
基于 GIS 的鄱阳湖流域非点源吸附态污染物时空变化研究^{*1}

刘海^{1, 2} 林苗¹ 殷杰¹ 武靖¹ 陈晓玲^{3, 4*}

(1. 湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062;

2. 区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 湖北武汉 430062;

3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079;

4. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西南昌 330022)

【摘要】: 鄱阳湖作为中国最大的淡水湖, 国际重要湿地, 其生态环境保护与可持续发展意义重大。基于 GIS 技术, 以鄱阳湖流域为研究区域, 利用 3 个时期多源数据, 首先运用土壤流失方程估算鄱阳湖流域土壤侵蚀量, 计算土壤侵蚀模数, 然后根据泥沙输移比估算水体的泥沙负荷, 最后采用颗粒态氮磷营养盐迁移经验模型定量研究鄱阳湖流域非点源吸附态污染物 N、P 负荷的时空变化规律。结果显示: 吸附态氮磷污染负荷在空间分布上呈现出四周高、中间低的特点, 相对较高的区域位于流域中、上游, 这主要由于该区域多为山地陡坡; 相对略低的区域位于流域的下游地区, 这主要因为该区域平原和丘陵交错分布, 土壤侵蚀强度较低。时间变化上, 全流域单位面积 N、P 吸附态污染物负荷大都呈现先增加后减少的趋势, 同时减少的幅度较增加的幅度大。

【关键词】: GIS; 鄱阳湖流域; 吸附态污染物; 时空变化

【中图分类号】: X131.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)11-1884-11

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201711017

水体污染包括点源与非点源污染两大类, 非点源污染指由于土地利用活动产生的溶解的或固体的污染物, 从非特定的地点

¹收稿日期: 2017-01-01; 修回日期: 2017-04-09

基金项目: 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心专项项目 (JXS-EW-08) [Collaborative Innovation Center for Major Ecological Security Issues of Jiangxi Province and Monitoring Implementation (JXS-EW-08)]; 2015 测绘地理信息公益性行业科研专项项目 (201512026) [Special Fund by Surveying & Mapping and Geo information Research in the Public Interest (201512026)]; 湖北省青年科技晨光计划 [Hubei Chenguang Talented Youth Development Foundation]

作者简介: 刘海 (1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事流域生态环境问题研究. E-mail: liuhai11191@163.com

***通讯作者** E-mail: xiaoling_chen@whu.edu.cn

随着降水(或融雪)产生的径流进入到受纳水体并引起水体富营养化或其他形式的污染,是相对于点源污染而提出的^[1, 2]。非点源污染由于其来源的复杂性,机理的模糊性和形成的潜伏性,具有在不确定时间内通过不确定途径排放不确定数量污染物的特性,特别是污染负荷的时空差异性,使得对其监测、模拟与控制面临巨大的困难^[3]。应用数学模型对非点源污染进行模拟和估算是非点源研究主要手段,20世纪60年代起发达国家开始关注非点源污染,20世纪70年代起进行系统研究,运用USLE、C R EAMS、AGNPS、SWAT等模型对非点源污染迁移转化机理进行研究^[4~6]。而中国起步较晚,对非点源污染物时空分布的研究多是对国外模型的修正和应用。如余进祥等^[7]利用RUSLE模型结合GIS,对鄱阳湖流域的土壤侵蚀量和吸附态氮磷的输出负荷进行估算;乔卫芳等^[8]运用SWAT模型研究丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征;张文婷等^[9]通过构建基于元胞自动机(CA)的降雨-径流模拟模型研究非点源污染时空动态分布。

非点源污染已成为威胁生态环境的主要因素,据统计,滇池、巢湖、太湖以及黄河、淮河、汉江等水域,非点源污染比例已超过点源污染^[8, 10]。而水体富营养化是非点源污染的重要表现。在富营养化过程中积累的营养物质(如N、P),导致过高的生物生产力,同时伴随水质恶化、湖区水生态环境的变化,使湖泊丧失原其原有功能。因此,加强湖泊水体非点源污染的研究对社会发展及生态环境建设具有重要的意义^[11]。鄱阳湖作为中国最大的淡水湖泊,随着鄱阳湖地区生态经济圈的建设,湖区水体近10a来正缓慢地向富营养化趋势发展,加剧了近湖水体的污染程度,造成湖泊水质恶化,此外,大量泥沙经五河入湖,其侵蚀、搬运和淤积过程,也极大地改变了鄱阳湖及流域生态环境状况,水生生态系统结构遭到破坏^[12, 13]。非点源污染作为鄱阳湖地区的主要污染源,长期以来定量分析不足。本研究欲通过GIS技术,利用1990年、2000年、2008年3期多源数据,根据颗粒态氮磷营养盐迁移经验模型定量分析鄱阳湖流域吸附态污染物N、P负荷及其时空变化规律,以期为鄱阳湖流域生态环境保护和治理提供科学参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

鄱阳湖是我国的第一大淡水湖泊,地处长江中下游南岸,上接江西境内赣江、信江、抚河、饶河、修水5大干流,下有湖口通长江^[14]。是我国重要的生态功能保护区,是世界自然基金会划定的全球重要生态区,同时又是长江的重要调蓄湖泊^[15]。鄱阳湖全流域面积 $16.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中96.6%位于江西省境内,占江西国土面积的94%。其承纳的5大水系,经鄱阳湖调蓄注入长江的水量约占长江流域大通水文站年径流量的15%,是一个过水性、吞吐型、季节性的淡水湖泊^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤流失方程

本文对鄱阳湖流域土壤侵蚀的估算采用美国学者Wischmeier等^[4]建立的通用土壤流失方程USLE。该方程全面考虑了影响土壤侵蚀的自然因素,即降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度、坡长、植被与作物管理因子和土壤保持措施六大因子。USLE的一般表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:A为年土壤侵蚀量,单位: $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$;R为降雨侵蚀力因子,单位: $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;K为土壤可蚀性因子,单位: $\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$;L为坡长因子(无量纲);S为坡度因子(无量纲);C为植被与作物管理因子(无量纲);P为土壤保持措施因子(无量纲)。

1.2.2 泥沙负荷估算

泥沙负荷是指坡面水土流失产生的土壤颗粒进入到河道中的部分。与土壤侵蚀量的关系如下^[17]：

$$T = D_r \cdot A \quad (2)$$

式中:T 为泥沙负荷量(t); A 为流域土壤侵蚀量($t \cdot km^{-2}$); D_r 为泥沙输移比(km^2)。

泥沙输移比(SDR)是指流域出口处某一断面实测的输沙量与断面以上流域侵蚀产沙量之比^[18]。影响泥沙输移比的因素很多且对于鄱阳湖流域泥沙输移比的研究较少,这里考虑空间尺度对泥沙输移比的影响,选择 Vanoni(1975)研究得出的 SDR 与流域面积的关系曲线^[19],公式如下:

$$SDR = 0.4724 \cdot A^{-0.125} \quad (3)$$

式中:SDR 为泥沙输移比(km^2); A 为流域面积(km^2)。

1.2.3 吸附态污染物负荷估算

吸附态污染物负荷的估算采用颗粒态氮磷营养盐迁移经验模型进行计算^[20],公式如:

$$L = T \cdot Q \cdot \eta \quad (4)$$

式中:L 为吸附态污染物流失量(t/a); T 为泥沙负荷量(t); Q 为流失土壤中污染物的背景含量(g/kg); η 为吸附态污染物的土壤富集比(无量纲)。

2 流域土壤侵蚀量估算

2.1 土壤侵蚀因子估算

2.1.1 降雨侵蚀因子 R 估算

R 值反映了降雨引起土壤分离和搬运的动力大小,即降雨产生土壤侵蚀的潜在能力,其与降雨量、降雨强度、降雨历时等因素有关。由于实测数据不易获取,降雨侵蚀力难以直接测定。因此,出现了各种估算 R 的方法,这里借鉴美国粮食与农业组织(FAO)改进的流域降雨侵蚀力指数,该方法既考虑了年降雨总量,又考虑各月的降雨分布,数据容易获取,使用较为广泛^[21]。计算方程如下:

$$F_{\text{mod}} = \sum_{i=1}^D r_i^2 / p \quad (5)$$

式中: F_{mod} 为改进后的傅里叶指数, r_i 为第 i 月降雨量; P 为年降雨量。把改进后的 Fournier 指数相加发现与降雨侵蚀力因子 R 成正比线性相关关系:

$$R = aF_{mod} + b$$

(6)

式中:R 为降雨侵蚀力因子; a 和 b 为气候带决定的常数, 本文借鉴游松财等^[22]对江西泰和县土壤侵蚀量估算的研究成果, a 取 4.17, b 取-152。

降雨量数据通过中国气象科学数据共享服务网得到, 研究区域分布有 16 个站点(图 1)。计算各站点的 R 值, 并通过反距离权重插值得到 1990 年、2000 年与 2008 年降雨侵蚀力因子 R 值的分布(图 2)。

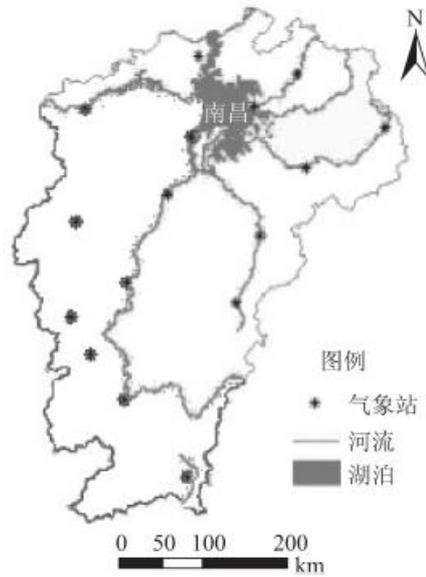


图 1 鄱阳湖流域气象站分布图

Fig. 1 Distribution of Weather Stations in Poyang Lake Basin

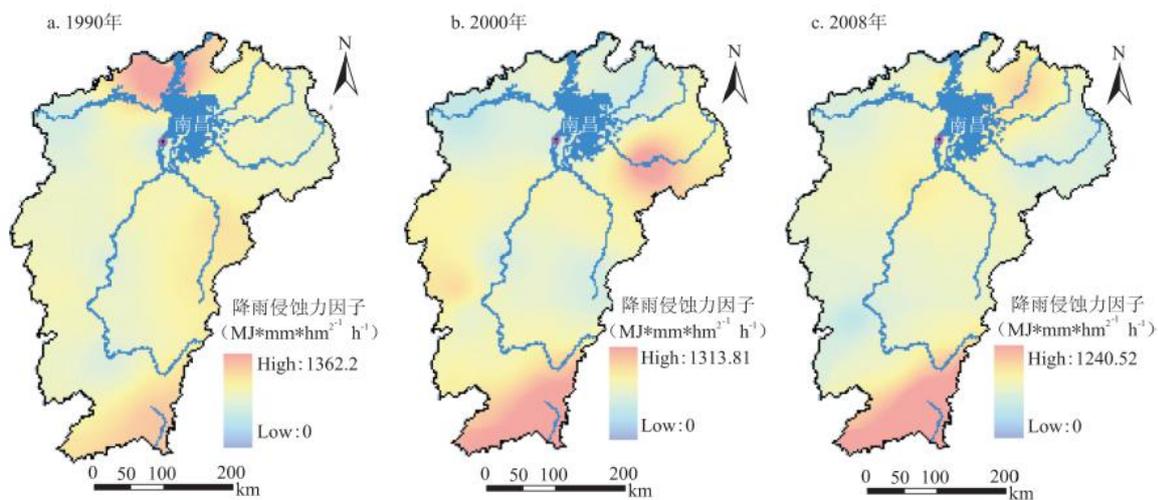


图2 降雨侵蚀力因子 R 值的分布图

Fig. 2 Distribution of R Value of Rainfall Erosivity Factor

图2显示, 3期的 R 值, 共同点是在南部地区的 R 值较高, 不同点是1990年表现为西北部的 R 值较高, 2000年表现为东部地区较高, 2008年表现为北部地区较高。 R 值有减小的趋势。

2.1.2 土壤可蚀性因子 K 估算

K 指土壤遭受侵蚀的敏感程度, 反映土壤对侵蚀外应力剥蚀和搬运的敏感性, 是影响土壤流失量的内在因素, 它也是定量研究土壤侵蚀的基础。在USLE中, 土壤可蚀性因子定义为标准小区内单位降雨侵蚀力引起的土壤流失率。本研究对鄱阳湖流域不同土壤类型的可蚀性因子 K 值获取是结合全国第二次土壤调查1:400万的土壤类型数据, 依据梁音等对长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性的研究成果得到^[23, 24](表1)。最终鄱阳湖流域土壤类型分布和 K 值分布如图3。

表1 鄱阳湖流域不同土壤类型可蚀性因子 K 值(单位: $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)

土壤类型	潮泥田	红壤	红壤性土	粗骨紫色土	黄壤	黄棕壤	棕壤	黑色泥灰石
K (国际制)	0.0544	0.0304	0.0299	0.0452	0.0252	0.0289	0.0158	0.0146

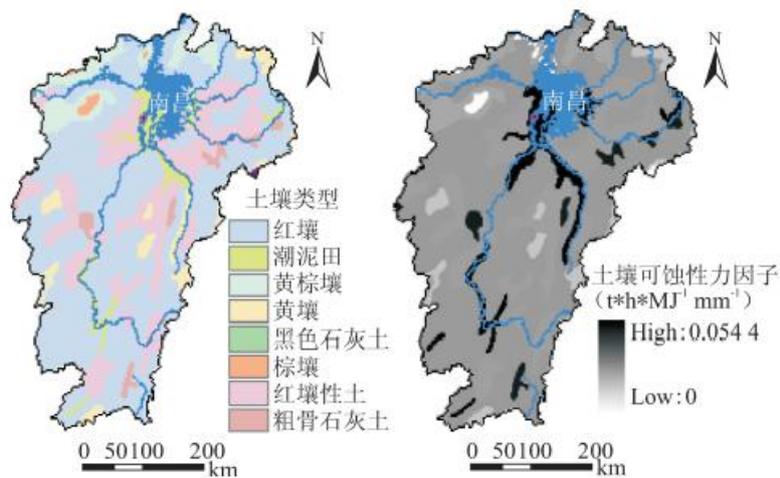


图3 土壤类型图和土壤可蚀性因子K值分布图

Fig. 3 Soil Type Diagram and Distribution of Soil Erodibility Factor K

图3反映出江西省红壤、红壤性土分布较为广泛。在环鄱阳湖，河流两岸分布着潮泥田和粗骨紫色土壤，K值较大，表征土壤可蚀性较其他区域强。

2.1.3 坡度坡长因LS估算

LS表示其它因子相同时，一定坡度/坡长的坡面上，土壤流失量与标准径流小区典型坡面土壤流失量的比值，是侵蚀加速因子，坡度与坡长一起反映地形地貌特征对土壤侵蚀的影响，故在研究中通常将坡长因子L和坡度因子S合并为LS来估算^[21]。对鄱阳湖流域LS的估算采用Van Remortel改进了的由Hickey提出的基于DEM的方法，该方法充分利用计算资源而不牺牲精度，因此针对大区域的研究，提高了计算速度^[25]。鄱阳湖流域DEM采用90m分辨率的SRTM地形数据。LS分布图(图4)基于鄱阳湖流域DEM得到。

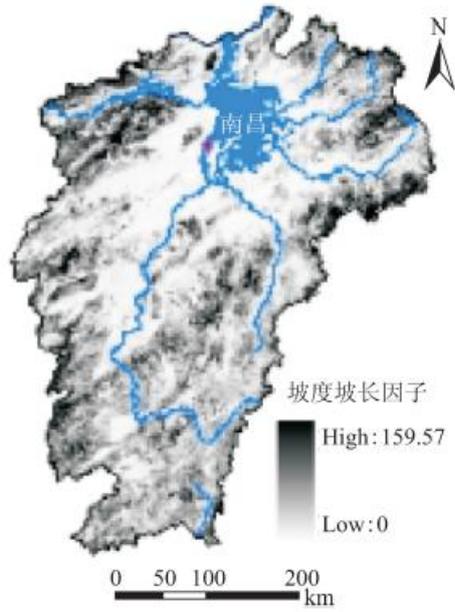


图4 坡度坡长因子LS值分布图

Fig. 4 Distribution of LS Value of Slope Length Factor

2.1.4 植被与作物管理因子C估算

C反映的是有关植被覆盖和管理变量对土壤侵蚀的综合作用，其定义为有特定植被覆盖或田间管理土地上的土壤流失量，与其他条件相同时清耕休闲地上的土壤流失量之比。C值的取值主要与植被覆盖用地类型有关^[26]。本研究对植被与作物管理因子C估算是依据调查鄱阳湖流域耕作管理制度，参考原立峰等^[27]研究成果，结合鄱阳湖域土地利用现状，确定了各土地利用类型的平均C因子值(表2)。

表2 鄱阳湖流域植被与作物管理因子C取值

用地类型	C值	用地类型	C值
水系	0	草地	0.050
林地	0.003	旱地	0.120
居民地	0.003	裸地	1.000
水田	0.088	未利用地	1.000

2.1.5 土壤保持措施因子P估算

P是采用专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值，介于0~1之间，对无任何土壤保持措施的土地类型P值取为1^[28]。本文对土壤保持因子的估算，是在对鄱阳湖流域水土流失现状和土地利调查的基础上，通过综合考虑土地利用

类型与地形坡度的基础上估算得到(表 3)。

表 3 鄱阳湖流域土壤保持措施因子 P 取值

土地利用类型	坡度 (%)	P 值
农业用地	0~5	0.11
	5~10	0.12
	10~20	0.14
	20~30	0.19
	30~50	0.25
	>50	0.33
林地	0~200	0.80
其他	0~200	1.00

2.2 鄱阳湖土壤侵蚀估算

依据以上估算的鄱阳湖流域 3 个时期土壤侵蚀的 6 个因子, 运用土壤流失方程估算得到鄱阳湖流域 3 个时期土壤侵蚀量(图 5)。

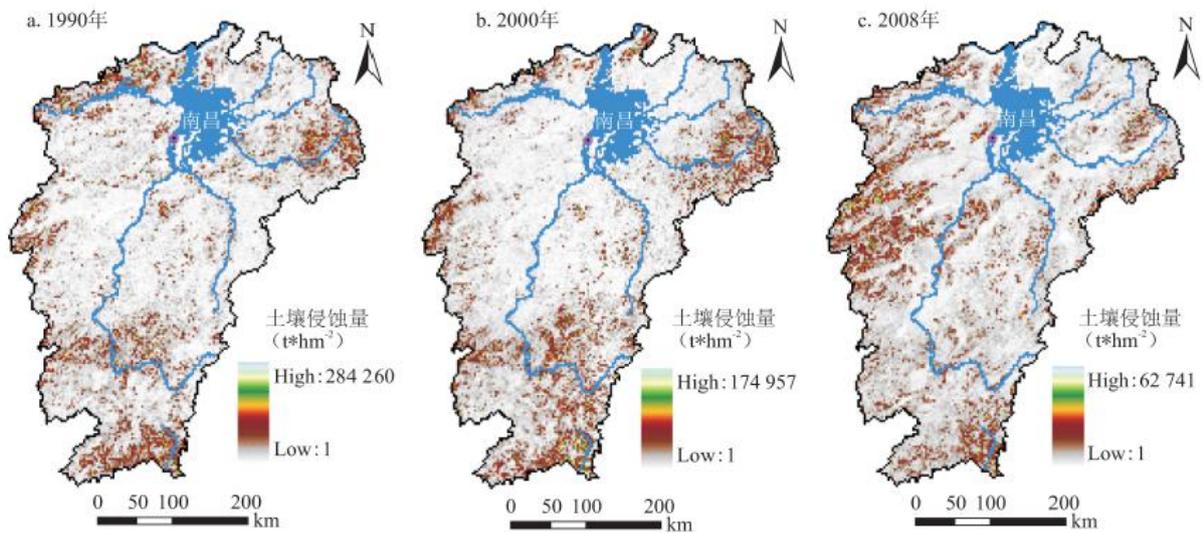


图 5 鄱阳湖流域土壤侵蚀量分布图

Fig. 5 Distribution of Soil Erosion in Poyang Lake Basin

从土壤侵蚀量空间分布看, 3 个时期较低的区域均以鄱阳湖及 5 河支流下游沿线向四周呈辐射状分布。较高的区位于 5 河中、上游地区。

从 3 个时期土壤侵蚀量变化看, 赣江流域先增加后减少, 抚河流域、饶河流域、信江流域土壤侵蚀量变化不大, 环鄱阳湖

区、修水流域逐渐减少。图 5 反映鄱阳湖流域土壤侵蚀量的时空分布，为进一步探求鄱阳湖流域 3 个时期土壤侵蚀强度的变化及土壤氮磷富集比的计算，这里对土壤侵蚀模数进行估算。

2.3 土壤侵蚀模数估算

土壤侵蚀模数是指单位面积和单位时段内的土壤侵蚀量，常用每年每平方千米的土壤侵蚀量，单位为 $t/(km^2 \cdot a)$ 或 $m^3/(km^2 \cdot a)$ ；或者用每年侵蚀土层的厚度表示，单位为 mm/a ^[29]。基于上文处理得到的鄱阳湖流域各年的土壤侵蚀数据，计算鄱阳湖流域各子流域的土壤侵蚀模数。利用 DEM 计算汇水区，依据鄱阳湖的五大支流，将流域分为 5 个子流域与鄱阳湖环湖区 6 个部分(图 6)。通过各流域的土壤侵蚀量及面积数据核算，得到三期各部分的土壤侵蚀模数(表 4)。各流域中饶河区、赣江区、抚河区、信江区土壤侵蚀强度均呈先增加后减少的趋势，信江区是 3 个时期土壤侵蚀模数变化最为剧烈的流域，平均变化幅度超过 50%。修水区、鄱阳湖环湖区逐渐减少，平均下降幅度超过 30%。总体来看，各流域土壤侵蚀模数均呈减小态势，水土流失得到初步改善。

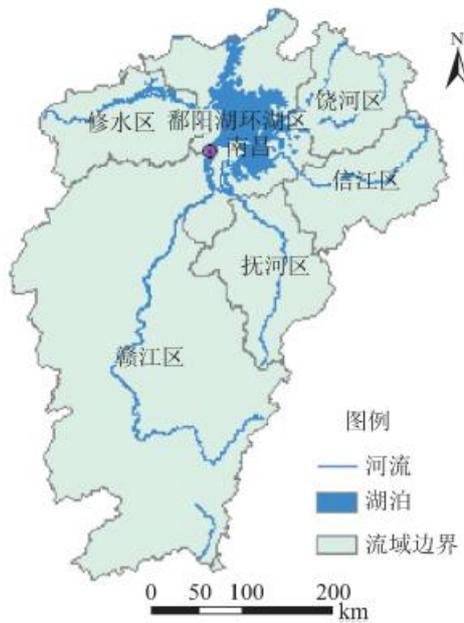


图 6 流域范围图
Fig. 6 River Basin Map

表 4 鄱阳湖流域各年各子流域土壤侵蚀模数

流域名	1990 年	2000 年	2008 年
饶河区	169.186	180.365	116.436
赣江区	251.439	340.569	208.91
抚河区	142.265	201.246	154.13
修水区	316.622	208.416	130.286
信江区	310.08	457.352	212.449
鄱阳湖环湖区	280.101	175.106	77.621

2.3 流域泥沙输移比计算

利用公式(3)，计算得到各流域泥沙输移比。泥沙输移比数值大小可以反映某流域土壤侵蚀剧烈程度，比值越大，侵蚀越剧烈，比值越小，侵蚀越缓慢^[30]。表5显示饶河区的SDR值最高，该流域的侵蚀最剧烈；赣江区SDR值最低，侵蚀较缓慢。

表5 各流域泥沙输移比

流域名	面积 (km ²)	SDR
饶河区	14 010	0.143 2
赣江区	79 749	0.115 2
抚河区	15 716	0.141 2
修水区	14 347	0.142 8
信江区	14 419	0.142 7
鄱阳湖环湖区	21 396	0.135 8

3 鄱阳湖流域吸附态污染负荷估算

鄱阳湖流域泥沙负荷由公式(1)并结合上文的SDR获得。土壤中污染物的背景含量，是通过查询中国土壤数据库第二次土壤普查农田肥力数据集，依据土壤类型查询得到，如表6。

表6 鄱阳湖流域不同土壤类型氮、磷背景含量(g /kg)

土壤类型	潮泥田	红壤	红壤性土	粗骨紫色土	黄壤	黄棕壤	棕壤	黑色石灰土
氮	1.360	1.200	0.420	0.580	1.760	0.910	2.080	2.750
磷	0.008	0.004	0.003	0.003	0.002	0.004	0.004	0.004

对于氮磷富集比的计算，国内外已经研究了多种方法^[31]。鉴于富集率的大小与土壤侵蚀过程密切相关，其通常随着侵蚀强度的增加显著降低^[32]，故有些学者将土壤侵蚀量和富集率的关系定量化，建立了富集率公式。相对于其它方法，上述方法由于数据获取的方便，能与土壤侵蚀量建立直接关系，故得到了广泛的应用^[33]，考虑研究区域的土壤类型较多，这里选择 Menze R. G. (1980)提出的综合性较强的N、P富集比计算公式^[34]，如下：

$$\ln(E_{TN/TP}) = 2 - 0.2 \ln(S_E) \quad (7)$$

式中:ETN/TP为氮磷富集率;SE为土壤侵蚀模数。以上文处理得到的鄱阳湖流域各年各子流域土壤侵蚀模数，结合公式(7)，处理得到鄱阳湖流域各年的氮磷富集比(表7)。

表7 鄱阳湖流域各年各子流域的氮磷富集比

年份	饶河区	赣江区	抚河区	修水区	信江区	鄱阳湖环湖区
1990	2.648	2.446	2.741	2.336	2.346	2.394
2000	2.614	2.302	2.558	2.540	2.170	2.630
2008	2.853	2.539	2.698	2.790	2.530	3.095

利用公式(4)处理得到鄱阳湖流域各流域吸附态污染物负荷(图7)。

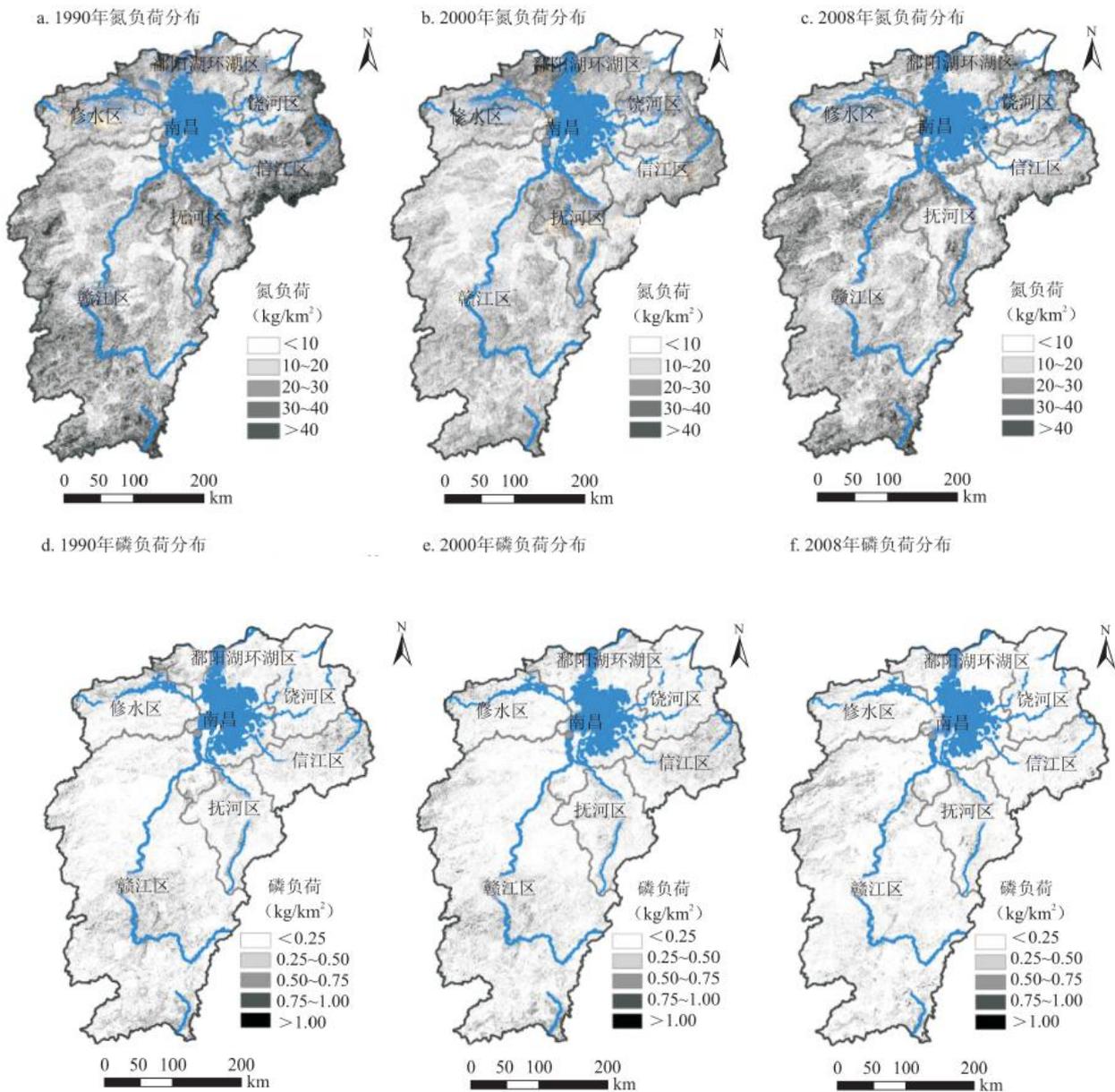


图7 江西省6大流域1990、2000、2008年氮和磷负荷分布图

Fig. 7 Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in 6 Major River Basins in Jiangxi Province, 1990, 2000 and 2008

为了让相关决策者能更直观的了解鄱阳湖流域吸附态污染物 N、P 负荷，这里按流域单元进行分区统计，得到各流域单元 3 个时期的 N、P 负荷总量对比数据(表 8)。

表 8 鄱阳湖流域各区域吸附态污染物负荷

	1990 年		2000 年		2008 年	
	氮(t)	磷(t)	氮(t)	磷(t)	氮(t)	磷(t)
全流域	12 371.26	45.36	14 449.37	55.2	8 261.61	32.58
抚河流域	839.78	3.89	1 226.96	5.39	892.40	4.00
赣江流域	5 934.24	22.25	8 058.80	29.73	4 911.41	17.96
修水流域	1 476.87	5.72	978.43	3.84	638.12	2.44
信江流域	1 304.70	5.62	2 043.73	8.31	1 104.17	3.85
饶河流域	817.01	2.63	888.21	2.75	157.32	1.81
环鄱阳湖区	1 998.66	7.88	1 253.24	5.18	558.19	2.52

据表 8 分析，3 个时期，赣江流域吸附态污染物 N、P 含量均最大，饶河流域均最小。

2000 年与 1990 年相比，抚河、赣江、信江、饶河流域 N、P 含量呈增长趋势，信江流域增加的幅度最大。修水、环鄱阳湖区氮磷含量呈减小趋势。

2008 年与 2000 年相比，6 个流域 N、P 含量均呈减小趋势，饶河流域 N 含量减小幅度最大，信江流域 P 含量减小幅度最大。

2008 年与 1990 年相比，6 个流域 N、P 含量均呈减小趋势，饶河流域 N 含量减小幅度最大，减小了 80.7%，修水流域 P 含量减小幅度最大，减小 57.3%。

各流域的污染物负荷反映了各个区域对鄱阳湖污染负荷的贡献，但是各区域面积存在差异，以各区域的负荷总量进行对比不易反映区域间受污染程度的差异，为了更直观的比较各区域在各个时期污染负荷的变化，这里以各区域的污染总负荷为基础，结合各区域的总土地面积，计算得到各区域单位面积产生的污染物负荷(表 9)。

表 9 鄱阳湖流域各区域单位面积吸附态污染物负荷

	1990 年		2000 年		2008 年	
	氮(kg/km ²)	磷(kg/km ²)	氮(kg/km ²)	磷(kg/km ²)	氮(kg/km ²)	磷(kg/km ²)
全流域	77.50	0.28	90.51	0.35	51.75	0.20
抚河流域	53.43	0.25	78.07	0.34	56.78	0.25
赣江流域	50.50	0.28	101.05	0.37	61.59	0.23
修水流域	102.94	0.40	68.20	0.27	44.48	0.17

信江流域	90.48	0.38	141.74	0.58	76.58	0.27
饶河流域	58.31	0.19	63.40	0.20	11.23	0.13
环鄱阳湖区	93.41	0.37	58.57	0.24	26.09	0.12

结合图 7 和表 9 来看, 1990 年, 在各流域单元中, 修水流域 N、P 含量均最高, 是全流域单位面积 N、P 负荷的 1.42 倍与 1.32 倍, 赣江流域 N 含量最低, 为 6 个流域单位面积 N 负荷总和的 11.24%。饶河流域的 P 含量最低, 为 6 个流域单位面积 N 负荷总和的 10.16%。

2000 年, 在各流域单元中, 信江流域 N、P 含量均最高, 是全流域单位面积 N、P 负荷的 1.57 倍与 1.67 倍, 饶河流域 N、P 含量均最低, 分别为各流域单位面积 N、P 负荷总和的 12.41%、10.00%。

2008 年, 在各流域单元中, 信江流域 N、P 含量均最高, 是全流域单位面积 N、P 负荷的 48 倍与 1.35 倍, 饶河流域 N 含量最低, 为 6 个流域单位面积 N 负荷总和的 4.06%。环鄱阳湖区的 P 含量最低, 为 6 个流域单位面积 N 负荷总和的 10.26%。

2000 年鄱阳湖全流域单位面积吸附态污染物负荷 N、P 含量与 1990 年相比, 在流域均值上都有小幅增加, N 含量增加了 16.79%, P 含量增加了 20.00%; 在各流域单元中有 4 个流域 N、P 量均增加, 其中赣江流域 N 含量增加幅度最大, 增加了 100.09%; 信江流域的 P 含量增加的幅度最大, 增加了 34.48%。修水、环鄱阳湖区流域 N、P 含量减少, 其中环鄱阳湖区 N、P 含量减小幅度最大, 分别减小了 37.30%、54.17%。

2008 年鄱阳湖全流域单位面积吸附态污染物负荷 N、P 含量与 2000 年相比, 在流域均值上都有小幅减少, N 含量减少了 42.82%, P 含量减少了 42.86%。在各流域单元中, N、P 含量均呈减小趋势。其中, 饶河流域 N 含量减少的幅度最大, 减少 82.29%, 信江流域 P 含量减少的幅度最大, 减少 53.45%。

2008 年鄱阳湖全流域单位面积吸附态污染物负荷 N、P 含量与 1990 年相比, 在流域均值上均减少, N 含量减少了 33.23%, P 含量减少了 28.57%。在各流域单元中有 4 个区域 N、P 量减少, 其中饶河流域 N 含量减少幅度最大, 减少了 80.74%; 环鄱阳湖区 P 含量减少的幅度最大, 减少 67.57%。有 2 个区域 N、P 量增加, 其中赣江流域 N 含量增加了 21.92%, P 含量增加了 17.86%; 抚河流域 N 含量增加了 6.27%, P 含量无增幅。

4 结果验证与分析讨论

由于缺少吸附态氮磷污染物实测数据, 因此本文通过与其他学者对鄱阳湖流域研究间接证明估算结果的可靠性。陆建忠等^[21]基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化的研究结果表明, 1990 年~2000 年, 抚河、赣江、饶河、信江流域的土壤侵蚀模数均为增加的趋势, 修水流域的土壤侵蚀模数为减小趋势。与本文土壤侵蚀模数(1990~2000 年)的估算结果相符。莫明浩等^[35]基于输出系数模型的研究结果表明, 2008 年赣江流域的氮磷负荷最大。本文研究结果也表明, 2008 年赣江流域的 N、P 负荷量最大。综上说明, 本文的估算结果是合理的。

在研究期选择方面, 短时间间隔能更清楚的反映研究区面源污染的变化, 但是由于本研究土地利用数据获取及处理受限较大, 且获取较为全面的, 可对比的数据较为困难, 本文在参考已有研究成果, 以 5a 或 10a 间隔较多^[21, 36], 故选择的研究时期间隔相对较长, 选择了 1990, 2000, 2008 年 3 个时期。

鄱阳湖为季节性河流, 枯水期、丰水期变化明显, 部分学者对枯丰水期的面源污染展开了研究, 如陈晓玲等研究显示鄱阳湖丰水期 TN、TP 浓度呈升高趋势^[37]。刘倩纯等^[38]、夏雨等^[39]研究显示鄱阳湖枯水期 TN、TP 的含量较高。同时, 也有学者,

如傅春等^[40]、刘聚涛等^[41]，在研究鄱阳湖面源污染方面未考虑枯丰水期的影响。在本文研究中，对降雨数据使用的是年降雨侵蚀因子，反映的是年降雨量对土壤侵蚀的影响，故在本文的研究中未考虑枯丰水期的影响。

本文综合考虑降雨、地形、植被等多个因子对流域土壤侵蚀的影响。从时间的角度分析，降雨侵蚀因子影响最大。降雨侵蚀因子越小，降雨强度越小，雨水冲刷地表能力越小，土壤侵蚀含量减少。水体溶解 N、P 含量减小，使得吸附态污染物氮磷负荷减小。从空间角度分析，鄱阳湖流域地势陡峭的区域，坡度大，土壤被雨水冲刷、搬运、堆积过程，导致土壤侵蚀含量增大。地势相对平坦的平原、丘陵交错分布区域，坡度小，土壤侵蚀强度相对较低。

5 结论与展望

本文基于 GIS 技术，运用土壤流失方程估算鄱阳湖流域土壤侵蚀量，计算土壤侵蚀模数，然后根据泥沙输移比计算水体的泥沙负荷，最后采用颗粒态氮磷营养盐迁移经验模型估算鄱阳湖流域非点源吸附态污染物 N、P 负荷，得出以下结论：

(1) 从空间分布看，吸附态氮磷污染负荷相对较高的区域位于流域的中、上游，这主要是该区域多为山地陡坡，土壤侵蚀强度较大；吸附态氮磷污染负荷低的区域位于流域的下游地区，这主要是该区域平原、丘陵交错分布，土壤侵蚀强度相对较低。

(2) 从时间变化看，2008 年全流域单位面积 N、P 吸附态污染物负荷比 1990 年和 2000 年小。3 个时期的鄱阳湖全流域单位面积吸附态污染物负荷 N、P 含量，总体呈现先增加后减少的趋势，减少的幅度较增加的幅度更大。

本研究对鄱阳湖流域非点源污染物负荷，采用的经验模型，各因子取值与鄱阳湖流域实际尚存在误差，导致土壤侵蚀模数及吸附态污染物负荷 N、P 含量估算与实际状况可能存在一定的差距。因此，加强对吸附态污染物负荷估算模型中基础参数的研究，减少模型估算的误差，是今后非点源吸附态污染估算研究的重要环节。同时，根据鄱阳湖流域特点确定合理的非点源污染防治技术方法和管理手段，减少氮磷污染物负荷，也是将来需要关注的重点。

参考文献：

[1] ARNOLD J G, ALLEN P M, BERNHARDT G A. Comprehensive surface-ground-water flow model [J]. Journal of Hydrology 1993, 142: 47-69.

[2] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R) 理论与实践 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5) : 1-6.

【WU Y H, HU Z Y, YANG L Z. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: reduce restoration(3R) theory and its practice [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5) : 1-6.】

[3] 红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径 [J]. 水资源保护, 2010, 26(3) : 87-90.

【HONG J, CHEN F. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3) : 87-90.】

[4] WISCHMEIER W, SMITH D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains [M]. Agriculture Handbook 282. Washington, DC: USDA-ARS, 1965.

[5] LE N L F, LAM D C, SWAYNE D A, et al. Integration of a nonpoint source pollution model with a decision support system [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2000, 15: 249 –255.

[6] DU J, RUI H, ZUO T, et al. Hydrological simulation by SWAT model with fixed and varied parameterization approaches under land use change [J]. *Water Resour Manage*, 2013, 27: 2823–2838.

[7] 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 J X, ZHONG B F, LIU Y F, LIU C L. 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.】

[8] 乔卫芳, 牛海鹏, 赵同谦. 基于 SWAT 模型的丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(2) : 219–225.

【QIAO W F, NIU H P, ZHAO T Q. Temporal spatial distribution of agricultural non-point source pollution in the danjiangkou reservoir watershed based on SWAT model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(2) : 219 –225.】

[9] 张文婷, 王铭泽, 宋丹阳, 等. 降雨径流过程的非点源污染时空动态分布研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(10) : 153–160.

【ZHANG W T, WANG M Z, SONG D Y, et al. Study on spatial distribution of non-point source pollution in the process of rain fall runoff [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10) : 153–160.】

[10] SARAWUTH N, SUSANNA T, TONG Y. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the Upper Little Miami River basin. *Agricultural Water Management*, 2013, 119: 65–79.

[11] PIAO C J, WANG H S, QU C Y, et al. Analysis on eutrophication status and its control measures [J]. *Coal Geology*, 2008, 27(8) : 23–29.

[12] 许其功, 曹金玲, 高如泰, 等. 我国湖泊水质恶化趋势及富营养化控制阶段划分 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(11) : 147–151.

【XU Q G, CAO J L, GAO R T, et al. Trend of water quality deterioration and eutrophication control phases partition in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(11) :147–151.】

[13] 章茹, 蒋元勇, 万金保, 等. 城镇化过程对鄱阳湖流域生态系统的影响 [J], *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3) : 400–406.

【ZHANG R, JIANG Y Y, WAN J B, et al. Effect of urbanization process on Poyang Lake basin ecosystem [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3) : 400 –406.】

[14] 杜彦良, 周怀东, 彭文启, 等. 近 10 年流域江湖关系变化作用下鄱阳湖水动力及水质特征模拟 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(5) : 1274—1284.

【DU Y L, ZHOU H D, PENG W Q, et al. Modeling the impacts of the change of river lake relationship on the hydrodynamic and water quality revolution in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5) : 1274—1284. 】

[15] 黄和平, 彭小琳, 孔凡斌, 等. 鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价. 生态学报, 2014, 34(11) : 3107—3114.

【HUANG H P, PENG X L, KONG F B, et al G. Evaluation of ecological economy index in the Poyang lake ecological economic zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (11) :3107—3114. 】

[16] 刘剑宇, 张强, 顾西辉, 等. 鄱阳湖流域洪水变化特征及气候影响研究 [J]. 地理科学, 2016, 36 (8) : 1234—1242.

【LIU J Y, ZHANG Q, GU X H, et al. Floods characteristics and impacts from climate indices in the Poyang Lake Basin. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(8) : 1234—1242. 】

[17] BENAYADA L, HASBAIA M. Comparisons between unsteady sediment-transport modeling [J]. Jcent South Univ, 2013, 20:536—540.

[18] 张晓明, 曹文洪, 周利军. 泥沙输移比及其尺度依存研究进展 [J]. 生态学报, 2014, 34(24) : 7475—7485.

【ZHANG X M, CAO W H, ZHOU L J. Progress review and discussion on sediment delivery ratio and its dependence on scale. Acta Ecolo Sinica, 2014, 34(24) : 7475—7485. 】

[19] VANONI V A. Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54. American Society of Civil Engineers [R]. New York, N. Y. 1975.

[20] 王丹, 邵景安, 王金亮, 等. 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(15) : 167—176.

【WANG D, SHAO J A, WANG J L, et al. 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. 】

[21] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(2) : 337—344.

【LU J Z, CHEN X L, LI H, et al. Soil erosion changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake basin [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2) : 337—344. 】

[22] 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.

【YOU S C, LI W Q. Estimation of soil erosion supported by GIS A case study in Guanxi, Tai He, Jiangxi [J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(1) : 62—68. 】

[23] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤区水土流失动态演变趋势分析 [J]. 土壤, 2009, 41(4) : 534—539.

【LIANG Y, ZHANG B, PANG X Z, et al. Changes of Soil and Water Loss in Red Soil Region of Southern China [J]. Soil, 2009, 41(4) : 534—539. 】

[24] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算 [J]. 土壤学报, 2007, 44(1) : 7—13.

【ZHANG K L, PENG W Y, YANG H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1) : 7—13. 】

[25] Hickey R. Slope angle and slope length solutions for GIS [J]. Cartography, 2009, 29(1) : 1—8.

[26] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究 [J]. 资源科学, 2014, 36(6) : 1288—1297.

【CHEN S X, YANG X H, XIAO L L, et al. Study on soil erosion based on rusle model in south Hilly Region [J]. Resources Science, 2014, 36(6) : 1288—1297. 】

[27] 原立峰, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 基于 GIS 和 USLE 的鄱阳湖流域土壤侵蚀敏感性评价 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(5) : 196—209.

【YUAN L F, YANG G S, LI H P, et al. Evaluation of soil erosion sensitivity in the Poyang Lake watershed based on GIS and USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5) : 196—209. 】

[28] 刘斌涛, 宋春风, 史展, 等. 西南土石山区水平梯田的水土保持措施因子 [J]. 中国水土保持, 2015(4) : 36—39.

【LIU B T, SONG C F, SHI Z, et al. Study on soil and water conservation measures of horizontal terraces in southwest mountainous area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015(4) : 36—39. 】

[29] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 不同尺度域的侵蚀模数 [J]. 水土保持通报, 2006, 26(2) : 69—71.

【ZHANG X B, HE X B, WEN A B, et al. Soil erosion rates under different land scale conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(2) : 36—39. 】

[30] 景可. 长江上游泥沙输移比初探 [J]. 泥沙研究, 2002(1) : 53—59.

【JING K. Sediment transport in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Sediment Research, 2002(1) : 53—59. 】

-
- [31] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究 [J]. 土壤报, 2016, 53(1) : 39-46.
- 【TANG S S, LI P, REN Z P, et al. Studies on characteristics of erosive particles on the covering hillslope under simulated rainfall [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1) : 39-46. 】
- [32] 叶芝茵, 刘宝元, 符素华, 等. 土壤侵蚀过程中的养分富集率研究综述 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7 (1) :124-131.
- 【YE Z H, LIU Y B, FU S H, et al. Review on nutrient enrichment rate in soil erosion process [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(1) : 124-131. 】
- [33] BHATNAGAR V K, MILLER M H, KETCHESON J W. Reaction of fertilizer and liquid manure phosphorus with soil aggregates and sediment phosphorus enrichment [J]. J Environ Qual, 1985, 14: 246-251.
- [34] MENZEL R G. Enrichment ratios for water quality modeling //Knisel W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. III [R]. Supporting Documentation, USDA Conservation Research Report No. 26. Washington DC: USDA-ARS, 1980.
- [35] 莫明浩, 杨洁, 顾胜, 宋月君. 鄱阳湖环湖区非点源污染负荷估算 [J]. 人民长江, 2010(17) : 51- 53+91.
- 【MOM H, YANG J, GUS, et al. Area around Poyang Lake, export coefficient model; pollution load calculation [J]. Yangtze River, 2010(17) : 1-53+91. 】
- [36] 樊哲文, 黄灵光, 钱海燕, 方豫. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应 [J]. 资源科学, 2009(10) : 1787-1792.
- 【FAN Z W, HUANG L G, QIAN H Y, et al. Soil erosion effects driven by land use changes over the Poyang Lake Basin [J]. Resources Science, 2009(10) : 1787-1792. 】
- [37] 陈晓玲, 张媛, 张琨, 等. 丰水期鄱阳湖水体中氮、磷含量分布特征 [J]. 湖泊科学, 2013, 25 (5) : 643 - 648.
- 【CHEN X L, ZH Y, ZH L, et al. Distribution characteristic of nitrogen and phosphorus in Lake Poyang during high water period [J]. Lake Science, 2013, 25(5) : 64, 3-648. 】
- [38] 刘倩纯, 胡维, 葛刚, 等. 鄱阳湖枯水期水体营养浓度及重金属含量分布研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10) : 1230 -1235.
- 【LIU Q CH, HU W, GE G, et al. Contents of nutrients and heavy metals in the poyang lake during dry season [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 21(10) : 1230-1235. 】
- [39] 夏雨, 鄢帮有, 方豫. 鄱阳湖区乐安河流域营养盐负荷影响因素分析 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(2) : 282-288.

【XIA Y, YAN B Y, FANG Y. Nutrient loading and its controlling factors in Le' an River watershed, Lake Poyang basin [J] . Lake Science, 2015, 27(2) : 282—288. 】

[40] 傅春, 康晚英. 环鄱阳湖区农业面源污染 TN/TP 时空变化与分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(7) : 864—868.

【FU C, KANG W Y. Research on spatial characteristics of TN&TP of agricultural non-Point source pollution in the surrounding area of the poyang lake [J] . Resources and Environment of Yangtze River Basin, 2012, 21(7) : 864—868. 】

[41] 刘聚涛, 钟家有, 付敏, 等. 鄱阳湖流域农村生活区面源污染特征及其影响 [J] . 长江流域资源与环境, 2014, 23(7) : 1012—1018.

【LIU J T, ZHONG J Y, FU M, et al. Study on the characteristics and impact of rural living area pollution in Poyang Lake Basin [J] . Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2014, 23(7) : 1012—1018. 】