

三峡库区季节性吸附态磷负荷的空间分布特征

龙天渝^{1,2}, 王海娟¹, 刘佳^{1,2}, 刘敏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.重庆大学低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要:降雨引起土壤流失和非点源污染的产生。依据三峡库区内部和周边 23 个气象站点的日降雨资料,采用日降雨量模型和 Kriging 插值法得到库区各季及各年降雨侵蚀力的空间分布,在此基础上,结合改进的通用土壤流失方程(RUSLE)和由地形指数形成的具有空间分布的入河系数,构建吸附态磷负荷的时空分布模型,并验证模型的合理性。应用所构建的模型,对三峡库区 2001—2010 年各季及年的吸附态磷负荷的空间分布进行模拟,结果表明吸附态磷负荷的季节性变化和空间变化都十分明显。季节性变化与降雨侵蚀力一致,夏季最大,冬季最小,春秋两季相差不大;在空间变化上,坡度较小、土地利用类型主要为林地、城乡工矿居民用地的夷陵、重庆和江津西南等地区负荷较低,而坡度较大、土地利用类型主要为水田、旱地和草地的巫溪、开县和秭归等地负荷较高。

关键词:日降雨量;吸附态磷负荷;土壤侵蚀;时空分布

中图分类号: X506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2015)03-0538-08 doi:10.11654/jaes.2015.03.017

Spatial Distribution of Seasonal Adsorbed Phosphorus Load in Three Gorges Reservoir Area

LONG Tian-yu^{1,2}, WANG Hai-juan¹, LIU Jia^{1,2}, LIU Min^{1,2}

(1.Key Laboratory of Eco-Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2.National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Rainfall leads to soil erosion and non-point source pollution. The spatial distributions of seasonal and annual rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Area were obtained by using the daily rainfall model and Kriging interpolation method. A spatial-temporal distribution model of adsorbed phosphorus load was then developed in combination of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and the loss coefficient with spatial inhomogeneity based on topographic index, and its rationality was verified. Then, the model was used to simulate the spatial distributions of seasonal and annual adsorbed phosphorus load from 2001 to 2010 in the Three Gorges Reservoir Area. Adsorbed phosphorus load showed obvious seasonal and spatial variations. The seasonal variation was consistent with rainfall erosivity, with the maximum in summer, the minimum in winter, and little difference in both spring and autumn. Spatially, adsorbed phosphorus loads were lower in Yiling, Chongqing, and the southwest Jiangjin, where the slopes are smaller and land use types are mainly woodland and urban and rural residential land, whereas higher in Wuxi, Kaixian, and Zigui districts, where the slopes are larger and land types are mainly paddy field, dryland and grassland.

Keywords: daily rainfall; adsorbed phosphorus load; soil erosion; spatial-temporal distribution

在三峡库区,由于人口密集,降雨丰沛且暴雨较多,加之特殊的地形、土壤特性和不合理的耕作方式,导致其水土流失十分严重,非点源污染约占整个库区

污染的 80%^[1],其中,磷污染以吸附态为主。为了估算吸附态磷污染负荷,首先需要计算区域的土壤侵蚀量和进入受纳水体的泥沙量。对于大中型区域,由于实测数据的不足,目前基本上采用美国的通用土壤流失方程(USLE)或改进后的通用土壤流失方程(RUSLE)来计算土壤侵蚀量^[2],而通过引入入河系数来计算进入水体的泥沙量^[3]。在 USLE 或 RUSLE 中,表征降雨对土壤侵蚀作用的是降雨侵蚀力因子,由于降雨是土

收稿日期:2014-11-03

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划重点项目(2011BAD31B03);重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC,2011BA7021)

作者简介:龙天渝(1960—),女,重庆人,博士,教授,主要从事水污染控制与水环境模拟研究。E-mail:longty128@cqu.edu.cn

壤侵蚀的主要动力,降雨侵蚀力的准确估算对于提高土壤侵蚀量和吸附态磷负荷的计算精度有着重要的作用。

Wishehmeier^[4]在1958年提出以次降雨总动能与30 min最大雨强 I_{30} 的乘积 EI_{30} 作为次降雨侵蚀能力的计算方法。王万中等^[5]通过研究我国的降雨侵蚀特性后,认为 EI_{30} 作为降雨侵蚀力的计算方法在我国同样适用,但由于该方法以次降雨过程的数据为计算基础,在实际中因过程资料的缺乏而难以应用。有关研究表明,目前其他的降雨侵蚀力的计算方法,如国外Yu等^[6]提出的月雨量模型,Richardson等^[7]提出的日雨量模型,国内黄炎和等^[8]、吴素业^[9]、周伏建等^[10]提出的月雨量模型、章文波等^[11]提出的日雨量模型,对于三峡库区这样的降雨丰沛且暴雨较多的地区,采用日雨量模型计算降雨侵蚀力的精度较高^[12]。

迄今为止,对于三峡库区土壤侵蚀和吸附态磷负荷的研究大多是以年为基本时间单位,研究主要在负荷的年际变化或平均年负荷的空间变化上^[13-14]。由于库区气候、植被覆盖等的季节性变化较大,导致吸附态磷负荷的季节性变化也较大,而关于三峡库区吸附态磷负荷的季节性变化特性的研究鲜有报道。为此,本研究采用日雨量模型计算降雨侵蚀力,耦合改进的通用土壤流失方程与基于地形指数、具有空间分布的人河系数,构建吸附态磷负荷模型,以季为时间单元,研究降雨侵蚀力和吸附态磷负荷的季节性变化以及空间分布特性,以期对三峡库区的水环境保护和水污染防治提供参考。

1 研究区域概况

三峡库区(28°31'—31°44'N,105°50'—111°40'E),东起湖北宜昌、西至重庆江津,总面积为5.8 km×104 km。该研究区域位于大巴山褶皱带、川东平行岭谷和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元的交汇处,区内地形复杂、高差悬殊。该区属中亚热带湿润季风气候,

年均气温17~19℃,降水丰沛,年均降水量1000~1200 mm,降水季节分配不均,4—10月为雨季,其中夏季(6—8月)降水量约占全年降水量的45%。本文基于三峡库区内部和周边的23个气象基准站点(图1)2001—2010年的日降雨资料,采用日雨量模型以半月为计算时段。土地利用按水田、旱地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地与未利用地进行重新分类。研究所需数据来源见表1,重分类的土地利用图、DEM和气象站点分布见图1。

2 模型与方法

2.1 土壤侵蚀模型

吸附态磷以被侵蚀的土壤为载体,为了得出吸附态磷负荷,首先要进行土壤侵蚀量的计算。对于大中型区域,通常采用修正后的通用土壤流失方程(RUSLE),其表达式为

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

式中: R 是降雨侵蚀动力因子, $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; K 是土壤可蚀性因子, $\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$; L 和 S 为坡长与坡度因子,无量纲; C 是植被覆盖管理因子,无量纲; P 是水土保持措施因子,无量纲。

2.2 日降雨量模型

降雨侵蚀力 R 反映了降雨引起土壤侵蚀的潜在能力, R 的计算精度直接关系到土壤侵蚀量和吸附态磷负荷的计算精度。日降雨量模型已经成功应用于三峡库区多个流域降雨侵蚀力的计算^[15-16],其形式为

$$R = \sum r_i \quad (2)$$

$$r_i = \alpha \sum_{j=1}^n (p_j)^\beta \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.144/p_{d12} + 24.455/p_{y12} \quad (4)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (5)$$

式中: R 为一定时段内的降雨侵蚀力值, $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; r_i 为第 i 个半月时段的降雨侵蚀力值, $\text{MJ} \cdot$

表1 数据来源

Table 1 Database sources

数据	类型	数据描述	数据来源
DEM	格栅	高程、坡度、坡长和坡向	长江科学院 1:50 000 三峡库区数字高程模型
土壤	矢量图	土壤类型和分布	1:1 000 000 土壤数据库
土地利用	格栅	分为水田、旱田、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用地 7 类	1:250 000 土地利用数据库
TM 遥感影像	格栅	30×30 m 的分辨率	美国地质调查局
降雨数据	DBF	2001 到 2010 年间的日降雨量	中国气象数据共享服务网
土壤属性	DBF	土壤有机质含量,磷背景值	中国科学院自然资源数据库

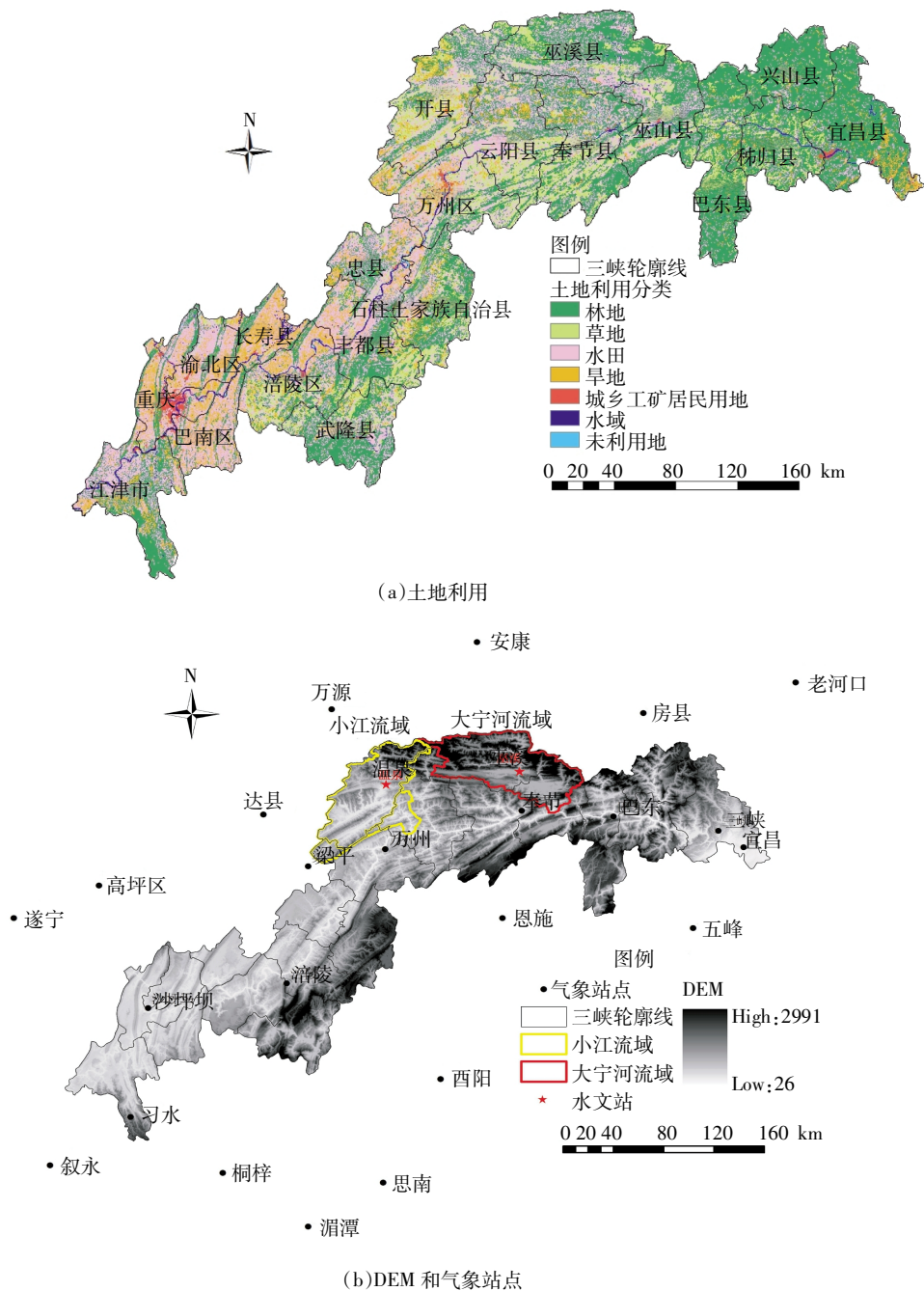


图 1 三峡库区土地利用、DEM 和气象站点分布

Figure 1 Distribution of land use types, DEM and meteorological stations in Three Gorges Reservoir Area

$\text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 15 \text{ d}^{-1}$; n 为半月时段内的天数; p_j 为该半月时段内第 j 天的侵蚀性降雨量, mm , 要求日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ [17], 否则以 0 计; α 和 β 为模型参数; p_{d12} 为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日均降雨量, mm ; p_{y12} 为日降雨量大于等于 12 mm 的年均降雨量, mm 。

半月时段的划分以每月前 15 d 作为一个半月时段, 该月剩下部分作为另一个半月时段, 全年共划分为 24 个时段 [11]。

2.3 吸附态磷负荷模型

在降雨的作用下, 通过降雨径流与地表间的相互作用, 吸附态磷以被侵蚀的土壤为载体进入受纳水体, 形成污染负荷。吸附态磷负荷采用下列模型进行计算 [18]:

$$L_0 = Y \cdot A \cdot C_s \cdot \eta \tag{6}$$
$$\eta = 7.4 (A \cdot Y)^{-0.2} \cdot T_f \tag{7}$$
$$Y = \lambda \cdot E \tag{8}$$

式中: L_0 为吸附态磷负荷, t ; Y 为产沙量, $t \cdot km^{-2}$; A 是区域面积, km^2 ; C_s 为土壤中磷的背景含量, 无量纲; η 为吸附态磷的土壤富集比, 无量纲; E 为土壤侵蚀量, $t \cdot km^{-2}$; T_f 为土壤质地综合因子, 无量纲; λ 是吸附态磷的入河系数, 无量纲。

2.4 模型中各因子的计算

针对所研究的三峡库区, 对于吸附态磷负荷模型(6)所涉及各因子, 选用的计算方法及计算式如下。

2.4.1 LS 因子

坡度和坡长因子 S 和 L 反映的是地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。其中, 坡长因子借鉴杨子生对滇东北坡地和王宁对松花湖流域的研究结果^[19-20], 采用坡长指数的方法进行计算。

$$L = (l/22.13)^m \quad (9)$$

式中: l 是坡长, m ; m 是仅与坡度有关的坡长指数, 其计算式为:

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 1\% \\ 0.3 & 1\% \leq \theta < 3\% \\ 0.4 & 3\% \leq \theta < 5\% \\ 0.5 & \theta \geq 5\% \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ 为坡度, %。

2.4.2 C 因子

本研究把三峡库区土地利用分为水田、旱地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地与未利用地 7 种类型(图 1a), 通过遥感获得库区内每个月的遥感影像, 并以每个月遥感影像为基础, 计算出每季植被归一化指数 NDVI。用 NDVI 计算得到每季的植被覆盖管理因子 C 。对于 j 类土地利用, 其计算式为^[21]

$$C_j = \begin{cases} 1 & V_j = 0 \\ 0.658 - 0.343 \lg V_j & 0 < V_j \leq 78.3\% \\ 0.0 & V_j \geq 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_j 是 j 类土地利用的植被覆盖率, %, 与归一化植被指数 NDVI 的关系为:

$$V_j = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (12)$$

$$NDVI = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 NDVI_i \quad (13)$$

式中: $NDVI_i$ 是每个月的归一化指数值; $NDVI$ 是每个季节的归一化指数值。

2.4.3 P 因子

根据实际调查的三峡库区坡耕地所采取的水土保持措施和实测数据, 水田、旱田、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用地的 P 值分别设为 0.25、

0.35、0.90、0.80、0、0.35 和 1.00^[22]。

2.4.4 K 因子

K 因子表示土壤的可侵蚀性, 即在降雨和地表径流的相互作用下土壤被侵蚀的难易程度, 其大小与地表特征和土壤结构及渗透性有关, 本研究采用 Williams 等^[23]在 EPIC 模型中的方法计算。

$$K = \left[0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 S d \times \left(1 - \frac{S l}{100} \right) \right] \right] \times \left[\frac{S l}{C l + S l} \right] \times \left[1.0 - 0.25 \times \frac{C b}{C b + \exp(3.72 - 2.95 C b)} \right] \times \frac{1.0 - 0.7 \times (1 - S d / 100)}{1 - S d / 100 + \exp[-5.51 + 22.9 \times (1 - S d / 100)]} \quad (14)$$

式中: $S d$ 、 $S l$ 、 $C l$ 和 $C b$ 分别为砂粒、粉粒、粘土和有机碳的体积百分比, %, 按照 Foster 提出的方法转换为国际单位^[26]。

对于所研究的流域, 土壤类型及其组成的有关数据均采用四川省第二次土壤调查的结果。

2.4.5 入河系数

入河系数是指被侵蚀的土壤在地表径流的作用下进入受纳水体的比例, 它与地面粗糙系数、降雨量及地表径流的流速等有关, 采用笔者研究团队提出的基于地形指数、具有空间分布的入河系数的计算式进行计算^[24], 其表达式为

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{\alpha_i}{\tan \beta_i} \bigg/ \left(\frac{1}{n} \ln \frac{\alpha_i}{\tan \beta_i} \right)_{\max} \quad (15)$$

式中: n 为地面的粗糙度; α_i 为流经坡面某处单位等高线长度的汇流面积, m^2 ; β_i 为该点的坡度, ($^\circ$)。

参考有关文献^[25-26], 根据三峡库区实际地表情况, 分别对 n 进行赋值, 再利用 ArcGIS 中的水文分析功能, 结合三峡库区的 DEM 计算 λ 。

2.4.6 T_f 因子

土壤质地综合因子 T_f 根据土壤中各级颗粒配合比例或所占质量的百分数计算, 参考有关文献^[27], 取沙、淤泥、粘土和泥炭的 T_f 分别为 1.00、0.85、1.15 和 1.50。

3 结果与讨论

3.1 模型的验证

由于没有实测的吸附态磷负荷的资料, 采用实测的泥沙资料对模型进行验证。考虑到三峡库区为非完整的流域, 选取库区范围内小江流域和大宁河流域对模型进行验证。图 2 为小江流域温泉站和大宁河流域巫溪站 2006—2010 年间各年平均输沙模数实测值与

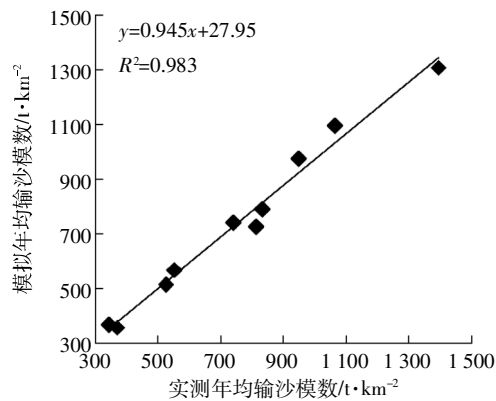


图2 输沙量实测值与模拟值的比较

Figure 2 Comparison of simulated and measured values of sediment yield

模拟值的比较,可知实测值与模拟值吻合较好。对于整个三峡库区,模拟所得年均土壤侵蚀量为19 686.23 万 $t \cdot a^{-1}$,与已有的研究结果 18359.43 万 $t \cdot a^{-1}$ [13]基本一致;计算得到 2001—2010 年三峡库区年平均输沙模数为 $766 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,与由实测数据推算的库区的平均实测输沙模数 $713 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 基本吻合[28];计算得出的年均吸附态磷负荷为 $9.4 \times 10^3 t$ 也与文献[29]的计算结果 $9.3 \times 10^3 t$ 基本相同。这都表明所构建的模型和模拟结果的合理性。

3.2 降雨侵蚀力的空间分布

使用三峡库区内部和周边的 23 个气象基准站 2001—2010 年的日降雨资料,用日降雨量模型计算库区的降雨侵蚀力。根据已有的研究,对于三峡库区,计算降雨侵蚀力的空间分布采用 Kriging 插值要优于其他插值[16,30],故选用 Kriging 插值方法,得出库区降雨侵蚀力各季节的空间分布和年均分布。

由图 3 可知,降雨侵蚀主要发生在夏季(6—8 月),这是由于三峡库区的降雨主要集中在夏季,降雨侵蚀力的变化范围为 $3442 \sim 5416 MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ 。库区冬季(12—2 月)降雨较少,冬季降雨侵蚀力的值最小,变化范围为 $126 \sim 448 MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ 。春季(3—5 月)和秋季(9—11 月)的降雨侵蚀力变化范围分别为 $1571 \sim 2628 MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ 和 $1054 \sim 2389 MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ 。通过对四季降雨侵蚀力空间分布特性的分析可以发现,每季降雨侵蚀力的最大值所在地不同,春季降雨侵蚀力较大的区域位于万州、忠县、石柱及巴东南部,夏季较大的区域主要分布在开县、夷陵区和北碚区域,秋季较大的区域主要分布在开县和万州,冬季较大的区域位于秭归县和夷陵区。从图 4 可以看出年均降雨侵蚀力的空间分布不均匀,其变化范围是 $6688 \sim 9589 MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$,最大位于开县

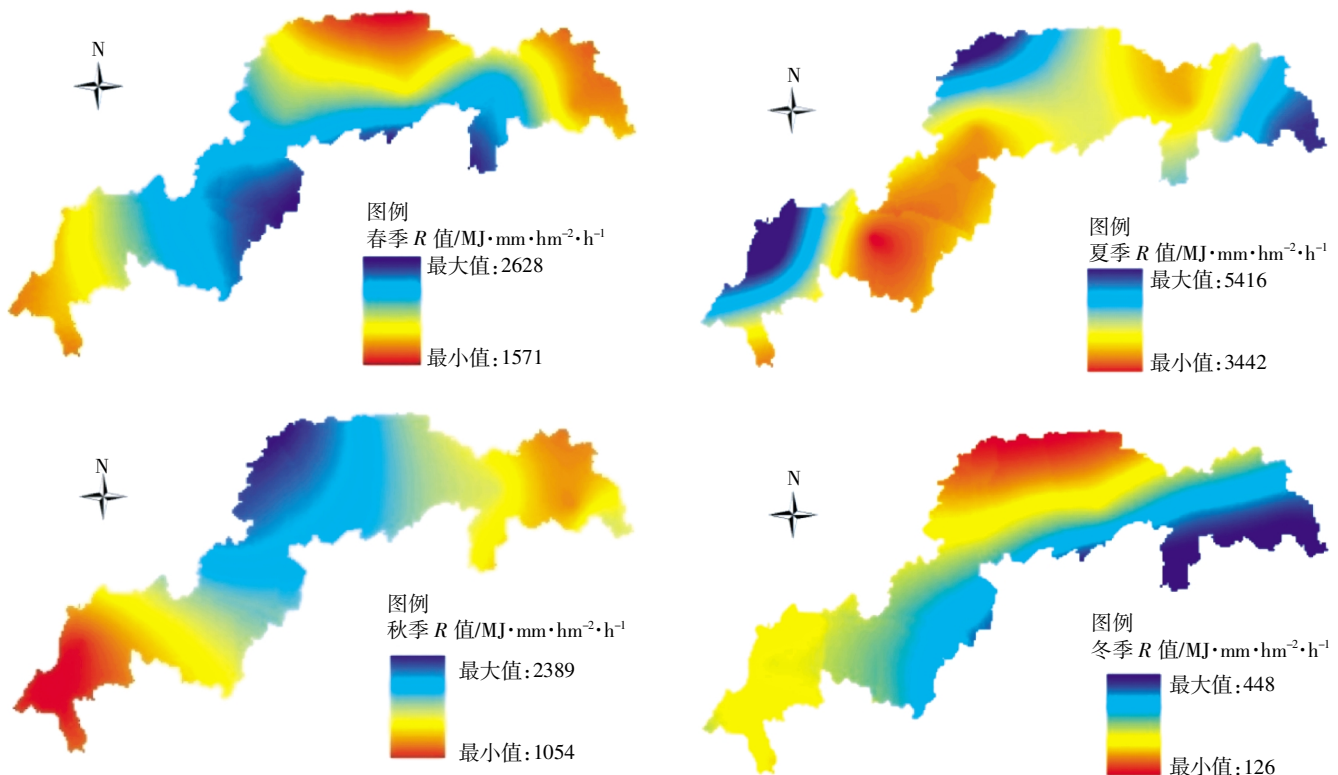


图3 三峡库区季节性降雨侵蚀力空间分布

Figure 3 Spatial distribution of seasonal rain erosion force in Three Gorges Reservoir Area

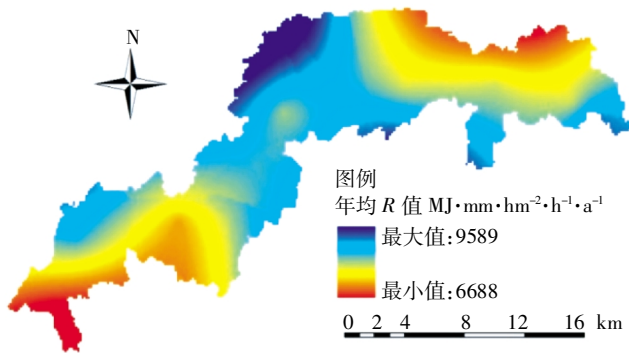


图 4 三峡库区年均降雨侵蚀力空间分布图

Figure 4 Spatial distribution of annual average rain erosion force in Three Gorges Reservoir Area

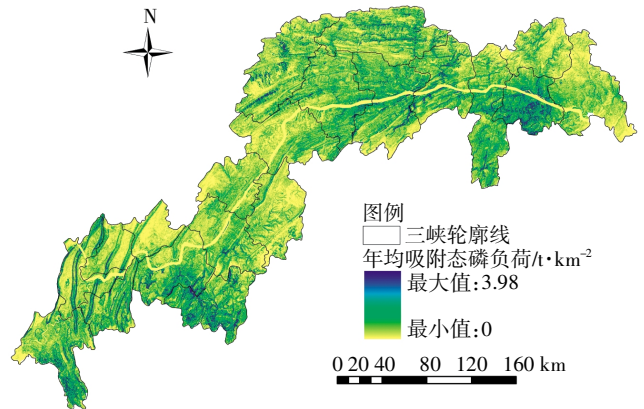


图 6 三峡库区多年平均吸附态磷负荷空间分布

Figure 6 Spatial distribution of annual adsorbed phosphorus load in Three Gorges Reservoir Area

地区,最小区域位于兴山北部及江津南部地区。

3.3 吸附态磷负荷的空间分布

把吸附态磷负荷模型应用于研究区域,得到各季和年均的吸附态磷负荷空间分布(图 5、图 6)以及各季的吸附态总磷负荷量(图 7)。可以看出,由于受到地形、地貌特征、气候、地质特征和人类活动等的影响,吸附态磷负荷在时间和空间上的分布差异明显。从图 5 和图 7 可知,夏季降雨量大,降雨侵蚀力大,导致夏季的吸附态磷负荷最严重,最大达到 $2.46 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,

吸附态总磷负荷达到 $4.7 \times 10^3 \text{ t}$;冬季最轻,最大值只有 $0.24 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,吸附态总磷负荷为 $0.2 \times 10^3 \text{ t}$;春秋两季相差不大,最大值分别为 1.36 、 $1.15 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,吸附态总磷负荷分别为 2.4×10^3 、 $2.1 \times 10^3 \text{ t}$ 。通过图 3 和图 5 的比较可知,在时间尺度上,吸附态磷污染负荷的特征和降雨侵蚀力的一致,说明降雨是土壤侵蚀的主要因素,而且也是影响吸附态磷负荷的重要因素。

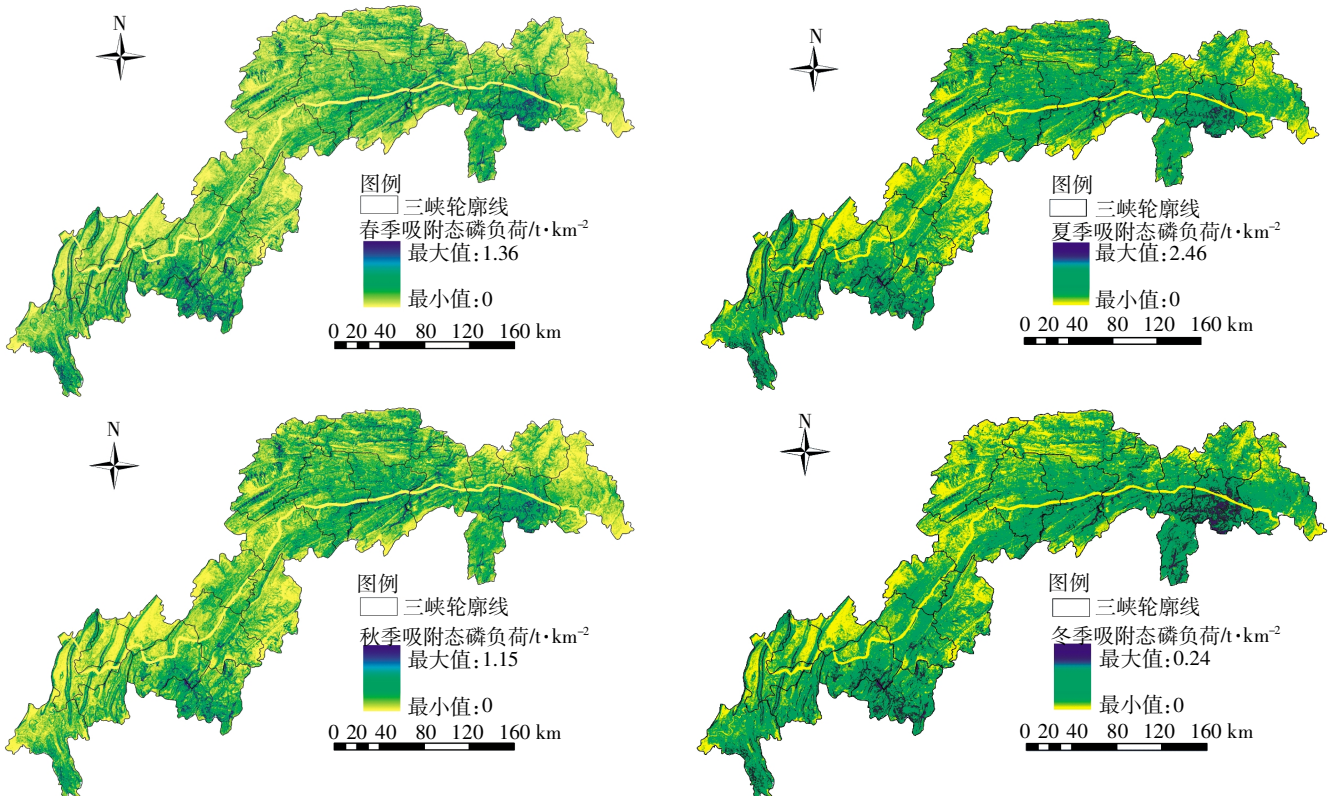


图 5 三峡库区季节性吸附态磷负荷的空间分布

Figure 5 Spatial distribution of seasonal adsorbed phosphorus load in Three Gorges Reservoir Area

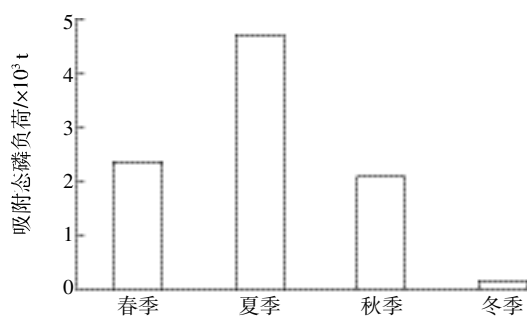


图7 每季吸附态总磷负荷

Figure 7 Quarterly total load of adsorbed phosphorus

分析图6可知,年均吸附态磷负荷从整体上来说,空间分布从东到西呈现先增加再减少的趋势,即“少-多-少”的分布趋势。最严重的区域分布在秭归、巫溪、开县以及江津西南等地区,吸附态磷负荷最大值达到 $3.98 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,而在最东部夷陵地区和最西部的巴南、江津西北等地区吸附态磷负荷较轻。结合土地利用图和地形图(图1)可知,吸附态磷负荷较大的地区,土地利用类型主要为水田、旱地、草地等,土地的磷背景含量较高,同时这些地区主要为山地,坡度较大,降雨产生的土壤侵蚀较大。这些因素的共同作用,造成这些地区的吸附态磷负荷较大。吸附态磷负荷较小的地区为土壤磷背景含量低的林地和城乡工矿居民用地,城乡工矿居民用地的区域坡度较小,降雨产生的土壤侵蚀不大,因而其吸附态磷负荷较低。而有些林地区域虽然其坡度较大,但是由于植被覆盖度较大,其吸附态磷负荷也较低。

4 结论

基于适合于降雨量充沛地区的日降雨量模型和ArcGIS的空间分析功能,得到了三峡库区的季节性降雨侵蚀力的空间分布和年均空间分布。库区年均降雨侵蚀为 $8264 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各季的降雨侵蚀力变化明显,最大值在夏季,变化范围为 $3442 \sim 5416 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;最小值在冬季,变化范围为 $126 \sim 448 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;春季和秋季的变化范围分别为 $1571 \sim 2628 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1054 \sim 2389 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

应用所构建吸附态磷负荷模型,得到了库区平均各季的吸附态磷负荷的空间分布以及年均空间分布。夏季的吸附态磷负荷最大,最大值为 $2.46 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$;冬季最小,最大值仅为 $0.24 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$;春秋两季相差不大,最大值分别为 1.36 、 $1.15 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。

在时间尺度上,吸附态磷污染负荷的特征和降雨

侵蚀力的一致。在空间分布上,较大负荷的区域位于秭归、巫溪、开县、武隆以及江津西南等地,最大值为 $3.98 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,较小的区域位于最东部的兴山、夷陵地区和最西部的重庆、江津西北等地。吸附态磷负荷较大的地区,坡度较大的山地较多,土地利用类型主要为水田、旱地、草地等,土壤侵蚀严重,土地的磷背景含量较高。

参考文献:

- [1] 郑丙辉,王丽娟,龚 斌.三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J].环境科学研究,2009,22(2):129-130.
ZHENG Bing-hui, WANG Li-jing, GONG Bin. Load of non-point source pollutants from upstream rivers into Three Gorges Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2): 129-130.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. The USDA Agriculture Handbook, 1978: 537-539.
- [3] 谢 云,林 燕,张 岩.通用土壤流失方程的发展与应用[J].地理科学进展,2003,22(3):280-287.
XIE Yun, LIN Yan, ZHANG Yan. The development and application of the universal soil loss equation[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(3): 280-287.
- [4] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation[J]. *Soil Science Society*, 1989, 44(2): 168-173.
- [5] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(1)[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.
WANG Wan-zhong, JIAO Ju-ying, HAO Xiao-pin, et al. Study on rainfall erosivity in China[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 1995, 9(4): 5-18.
- [6] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(2): 559-561.
- [7] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(1): 153-156.
- [8] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等.闽东南降雨侵蚀力指标R值的研究[J].水土保持学报,1992,6(4):1-5.
HUANG Yan-he, LU Cheng-long, ZHENG Tian-fa, et al. Study on rainfall erosivity index in Southeastern Fujian[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 1992, 6(4): 1-5.
- [9] 吴素业.安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J].中国水土保持,1994(4):12-13.
WU Su-ye. Rainfall erosivity simplified algorithms and spatial and temporal distribution of Dabie Mountain in Anhui[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 1994(4): 12-13.
- [10] 周伏建,陈明华,林福兴,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, CHEN Ming-hua, LIN Fu-xing, et al. Rainfall erosion force index R value of Fujian Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(1): 13-18.

- [11] 章文波, 谢元, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
ZHANG Wen-bo, XIE Yuan, LIU Bao-yuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.
- [12] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
ZHANG Wen-bo, FU Jin-sheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 35-41.
- [13] 吴昌广, 吕华丽, 周志翔, 等. 三峡库区土壤侵蚀空间分布特征[J]. 中国水土保持, 2012, 10(3): 15-21.
WU Chang-guang, LÜ Hua-li, ZHOU Zhi-xiang, et al. Spatial distribution analysis of soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(3): 15-21.
- [14] 刘鹏霞, 于志刚. 三峡水库蓄水至 135 米后库区和长江干流各形态磷的分布特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007: 21-28.
LIU Peng-xia, YU Zhi-gang. The study of phosphorus species' distribution in the Three Gorges Reservoir and the main channel of the Changjiang (Yangtze River) after the filling to 135 meters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 21-28.
- [15] 张照录, 薛重生. 湖北三峡库区降雨侵蚀力的计算及其特征分析[J]. 中国水土保持, 2005, 8: 10-12.
ZHANG Zhao-lu, XUE Chong-sheng. Calculation and analysis of rainfall erosivity characteristics of Three Gorges Reservoir in Hubei Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 8: 10-12.
- [16] 吴昌广, 林德生, 肖文发, 等. 三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 151-158.
WU Chang-guang, LIN De-sheng, XIAO Wen-fa. Spatiotemporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 151-158.
- [17] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
XIE Yun, LIU Bao-yuan, ZHANG Wen-bo. Study on standard of erosive rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 6-11.
- [18] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: Anonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. *Soil and Water Cons*, 1989, 44(2): 168-173.
- [19] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 1-9.
YANG Zi-sheng. Study on soil loss equation of cultivated slopeland in northeast mountain region of Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(1): 1-9.
- [20] 王宁, 朱颜明, 徐崇刚. GIS 用于流域径流污染物的量化研究[J]. 东北师大学报自然科学版, 2002, 34(2): 92-98.
WANG Ning, ZHU Yan-ming, XU Chong-gang. Applying GIS to the quantity study of runoff pollutants in watershed[J]. *Journal of Northeast Normal University*, 2002, 34(2): 92-98.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华. 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, 19-24.
CAI Chong-fa, DING Shu-wen, SHI Zhi-hua. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14, 19-24.
- [22] Vigiak O, Borselli L, Newham L T H, et al. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio[J]. *Geomorphology*, 2012, 138: 74-88.
- [23] Williams J R, Renard K G, Dyke, P T. EPIC-A new method for assessing erosions effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38: 381-383.
- [24] 龙天渝, 曹怀亮, 安强, 等. 三峡库区紫色土坡耕地吸附态磷可迁移污染负荷空间分布[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 157-164.
LONG Tian-yu, CAO Huai-liang, AN Qiang, et al. Spatial distribution of transfer pollution absorbed phosphorus load in slope farmland of purple soil in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4): 157-164.
- [25] 彭月. 三峡库区(重庆)典型区县土地利用/覆被变化及其生态环境效应分析[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 27-34.
PENG Yue. Land use/cover change and It's Eco-Environment effect of typical districts in the Three Gorges Reservoir Region[D]. Chongqing: The Southwest University, 2010: 27-34.
- [26] 王宝山. 城市雨水径流污染物输移规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011: 75-77.
WANG Bao-shan. Study on urban stormwater pollutants transportation processes[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011: 75-77.
- [27] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 432-437.
XU Jiong-xin. Effect of human activities and precipitation on sediment yield of the Jialingjiang River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 432-437.
- [28] 梁福庆. 三峡水库水环境保护研究[J]. 中国三峡建设(科技版), 2009, 3: 64-71.
LIANG Fu-qing. Water quality protection on Three Gorges Reservoir[J]. *China Three Gorges Construction*, 2009, 3: 64-71.
- [29] Ding X Y, Zhou H D, Lei X H, et al. Hydrological and associated pollution load simulation and estimation for the Three Gorges Reservoir of China[J]. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2013, 27: 617-628.
- [30] 吴昌广, 林德生, 周志翔, 等. 三峡库区降水量的空间插值方法及时空分布[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(7): 752-758.
WU Chang-guang, LIN De-sheng, ZHOU Zhi-xiang, et al. Spatial interpolation methods and temporal-spatial distribution of precipitation in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(7): 752-758.