条件下,单独考虑径流的影响,可将 s^b 视为常数,径流泥沙搬运力只与 q 有关,根据研究流域情况对系数 a 取中间值1.4,则可得如下关系:

$$\frac{\lambda_{q,i}}{\lambda_q} = \frac{TC_i}{TC} = \left(\frac{q_i}{q} \right)^{1.4} \quad (7)$$

土地管理活动对土壤侵蚀和泥沙输移的影响十

分复杂,对于每年的 M_i 和 $\lambda_{m,i}$ 难以从理论上找到确定的方法或公式进行计算.由于因子 M_i 和 $\lambda_{m,i}$ 都与土地管理活动有关,因此可将 M_i 和 $\lambda_{m,i}$ 概化为土地管理活动 m_i 的函数,即 $M_i \lambda_{m,i} = f(m_i)$,引入土地管理影响系数 α_i ,将其定义为:

$$\alpha_i = \frac{f(m_i)}{f(m)} = \frac{M_i \lambda_{m,i}}{M \lambda_m} \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(5)得泥沙输出量计算式:

$$Q_{s,i} = \left(\frac{q_i}{q} \right)^{1.4} \cdot \alpha_i \cdot A \cdot K \cdot LS \cdot R_i \cdot M \cdot \lambda \quad (9)$$

2.2 因子计算

(1) K 因子算式 K 为土壤可蚀性因子,表征某一类型土壤发生侵蚀的敏感程度,可按照Williams等^[23]在EPIC模型中的算法或者根据土壤属性查询侵蚀诺模图得出,在这里,直接引用邓良基等^[24]在该区域的研究成果,结合流域的土壤图确定不同土壤类型的 K 值.

(2) LS 因子算式 参考我国其他地区的研究成果,引用王宁等^[25]在与本流域地形特征相似的松花湖流域使用的经验公式进行计算:

$$LS = (l/22.13)^m (0.085 + 0.045\theta + 0.0025\theta^2) \quad (10)$$

式中, l 为坡长(m); θ 为坡度($^\circ$); m 为坡长指数,其值的确定与坡度相关:

$$m = \begin{cases} 0.30 & \theta \geq 22.5^\circ \\ 0.25 & 17.5^\circ \leq \theta < 22.5^\circ \\ 0.20 & 12.5^\circ \leq \theta < 17.5^\circ \\ 0.15 & 7.5^\circ \leq \theta < 12.5^\circ \\ 0.10 & \theta < 7.5^\circ \end{cases}$$

(3) R_i 因子算式 利用各年月降雨量和年降雨总量通过韦斯曼经验公式^[23]求算 R_i 值:

$$R_i = \sum_{j=1}^{12} 1.735 \times 10^{\left(1.5 \cdot \frac{P_j^2}{P^2} - 0.8188 \right)} \quad (11)$$

式中, P 为 i 年降雨总量(mm); P_j 为 i 年1~12月的各月平均降雨量(mm).利用流域内各气象站点降雨资料计算得各点 R_i 值,并进行空间插值得到 R_i 因子专题图层.

(4) M 因子计算 M 因子由 C 、 P 因子组成, C 因子根据蔡崇法等^[26]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 之间的数学关系计算而得:

$$\begin{cases} C = 1 & c = 0 \\ C = 0.658 - 0.343\,61\lg c & 0 < c < 78.3\% \\ C = 0 & c > 78.3\% \end{cases}$$

(12)

P 值由土地单元采取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 P 值取 1,水土保持措施越好 P 值越小。

(5) λ 值计算 长江水利委员会在长江流域长期定位研究的结果表明,长江流域值大约在 0.1~0.4 之间^[17],参考文献[27],确定嘉陵江流域平均泥沙输移系数为 0.25.考虑到每个土地单元空间位置的差异,到流域出口的距离和高差不同,侵蚀的土壤被输移到出口的比例自然不同,所以,对于每个栅格单元的 λ 值,笔者根据栅格单元到流域出口的距离与相对高差对平均 λ 值进行加权而得。

(6) α_i 值计算 土地管理因子主要受水土流失治理状况的影响,嘉陵江流域的水土流失治理,是根据规划的治理目标,按照一定的时间步骤进行实施的.那么,由于水土流失治理工作时间的持续性及其治理效果的累积性而引起的土地管理影响系数 α_i 的变化是否也会在时间上呈现一定的规律.结合流域 1990~1999 年实际监测的降雨和出口的径流、泥沙资料,利用式(9)逆推得到每年的 α_i 值,分析发现, α_i 值随年度的变化存在一定的回归关系(如图 2),将其进行曲线拟合,得到时间和土地管理影响系数 α_i 的关系为:

$$\alpha_i = 1.020\,8e^{-0.089\cdot\Delta t_i} \quad (R^2 = 0.808\,2)$$

(13)

式中, Δt_i 为所求年份与 1990 年的时间间隔(年),1990 年为 0,1991 年为 1,依此类推。

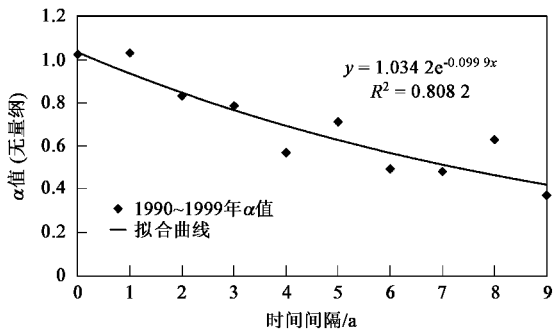


图 2 嘉陵江流域 α 因子与时间 Δt 关系曲线
Fig.2 Relation between α and Δt in Jialing River Basin

由图 2 可以看出, α_i 值随着时间的增加逐年降低,其指数型关系正好反映出随着治理工作对下垫

面环境的改善,减沙空间越来越小,减沙效果不如前期显著的实际情况.因此,可以认为在当前土地管理措施和治理力度下,流域下垫面逐渐修复所引起的 α_i 值变化有一定的规律可寻,可用式(13)来近似估算今后各年份的 α_i 值。

3 吸附态污染负荷模型与吸附态氮磷负荷估算

3.1 吸附态非点源污染负荷模型

吸附态非点源污染物以被侵蚀的土壤为载体,流域出口的污染负荷决定于流域坡面上的土壤流失、污染物元素在土壤中的背景含量和流失过程的富集比例.在参考相关报道^[17,28]的基础上,采用以下公式计算流域出口吸附在泥沙中的氮磷非点源污染负荷:

$$L_{N,P} = Q_s \cdot C_a \cdot \eta$$

(14)

$$\eta = 7.4 \cdot Q_s^{-0.2} \cdot T_f$$

(15)

式中, $L_{N,P}$ 为吸附态的氮磷负荷(t/a); C_a 为土壤中的氮磷元素的背景含量(g/t),由中国科学院土壤信息空间数据库得到; η 为污染物富集率(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或所占重量的百分数计算。

3.2 吸附态氮磷负荷估算

为了应用所建立的模型模拟嘉陵江流域非点源负荷的空间分布,需要收集流域的降雨、地形、土壤、土地利用、农业管理等相关数据和资料(见表 2).以 100 m×100 m 的单位栅格为基本单元,将各种空间数据和属性数据在地理信息系统软件(ArcGIS9.1)支持下进行信息处理并制作专题图层,对流域复杂的自然环境进行模拟并根据需要在计算机上进行空间分析和图层运算,从而完成土壤流失量和吸附态氮磷污染负荷空间分布的模拟和估算。

4 计算结果及分析

4.1 泥沙输出量估算与检验

根据 1990~1999 年实测的降雨、径流和泥沙资料,回归得到 α_i 值计算式(13)后,代入式(9)得到流域泥沙输出量计算式,利用 2000~2005 年的实测泥沙资料对其进行验证.由表 3 可见,6 a 中模拟值与实测值波动趋势一致,且相对误差都控制在 15% 以内,对于条件复杂的大型流域而言,模拟效果已比较理想.说明通过考虑引起水土流失年际变化的水文条件和土地管理活动造成的下垫面变化 2 个主导因素的影响,在 USLE 方程基础上改进的流域年输沙

量计算新方法,可以对流域的年泥沙输出量进行较准确的计算和预测,为进一步结合吸附态污染负荷

模型对流域的吸附态氮磷污染逐年负荷进行估算奠定了良好的基础.

表 2 基础数据说明
Table 2 Description of basic data

数据名称	类型	说明	来源
DEM(90 m)	栅格图	90 m 分辨率嘉陵江流域数字高程,用来提取流域的坡长和坡度,生成河网并划分子流域	地球系统科学数据共享网 http://www.geodata.cn
土壤	多边形	1:400 万流域土壤类型及分布图	
土地利用	栅格图	城镇、旱地、水田、草地、灌木、林地、水域、荒地等各种土地利用类型	美国地质勘测局(USGS)
降雨	DBF	1990~2005 年的平均各月降雨量和年降雨总量	中国科学院自然资源数据库、土壤数据库
土壤属性	DBF	土壤有机质、总氮、总磷等背景含量	

表 3 2000~2005 年北碚泥沙输出量实测值与模拟值对比
Table 3 Comparison between sediment loads of observation and simulation at Beibei from 2000 to 2005

年份	实测输出量 /亿 t	模拟输出量 /亿 t	相对误差 /%
2000	0.373	0.329	-13.40
2001	0.234	0.213	-9.78
2002	0.126	0.143	11.72
2003	0.306	0.359	14.73
2004	0.175	0.168	-4.03
2005	0.423	0.379	-11.51

4.2 吸附态氮磷污染负荷

在 GIS 支持下利用式(9)计算得到嘉陵江流域 1990~2005 年的年泥沙输出量后,再用式(14)对流域出口的年吸附态氮磷污染负荷进行计算(结果如表 4 所示),并输出各年吸附态氮磷污染空间分布图.模拟结果表明,虽然流域污染负荷逐年变化,但各年吸附态氮磷污染主要发生区的空间分布状况基本类同,因此,这里只给出 2005 年的吸附态氮磷污染空间分布图进行流域吸附态氮磷污染危险区的识别和污染现状的分析(图 3、图 4).

表 4 流域吸附态氮磷污染负荷计算结果/t
Table 4 Annual loads of sorbed phase of nitrogen and phosphorus in the basin/t

年份	吸附态氮负荷	吸附态磷负荷	年份	吸附态氮负荷	吸附态磷负荷
1990	89 732	4 816	1998	83 236	4 468
1991	54 777	2 940	1999	28 274	1 518
1992	70 604	3 790	2000	41 037	2 203
1993	75 041	4 028	2001	29 309	1 573
1994	30 239	1 623	2002	20 415	1 096
1995	39 347	2 112	2003	42 849	2 300
1996	27 701	1 487	2004	24 481	1 314
1997	12 808	687	2005	47 104	2 528

4.3 结果分析

由表 4 可以看出,在 1990 年“长治”工程刚刚开展的初期,流域水土流失治理还未取得实际效果,吸附态氮磷污染十分严重;随着治理的不断深入,流域水土流失治理工程取得显著效果,虽然个别年份由于水文偏丰的影响,吸附态氮磷污染负荷偏大,但总体呈现明显的下降趋势,即使在 1998 年特大洪水造成大量泥沙流失,引起吸附态氮磷污染负荷的剧烈反弹,其值也只是接近 1990 年的水平;近 5 年平均吸附态氮磷污染负荷分别为 34 423 t/a 和 1 848 t/a,与 1990 年相比减少约 60%,说明流域水土流失治理工

作对非点源污染防治起到了重要作用.

从 2005 年流域吸附态氮磷污染负荷空间分布上来看,白龙江流域和西汉水流域是吸附态氮磷污染负荷最为严重的区域,无论氮磷,其流失模数都为最高,这主要是因为白龙江和西汉水流域多为山地陡坡,且植被破坏,土壤氮磷背景含量相对较高造成的;涪江流域、渠江流域的吸附态氮磷污染负荷相对较低,在它们上游海拔较高的山地,由于土地覆盖多为荒地和灌木,水土保持措施较差,导致其氮磷污染负荷较高;嘉陵江中下游、涪江中下游、渠江下游的吸附态氮磷流失负荷为最低,这主要得利于下游地

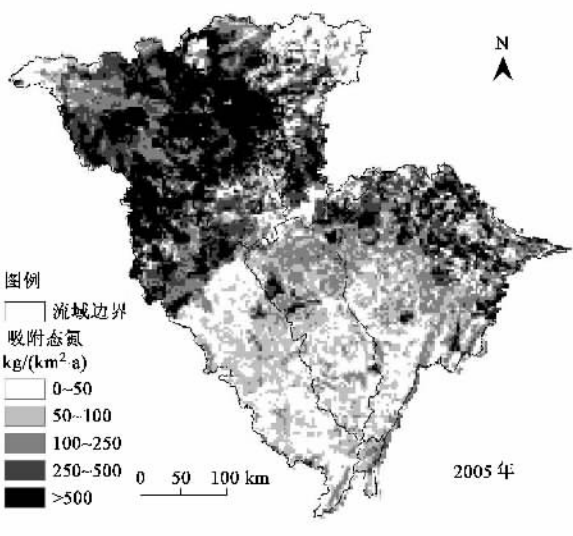


图 3 吸附态氮污染负荷空间分布

Fig.3 Spatial distribution of adsorbed nitrogen

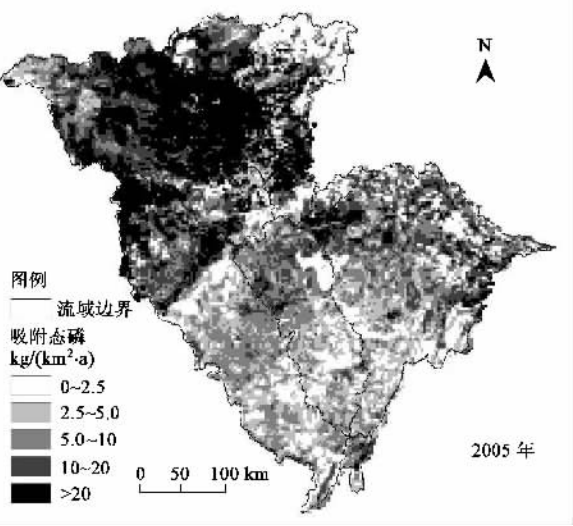


图 4 吸附态磷污染负荷空间分布

Fig.4 Spatial distribution of adsorbed phosphorus

区平坦的地势和有利的水土保持措施.

5 结论

(1)本研究从 USLE 方程的基本原理出发,分析了影响流域土壤流失年际变化的水文条件和土地管理活动 2 个主导因素,并从泥沙输移的距离与落差等方面考虑泥沙输移过程的时空异性,建立了嘉陵江流域吸附态氮磷污染年负荷动态模型,通过验证,模拟结果比较可靠,可以用来对每年流域出口的输沙量及水土流失造成的吸附态氮磷污染负荷进行预测.

(2)流域吸附态氮磷污染负荷大小同流域泥沙

输出量密切相关,受到水文条件和下垫面因素的影响,自 1990 年以来,由于水土流失治理的进展,吸附态氮磷污染负荷呈逐渐降低的趋势.近 5 年来,流域平均吸附态氮磷污染负荷分别为 34 423 t/a 和 1 848 t/a,与 1990 年相比减少约 60%,但污染仍然相当严重.

(3)由于嘉陵江域下垫面特征和土壤氮磷背景含量的巨大差异,水土流失造成的氮磷污染负荷空间分布也差异显著,吸附态氮磷流失最为严重的地区主要分布在白龙江和西汉水流域,下游地区相对较轻.

(4)通过封山造林、坡田改梯、生态农业等水土保持措施改善流域的侵蚀、产沙和输沙环境,可以明显降低吸附态氮磷污染负荷,改善流域水质环境.

参考文献:

[1] 洪一平,叶闽,臧小平. 三峡水库水体中氮磷影响研究[J]. 中国水利, 2004, (20):23-24.

[2] Wischemier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses-a Guide to Conservation planning [M]. Washington D C, USDA: US Department of Agriculture, Science and Education Administration, Agricultural Handbook, 1978. 537-539.

[3] Nyakatawa E Z, Jakkula V, Reddy K C, *et al.* Soil erosion estimation in conservation tillage systems with poultry litter application using RUSLE 2.0 model [J]. Soil and Tillage Research, 2007, **94** (2): 410-419.

[4] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RULSE 侵蚀模型的应用及进展 [J]. 水土保持研究, 2004, **11**(4): 80-83.

[5] Kinnell P I A. AGNPS-UM: applying the USLE-M within the agricultural non point source pollution model [J]. Environmental Modelling and Software, 2000, **15** (3): 331-341.

[6] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, *et al.* Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia) [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, **30**(8-10): 497-507.

[7] 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** (11): 1617-1627.

[8] Flipo N, Jeannée N, Poulin M, *et al.* Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France): Combined use of geostatistics and physically based modeling [J]. Environmental Pollution, 2007, **146** (1): 241-256.

[9] 曾思育,杜鹏飞,陈吉宁. 流域污染负荷模型的比较研究[J]. 水科学进展, 2006, **17**(1): 108-112.

[10] 胡雪涛,陈吉宁,张添柱. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, **23**(3): 124-129.

[11] 徐立刚,张奇. 流域非点源污染输移模型研究现状及展望 [J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(增刊): 326-322.

[12] 张有全,官辉力,赵文吉,等. 基于 GIS 和 USLE 的密云县土壤侵蚀评价及空间特征研究[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(3): 358-362.

[13] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. 基于 GIS 和 USLE 的非点源污染关键区识别[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(2): 170-174.

[14] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 366-374.

[15] 黄金良, 洪华生, 张珞平. 基于 GIS 和模型的流域非点源污染控制区划[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(4): 119-124.

[16] 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 等. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J]. 地理科学, 2004, **24**(2): 227-231.

[17] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面原氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(4): 473-477.

[18] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, (7): 1-20.

[19] 许全喜, 石国钰, 陈择方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水科学进展, 2004, **15**(4): 420-426.

[20] 张信宝, 文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. 水利学报, 2002, (4): 56-59.

[21] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, **18**(1): 123-132.

[22] Prosser I P, Rustomji P. Sediment transport capacity relations for overland flow [J]. Progress in Physical Geography, 2000, **24**: 179-193.

[23] Williams J R, Renard. EPIC-A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, **38**: 381-383.

[24] 邓良基, 侯大斌, 王昌全, 等. 四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究[J]. 中国水土保持 SWCC, 2003, (7): 23-25.

[25] 王宁, 朱颜明, 徐崇刚. GIS 用于流域径流污染物的量化研究[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 2002, **34** (2): 92-98.

[26] 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.

[27] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组、中国长江三峡工程开发总公司工程泥沙专家组编. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996-2000)第四卷, 长江三峡工程“九五”泥沙研究综合分析[M]. 北京: 知识产权出版社, 2002. 1-415.

[28] 庄咏涛, 李怀恩. 农业非点源污染模型浅析[J]. 西北水资源与水工程, 2001, **12**(4): 12-16.