

近 20 a 三峡库区泥沙输移比估算与吸附态氮磷污染负荷模拟

王丹¹, 邵景安^{2,3*}, 王金亮², 李阳兵^{2,3}, 倪九派¹, 高明¹, 谢德体¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 400047;
3. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 400047)

摘要: 该文把泥沙输移比细化到栅格空间, 以反映流域水文过程的地形指数作为泥沙受汇流的动力系数、植被截留阻力作为泥沙输移的阻力系数, 构建泥沙输移比模型, 最后运用已有的土壤侵蚀模型、泥沙负荷模型和吸附态氮磷污染负荷模型估算近 20 a 三峡库区吸附态氮磷污染负荷, 结果表明: ①影响库区泥沙输移的动力系数主要集中于中等以上区间 (0.4, 0.8), 空间异质性不显著, 而阻力系数表现较为复杂, 坡度低的平行岭谷区和河流冲积缓坡以及台地区较高, 坡度陡的秦巴山地北部区和武陵山区的高山峡谷地带偏低; ②库区泥沙输移比呈“单峰”结构, 近似正态分布, 均值为 0.48。空间上具有显著的异质性, 中、西部平行岭谷区泥沙输移比较小, 武陵山区和秦巴山区较高, 以河流河道为中心向两侧呈梯度增大趋势; ③泥沙负荷均值与负荷总量的年际变化趋势相同, 泥沙负荷总量的模拟值 (0.9 亿 t) 与公报监测值 (0.92 亿 t) 最为接近的是 1995 年。空间格局上因近 10 a 库区泥沙负荷量的均值变化不大, 泥沙负荷的低值区与高值区的空间分布比较稳定, 低值区的分布范围广泛, 集中度高, 而高值区的分布较为离散和破碎; ④吸附态氮磷负荷量与土壤侵蚀模数、泥沙负荷量在数值上同比增长, 在 2010 年负荷总量达到最大值, 分别为 1.2 和 0.6 亿 t。空间上总体分布相似, 具有不平衡特征, 从东向西呈逐渐减小趋势。与监测数据的相关分析, 吸附态氮磷负荷的模拟效果比吸附态磷更好, 且吸附态氮磷负荷在库区流域内存在空间相关性。

关键词: 氮; 磷; 污染; 泥沙输移比; 动力系数; 阻力系数; 吸附态氮磷; 污染负荷; 三峡库区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.023

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0167-10

王丹, 邵景安, 王金亮, 李阳兵, 倪九派, 高明, 谢德体. 近 20 a 三峡库区泥沙输移比估算与吸附态氮磷污染负荷模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 167-176. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.023 http://www.tcsae.org
Wang Dan, Shao Jing'an, Wang Jinliang, Li Yangbing, Ni Jiupai, Gao Ming, Xie Deti. Estimation of sediment delivery ratio and modelling of absorbed nitrogen and phosphorus load in Three Gorges Reservoir Area nearly 20 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 167-176. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.023 http://www.tcsae.org

0 引言

水土流失携带氮磷元素是吸附态氮磷迁移的主要载体^[1]。吸附态氮磷污染的形成关键取决于土壤泥沙的流失过程, 而土壤泥沙流失则会引发河湖淤积和水域富营养化等水环境污染问题。考虑泥沙输移和吸附态氮磷污染负荷模拟, 对流域综合治理有重要的理论和现实意义。

吸附态污染物一般将土壤颗粒作为迁移载体, 其产污多受土壤侵蚀的过程所控制, 因此, 现有吸附态氮磷污染负荷的研究主要运用土壤侵蚀模型模拟土壤侵蚀量, 再结合泥沙输移比等相关参数构建估算模型。其中, 有代表性的是 Haith 等^[2-4]提出的“规划”模型, 其主要考虑参数有土壤流失量、土壤固态氮磷污染物浓度、污染物富集比和流域泥沙输移比。国内研究多数也是在该模型基础上进行

的, 在模型中, 泥沙输移比 (sediment delivery ratio, SDR) 是关键性参数, 是连接地面侵蚀与河道输沙的纽带, 它的引入在一定程度上使得吸附态氮磷污染的负荷估算在真正意义上考虑了泥沙的输移状况^[5]。

现有泥沙输移比的研究方法主要集中于模型构建上, 如因子经验模型、分布式模型和物理模型^[6-8]。Ferro 等^[9]建立的泥沙输移分布模型 SEDD, 确定了泥沙输移系数与中值输移时间、泥沙输移比的关系; Fraser 等^[10]开发的分布式泥沙输移比评估模型 SEDMOD, 考虑了影响泥沙输移的坡度、坡形、地表粗糙度、与河道的距离、土壤质地和坡面径流特征。国内的泥沙输移比研究仅是在国外模型的基础上改进^[11-12], 且多数模型基本上是在中、小尺度上建立的 (坡面或小流域), 而在大的区域尺度上 (如长江、黄河流域等) 多选用区域均值, 如沈虹等^[13]估算汉江中下游流域颗粒态非点源磷负荷时, 采用的就是泥沙输移比均值 (0.28)。但是在模拟过程上, 更多的研究没有详尽考虑泥沙输移到相应流域出水口的路径不同, 因为, 土壤流失过程主要包括土壤物质的原位剥离 (产沙过程) 和泥沙在空间上的再分配过程 (输沙-沉积过程)^[14], 泥沙输移的物理过程必然会受到空间单元和径流的阻/动力以及输移路径的影响。

收稿日期: 2015-03-26 修订日期: 2015-06-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题 (2012ZX07104-003)

作者简介: 王丹, 女, 黎族, 辽宁阜新人, 博士生, 主要研究领域为国土整治及土壤环境质量。重庆 西南大学资源环境学院, 400716。

Email: 190101643@qq.com

*通信作者: 邵景安, 男, 汉族, 安徽亳州人, 博士, 研究员, 主要研究领域为土地利用与生态过程。重庆 重庆师范大学地理与旅游学院, 400047。

Email: shao_ja2003@sohu.com

由此, 本文重点考虑泥沙输移比, 通过对影响三峡库区泥沙输移的主要影响因素进行空间计算, 把泥沙输移比细化到栅格空间, 以反映流域水文过程的地形指数作为泥沙受汇流的动力系数、地表截留阻力作为泥沙输移的阻力系数, 构建泥沙输移比模型, 最后应用已有的土壤侵蚀模型、泥沙负荷模型和吸附态氮磷污染负荷模型估算 1990-2010 年间五期 (1990、1995、2000、2005 和 2010 年) 三峡库区泥沙负荷和吸附态氮磷污染负荷, 并利用水文监测数据对估算结果进行验证, 为有效防控库区面源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

三峡库区 (106°50′~110°50′E, 29°16′~31°25′N), 涉及渝鄂 22 个区 (县) 市, 幅员 5.8 万 km² (图 1)。地形高度、坡度变化大。土壤以紫色土、石灰土、黄壤、水稻土等为主。气候属亚热带季风气候区, 处于南温带和亚热带过渡地带, 年均气温在 17~19℃, 年均降水量 1 100~1 200 mm。植被以亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林、针叶林等为主。受地形起伏的影响, 土壤、气候、植被等分布的立体特征明显。截止 2013 年, 库区人口密度 226 人/km², 但人口分布的空间异质性较大, 60% 以上的区域人均耕地不足 667 m², 且以 ≥15° 的坡耕地为主 (约 75%)。

受大坝建设及波及效应对库区生态环境的叠加影响, 库区已成为中国长江上游流域主要的灾害频发区、水土流失重点区和生态脆弱区的集中发生地, 是中国乃至世界最为特殊的生态功能区。脆弱的生态环境与集中后靠的移民安置重叠后, 大大加重了人口、资源和环境间的矛盾。做好水土保持、水质保护和生物多样性维持对于投资庞大的三峡工程的安全运行、长江中下游的防洪与生态安全具有特殊、重要的战略意义^[15]。库区奉节以东为渝鄂边境山地, 沟壑纵横, 耕地较少, 生存条件恶劣。奉节以西属四川盆地边缘的渝东低山丘陵区, 自然地理状况虽比奉节以东要好, 但相当部分耕地处于 25° 左右的斜坡上, 土质较差。因此, 库区由土壤侵蚀所造成的水土流失较为严重, 是威胁三峡工程可持续运行的关键影响因子, 尤其是泥沙的输移沉积作用影响最大^[16]。

1.2 数据来源

①三峡库区 DEM 数据来源于中国西部数据中心, 空间分辨率 90 m (图 1); ②库区及其周边 1951—2010 年日降水量监测数据来源于国家气象局气象信息中心, 包括库区内部 7 个和周边 18 个国家气象基准站点 (图 1); ③库区土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所制作的 1:100 万中国土壤数据库—全要素数字化土壤图; ④库区土地利用数据来源于邵景安等^[17]的库区土地利用解译数据, 共为五期 (1990、1995、2000、2005 和 2010 年), 解译结果得到实地验证并达到精度要求; ⑤库区流域数据来源于国家基础地理信息中心的全国 1:100 万流域分区数据, 囊括全国一级流域及其子流域矢量数据; ⑥河流断面面源污染监测数据来源于重庆和湖北省环境科学

研究院环境监测中心发布的自动监测水质周报, 以及长江泥沙公报。此外, 库区矢量边界依据三峡建设委员会对所囊括渝鄂 22 个区 (县) 市的行政边界自行制作 (图 1), 并将所有栅格数据统一转换为空间分辨率为 90 m, 图像统一转为 Albers 等积投影参与空间运算。

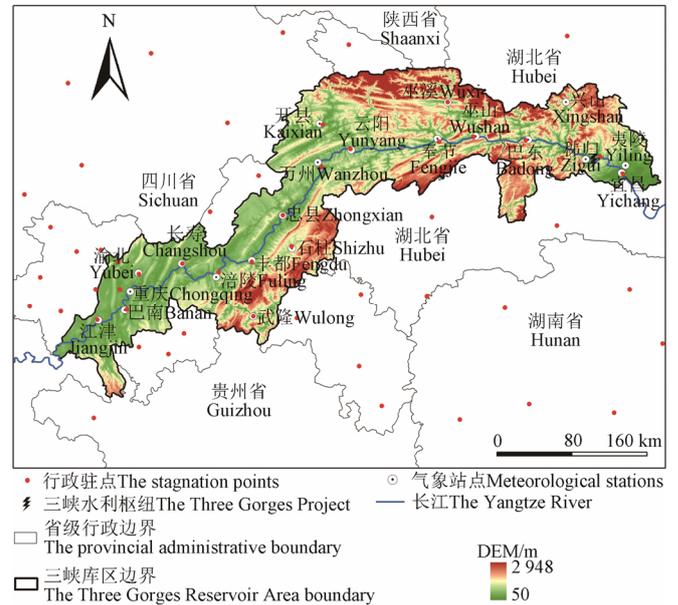


图 1 三峡库区空间位置、数字高程、行政区划和气象站点分布
Fig.1 Spatial location of Three Gorges Reservoir Area, its DEM and administration district, and distributions of meteorological observation station

1.3 模型建立与数据处理

1.3.1 土壤侵蚀强度等级计算

应用修正后的通用土壤流失方程 (the revised universal soil loss equation, RUSLE)^[18]估算库区五期土壤侵蚀量 (1990、1995、2000、2005 和 2010 年), 并根据水利部发布的 SL190-2007《土壤侵蚀分类分级标准》^[19]对土壤侵蚀强度进行分级, 得到五期侵蚀强度等级图。本文所应用的土壤侵蚀模型 (RUSLE) 属于经验统计模型, 其原理在于借助统计方法, 定量表述影响土壤侵蚀因子的指标 (包括降雨、坡度、土壤可蚀性、植被及耕作管理等), 进而得出计算土壤流失量的方程式, 具体的修正后通用土壤流失方程见公式 (1)^[20-21]。

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

式中: X 为土壤侵蚀模数 t/(hm²·a); R 为降雨侵蚀动力因子 MJ·mm/(hm²·h·a); LS 为坡长坡度因子; K 为土壤可蚀性因子 t·hm²·h/(hm²·MJ·mm); C 为植被覆盖和作物管理因子; P 为水土保持措施因子。其中 LS 、 C 、 P 均无量纲。

1.3.2 泥沙输移比模型建立

1) 模型理论依据

泥沙输移比一般表述为“在一定的时段内通过河流或沟道某一断面的实测输沙量与该断面以上流域总侵蚀量之比”^[22]。如依据这一表述, 在库区的大尺度范围开展实测是很难做到的。而且, 现有研究在计算输沙量时, 泥沙输移比选用的均是流域空间均值, 没有考虑其空间

异性。本文根据影响泥沙输移空间差异的主导因子, 对其进行空间计算, 细化到栅格空间单元。

栅格单元间产生的径流会相互影响, 流经目标栅格单元的其他单元所产生的径流对目标栅格单元泥沙进入受纳水体会起到推动作用, 表现为动力, 而有些则会受到阻碍作用, 表现为阻力, 因此, 库区每一栅格单元因受水流路径中其他栅格单元的作用, 泥沙进入受纳水体的能力有差异。在山区, 动力作用往往受地形所控制, 地形是降雨-径流陆面水文过程中最为重要的影响因子, 决定着径流路径的差异性^[23]; 阻力作用表现为植被根系的固持土壤作用, 以及对降雨和径流的截留、吸收、下渗等作用^[24]。如影响泥沙输移的动力大于阻力, 则促进泥沙输移, 反之亦然。

为此, 本文设想以反映流域水文过程的地形指数作为泥沙受汇流的动力作用、地表景观的截留阻碍作为泥沙输移的阻力作用, 以此构建库区流域的阻/动力系数和泥沙输移比模型。

2) 动/阻力系数计算

动力系数: 为流入目标栅格单元的径流运移该单元泥沙的能力, 以各栅格单元产流能力与栅格总产流能力的比值来表达栅格自身的产沙能力对其他栅格单元的推动作用。本文选取的动力系数指标—地形指数, 是 Beven 等^[25]于 1979 年提出的, 见公式 (2)^[26]。地形指数能反映径流对泥沙输移的推动作用^[27], 与产流间关系为: $T_i = S_i/m - S^*/m + T^*$ (式中: S^* 为流域平均土壤相对含水量, T^* 为流域平均地形指数)。以栅格为单元, 把影响泥沙输移的动力系数细化到每个栅格, 即栅格的动力作用为相应栅格的地形指数与库区最大地形指数的比值, 见公式 (3)。

$$T_i = \ln(a / \tan \beta) \quad (2)$$

$$E_i = T_i / (T_i)_{\max} \quad (3)$$

式中: T_i 为流经坡面任一点 i 处的地形指数; a 为 i 处单位等高线长度的汇流面积; β 为 i 处的局部坡度角; E_i 为动力系数; $(T_i)_{\max}$ 为库区地形指数最大值。

阻力系数: 结合地表对泥沙的拦截能力模拟栅格单元截留泥沙使其不进入河道的量, 定义截留阻力系数为影响泥沙输移的阻力系数, 表示为每个栅格单元对流入该单元的泥沙的截留作用。由于截留阻力系数的影响因素很多, 且针对库区的相关研究较少, 因此参照现有关于植被对地表径流中泥沙的截留研究成果^[28-29], 确定库区不同坡度下的阻力系数 (U), 见公式 (4)。

$$U = \begin{cases} 0.36 & \beta < 5^\circ \\ 0.30 & 5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \\ 0.24 & 10^\circ \leq \beta \leq 15^\circ \\ 0.18 & 15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ \\ 0.12 & 20^\circ \leq \beta \leq 25^\circ \\ 0.03 & \beta \geq 25^\circ \end{cases} \quad (4)$$

3) 泥沙输移比估算

依据上述本文对影响库区泥沙输移的动/阻力计算, 同时考虑到泥沙输移比研究本身的复杂性, 本文采

取线性方式对库区泥沙输移比进行概化, 由影响泥沙输移的阻/动力系数, 构建泥沙输移比 (D_r) 估算模型, 见公式 (5)。

$$D_r = (1-U) \times E \quad (5)$$

1.3.3 吸附态氮磷污染负荷模拟

在进行吸附态氮磷污染负荷模拟前, 需要进行泥沙负荷估算。泥沙负荷是指因坡面土壤侵蚀产生的土壤颗粒中进入河道的部分, 因此计算泥沙负荷主要是通过泥沙输移比与土壤侵蚀量的乘积计算^[30], 而土壤侵蚀量由上述土壤侵蚀模数与研究区面积的乘积计算得到。同样地, 吸附态氮磷污染负荷模拟也是在参阅现有文献的基础上, 采用颗粒态氮磷营养物迁移经验模型进行计算的^[31], 其计算原理在于吸附态污染物的发生是以土壤侵蚀为运载体, 同时其流失负荷也受到氮磷元素在土壤颗粒中的富集比例的影响, 因此该模型的计算主要是通过泥沙负荷量、土壤中氮磷的背景含量和吸附态氮磷的土壤富集比三者之间的叠加得到。其中, 泥沙负荷和吸附态氮磷污染负荷计算见公式 (6) 和 (7)。在公式 (7) 中, 由于土壤中营养物质背景含量与土壤类型、土地利用类型、坡度等因素有关, 是一个难以确定的参数^[32], 因此, 本文借鉴郭劲松等^[33]对库区面源污染的研究结果, 将其分布看作空间均匀不变的常量, TN 为 0.69, TP 为 0.35。

$$Q = D_r \cdot X \cdot A \quad (6)$$

$$W_x = Q \cdot C_x \cdot \eta \quad (7)$$

式中: Q 为泥沙负荷量, t/a; D_r 为泥沙输移比; X 为土壤侵蚀模数; A 为库区面积, km²。 W_x 为吸附态污染负荷, t/a; C_x 为土壤中氮磷的背景含量, g/kg; η 为吸附态氮磷的土壤富集比 (无量纲), 取值为 1.77^[34]。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀特征

近 20 a 库区土壤侵蚀模数整体处于中度侵蚀状态。表 1 可看出, 库区多年平均侵蚀模数 2953.32 t/(km²·a) (中度侵蚀介于 2 500~5 000 t/(km²·a)^[19]), 但不同年份存在较大差异, 呈现“N”型格局。2000 年是侵蚀模数和侵蚀量发生的低值区, 分别为 2 633.44 t/(km²·a) 和 15236.20 万 t。其之前的侵蚀模数和侵蚀量呈先增大后减少态势, 而后则表现为线性增加趋势, 尤其是 2010 年的侵蚀模数和侵蚀量均较 2000 年有显著增加, 增量分别为 710.81 t/(km²·a) 和 4112.53 万 t。

不同侵蚀等级发生的面积表现为轻度侵蚀>中度侵蚀>极强烈侵蚀>强烈侵蚀>剧烈侵蚀, 除 1995 年和 2010 年的极强烈侵蚀大于中度侵蚀外 (表 1)。土壤侵蚀量沿着剧烈侵蚀>极强烈侵蚀>强烈侵蚀>轻度侵蚀>中度侵蚀的轨迹, 除 2000 年的中度侵蚀 (1 852.62 万 t) 大于轻度侵蚀 (1 531.14 万 t)、2010 年的轻度侵蚀 (2 216.52 万 t) 大于强烈侵蚀 (2 098.47 万 t) 外。尽管极强烈和剧烈侵蚀的侵蚀面积远小于轻度侵蚀, 但侵蚀量却很高, 这说明库区局地水土流失仍较为严重。同样地, 虽然轻度侵

蚀的平均侵蚀模数 (500~1 500 t/(km²·a)) 远小于极强烈侵蚀 (8 000~15 000 t/(km²·a)), 但因 2010 年的轻度侵蚀面积 (18 747.01 km²) 远大于极强烈侵蚀

(4 331.99 km²), 致使 2010 年的轻度侵蚀量反而超过了极强烈侵蚀量, 即低等级的土壤侵蚀对库区水土流失的贡献仍不可忽视。

表 1 三峡库区 1990—2010 年不同土壤侵蚀等级的数量特征

Table 1 Number characteristics of different grades of soil erosion in Three Gorges Reservoir Area during 1990-2010

侵蚀等级 Erosion grades	侵蚀特征指标 Erosion characteristic indexes	1990 年 Year of 1990	1995 年 Year of 1995	2000 年 Year of 2000	2005 年 Year of 2005	2010 年 Year of 2010	多年平均 Average years
轻度侵蚀 Mild erosion	侵蚀面积/km ²	17463.90	17405.30	15351.06	17994.09	18747.01	17392.27
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	1080.37	1106.57	997.42	1132.69	1182.33	1099.88
中度侵蚀 Moderate erosion	侵蚀面积/km ²	4223.10	3946.49	5558.28	4130.91	3918.50	4355.46
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	3689.19	3669.07	3333.09	3679.39	3657.42	3605.63
强烈侵蚀 Strong erosion	侵蚀面积/km ²	3603.57	3278.85	3263.72	3434.94	3274.04	3371.02
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	6399.46	6407.24	6384.87	6397.99	6409.44	6399.80
极强烈侵蚀 Very strong erosion	侵蚀面积/km ²	4147.42	4176.60	3663.48	4111.00	4331.99	4086.10
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	10865.80	10975.40	10877.10	10918.10	11033.90	10934.06
剧烈侵蚀 Severe erosion	侵蚀面积/km ²	2447.76	3244.81	2359.55	2764.19	3554.16	2874.09
	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	21355.90	23550.50	22753.60	22641.20	23832.60	22826.76
总体侵蚀 Overall erosion	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	2744.32	3127.09	2633.44	2917.49	3344.25	2953.32
	侵蚀量/万 t	15877.73	18092.29	15236.20	16879.64	19348.73	17086.92

注: 对土壤侵蚀的相关特征进行计算时, 剔除了微度侵蚀发生的面积。

Note: When correlation characteristics of soil erosion were calculated, area of occurrence of micro erosion was removed.

2.2 动/阻力系数与泥沙输移比

泥沙输移的动力系数呈现“单峰”结构, 其频率分布主要集中于中值区。图 2a 表明, 影响库区泥沙输移的动力系数的频率分布介于 0.17~1, 均值为 0.63, 其中分布在 0.4~0.8 的像元数所占的比例达 75.7%, 且以频率介于 0.5~0.7 的像元数最多, 占比为 44.0%。这一结果显示影响库区泥沙输移的动力处于中等以上水平, 地貌对土壤侵蚀过程中的泥沙输移有较强的动力作用。

动力系数值的频率分布的相对集中, 也导致其在整个库区流域的空间分布差异不显著。图 3a 可知, 中值区(0.4, 0.8) 填充了库区流域的绝大部分空间, 分布最广; 低值区 (0.17, 0.4) 主要分布于河道及其两侧的平缓地带, 尤其是库区特有的平坝区, 势能低, 产流慢; 高值区 (0.8, 1) 主要分布在相对高差较大的武陵山区、秦巴山区及平行岭谷由高地势过渡到低地势的山岭与谷地相邻转折区。

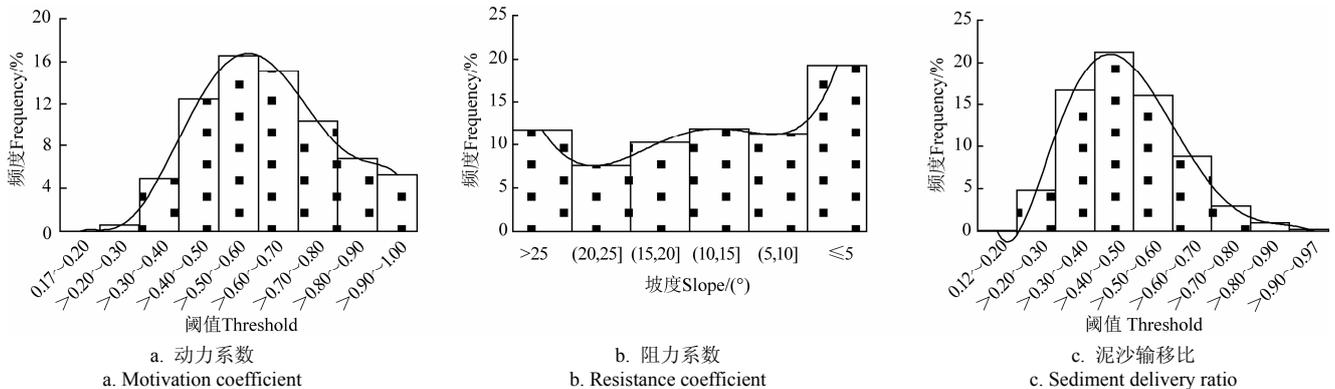


图 2 三峡库区动力系数、阻力系数及泥沙输移比的频度

Fig.2 Frequency of motivation coefficient, resistance coefficient and sediment delivery ratio in Three Gorges Reservoir Area

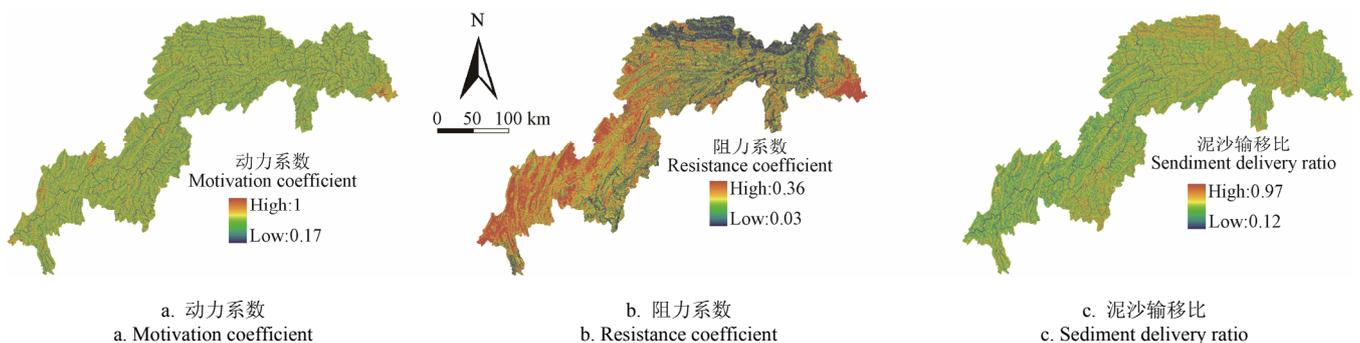


图 3 三峡库区动力系数、阻力系数及泥沙输移比的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of motivation coefficient, resistance coefficient and sediment delivery ratio in Three Gorges Reservoir Area

泥沙输移的阻力系数表现为“W”型的宽谷格局，相对于动力系数整体偏低。图 2b 可看出，影响库区泥沙输移的阻力系数的频率分布介于 0.03~0.36，均值为 0.23。总体上阻力系数在数值上可分为三大区间： ≥ 0.33 、0.15~0.33 和 0.03~0.15，而 ≥ 0.33 与 0.03~0.15 区间的累计像元数所占的比例间没有显著差异，分别为 26.78% 和 26.83%，且 0.15~0.33 区间的累计像元数占比仅较 ≥ 0.33 和 0.03~0.15 区间少 15.56%。类似于动力系数的频率分布，影响库区泥沙输移的阻力系数也主要集中于中值区，且数量上大体呈现 1 (≥ 0.33):1 (0.03~0.15):2 (0.15~0.33) 的分布态势。但是，在坡度的影响下，库区流域阻力系数的空间差异较为明显（图 3b），表现为坡度低的平行岭谷区、河流冲积缓坡及台地区阻力系数较高，坡度较陡的武陵山区和秦巴山区阻力系数值偏低。

库区泥沙输移比呈“单峰”结构，值域为 [0.12, 0.97]。在大的区域尺度上，受整体偏低的阻力系数的叠加作用，库区泥沙输移比的均值为 0.48，较动力系数的均值偏低（图 2c）。其中，泥沙输移比在 (0.3, 0.7) 值域的像元数占比为 87.47%，而在低值区 (0.12, 0.3) 和高值区 (0.7, 0.97) 的像元数分布较少，分别为 6.74% 和 5.69%。可以说，库区泥沙输移比值的频率分布更趋于正态。图 3c 显示，在空间分布格局上，中、西部的平行岭谷区泥沙输移比较小，武陵山区和秦巴山区则较高，原因在于中、西部的平行岭谷区的整体坡度要比山区小，阻力系数作用强，而山区动力作用大。而且，泥沙输移比以长江及其支流的河道为中心向两侧呈梯度增大趋势展布。

2.3 泥沙负荷特征

近 20a 库区泥沙负荷的模拟值展现出显著的时间变异性。栅格单元中最大的泥沙负荷量为 1995 年的 466.13 t，其次顺序依次为 2000 年 (454.796 t) > 2010 年 (454.156 t) > 2005 年 (407.753 t) > 1990 年 (343.003 t)（图 4）。泥沙负荷总量的年际变化为 2010 年 (9698.1 万 t) > 1995 年 (9023.13 万 t) > 2005 年 (8448.09 万 t) > 1990 年 (7922.03 万 t) > 2000 年 (7623.43 万 t)，而且库区泥沙负荷均值与负荷总量的年际变化趋势一致，为 2010 年 (13.58 t) > 1995 年 (12.63 t) > 2005 年 (11.83 t) > 1990 年 (11.09 t) > 2000 年 (10.67 t)。对比表示不同土壤侵蚀等级数量特征的表 1，由于本文的泥沙负荷计算是由土壤侵蚀量与泥沙输移比的线性叠加得到，因此库区泥沙负荷总量与均值同土壤侵蚀模数和侵蚀量成正比，即在数值上呈现同比增减的趋势（表 2）。

表 2 三峡库区 1990-2010 年泥沙负荷量的均值与总量
Table 2 Mean value and aggregates of sediment load in Three Gorges Reservoir Area during 1990-2010

年份 Year	平均值 Mean	总负荷量 Aggregates of sediment load
1990 年	11.09	7922.03
1995 年	12.63	9023.13
2000 年	10.67	7623.43
2005 年	11.83	8448.09
2010 年	13.58	9698.1

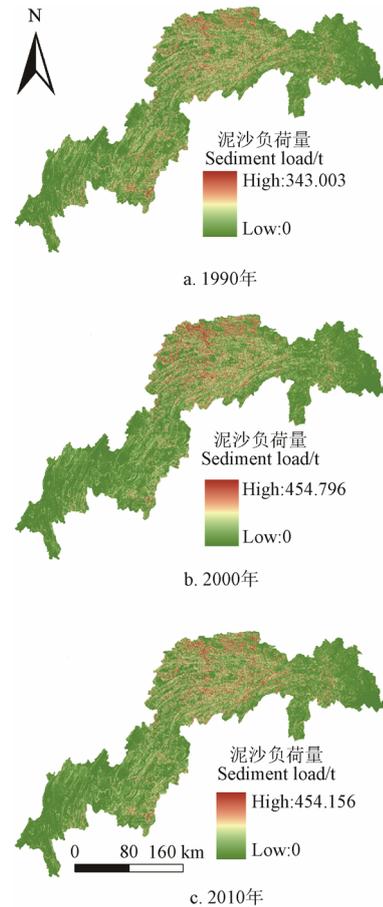


图 4 三峡库区 1990—2010 年泥沙负荷量的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of sediment load in Three Gorges Reservoir Area during 1990-2010

空间格局上因不同时期库区泥沙负荷量的均值变化不大，泥沙负荷的低值区与高值区的空间分布比较稳定。低值区的分布范围广泛，集中度高，主要分布于重庆段的江津、主城和长寿，以及湖北段的巴东、兴山、秭归和夷陵，这些地区的地势较低，泥沙输移比较小，因此泥沙负荷产生的几率较小；而高值区主要分布在重庆段的武陵山区（武隆、丰都、石柱）和秦巴山区（开县、奉节、云阳、巫溪和巫山），且分布相对破碎，栅格单元较为离散，这些地区地势较高，尽管存在一定量的林草地覆盖，但由于决定泥沙负荷大小的泥沙输移比较大，再加上高等级土壤侵蚀的集中分布，因此这些地区的泥沙负荷发生的几率较大，泥沙输移作用强。

2.4 吸附态氮磷负荷

吸附态氮磷负荷与土壤侵蚀模数、泥沙负荷在数值上同比增长。表 3 可看出，吸附态氮磷负荷的均值和总量分别介于 (13, 17) t 和 (0.9, 1.2) 亿 t 和 (6.6, 8.5) t 和 (0.5, 0.6) 亿 t)。比较表 1、表 3 和图 5 发现，吸附态氮磷均值和总量的最大值均出现在 2010 年，分别为 (16.64 t 和 1.19 亿 t) 和 (8.44 t 和 0.6 亿 t)，届时侵蚀模数最大，达 3 344.25 t/(km²·a)，泥沙负荷的均值也最大，为 9 698.10 t。而且，其他时段的吸附态氮磷负荷量与侵蚀模数、泥沙负荷量在数值上也表现为很好的对应关系，说明大尺度土壤侵蚀模数控制泥沙负荷量，进而决定吸附态氮磷负荷量。

表3 三峡库区1990—2010年吸附态氮磷负荷

Table 3 Load of absorbed nitrogen and phosphorus in Three Gorges Reservoir Area during 1990-2010

年份 Years	吸附态氮 Absorbed nitrogen		吸附态磷 Absorbed phosphorus	
	均值 Mean/t	总量 Total/10 ⁸ t	均值 Mean/t	总量 Total/10 ⁸ t
1990	13.59	0.97	6.89	0.49
1995	15.49	1.11	7.86	0.56
2000	13.10	0.94	6.64	0.47
2005	14.50	1.04	7.35	0.53
2010	16.64	1.19	8.44	0.60

吸附态氮磷负荷的空间分布呈从东向西逐渐减小的不平衡特征。图5显示,受气候、地貌、土壤等因素空间分异的控制,库区吸附态氮磷负荷量在空间上呈三大阶梯状分布:重庆段的开县、云阳、奉节、巫溪、巫山和湖北段的秭归氮磷污染负荷严重,为第一阶梯;重庆段的万州、忠县、石柱、武隆、巴南氮磷污染负荷较重,为第二阶梯;其他区域氮磷污染负荷较弱,为第三阶梯。比较图4和图5发现,吸附态氮磷负荷与泥沙负荷在空间上分布规律相似。

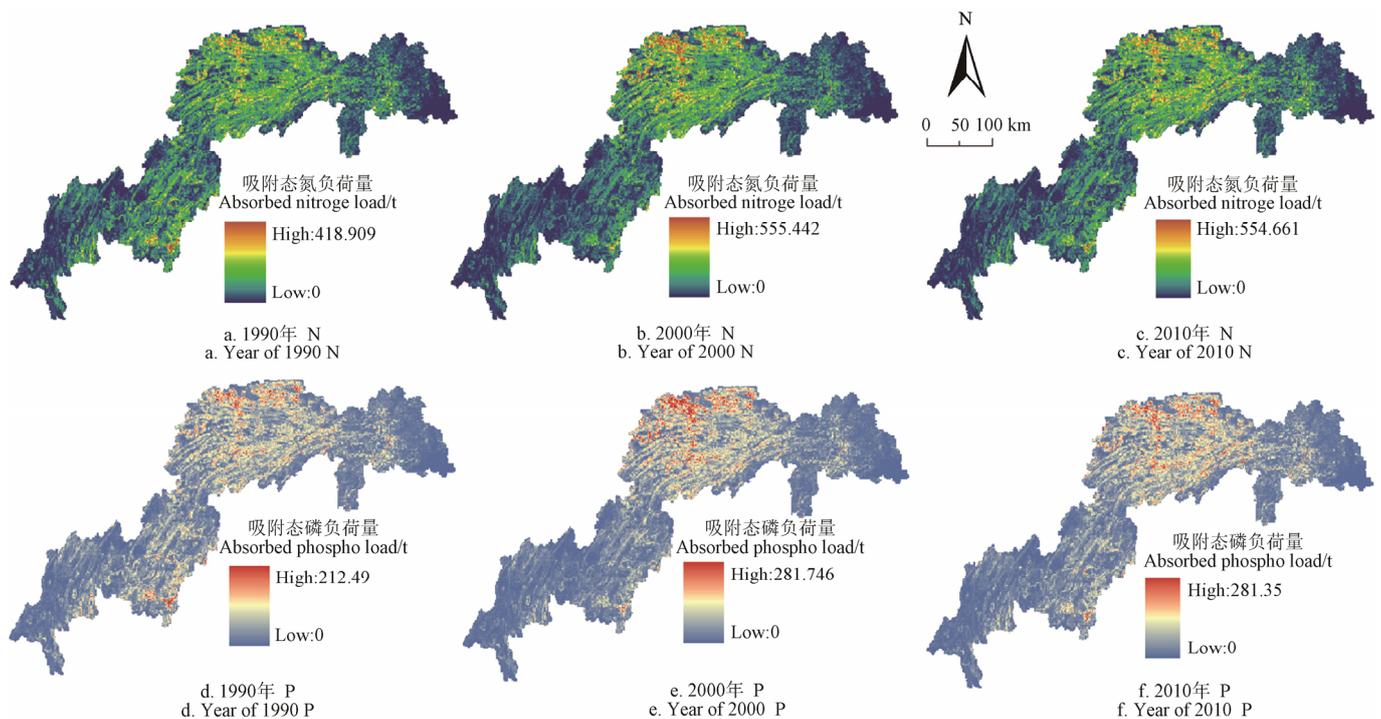


图5 三峡库区1990—2010年吸附态氮磷负荷的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of absorbed nitrogen and phosphorus load in Three Gorges Reservoir Area during 1990-2010

分析发现,吸附态氮磷负荷污染严重或相对严重区的地形高差较大,在降雨丰富且约50%的降水直接转变为地表径流的情况下,泥沙输移的动力系数大,降雨侵蚀力较强,水土保持能力低。加之,这些区域受三峡工程建设的影响较大,如移民就地后靠安置、城镇后靠迁建、基础设施重新配套等强烈的人为扰动都使得土壤侵蚀的发生较为严重。而且,库区约85.7%的陡坡旱地均集中分布于这一区域,受传统耕作方式的扰动,土壤侵蚀依然严重,甚至有增无减。另外,受非农务工工资逐年提高和农业生产投入成本攀升的影响,库区山区农村青壮年劳动力大量“析出”,从而使得直接从事农业生产的青壮年劳动力的数量大大缩小,捕获到的机会降低,成本提高。在这种情况下,用于土地平整、田坎维护、沟渠疏通等方面的投入(资金和工时)大大降低,相比大量青壮年劳动力外出之前,在农业生产过程中,土壤侵蚀发生的风险和可能大大提高。

相反地,污染负荷较弱的其他区(如重庆段的主城、长寿、涪陵等和湖北段的巴东、兴山和夷陵),地貌以平行岭谷为主,地形起伏较小,在保护性耕作和作物轮

作的共同作用下,降雨侵蚀力较弱。尽管旱地在农业生产中所占比重较大,但坡度主要集中于15°以下,且由于这一区域的大部分地区是粮食主产区,以坡改梯、坡面水系整治等为主要措施的水土保持投入较多,致使以农业生产为主的人为扰动对土壤侵蚀的驱动作用较弱,吸附态氮磷负荷较小。

2.5 模型结果验证

2.5.1 土壤侵蚀模数与侵蚀量结果对比

关于土壤侵蚀量的监测与评估,现有研究多以修正的土壤流失方程为计算模型,并以多年平均土壤侵蚀量为最终结果,本文则同样在该方程的基础上考虑了年际差异变化。为此,为了更好地与已有研究的比较,本文选取库区平均土壤侵蚀数据间接地验证本文的土壤侵蚀模数与侵蚀量结果。本文的平均土壤侵蚀模数、平均土壤侵蚀量的估算结果与现有研究发现是基本一致的,前者的相对误差分别为7.73%、-7.27%和-10.95%,后者的分别为-11.76%、-6.93%和-7.52%(表4),均在大尺度土壤侵蚀估算结果的可接受范围(±15%以内),这进一步反映本文估算方法的可行性和估算结果的正确性。

表 4 三峡库区土壤侵蚀的不同多年平均结果对比
Table 4 Comparison of different years of average results of soil erosion in Three Gorges Reservoir Area

文献来源 Literature sources	平均土壤侵蚀模数 Average soil erosion modulus/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	与本文的相对误差 Relative error/%	平均土壤侵蚀量 Average soil erosion amount/万 t	与本文的相对误差 Relative error/%
龙天渝等 ^[35] Long Tianyu, et al ^[35]	2741.48	7.73	19364.71	-11.76
吴昌广等 ^[36] Wu Changguang, et al ^[36]	3185	-7.27	18359.43	-6.93
刘爱霞等 ^[21] Liu Aixia, et al ^[21]	3316.53	-10.95	18476.27	-7.52

2.5.2 库区泥沙输移比的可行性

对于泥沙输移比的估算模拟，无论是方法还是结果，目前尚处于定性描述或推理性解释阶段^[11]。这一模拟不仅受限于影响泥沙输移因子作用的复杂性，而且受制于尺度升降带来误差的难确定性，致使多数研究以流域为尺度估算多年平均泥沙输移比。本文得出的库区泥沙输移比均值为 0.48，空间区域上泥沙输移比值域为[0.12, 0.97]，这一结果与史德明^[35]对库区的估算结果(0.28)和余剑如等^[36]对长江上游宜昌段以上流域的估算结果(0.23)相比，显得明显偏大。但是，景可^[37]认为长江上游的泥沙输移比定会远大于 0.23，在高中山区接近于 1、丘陵宽谷区不小于 0.5。按照这一说法，在大尺度上，本文所采用的由景观阻/动力系数构建的泥沙输移比模型，对库区泥沙输移的模拟结果较为合理。不足的是，本文没有考虑泥沙输移的时间序列变化，如能进一步考虑泥沙输移的水动力—径流量周期变化，即可估算 2 个以上水文系列年的泥沙输移比变化。

2.5.3 泥沙负荷和吸附态氮磷负荷的验证

对比泥沙污染公报中的泥沙监测数据发现，5 个年份的泥沙负荷模拟值均较公报监测值小，模拟结果最接近的是 1995 年，相对误差-2.17%，其次为 2000 年，相对误差-5.00%，而相差最大的是 2010 年，相对误差-57.64% (表 5)。分析认为，土壤侵蚀量监测的精确度是导致对比结果差异较大的主要原因，在大中流域尺度的土壤侵蚀监测中目前尚未有一个较为理想的土壤侵蚀预报模型^[38]。尽管如此，在整体趋势上，1995 年到 2000 年模拟值和公报监测值都减小，说明“长治”工程已有一定成效，2000 年到 2010 年的增大，则反映水库工程阶段性胁迫的波动性强。

表 5 泥沙负荷总量的模拟结果验证
Table 5 Verification of simulation results of total sediment load

年份 Years	模拟值 Simulation value/10 ⁸ t	公报监测值 Value of monitoring /10 ⁸ t	相对误差 Relative error/%
1990 年	0.8	1.05	-23.81
1995 年	0.9	0.92	-2.17
2000 年	0.76	0.8	-5.00
2005 年	0.84	1.02	-17.65
2010 年	0.97	2.29	-57.64

因缺乏实测的氮磷通量值，无法验证库区吸附态氮磷负荷模拟的有效性，为此，本文利用已有主要河流断面的水质浓度监测数据，沿长江主干流方向依次选取 14 大子流域作为统计单元，统计 2010 年各大子流域的模拟均值和监测均值，通过相关分析验证本文的吸附态氮磷模拟在空间分布上的合理性。图 6 显示，本文模拟的吸附态氮磷负荷同监测数据呈现一定程度的正相关关系，且吸附态氮的拟合 ($R^2=0.6667$) 明显高于吸附态磷 ($R^2=0.4336$)，说明吸附态氮负荷的模拟效果更好。而且，吸附态氮的模拟结果均值以 20 t 为界，小于 20 t 的 8 个流域主要集中于中上游，而大于 20 t 的 6 个流域则集中在中下游；吸附态磷的分界值为 10 t。吸附态氮磷负荷在库区流域内存在一定的空间相关性，且溶解态氮磷往往会影响到吸附态氮磷的存在，这均需在后续研究中进一步分析。

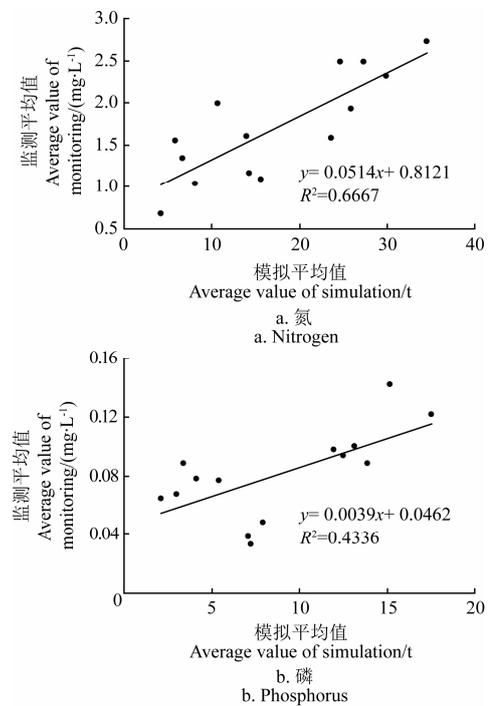


图 6 2010 年吸附态氮磷负荷模拟与监测值的相关性
Fig.6 Relevance between load simulation and monitoring of absorbed nitrogen and phosphorus in 2010

3 结 论

本文在已有的修正土壤流失方程、泥沙负荷模型和吸附态氮磷负荷模型的基础上，以泥沙输移比为突破口，以影响泥沙输移的动力系数和阻力系数的大尺度区域泥沙输移比模型，以此估算模拟三峡库区 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年的土壤侵蚀量、影响泥沙输移的动/阻力系数、泥沙输移比和吸附态氮磷污染负荷，并得到很好的验证。主要结论如下：

1) 1990—2010 年 5 a 的三峡库区平均土壤侵蚀模数为 2953.32t/(km²·a)，处于中度侵蚀阶段，且在 2000—2010 年的 10 a 中表现出不断加重的趋势。由于极强烈和剧烈侵蚀的土壤侵蚀模数较大，使得库区局部地区的水土流失较为严重，而且低等级的土壤侵蚀对库区水土流失的

贡献不可忽视。

2) 影响库区泥沙输移的动力系数频率分布介于 0.17~1, 均值 0.63。阻力系数频率分布介于 0.03~0.36, 均值 0.23。坡度低的平行岭谷区和河流冲积缓坡以及台地区, 阻力系数较高; 坡度陡的秦巴山地北部区和武陵山区的高山峡谷地带, 阻力系数值偏低。

3) 库区泥沙输移比均值为 0.48, 频率图趋于正态分布, 空间上呈现两大格局: 中、西部平行岭谷区泥沙输移比较小, 武陵山区和秦巴山区泥沙输移比较高。

4) 泥沙负荷均值与负荷总量的年际变化趋势相同, 且泥沙负荷与土壤侵蚀量呈正线性关系, 2010 年的负荷总量为最大, 9 698.1 万 t。

5) 吸附态氮磷负荷量与土壤侵蚀模数、泥沙负荷量在数值上同比增长, 最大值的 2010 年氮磷负荷总量分别为 1.19 和 0.6 亿 t。空间上总体分布相似, 具有不平衡特征, 主要表现为从东向西呈逐渐减小趋势。而且, 与监测数据的相关分析, 吸附态氮负荷的模拟效果比吸附态磷更好, 且吸附态氮磷负荷在库区流域内存在空间相关性。

本研究重点在于三峡库区大尺度的泥沙输移比空间量化, 因为泥沙输移比把坡面上的土壤侵蚀与泥沙进入河流的过程联系起来, 为关键性参数。本文用反映流域水文过程的地形指数作为泥沙受汇流的动力作用、地表景观的截留阻碍作为泥沙输移的阻力作用, 尽管如此, 影响土壤侵蚀和泥沙输移的影响因子还包括降雨、土壤结构和湿度、植被覆盖等, 这需要在以后的研究中将各主导因子加入动/阻力系数中, 以更加完善大尺度区域的泥沙输移比估算。同时, 社会人文方面的因素, 诸如城镇建设、农业生产、农村人口结构等间接因素因子, 也可加入本文所应用模型的修正中, 从而更好地模拟库区泥沙负荷和吸附态氮磷负荷。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Yang Shengtian, Cheng Hongguang, Bu Qingsong, et al. Estimation of soil erosion and nitrogen and phosphorus load in its application in assessment of the absorbed China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(3): 366—374. (in Chinese with English abstract)
- [2] Jiang T T, Huo S L, Xi B D, et al. The influences of land-use changes on the absorbed nitrogen and phosphorus loadings in the drainage basin of Lake Chaohu, China[J]. Environment Earth Science, 2014, 71: 4165—4176.
- [3] 姜甜甜, 席北斗, 侯浩波, 等. 湖北省土壤侵蚀量模拟及其在吸附态氮、磷量匡算中的应用[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1249—1255.
Jiang Tiantian, Xi Beidou, Hou Haobo, et al. Simulation of soil erosion and its application in the assessment of absorbed nitrogen and phosphorus load in Hubei province[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(11): 1249—1255. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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 Jinfeng, Xia Jun, Liang Tao, et al. Research on load model of particulate nitrogen and phosphorus[J]. Advance in Water Science 2005, 16(3): 334—337. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李秀霞, 李天宏. 黄河流域泥沙输移比与流域尺度的关系研究[J]. 泥沙研究, 2011 (2): 33—37.
Li Xiuxia, Li Tianhong. Study of relationship between sediment delivery ratio and watershed scale of Yellow River Basin[J]. Journal of Sediment Research, 2011 (2): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李林育, 焦菊英, 陈杨. 泥沙输移比的研究方法及成果分析[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 113—122.
Li Linyu, Jiao Juying, Chen Yang. Research methods and results analysis of sediment delivery ratio[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(6): 113—122. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王志杰, 简金世, 焦菊英, 等. 基于 RUSLE 的松花江流域不同侵蚀类型区泥沙输移比估算[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 50—56.
Wang Zhijie, Jian Jinjie, Jiao Juying, et al. Estimation of sediment delivery ratio in different soil erosion regions in Songhua river basin based on RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 50—56. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hafzullah A, Levent K M. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models[J]. Catena, 2005, 64(23): 247—271.
- [9] Ferro V, Porto P. Sediment delivery distributed (SEDD) model. Journal of Hydrologic Engineering, 2000, 5(4): 411—422.
- [10] Fraser R H, Barten P K, Tomlin C D. SEDMOD: A GIS based method for estimating distributed sediment delivery ratios[J]. Symposium on Geographic Information Systems and Water Resources, American Water Resources Association, 1996: 137—146.
- [11] 王玲玲, 姚文艺, 刘兰玉, 等. 我国流域泥沙输移比研究进展[J]. 人民黄河, 2008, 30(9): 36—45.
Wang Lingling, Yao Wenyi, Liu Lanyu, et al. The research progress in sediment delivery ratio in China basin[J]. Yellow River, 2008, 30(9): 36—45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 谢旺成, 李天宏. 流域泥沙输移比研究进展[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(4): 685—694.
Xie Wangcheng, Li Tianhong. Research comment on watershed sediment delivery ratio[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(4): 685—694. (in Chinese with English abstract)
- [13] 沈虹, 张万顺, 彭虹. 汉江中下游土壤侵蚀及颗粒态非点源磷负荷研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 1—6.
Shen Hong, Zhang Wanshun, Peng Hong. Research on soil erosion and particulate phosphorus load of non-point source pollution in the middle and lower reaches of the Hanjiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)

- [14] 刘宇, 吴炳方, 曾源, 等. 耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2581—2589.
Liu Yu, Wu Bingfang, Zeng Yuan, et al. Assessment of the impacts of soil erosion on water environment based on the integration of soil erosion process and landscape pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2581—2589. (in Chinese with English abstract)
- [15] Wu J G. Three-Gorges Dam: Experiment in habitat fragmentation?[J]. Science, 2003, 300: 1239—1240.
- [16] Cui Peng, Ge Yonggang, Lin Yongming. Soil erosion and sediment control effects in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(4): 289—297.
- [17] 邵景安, 张仕超, 魏朝富. 基于大型水利工程建设阶段的三峡库区土地利用变化遥感分析[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2189—2203.
Shao Jing'an, Zhang Shichao, Wei Chaofu. Remote sensing analysis of land use change in the Three Gorges Reservoir area, based on the construction phase of large-scale water conservancy project[J]. Geographical Research, 2013, 32(12): 2189—2203. (in Chinese with English abstract)
- [18] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by walter: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [J]. Washington D C: US Department of Agriculture, 1997.
- [19] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190-2007) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [20] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705—71.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705—71. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘爱霞, 王静, 刘正军. 三峡库区土壤侵蚀遥感定量监测—基于 GIS 和修正通用土壤流失方程的研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 25—30.
Liu Aixia, Wang Jing, Liu Zhengjun. Remote sensing quantitative monitoring of soil erosion in Three Gorges Reservoir area: a GIS/RUSLE-based research[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(4): 25—30. (in Chinese with English abstract)
- [22] 蔡强国, 范昊明. 泥沙输移比影响因子及其关系模型研究现状与评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(5): 1—9.
Cai Qiangguo, Fan Haoming. On the factors and prediction models of SDR [J]. Progress In Geography, 2004, 23(5): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [23] Ambrose B, Beven K, Freer J. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: topographic indices of hydrological similarity[J]. Water Resources Research, 1996, 32: 2 135-2 145.
- [24] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490—495.
Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 490—495. (in Chinese with English abstract)
- [25] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, et al. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments[J]. Journal of Hydrology, 1984, 69(1): 119—143.
- [26] 邓慧平, 孙菽芬. 地形指数模型 TOPMODEL 与陆面模式 SSiB 的耦合及在流域尺度上的数值模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(7): 1083—1097.
Deng Huiping, Sun Sufen. Incorporation of TOPMODEL into land surface model SSiB and numerically testing the effects of the corporation at basin scale[J]. Sci China: Earth Sci, 2012, 42(7): 1083—1097. (in Chinese with English abstract)
- [27] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 103—110.
Deng Huiping, Li Xiubin. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPMODEL[J]. Progress in Geography, 2002, 21(2): 103—110. (in Chinese with English abstract)
- [28] Daniels R B, Gilliam J W. Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60: 246—251.
- [29] 赵新峰, 陈利顶, 杨丽蓉, 等. 基于水流路径与景观单元相互作用的非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 621—630.
Zhao Xinfeng, Chen Liding, Yang Lirong, et al. Modelling non-point pollution based on interactions between flow path and landscape units[J]. Acta Scientiae Circumstantiate, 2010, 30(3): 621—630. (in Chinese with English abstract)
- [30] Benayada L, Hasbaia M. Comparisons between unsteady sediment-transport modeling[J]. J Cent South Univ, 2013, 20: 536—540.
- [31] 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.
Zhuang Yongtao, Li Huaien. Analysis of agricultural nonpoint pollution models[J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2001, 12(4): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [32] 余进祥, 郑博福, 刘娅菲, 等. 鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 3980—3989.
Yu Jinxiang, Zheng Bofu, Liu Yafei, et al. Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3980—3989. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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 Yanlong, Li Chongming, Guo Jingsong, 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. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘腊美, 龙天渝, 李崇明. 三峡水库上游流域非点源颗粒态磷污染负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4):

- 320—325.
Liu Lamei, Long Tianyu, Li Chongming. On the non-point source pollution of particulate phosphorus in the upstream watershed of the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(4): 320—325. (in Chinese with English abstract)
- [35] 史德明. 长江流域土壤侵蚀的特点及其潜在危险[J]. 中国水土保持, 1983(3): 3—6.
Shi Deming. The characterize and potential risk of soil erosion in the Yangtze Basin[J]. Soil and Water Conservation in China, 1983(3): 3—6. (in Chinese with English abstract)
- [36] 余剑如, 史立人, 冯明汉, 等. 长江上游的地面侵蚀与河流泥沙[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 9—17.
Yu Jianru, Shi Liren, Feng Minghan, et al. The surface erosion and fluvial silt in the upper reaches of Changjiang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(1): 9—17. (in Chinese with English abstract)
- [37] 景可. 长江上游泥沙输移比初探[J]. 泥沙研究, 2002(1): 53—59.
Jing Ke. Sediment delivery ratio in the upper Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2002(1): 53—59. (in Chinese with English abstract)
- [38] 景可, 焦菊英, 李林育, 等. 输沙量、侵蚀量与泥沙输移比的流域尺度关系—以赣江流域为例[J]. 地理研究, 2010, 29(7): 1163—1170.
Jing Ke, Jiao Juying, Li Linyu, et al. The scale relationship of sediment discharge, erosion amount and sediment delivery ratio in drainage basin: A case study in the Ganjiang River Basin[J]. Geographical Research, 2010, 29(7): 1163—1170. (in Chinese with English abstract)

Estimation of sediment delivery ratio and modelling of absorbed nitrogen and phosphorus load in Three Gorges Reservoir Area nearly 20 years

Wang Dan¹, Shao Jing'an^{2,3*}, Wang Jinliang², Li Yangbing^{2,3}, Ni Jiupai¹, Gao Ming¹, Xie Deti¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

3. Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing, in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400047, China)

Abstract: In this paper, sediment delivery ratio was spatially rasterized, and the model of sediment delivery ratio was constructed by the motivation coefficient and the resistance coefficient. Among them, the motivation coefficient was expressed by topographic index which reflected hydrological process, and the resistance coefficient was expressed by the vegetation interception resistance. Finally, the existing soil erosion model, sediment load model and absorbed nitrogen and phosphorus load model were used to estimated the pollution load of absorbed nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir area from 1990 to 2010. The results showed that the motivation coefficient affecting sediment delivery was primarily on median range from 0.4 to 0.8 in the Three Gorges Reservoir area. Moreover, its spatial heterogeneity was not significant ($p > 0.05$). However, the performance of resistance coefficient was more complicated. The parallel ridge and valley zone, river alluvial gentle slope zone and mesa zone had high resistance coefficient, due to low gradient of slopes, while the northern zone of Qinba Mountain area, and the Alpine and Valley zone of Wuling Mountain area possessed low resistance coefficient due to steeper slopes. The results also showed that the sediment delivery ratio was in approximately normal distribution in the Three Gorges Reservoir area with a single peak. Its mean value was 0.48. It exhibited significant spatial heterogeneity. The ratio of sediment delivery in the middle and western parallel ridge and valley zone was much smaller than the Qinba Mountain and Wuling Mountain areas. At the same time, it had the tendency of the gradient increase from the center of the river to the sides. Moreover, the change trend of mean sediment load was the same as the interannual variation of total sediment load in the Three Gorges Reservoir area. Simulation of the total sediment load (0.9 t) and the value of monitoring from bulletin (0.92 t) was the most close in 1995. At the spatial patterns, the spatial distribution of the low value zone and high value zone of sediment load were relatively stable due to little change in mean sediment load during 1990-2010. The distribution ranges of the low value zone was very wide with a high concentration degree. The distribution of high value area was very discrete and broken. In addition, absorbed nitrogen and phosphorus load possessed on value year-on-year growth with soil erosion modulus and sediment load in the Three Gorges Reservoir area. The maximum values of the total load in 2010 reached 1.2 tons and 0.6 tons respectively for nitrogen and phosphorus. Overall, they had similar spatial distribution with an unbalanced characteristics. Absorbed nitrogen and phosphorus load presented gradually decreasing tendency from east to west. The simulation result of adsorbed of nitrogen load was better than adsorbed phosphorus load when their correlation analysis was made with monitoring data. Absorbed nitrogen and phosphorus load had spatial correlation within in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: nitrogen; phosphorus; pollution; sediment delivery ratio; the motivation coefficient; the resistance coefficient; absorbed nitrogen and phosphorus; pollution load; the Three Gorges Reservoir Area