

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.01.008

徐靖, 银森录, 吴楠, 等. 广西西江流域植被移除磷素污染的生态系统服务价值[J]. 广西植物, 2013, 33(1): 52—57

Xu J, Yin SL, Wu N, *et al.* Ecosystem service value supplied by vegetation for avoiding phosphorus pollution within Xijiang River Basin, Guangxi [J]. Guihaia, 2013, 33(1): 52—57

广西西江流域植被移除磷素污染的生态系统服务价值

徐靖¹, 银森录¹, 吴楠², 李俊生^{1*}, 孙光¹

(1. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京

100012; 2. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230071)

摘要: 3S技术的应用, 为快速计算生态系统服务价值提供了新的方法。以 ArcGIS9.2 为平台, 构建广西西江流域生态系统减轻集水区出口受纳水体非点源污染服务物质量和价值量评估模型, 以总磷(TP)作为指示污染物, 模拟 2008 年流域内每个栅格像元被植被移除而未进入水环境的污染物质量空间分布特征, 结合期望水质标准和净化污染物的边际成本计算出服务的价值。结果表明: 西江流域的水文敏感区主要集中在地势平缓的区域; 磷素关键污染源区分布与水文敏感区相近, 主要位于桂林、柳州、南宁、来宾及贵港。当年被西江流域生态系统过滤移除而未进入水环境的磷素污染物质总量达 2673.36 t · a⁻¹, 占关键污染源区指数总量的 73.2%, 其中林地生态系统服务价值贡献率最高。流域生态系统对于减轻其出口受纳水体磷素非点源污染的总价值为 3462.44 万元。

关键词: 广西; 西江流域; 水文敏感区; 关键污染源区; 植被移除磷素量; 生态系统服务价值

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2013)01-0052-06

Ecosystem service value supplied by vegetation for avoiding phosphorus pollution within Xijiang River Basin, Guangxi

XU Jing¹, YIN Sen-Lu¹, WU Nan², LI Jun-Sheng^{1*}, SUN Guang¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, CREAS,

Beijing 100012, China; 2. Anhui Academy of Environmental Science, Hefei 230071, China)

Abstract: The application of 3S technology provides new methodologies for rapid valuation of ecosystem services. On the basis of Geographic Information System(GIS) software package ArcGIS9.2, a model was established to simulate the ecosystem service supplied by the ecosystem within Xijiang River Basin, Guangxi for avoiding the receiving waters from non-point source pollution and its economic value. Total phosphorus(TP) was chosen as a pollutant surrogate and the pollutant loading coefficient, as well as the vegetation filtering coefficient of different land use/cover types were used to simulate the spatial patterns of the annual quantity of the pollutant that were prevented from entering the water environment by the vegetation in each cell followed the flow path in watershed in the year 2008. The economic value of the ecosystem service in this model was determined by the expected water quality standard and marginal cost of purifying pollutant. The results showed that the flat regions were the high hydraulic connectivity areas of

* 收稿日期: 2012-05-18 修回日期: 2012-07-16

基金项目: 国家环境保护部《生物多样性公约》项目(1441100036)

作者简介: 徐靖(1980-), 硕士, 助理研究员, 从事生物多样性保护研究, (E-mail) xujing_2001@yahoo.com.cn。

* 通讯作者: 李俊生, 博士, 研究员, 从事生物多样性保护研究, (E-mail) lijsh@craes.org.cn。

the watershed of Xijiang River. The farmlands in Guilin, Liuzhou, Nanning, Laibin and Guigang were phosphorus critical source areas(CSA), distributed similarly as the high hydraulic connectivity areas. In 2008, the total of phosphorus prevented from entering the reservoir by vegetation in watershed was $2\,673.36\text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, which was 73.2% of the total CSA index. Forest contributes most to this ecosystem service value. The total value of the service for avoiding the receiving waters from phosphorus pollution was 34.6244 million yuan.

Key words: Guangxi; Xijiang River Basin; hydrological sensitive area; critical polluted source areas; vegetation removal phosphorus content; ecosystem service value

非点源污染(non-point Source pollution)是指溶解的或固体污染物从非特定的地点,在降水和径流冲刷作用下通过径流过程汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)引起的水体污染,与点源污染相对应(贺缠生等,1998),是目前全球陆地水环境的重要污染源或首要污染源(Lovejoy *et al.*, 1997; Sims *et al.*, 1999)。造成水体富营养化的重要限制性元素磷,就主要由非点源污染产生(贺缠生等,1998)。自然生态系统能有效减少地表径流,并通过一系列物理、化学和生物过程降低污染物的毒性,减轻污染程度(Naiman *et al.*, 1997; 钱进等, 2009)。近期的研究将特定区域植被滞留和净化污染物能力的定量化研究结论与不同时空尺度上水文和非点源污染的过程模型,以及3S技术(GPS、RS和GIS)相结合,使这一领域的研究发展得到了多方面的提升(王建武等, 2002; 郑丽波等, 2008),为研究大尺度生态系统移除非点源污染的生态系统服务提供了新的思路和技术参考。

本文以污染物溶质及泥沙共驱运移理论为基础,用遥感数据和模型评估的方法,试图对广西西江流域非点源磷污染的产生量、空间分布和流域生态系统过滤移除此类型磷素的能力产生及其产生的经济价值进行估算,从技术角度为研究广西西江流域非点源污染提供参考。

1 区域概况

西江是珠江流域的主干流,河长 2 075 km,平均坡降 0.58‰。西江在广西境内部分长度为 869 km,流域土地面积 21.69 万平方公里。广西西江流域人口 4 486 万人,年均径流量 $2\,277 \times 10^8\text{ m}^3$,年均径流深 754 mm。主要支流有北盘江、柳江、郁江、桂江及贺江等。广西西江流域出露岩层是以灰岩和白云岩为主的沉积岩,岩溶地貌广布,土壤类型多样,其中红壤是分布面积最大的一个土类,其次为赤红壤、砖红壤和石灰土,主要植被类型为森林、灌丛及灌丛矮林,大部分为次生植被。此外,农田、林地

与草地是广西西江流域主要的土地利用/土地覆盖类型(图 1)。流域各地年均气温为 16.5~23.1℃。各地年降水量为 1 080~2 760 mm,大部分地区在 1 300~2 000 mm 之间。农业活动是广西西江流域非点源污染的主要来源,农药化肥以及禽畜粪便等其中的磷素随降水和地表径流进入水体,是农业非点源污染中磷的主要产生途径。流域植被具有降低流域土壤侵蚀,抑制水土流失等作用,因此在减轻流域非点源污染过程中发挥了主要作用。

2 研究方法

通过模型计算水文敏感系数(hydrological sensitive coefficient, HSC),结合各种土地利用方式的磷素输出系数识别出关键污染源区(critical source areas, CSA),然后沿汇流路径,结合每个栅格像元上不同土地利用方式对磷素过滤能力系数得到植被移除的该污染物质量。价值量模型则结合流域出口断面的期望水质标准与净化改污染物的边际成本进行计算。

2.1 污染关键源区的识别

集水区高达 90% 的磷流失量可能来源于 10% 的区域,且主要分布在靠近河道的区域,是非点源污染物的关键源区(Pionke *et al.*, 1998; 张淑荣等, 2003)。影响水环境非点源污染关键源区形成的因子可以分为源因子和迁移扩散因子两类:源因子主要反映各土地利用方式下土壤中养分含量、肥料输入及土壤对养分的持留能力等,表明是否具有较高的养分输出潜力;迁移扩散因子包括直接和间接影响养分迁移的因子,决定了流失潜力能否实现流失。明确磷污染关键源区的空间变异特征,对于估算广西境内西江流域植被移除非点源磷污染的生态系统服务至关重要。

本模型基于土地利用/覆盖分布数据及每种土地利用/覆盖类型的磷输出系数识别磷污染关键源区涉及的源因子的空间分布特征。流域土地利用/覆盖数据来源于 2008 年 Landsat TM 遥感解译数

据,比例尺 1:100 000。参考刘纪远(1996)提出的分类体系,根据西江流域土地的自然属性,将其类型划分为农业用地、林地、草地、城镇用地和未利用地 5 类,数据格式为 COVERAGE。根据相关文献资料(Johnes, 1996; 沈珍瑶等, 2008), 西江流域每种土地利用/覆盖类型的磷输出系数如表 1 所示。

迁移扩散因子的空间分布特征基于水文敏感系数来计算。水文敏感系数表示生态系统中土壤渗透饱和性和随后产生的汇流潜力,由汇流量数据、土壤参数和坡度数据确定(Deng *et al.*, 2002)。水文敏感系数分值越高,意味着土壤愈容易达到饱和而产流,与区域中河流的连接性愈好。采用如下模型计算:

$$HSC_i = \lg(flow_acc_i / Ksat_i \times soil_depth_i \times slope_i) \quad (1)$$

式中, HSC_i 表示栅格 i 标准化前的水文敏感系数; $flow_acc_i$ 是栅格 i 由上述 DEM 数据(30 m 分

辨率)派生出的汇流量数据; $Ksat_i$ 是栅格 i 上的土壤渗透性数据($cm \cdot day^{-1}$); $soil_depth_i$ 是栅格 i 上的土壤深度数据(mm),这两项数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1:1 000 000 数字化《中国土壤图》数据库; $slope_i$ 是栅格 i 上由 DEM 数据派生出的坡度数据(单位为 $^{\circ}$)。

对计算得到的水文敏感系数栅格图层在数值上进行 0-1 的标准化处理,得到表征集水区磷素迁移扩散能力的系数图层,即水文敏感区指数(HSA)。

表 1 不同生态系统总磷输出及过滤移除系数

Table 1 Total phosphorus export and filtration removal coefficient in different ecosystems

土地类型	单位面积年输出总磷 ($kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	磷过滤移除能力 系数(无量纲)
农田	90	0.1
林地	15	0.75
草地	20	0.4
建设用地	24	0
未利用地	51	0

表 2 汇流路径上每个栅格被植被过滤移除污染物质量模型

Table 2 Model of calculating the quantity of pollutant that were removed by vegetation in each cell followed the flow path

栅格 编号	污染物过滤移除 能力系数(无量纲)	关键污染源区指数 CSA ($kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	被植被过滤移除污染物质量 ($kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	未被植被过滤移除而汇入下一栅格的 污染物质量 ($kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
1	R1	CSA1	$CSA1 \times R1$	$CSA1 \times (1-R1)$
2	R2	CSA2	$[CSA1 \times (1-R1) + CSA2] \times R2$	$[CSA1 \times (1-R1) + CSA2] \times (1-R2)$
3	R3	CSA3	$\{[CSA1 \times (1-R1) + CSA2] \times (1-R2) + CSA3\} \times R3$	$\{[CSA1 \times (1-R1) + CSA2] \times (1-R2) + CSA3\} \times (1-R3)$

注:假设第一个栅格像元可以对自身的污染负荷进行过滤移除

在 ArcGIS9.2 中对磷素输出潜力图层与水文敏感区指数图层进行栅格相乘,得到西江流域集水区内磷污染关键源区的空间变异特征:

$$CSA_i = Loads_i \times HSA_i \quad (2)$$

式中, CSA_i 为栅格 i 的关键污染区指数($kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$); $Loads_i$ 为栅格 i 的磷年输出系数,即磷素的年污染负荷($kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$),通过综合栅格内土地利用类型及其对应的年输出总磷量(表 1)计算得出; HSA_i 为栅格 i 的水文敏感区指数(无量纲)。

2.2 被植被移除的磷素空间变异

集水区内被植被移除的磷素即为生态系统对于减轻集水区出口受纳水体非点源污染服务的物质量。由关键污染源区数据和各种土地利用方式对磷素的过滤移除能力系数(表 1)得到。水文表面上的每个像元都有从汇水盆地顶端延伸到注入点的汇流路径。根据 DEM 派生出的汇流量数据,结合研究集水区的实际河道分布,指定汇流量大于 10 000 这

一阈值的栅格像元为河流,并将其流向值赋为 0。对集水区内每个栅格按照其流向数据搜寻汇入相邻的下一个栅格,直至汇入河流,每个栅格 i 过滤移除的磷素量按照表 2 所列的前 3 个栅格计算模型以此类推进行模拟,进而得到每个栅格对于减轻集水区出口受纳水体磷素非点源污染服务的物质量一级该项服务量的空间分布。

2.3 价值量评估模型

将集水区出口断面期望的年输出磷素标准按照集水区总栅格数进行均分,被相应栅格年过滤移除的磷素量相减,得出每个栅格修正的服务物质量。通过成本替代技术(Smith, 1993),按照下式计算集水区内每个栅格减轻集水区出口受纳水体磷素非点源污染服务价值量:

$$Value_{Filter_loads} = MC \times \max(0, Filter_loads_i - EWQ/CN) \quad (3)$$

式中, $Value_{Filter_loads_i}$ 为集水区内栅格 i 该项生态

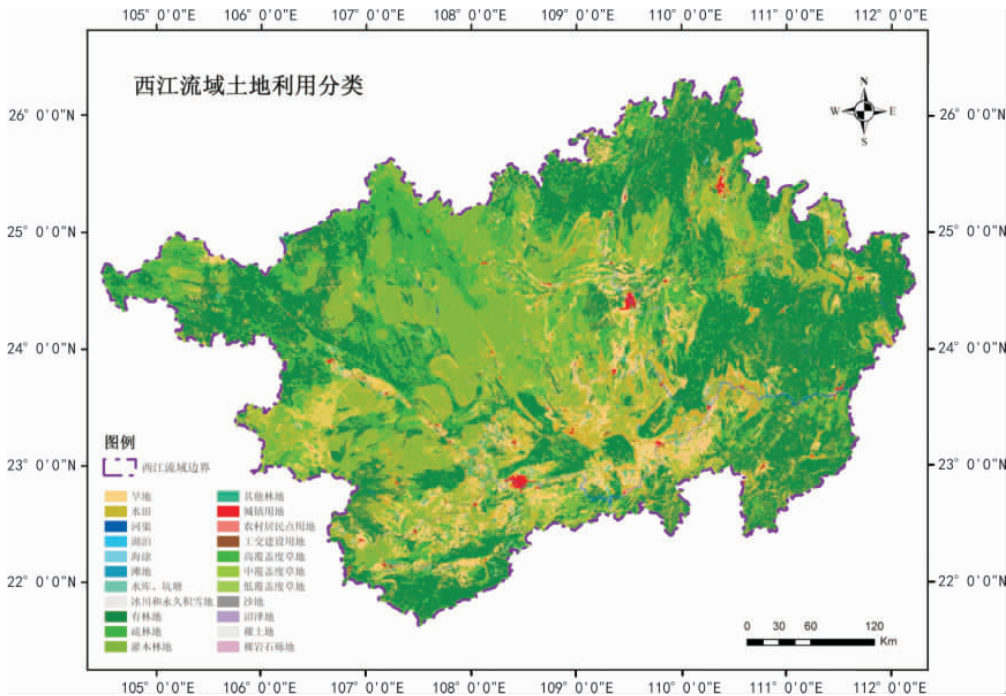


图 1 广西西江流域土地利用/土地覆盖分类

Fig. 1 Land-use/landcover in Xijiang River Basin, Guangxi

表 3 西江流域 2008 年不同生态系统水文敏感区指数、关键污染源区指数、植被移除磷素量和经济价值估算

Table 3 Estimates of HSA, CSA, quantity of phosphorus filtered by vegetations and its economic value of different types of ecosystem in Xijiang River Basin in 2008

生态系统类型 Types	面积比例 Area percent (%)	水文敏感区指数 HSA	关键污染源区指数 CSA		移除磷素量 Filter_loads		经济价值 Economic value	
		平均值 (无量纲)	平均值 ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	总值 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	平均值 ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	总值 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	平均值 ($\text{yuan} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	总值 ($10^4 \text{ yuan} \cdot \text{a}^{-1}$)
农田	21.68	0.65	58.06	2544.83	14.44	632.77	185.26	811.98
林地	67.31	0.44	6.54	888.34	13.58	1844.82	176.57	2399.16
草地	7.88	0.48	9.62	153.05	12.30	195.78	157.89	251.30
建设用地	1.76	0.75	17.89	63.62	0	0	0	0
未利用地	1.37	0.73	23.08	0.41	0	0	0	0
合计	100.00			3650.25		2673.36		3462.44

系统服务的价值(元); MC 为清除单位重量磷素的费用(元/公斤),按照国家相关部门提出的《排污费征收标准及计算方法》(自 2003 年 7 月 1 日起实施),取 14 元/公斤; $Filter_loads_i$ 为栅格 i 年过滤移除的磷素量($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); EWQ 为集水区出口断面的期望输出水质标准,目前西江段流域水体水质为二类,按照国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)二类水总磷(以磷素计)含量不得超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准,西江年均径流量 2 277 亿立方米,期望出口断面年输出 $2.28 \times 10^4 \text{ t}$ 的磷素; CN 为集水区总栅格数,输出像元大小统一设为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, EWQ/CN 单位为 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; $\max(a, b)$ 函数

表示取 a 和 b 中较大的数值,避免出现负数。

3 结果与分析

3.1 流域内各生态系统类型水文敏感性

2008 年广西西江流域内各种主要生态系统类型的水文敏感区指数(HSA)模拟结果如表 3 所示。模型中各生态系统类型的 HSA 在 0.44~0.75 之间,其中农田、建设用地和未利用地(包括裸岩、水体、沼泽和滩涂等)水文敏感性较高,与其多位于地势平缓之地,且往往靠近河道有关;林地和草地相对较低。水文敏感区指数的空间分布表明在集水区

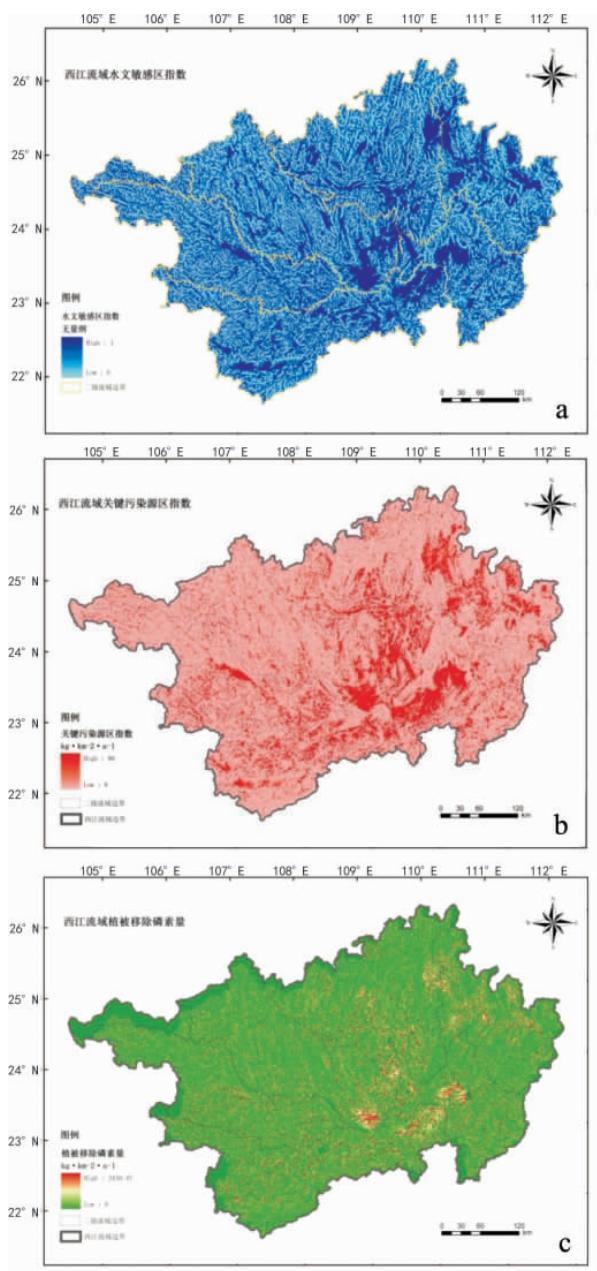


图 2 水文敏感系数、关键污染源区指数、植被移除磷素量

Fig. 2 HSC, CSA and quantity of phosphorus filtered by vegetations

些区域更容易产生汇流,反映了磷素扩散因子高值的空间分布特征。图 2:a 表明 HSA 较高的区域有桂东北(桂林、灵川、临桂和永福)、桂中南地区(南宁、邕宁、武鸣、上林、宾阳、来宾、贵港、桂平和平南),以及桂西、桂西南的河谷地带(百色、田阳、田东/宁明及上思)。而桂中北、西南石漠化较严重的区域,由于土层薄、坡度大等原因对非点源磷污染进入地表径流贡献不明显,HSA 往往不如平原和河谷

区域高。

3.2 流域内各生态系统关键污染源区(CSA)指数

经估算,广西西江流域 2008 年各主要生态系统的 CSA 指数范围为 $6.54 \sim 58.06 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。农田的该指数均值最高,未利用地和建设用地次之,林地和草地的 CSA 指数均值显著低于其它系统。

农田系统总磷的 CSA 指数总量最大,占流域总量($3\,650.25 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)的 69.7%;林地虽然均值最低,但由于面积最大,总量占流域总量的 24.3%;其它三种系统类型由于面积小及指数均值低,共占总量的 6.0%。

通过识别集水区内磷素关键污染源区的空间分布,可将磷素非点源污染治理重点和有限的资源投入到流域内污染负荷最高、且对水体危害可能性最大而范围相对较小的敏感地区和地段。本研究中,桂西南右江流域(百色、田阳、田东),左江流域的龙州、宁明、崇左、扶绥,桂中(宜州、柳城、柳州、来宾、武宣、象州),桂中南(南宁、武鸣、宾阳、贵港、桂平、平南)和桂东北(永安、灵川、桂林、临桂、荔浦、平乐及贺州)等地是关键污染源区指数高值集中的区域(图 2:b)。

3.3 集水区各生态系统植被移除磷素量及经济价值

运用表 2 所列模型和公式(3)的计算结果(表 3)表明,农田、林地和草地生态系统移除磷素量为 $2\,673.36 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占 CSA 指数总量的 73.2%。农田移除磷素的平均量最大,移除磷素总量 $632.77 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$;林地平均值次之,由于面积大,总量达 $1\,844.82 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占被植被移除磷素污染物质总量的 69%;草地移除总量为 $195.78 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2008 年生态系统移除磷素污染的服务价值达到 3 462.44 万元,其中具有该项服务功能的农田、林地、草地系统价值分别为 811.98、2 399.16、251.30 万元。

虽然农田移除磷素的能力最强,但其 CSA 指数远高于移除能力,因此农田整体上还是磷素污染的输出者。在本研究中,林地往往分布在集水区上游或者坡度较大的区域,不易产生汇流,污染物产出量也相对少,大部分磷素未经林地过滤,因此本研究模拟林地移除磷素能力的结果可能无法反映林地这一项生态系统服务的极限。

4 结论与讨论

该模型依靠经验参数结果,综合考虑了面源污染的产生和传输过程,直接估算进入水体的面源总

磷污染负荷,不必考虑面源污染的过程和内在机制以及其它影响因素,结构简单,受研究尺度、数据基础等方面的限制较少,适当调整模型参数还可以进行其它非点源污染物如氮素等的模拟。模型计算出广西西江流域非点源污染水文敏感性和关键污染源区的分布格局,对广西西江流域非点源污染研究和治理具有重要的参考意义;此外,模型对不同土地利用/覆盖类型和各市区非点源磷污染产生的数量及其被植被过滤移除的数量,以及该生态系统服务的价值估算对评估广西西江流域非点源磷污染程度有一定的参考意义。

本研究只对新的生态系统服务评价方法的探讨,还存在以下问题:(1)使用其它流域和生态系统的小区实验结果和经验参数作为广西西江流域生态系统总磷输出及过滤移除系数,并没有进行实地检测和实验模拟,可能会造成模拟结果的偏差,如李生等(2009)通过在广西凌云县的径流实验发现喀斯特地区尤其是石漠化地区由于形成负地形以具有及复杂的地下渗漏系统,降雨历时短的大雨以上强度的降雨才产生地表径流,而本模型在计算流域水文敏感区指数分布的过程中难以对此过程进行有效的处理,可能使非点源磷污染的水文敏感区范围估计结果偏大。因此,需要通过实地验证,进一步了解喀斯特/岩溶生态系统的水文敏感性特征,才能更为准确地评价其对磷污染的影响。(2)喀斯特地区土层较薄,土壤含磷量也相对较低,经验数据的使用可能使非点源磷污染产生的总量估计结果偏高;除此之外,模型中使用的土地利用和生态系统类型分类不够精细,也会在一定程度上影响模型运行结果的准确性。解决这些问题需要对广西西江流域非点源污染尤其是磷素污染进行更加深入的研究,得到适合西江流域的经验参数,并通过更多的过程研究完善模型的设计和运行。(3)本研究使用替代成本的方法,从治理污染的花费表现了生态系统服务某一方面的经济价值,但无法定量其它生态系统服务如吸收水土保持、调蓄洪水、CO₂、释放氧气、提供木材等产品,以及文化景观享受等方面的经济价值,仍然具有一定的局限性,需要用更完善的理论和方法来全面评估生态系统服务的价值。

广西喀斯特地区地貌的复杂性和生态系统的脆弱性,使非点源污染极易影响区域内水质,并且对地下水水质的影响比非喀斯特地区更显著。保护喀斯特地区的生态系统,提升生态系统服务,减轻水土流

失,才能从源头上减少非点源污染的影响。

参考文献:

- 刘纪远. 1996. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京:中国科学技术出版社:1—40
- 沈珍瑶,刘瑞民,叶闯,等. 2008. 长江上游非点源污染特征及其变化规律[M]. 北京:科学出版社:47—48
- Deng HP, Li XB. 2002. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPMODEL[J]. *Progr Geogr*, 21(2):103—110
- He CS(贺缠生), Fu BJ(傅伯杰), Chen LD(陈利顶). 1998. Non-point source pollution control and management(非点源污染的管理及控制)[J]. *Environ Sci(环境科学)*, 19(5):87—96
- Johnes PJ. 1996. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters; the export coefficient modeling approach[J]. *J Hydrol*, 183:323—349
- Li S(李生), Ren HD(任华东), Yao XH(姚小华), et al. 2009. Study on characteristics of runoff and nutrition loss between different vegetation land in typical karst rock desertification zone(典型石漠化地区不同植被类型地表水土流失特征研究)[J]. *J Soil Water Cons(水土保持学报)*, 3(2):1—6
- Lovejoy SB, Lee JG, Randhir TO. 1997. Research needs for water quality management in the 21st century: a spatial decision support system [J]. *J Soil Water Cons*, 52(1):19—23
- Naiman RJ, Decamps H. 1997. The ecology of interfaces: riparian zones[J]. *Ann Rev Ecol Syst*, 28(2):621—658
- Qian J(钱进), Wang C(王超), Wang PF(王沛芳), et al. 2009. Research progresses in purification mechanism and fitting width of riparian buffer strip(河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展)[J]. *Adv Water Sci(水科学进展)*, 20(1):139—144
- Sims JT, Goggin N, McDermott J. 1999. Nutrient management for water quality protection: integrating research into environmental policy[J]. *Water Sci & Technol*, 39(12):291—298
- Smith VK. 1993. Nonmarket valuation of environmental resources: an interpretive appraisal[J]. *Land Econ*, 69(1):1—26
- Pionke HB, Gburek WJ, Sharpley AN, et al. 1997. Hydrologic and Chemical Controls on Phosphorus Loss from Catchments [M]//Tunney H, Carton O, O'Donnell T(eds). Phosphorus Loss from Soil to Water. Cambridge, UK: CAB International Press:225—242
- Wang WW(王伟武), Zhu LZ(朱利中), Wang RC(王人潮). 2002. Review of application of 3S technique in quantitative analysis model of non-point source pollution in special drainage basin(基于3S技术的流域非点源污染定量模型及其研究展望)[J]. *J Soil Water Cons(水土保持学报)*, 16(6):39—49
- Zhang SR(张淑荣), Chen LD(陈利顶), Fu BJ(傅伯杰), et al. 2003. The risk assessment of nonpoint pollution of phosphorus from agricultural lands: a case study of Yuqiao Reservoir Watershed(农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例)[J]. *Watersh Quat Sci(第四纪研究)*, 23(3):262—269
- Zheng LB(郑丽波), Gui XA(桂新安), Wang SP(王少平), et al. 2008. Review of non-point source pollution modeling: parameter estimation and simplification by sensitivity and uncertainty analysis(非点源污染模型参数数字化及不确定性研究进展)[J]. *Environ Poll Contr(环境污染与防治)*, 30(5):69—73