

# 基于 GIS 的流域非点源污染潜在风险区识别

胡连伍, 王学军, 罗定贵, 蒋颖

(北京大学 环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 地表水环境非点源风险区识别是开展非点源污染控制与管理工作的主要内容。借鉴 USLE 参数化模型的成功经验, 引入施肥调整因子及河网因子, 把城镇用地和农村居民用地作为非点源的源因子赋值, 并与 GIS 相结合, 用于识别以农业景观为主的杭埠—丰乐河流域非点源污染风险区, 结果显示, 流域地表水氮磷风险区集中分布在龙河口水库周边及其上游地区, 主要因为陡坡开垦为农田, 由于水库对非点源的截留作用, 该区域对巢湖的影响并不大; 丰乐河中上游部分和杭埠河邻近龙河口水库的下游部分也是重要的集中分布区之一, 该区域会对巢湖营养元素产生较大的影响。流域大于均值风险区占了流域面积的 5.62%, 而农业用地又占了其中的 86.47%, 说明农业非点源污染是该流域地表水环境非点源污染的关键源区。

**关键词:** 杭埠—丰乐河流域; USLE; GIS; 风险区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0107-04

中图分类号: X87, X824

## GIS Based Identification of Potential Risk Areas of Non-point Source Pollution in Hangbu-Fengle Watershed

HU Lian-wu, WANG Xue-jun, LUO Ding-gui, JIANG Ying

(College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In order to improve water quality, it is essential to identify non-point source risk areas for pollution control when the point sources have been controlled. Modified USLE model was used to identify the risk areas of the Hangbu-Fengle watershed with the help of the spatial analysis tool of GIS. The risk maps were classified. Results show that the high risk areas are mainly distributed around the upper area of Longhekou reservoir. The upper and middle areas of Fengle watershed and the lower area of Hangbu watershed near Longhekou reservoir are critical for eutrophication of Chao Lake. The regions with the risk bigger than average cover less than 5.62% of the total watershed area, in which the agricultural landuse accounts for 86.47%. This indicates that agricultural landuse has higher risk.

**Keywords:** Hangbu-Fengle watershed; USLE; GIS; risk area

湖泊等内陆地表水体的富营养化已经成为非常重要的环境问题。在很多地区, 营养物质主要来源于农业、森林和城市的非点源污染源, 而不是点源。非点源污染具有时空上的分散性以及排放的不确定性, 所以在识别上存在很大的困难。为了改善水质, 在点源污染逐渐得到控制的前提下, 利用一种简单适用的方法识别出地表水非点源污染的潜在风险区, 作为非点源污染的优先控制区是非常必要的。

非点源污染潜在风险区识别的方法有营养元素流失敏感性指标体系评价法<sup>[1]</sup>, 分布式非点源污染模型识别法<sup>[2]</sup>, 通用土壤流失方程 (USLE) 识别法等<sup>[3]</sup>。指标体系评价法主要用于识别农业区非点源

污染潜在风险区, 该方法是一种参数化方法, 该方法最关键的地方是各个参数赋值的合理性。分布式模型识别法需要大量数据的支撑, 众多的参数也限制了该种模型的使用。应用土壤流失方程识别非点源污染风险区是一个可行途径, 因为地表径流是侵蚀过程与污染物质淋失过程共同的动力, 土壤侵蚀的强弱决定着吸附态污染物流失的强弱。

但是该种方法的缺陷是, 重土壤侵蚀区并不一定就是非点源氮磷的高危险区, 非点源污染风险区的分布还与其源因子 (土壤氮磷的本底值、化肥的施用量及施用方式等) 密切相关。农业非点源污染敏感性评价的目标之一就是建立一种简单适用的, 供资源管理

收稿日期: 2006-04-20

修稿日期: 2006-07-07

资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (40021101); 教育部优秀青年教师教学科研奖励计划资助

作者简介: 胡连伍 (1979-), 男 (汉族), 山东省泰安人, 硕士研究生, 主要从事区域环境科学研究。E-mail: huliianwu@163.com。

通讯作者: 王学军 (1962-), 男 (汉族), 北京人, 教授, 主要从事区域环境科学研究。E-mail: xjwang@urban.pku.edu.cn。

和环境规划工作人员野外识别农业区养分元素流失敏感地区的方法<sup>[4]</sup>。

本研究借鉴 USLE 参数化模型的成功经验,引入了施肥调整因子和距离河网远近因子,把城镇用地和农村居民用地作为非点源的源因子赋值,并与 GIS 的空间分析、数据处理、图形显示功能相结合,应用于以农业景观为主的杭埠—丰乐河流域,期望识别出的流域非点源污染风险区空间分布更加合理。

## 1 流域概况

杭埠—丰乐河是巢湖流域的七大水系之一,由 1:25 万 DEM 提取的流域面积为 4 089 km<sup>2</sup>,占了整个巢湖汇水区的近 50%,流域多年平均径流量 2.68 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>,占了巢湖水源的 63% 以上。流域地势由南西向北东倾斜,呈阶梯状下降,地貌类型包括山区、丘陵、岗地以及冲积平原。该流域林木植被遭到破坏,水土流失严重,不仅淤积河床,也带入了大量的氮、磷和有机质。流域土壤类型以潜育水稻土、粗骨土、黄棕壤为主,占了流域面积的 74.4%,其中潜育水稻土占了流域面积的 50.3%。流域景观格局以农业景观为主,农业用地(包括水稻田、旱地、茶园、菜地、苗圃和果园)占了流域面积的 56.57%,这些使得杭埠—丰乐河流域成为巢湖最重要的非点源污染源之一。据安徽省环境监测中心站监测数据,杭埠—丰乐河流域水质 1999 年、2000 年、2001 年连续 3 a 总磷指标保持在 III—IV 类水之间<sup>[5]</sup>。

## 2 理论与方法

USLE 模型是威斯迈尔和史密斯于 1965 年提出的<sup>[6]</sup>,它是一个经验性很强而各个参数又有着相当物理意义的参数化模型。该方程是在美国试验小区长期径流研究的基础上提出的,主要用来估计区域年侵蚀负荷。如果应用该模型识别污染关键区而不是用于精确计算区域侵蚀,则模型可以简化。Sivertun 等(2003)利用 GIS 与简化的 USLE 模型<sup>[7]</sup>,用于识

别非点源的关键区。该模型没有考虑降雨径流因子,适合于降雨空间分布比较均一的地区,但也为缺少降雨资料地区的非点源污染控制提供了一个有效的工具。另外该模型最大的缺点就是没有充分考虑源因子(主要是施肥量)对非点源的影响。该模型与分布式非点源污染模型风险区识别法相比,具有所需数据量少,计算简单,结果显示灵活等特点。

非点源污染的发生是自然地理特征与社会经济因素共同作用的结果,按照各要素对非点源发生作用的不同,可以把各因子划分为源因子与控制因子,控制因子用于调整源因子适合当地的自然地理和社会经济特征。

施肥量是流域非点源最重要的源因子。施肥方式、时间和土壤本底氮磷含量对非点源也有重要影响。Rekolainen(1989)和 Grizzetti B 等(2003)研究认为非点源营养素负荷与农业用地面积相关性非常好<sup>[8-9]</sup>,而与作物类型关系不大,其中起主要作用的是施肥量。本研究引入了施肥调整因子。由于缺少土壤本底氮磷含量的数据,本研究假定土壤氮磷本底值是空间均一的。文献[1, 7, 10]都是把低肥区和无肥区的施肥因子分级值设置为 0,其实这是不合理的,因为低肥高侵蚀区也有可能成为非点源氮磷的关键贡献区。本研究施肥调整因子的分级分类标准见表 1。另外城镇用地和农村居民用地也是重要的非点源源贡献因子,这是文献[1]所没有考虑的。

由于前面的模型没有考虑空间降雨的差异对非点源污染发生的影响,对于大流域而言,这种空间差异性对非点源污染发生的影响是非常大的,所以本研究引入了降雨侵蚀性因子  $R$ ,对模型进行了完善。

于是可建立下面的模型:

$$P = \alpha * C * R * K * LS * W$$

式中:  $P$ ——为风险因子;  $\alpha$ ——为施肥调整因子;  $C$ ——为土地覆盖因子;  $R$ ——为降雨侵蚀性因子;  $K$ ——为土壤因子;  $LS$ ——为地形因子;  $W$ ——为河网因子。

表 1 简化的 USLE 模型要素图分级值

要素图	分类	分级值	要素图	分类	分级值
河网( $W$ )	区域 1(0~ 50 m)	0.924	施肥调整因子 ( $N + P_2O_5$ )	0~ 25 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	1
	区域 2(50~ 200 m)	0.688		25~ 75 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	2
	区域 3(200~ 1000 m)	0.241		75~ 125 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	3
	区域 4(> 1000 m)	0.0001		125~ 225 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	4
				225~ 325 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	5
				> 325 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	6

注:表中河网要素分类值引自文献[7],施肥的分类值参考了文献[10]。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 施肥调整因子

收集了流域内各县城 1:5 万土地利用图, 利用 MapInfo7.0 矢量化, 不同土地利用下的施肥数据由实地调查获取, 具体数据见表 2。源因子要素图的制作是基于对土地利用数字地图的属性编辑派生而来。

#### 3.2 地形因子

收集了流域 1:25 万地形图, 利用 MapInfo7.0 进行矢量化, 在 ArcView3.3 中转化为 TIN 格式, 然后再生成规则格栅的 DEM, 利用下面的模型计算地形因子<sup>[1]</sup>, 计算公式为:

$$LS = (L/22.1)^m (65.41\sin^2 S + 4.56\sin S + 0.065)$$

式中:  $L$  —— 坡长(m);  $S$  —— 坡度角(以弧度表示);  $m$  —— 坡度指数(当  $S \geq 5\%$  时,  $m$  为 0.5; 当  $S \geq 3\%$  时,  $m$  为 0.4; 当  $S \geq 1\%$  时,  $m$  为 0.3; 当  $S < 1\%$  时,  $m$  为 0.2)

在处理 DEM 之前, 首先去掉了其中的水面部分, 这样就避免了不真实的流量累积值。杭埠—丰乐河流域地形因子介于 0 与 1 186.66 之间, 平均值为 37.63, 标准差为 86.54, 其中小于 1 的地区占到了流域总面积的 64.13%, 高值区主要分布在流域的西南部分, 即龙河口水库上游部分, 该区属于大别山系的一部分。

表 2 杭埠—丰乐河流域不同土地利用的施肥情况实地调查数据及 C 值

土地利用类型	C 值 <sup>①</sup>	施 N 量/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	施 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	总量/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	等级分值 <sup>②</sup>
水旱轮作	0.08	247	58	305	5
果园	0.18	112	112	224	4
旱地	0.26	230	58	288	5
苗圃	0.04	560	0	560	6
茶园	0.18	101	45	146	4
菜地	0.38	520	240	760	6

注: ① 城市、农村居民用地、水体、林地依次为 0.04, 0.06, 0, 0.005; ② 无肥区水体赋值为 0, 城市、农村居民用地赋值为 2, 林地为 1。

#### 3.3 降雨侵蚀性因子

年降雨侵蚀性因子  $R$ , 采用吴素业(1994)<sup>[11]</sup> 在大别山区提出的经验公式计算, 并且取多年平均值:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 0.0125P_i^{1.6295}$$

式中:  $R$  —— 年降雨侵蚀力因子( $J/m^2$ );  $p_i$  ——  $i$  月降雨量(mm)。

$R$  因子的空间分布特征采用该地区 7 个代表性气象站点的降雨数据分别求算各个站点的多年平均  $R$  值, 然后利用 GIS 的空间插值功能, 实现点数据表面化。

本研究选用了反距离权重法, 该方法是一种比较常用的方法, 该流域多年平均  $R$  值介于 232~340 之

间, 其中毛毯厂与茶湾气象站点的  $R$  值最大, 分别为 339.53 和 338.13, 桃溪站的值最小, 为 232.85。

#### 3.4 土壤要素

收集到了研究流域 20 世纪 80 年代的土地普查资料 1:70 万的土壤分布图, 利用 MapInfo7.0 进行矢量化, 各种土壤类型的属性特征由安徽土壤、舒城与肥西土壤志查得, 利用 RUSLE 用户手册中推荐的在缺少资料时采用的土壤颗粒的几何平均直径计算  $K$  值的方法<sup>[6]</sup>, 计算公式如下:

$$K = 7.594 \times \{0.0034 + 0.0405 \times \exp[-\frac{1}{2}[(\lg D_x + 1.659)/0.7101]^2]\}$$

其分类分级值见表 3。

表 3 杭埠—丰乐河流域土壤要素分级值

土壤类型	分级值	土壤类型	分级值	土壤类型	分级值
潴育水稻土	0.24	黄褐土	0.30	红壤	0.23
淹育水稻土	0.28	棕壤	0.18	黄棕壤	0.17
潜育水稻土	0.26	石灰岩土	0.30	暗黄棕壤	0.19
漂洗水稻土	0.22	紫色土	0.18		
潮土	0.13	粗骨土	0.14		

#### 3.5 河网要素

不同的污染源距离河流的远近是控制污染物迁移扩散过程的一个非常重要的因子, Sivertun 等

(2003) 引入了权重因子<sup>[7]</sup>, 使得河网因子的赋值更加合理, 其分级值见表 1。要素图的制作是从土地利用图中提取水面部分, 然后利用 GIS 的查找距离模

块进行距离计算,重新分类并对其属性进行编辑派生而来。

### 3.6 土地覆盖因子

土地覆盖因子的确定主要参考了文献[7, 12—13],其赋值情况见表 2。土地覆盖要素图的制作基于对土地利用图的属性编辑派生而来。

### 3.7 流域非点源污染风险区空间特征分析

将上述 6 个因子相乘就可以得到流域氮磷风险因子图,进一步对其进行必要的分级分类,根据不同的环境保护目标,以及各地不同的社会经济状况,可以有不同的分级分类标准。首先,从地表水体的角度考虑,把该地区非点源污染潜在风险区划分为 4 类,依次为低于均值区、平均值~ 1 个标准差区;1~ 2 个标准差区;大于 2 个标准差区。由于龙河口水库的存在截留了其上游的非点源,它对巢湖富营养化没有贡献,因此把除龙河口水库上游流域外的流域风险均值作为另一个分类界限,其值为 16.68。对产品图分类分级后,去掉流域中的水面部分,便得到杭埠—丰乐河流域非点源氮磷潜在污染风险区分级图(图 1)。

分别统计了整个流域、非农用地(林地、城镇用地、农村居民用地)和流域农业用地中各类风险区所占的比例(见表 4)。从表 4 可以看到,该流域处在

于均值风险区的土地利用面积占到流域面积的 5.62%,处于非农用地中的大于均值风险区土地利用面积占非农用地面积的 1.87%,处于农业区的大于均值风险区占农业土地利用面积的 8.4%;另外计算了大于均值风险区土地利用中农业用地所占的比例,其值高达 86.47%;说明农业非点源污染是该流域地表水环境非点源污染的关键源区。

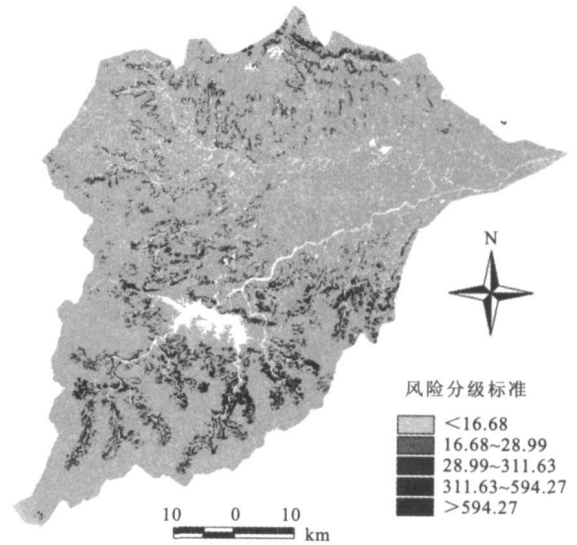


图 1 杭埠—丰乐河流域非点源氮磷风险区分级图

表 4 杭埠—丰乐河流域风险区分布特征

风险区分级	分级标准	全流域/ %	农业用地/ %	非农业用/ %
低于 16.68 风险均值区	< 16.68	92.18	89.39	95.90
风险均值 16.68~ 均值区	16.68~ 28.99	2.19	2.21	2.23
平均值~ 1 个标准差区	28.99~ 311.63	3.86	5.43	1.76
1~ 2 个标准差区	311.63~ 594.27	0.60	0.99	0.07
大于 2 个标准差区	> 594.27	1.16	1.98	0.04

从空间上来看,风险区沿着水体分布,流域地表水氮磷风险区集中分布在龙河口水库周边及其上游地区,主要原因为陡坡开垦为农田,但是由于水库对非点源的截留作用,该区域对巢湖营养素的影并不大;另外一个集中分布区在丰乐河中上游部分和邻近龙河口水库的下游部分,除龙河口水库上游以外的流域中,大于 16.68 的区域占了该区域面积的 6.84%,该区域会对巢湖营养素产生较大的影响,应是该流域中对控制巢湖富营养化具有重要意义的区域。

本研究模型的计算以及图形显示全部在 ESRI 的 ArcView GIS3.3 中实现,模型计算过程中,用到的 GIS 功能主要有栅格与矢量之间的转化、再分类、查找距离、查询、栅格图层间的函数运算、地理分析中的剪切与叠加功能以及水文分析功能等。

## 4 结论

简化的 USLE 模型在进一步完善的基础上与 GIS 相结合可以简单有效地识别非点源污染潜在风险区。在气候、地形、地貌等因子不受人类控制的情况下,土地利用与覆盖可能是影响非点源污染的最主要的动力学因子,该模型可以用来研究区域土地利用变化对区域非点源污染风险区空间转移特征的影响。模型识别出的高风险区可以作为进一步深入研究的对象。

研究区中丰乐河中上游流域和杭埠河邻近龙河口水库的下游区域对与巢湖富营养化的控制具有重要的意义。

(下转第 115 页)

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 张照录, 崔继红. 通用土壤流失方程最新研究改进分析[J]. 地球信息科学, 2004, 4(4): 51—54.
- [ 2 ] 张先婉, 李仲明. 川中丘陵区的农田生态系统[J]. 土壤通讯, 1984, 6(1): 1—11.
- [ 3 ] 朱波, 彭奎, 高美荣, 等. 川中丘陵区土地利用变化的生态环境效应——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站集水区为例[J]. 山地学报, 2001, 19(增刊): 14—19.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 史学正, 于东升, 邢延炎. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性  $K$  值[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 399—405.
- [ 6 ] 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性因子的研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2), 47—52.
- [ 7 ] 四川省土壤普查办公室, 四川省农牧厅. 四川省第二次土壤普查数据资料汇编[M]. 成都: 成都地图出版社, 1992.
- [ 8 ] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of ASAE, 1989, 32: 1571—1576.
- [ 9 ] 朱蕾, 黄敬峰, 李军. GIS 和 RS 支持下的土壤侵蚀模型应用研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(4): 413—416.
- [ 10 ] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Handbook NO. 703. Washington D C: U. S. Department of Agriculture, 1997.
- [ 11 ] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37: 1835—1840.
- [ 12 ] 倪九派, 傅涛, 李瑞雪, 等. 应用 ARC/INFO 预测芋子沟小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 29—33.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62—68.
- [ 15 ] 张信宝, 贺秀斌, 王安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{210}\text{Pb}$  双同位素法研究[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1537—1541.

(上接第 110 页)

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 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]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 262—269.
- [ 2 ] Tripathi M P, Panda R K, Raghuvanshi N S. Identification and prioritization of critical sub-watershed for soil conservation management using the SWAT model[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(3): 365—379.
- [ 3 ] 刘枫, 王华东, 刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用[J]. 地理学报, 1988, 43(4): 329—339.
- [ 4 ] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 56—59.
- [ 5 ] 张美琴, 陈静. 巢湖主要入湖河道磷的污染现状[J]. 广东微量元素学, 2003, 10(4): 41—44.
- [ 6 ] 李凤, 吴长文. RUSLE 侵蚀模型及其应用(综述)[J]. 水土保持研究, 1997, 4(1): 109—112.
- [ 7 ] Sivertun A, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gisselo watershed using GIS[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, (18): 887—898.
- [ 8 ] Rekolainen S. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland[J]. Aqua Fennica, 1989, (19): 95—107.
- [ 9 ] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K, et al. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed(Finland) using the SWAT model[J]. Ecological Modelling, 2003, (169): 25—38.
- [ 10 ] Trevisan M, Padovani L, Capri E. Nonpoint-Source Agricultural Hazard Index: A Case Study of the Province of Cremona, Italy[J]. Environmental Management, 2000, 26(5): 577—584.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62—68.
- [ 13 ] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的小流域农地水土保持规划研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 172—175.