

# 南四湖流域非点源污染 TN/TP 时空格局及防治分区演变

张华美<sup>1,2</sup>, 荆延德<sup>1,2</sup>, 孙笑笑<sup>1,2</sup>

(1. 山东省高校南四湖湿地生态与环境重点保护重点实验室, 山东 济宁 273165;

2. 曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276826)

**摘要:** [目的] 探究非点源污染物 TN, TP 时空演变特征, 找出影响流域非点源污染的主要污染物、污染源和影响 TN, TP 变动的最活跃单元, 分析 TN, TP 污染防治分区演变, 为南四湖流域非点源污染治理提供理论依据。[方法] 以 1990—2013 年土地利用为基础数据, 结合 3S 技术, 运用输出系数模型和等标污染负荷法模拟非点源污染时空分布。[结果] 1990—2013 年期间南四湖流域非点源 TN 和 TP 污染排放量整体变化趋势是先上升后下降并趋于平稳, 其中 TN 是主要污染物; TN 的主要污染源是土地利用, TP 的主要污染源是农业生活和畜禽养殖; 1990—2013 年期间, 南四湖流域非点源 TN 和 TP 变动最活跃的单元是降水因子。[结论] 南四湖流域非点源污染具有地区差异等特点。整体而言, 湖西地区比湖东地区污染严重, 但在近 24 a 间, 地区差异有缩小的趋势; 1990—2013 年期间, 湖西地区非点源污染较为严重, 属于重点治理区; 北沙河流域、洮府河流域和梁济运河流域污染程度有加重趋势, 是优先控制和重点治理区。

**关键词:** 南四湖流域; 非点源污染; 输出系数模型; 时空格局; 防治分区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2018)02-0019-08

**中图分类号:** X524

**文献参数:** 张华美, 荆延德, 孙笑笑. 南四湖流域非点源污染 TN/TP 时空格局及防治分区演变[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 19-26. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 02. 004. Zhang Huamei, Jing Yande, Sun Xiaoxiao. Evolution of spatio-temporal pattern and prevention partition of TN and TP of non-point source pollution in Nansi Lake basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 19-26.

## Evolution of Spatio-temporal Pattern and Prevention Partition of TN and TP of Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin

ZHANG Huamei<sup>1,2</sup>, JING Yande<sup>1,2</sup>, SUN Xiaoxiao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Nansi Lake Wetland Ecological and Environmental Protection in Universities of Shandong, Jining, Shandong 273165, China;

2. College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao, Shandong 276826, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of the study was to explore the spatio-temporal changes of TN and TP of non-point source pollution, to find the main pollutants, main pollution sources and the most active units affecting TN and TP changes, and to carry out the prevention partition evolution of TN and TP pollution. All these were expected to provide reference for controlling the non-point source pollution of Nansi Lake basin. [Methods] Based on the land use data from 1990 to 2013, combining with 3S technology, the spatio-temporal distribution of non-point source pollution was simulated using the export coefficient model and standard pollution load method. [Results] Firstly, during 1990—2013, pollution emissions of TN and TP decreased after a first increase and tended to be stable afterwards, and TN was the main pollutant. Secondly, land use was the main pollution sources of TN, and the main sources of TP were agricultural life and livestock and poultry breeding. Thirdly, during 1990—2013, the most active element of non-point source TN

收稿日期: 2017-08-01

修回日期: 2017-09-25

资助项目: 教育部人文社会科学研究面上项目“基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染负荷估算及其对土地利用变化的响应研究”(15YJAZH027)

第一作者: 张华美(1989—), 女(汉族), 河南省项城县人, 硕士研究生, 研究方向为环境保护与修复。E-mail: zhanghuamei12@163.com。

通讯作者: 荆延德(1970—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事环境修复与资源再生方面的研究。E-mail: jingyande@163.com。

and TP in Nansi Lake basin was precipitation. [Conclusion] Non-point source pollution of Nansi Lake basin had many characteristics, such as regional differences. The pollution in the west part of the lake was worse than that in the east part of the lake, but regional difference had a tendency to homogenize in the past 24 years. Finally, the west part of the lake was the key management area, owing to the non-point source pollution being more serious. The Beisha River basin, Guangfu River basin and Liangji Canal basin were the priority control and key management areas because their level of non-point source pollution had a tendency to increase.

**Keywords:** Nansi Lake basin; non-point source pollution; export coefficient model

经水利部统计,2013 年全国废污水排放总量达到  $7.75 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 中国大部分湖泊处于富营养化状态。目前水资源水环境问题成为制约我国经济社会可持续发展的重要因素<sup>[1]</sup>。据调查,中国输入河流湖泊污染物的 1/2 来自于非点源污染。据研究表明,“三河三湖”地区富营养化程度较高<sup>[2]</sup>,其中非点源污染比例高于点源污染。例如,海河流域<sup>[3]</sup>的 TN 和 TP 非点源污染量分别占总污染量的 58.7% 和 60.2%,巢湖流域<sup>[4]</sup>的 TN 和 TP 非点源污染量分别占总污染量的 74.0% 和 68.0%。由于非点源污染的发生具有随机性、分散性和广泛性的特点,增大了非点源污染控制难度,因此对非点源污染负荷的研究最为常见方法是模型模拟法。美国学者在研究土地利用与湖泊富营养之间关系<sup>[5]</sup>时,首次提出输出系数模型。Johnes<sup>[6]</sup>不断的对模型改进,并将模型进一步扩展到农村生活、牲畜和大气沉降污染物负荷量。该模型所需参数少且较易获取,能很好地结合 GIS,RS 技术,非常适用于监测资料少的大尺度流域非点源污染的研究<sup>[7]</sup>。南四湖是鲁南苏北最重要的水源地,随着南四湖流域工农业的快速发展,污染物入湖量不断增加,非点源污染成为导致南四湖流域水质恶化和水体富营养化的主要原因<sup>[8]</sup>。以不同入湖河流为主划分子流域进行分区管理,能有效控制南四湖流域非点源污染。目前,运用输出系数模型并结合 RS 和 GIS 技术,对南四湖流域进行氮磷非点源污染时空格局及防治分区演变特征的研究很少。因此,本研究将江苏省徐州市的丰县和沛县划入南四湖流域研究区域,运用输出系数模型综合考虑流域内土地利用方式及类型、畜禽养殖、农业生活和降水等方面因素,进行流域非点源污染时空变化特征分析,以期以南四湖流域非点源污染控制和社会经济的可持续发展提供理论依据和支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

南四湖是山东省济宁市以南的微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖 4 个湖的总称,是淮河流域的第二大

淡水湖。湖区总面积为  $1\,266 \text{ km}^2$ ,呈西北东南方向展布,南北长约 125 km,东西宽 5.6~30 km,储水量为  $1.93 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,容量可达到  $6.37 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。南四湖流域,属于淮河流域的沂沭泗水系,跨鲁、苏、豫、皖 4 省 32 个县(市、区),承接 53 条河流来水,总流域面积为  $3.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[9]</sup>,其中,梁济运河将其划分为湖东地区和湖西地区。根据实际情况和研究需要,本研究中的区域包括山东省南四湖流域 28 各县(市、区)和江苏省徐州市 2 个县(市、区)(丰县和沛县)。南四湖地处暖温带、半湿润季风气候区,年平均气温为  $14.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,多年平均降水量为 700 mm。南四湖流域多年平均水资源总量为  $1.68 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,生物资源、矿产资源(煤炭、稀土、铁矿)、农业资源丰富。工农业的发展使南四湖流域水质富营养化,非点源污染较严重。据 2011 年济宁市南四湖水资源监测可知,南四湖入湖河道中氨氮、5 d 生化需氧量、化学需氧量超标率分别达到 33.3%,13.3%,13.3%。南四湖湖区富营养指数在 42~50 之间,属于中营养化状态。

### 1.2 数据来源及处理

本研究中需要的数据主要包括地理空间数据和属性数据两种类型,地理空间数据包括土地利用数据、水系图和行政区划图,属性数据指的是各县(市、区)的农业人口数量、畜禽(牛、猪、羊、鸡)养殖情况、化肥折纯量和平均降水量数据。本文中的数据来源和说明详见表 1。在本研究中,主要采用的数据处理工具为 Excel 2003 数据处理软件、SPSS 19.0 数据处理软件和 ArcGIS 10.1 空间分析软件。运用 Excel 2003 软件进行基础数据的计算;运用 SPSS 软件进行聚类分析;运用 ArcGIS 10.1 软件进行空间数据处理和绘制图像。

### 1.3 研究方法

1.3.1 输出系数模型 输出系数模型是建立不同污染源与污染负荷量之间关系,求得研究区污染物负荷总量,不考虑污染物在环境中复杂过程。

Johnes 等<sup>[6]</sup>改进后的输出系数模型公式为:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i + P \quad (1)$$

式中: $L$ ——营养物的输出量; $E_i$ ——第  $i$  种营养源

的输出系数(即单位面积年负荷量);  $A_i$ ——第  $i$  类土地利用类型的面积或第  $i$  种牲畜的数量、人口数量;  $P$ ——降雨输入的营养物数量,计算公式为:

$$P = c \cdot a \cdot Q \quad (2)$$

式中: $c$ ——雨水中营养物的浓度(mg/L);  $a$ ——年降水量(mm);  $Q$ ——径流系数。

表 1 数据来源及说明

数据名称	说明	来源
土地利用数据	数据分辨率为 30 m×30 m,数据格式为 TIFF,反映了研究区土地利用状况	地理国情监测云平台
水系图	数据格式为 .shp file,由分辨率为 90 m×90 m 的 DEM 图处理获得	地理空间数据云
行政区划图	数据格式为 .shp file,反映了研究区 30 个县(市、区)的空间分布和边界	国家地理信息系统
基础数据	包括各县(市、区)的农业人口数量、畜禽(牛、猪、羊、鸡)养殖情况、化肥折纯量	枣庄市、菏泽市、泰安市、济宁市和徐州市统计年鉴及其他相关统计资料与报表
降水量数据	将南四湖流域范围内的各县市区降水量添加到矢量图中,最后转化为栅格图层,以便与其他图层叠加运算。	主要来自统计年鉴

1.3.2 输出系数的确定 从南四湖流域的实际情况和已有数据出发,将南四湖流域非点源污染源分为 4 类:土地利用污染物、畜禽排泄物、农村生活污染物和降水营养盐。输出系数确定较为复杂<sup>[10]</sup>,本研究中,运用文献参考法和数学统计分析法确定 4 类污染物的输出系数(表 2)。

(1) 由于南四湖流域和云蒙湖流域的地理位置都位于山东省境内,因此以两流域的气候条件、水文条件、土地利用情况及种植条件等相同为前提,参考孟晓云等<sup>[11]</sup>的试验估算成果从而确定耕地、林地、草地和城镇用地的 TN 和 TP 输出系数值。全国对水域与未利用土地的 TN,TP 输出系数研究检测较少,且各研究区域的系数值大致相同,因此,水域与未利用土地的 TN,TP 输出系数参考国家平均值<sup>[12]</sup>。

(2) 由于确定畜禽排泄物的输出系数较为复杂,因此,国内外没有确定的标准。本文将畜禽分为 4 种类型:大牲畜(牛)、猪、羊和家禽(鸡),计算时,以已有的研究和高祥照等<sup>[13]</sup>人的研究作为标准,饲养期采用全国估算值(猪按 300 d 计算,牛和羊的饲养期较长,按 365 d 计算,家禽的饲养期为 55 d),流失率采用全国平均水平(粪便的流失系数大约为 2%~8%,尿液的流失系数达到 50%)。

(3) 本研究中,农业生活污染物包括人类粪尿和生活污水。人类粪尿产生的污染物输出系数以《肥料实用手册》<sup>[13]</sup>中数据作为标准,粪尿的流失量按经验值 21.9%计算<sup>[14]</sup>;生活污水产生的污染物输出系数计算时,用水量采用经验数据(全国农村人均综合用水量为 50~80 L/d,山东省农村人均生活用水量大约

在 71 L/d,江苏省农村人均生活用水量大约在 86 L/d),流失率参考叶飞等<sup>[15]</sup>的研究(生活污水的流失率为 85%)。

(4) 降水为水体带来的营养盐的浓度参考李恒鹏<sup>[16]</sup>与崔巍等<sup>[17]</sup>的降水监测估算结果(TN 浓度为 1.270 mg/L,TP 浓度为 0.025 mg/L),南四湖流域的多年平均径流系数采用沂沭泗水系相关研究结果(取值为 0.14)。

表 2 南四湖流域不同污染源 TN/TP 输出系数

污染源类型	污染源名称	输出系数	
		TN	TP
土地利用/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	耕地	25.950	0.700
	林地	11.500	0.160
	草地	16.560	0.210
	水域	15.000	0.360
	城镇用地	11.000	0.240
畜禽养殖/(kg·a <sup>-1</sup> )	未利用土地	14.900	0.200
	牛	11.094	0.415
	猪	0.908	0.120
	羊	0.484	0.104
农业生活/(kg·a <sup>-1</sup> )	鸡	0.006	0.002
	农业生活	1.456	0.244
降水营养盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	降水	0.178	0.004

据研究<sup>[18]</sup>表明,地表径流引起的氮素损失约占施肥量的 15%,可利用南四湖流域氮肥施用折纯量对耕地的输出系数进行修正,由于草地和林地不需要施肥,因此不需要改进输出系数。对耕地输出系数的修正结果详见表 3。

表 3 南四湖流域耕地输出系数修正

年份	1990	1995	2000	2005	2010	2013
化肥使用状况(氮折纯量)/(kg·hm <sup>-2</sup> )	114.000	127.330	138.070	145.070	141.130	140.800
耕地输出系数/(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	43.050	45.050	46.660	47.710	47.120	47.070

1.3.3 等标污染负荷法 为使各种污染物之间具有可比性,采用等标污染负荷法计算各污染物的等标排放量。计算公式为:

$$D_i = \frac{E_i}{C_o} \quad (3)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n D_i \quad (4)$$

$$D_m = \sum_{j=1}^m D_j \quad (5)$$

$$D_{i\text{总}} = \sum_{j=1}^m D_{ij} \quad (6)$$

$$K_i = \frac{D_i}{D_{i\text{总}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$K_{i\text{总}} = \frac{D_{i\text{总}}}{D_m} \times 100\% \quad (8)$$

$$K_j = \frac{D_j}{D_m} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $E_i$ ——污染物  $i$  的排放量(t/a);  $C_o$ ——《国家地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类标准系列中该污染物的标准浓度值,即  $\rho$ (TN)为 1 mg/L,  $\rho$ (TP)为 0.2 mg/L;  $n$ ——污染物的个数;  $m$ ——污染源源的个数;  $D_{ij}$ ——第  $j$  个污染源中污染物  $i$  的等标排放量( $\text{m}^3$ );  $D_i$ ——污染物  $i$  的等标排放量( $\text{m}^3$ );  $D_j$ ——污染源  $j$  的等标排放量( $\text{m}^3$ );  $D_m$ ——某区域的等标排放量( $\text{m}^3$ );  $D_{i\text{总}}$ ——区域中污染物的等标排放总量( $\text{m}^3$ );  $K_i$ ——污染物  $i$  在某污染源中的等标污染负荷比(%);  $K_{i\text{总}}$ ——污染物  $i$  在某区域中的等标污染负荷比(%);  $K_j$ ——污染源  $j$  在某区域中的等标污染负荷比(%)。

1.3.4 排放强度 非点源污染排放强度指的是单位面积非点源污染物的排放量,计算公式为:

$$EI = E/AL \quad (10)$$

式中: $EI$ ——非点源污染物的排放强度;  $E$ ——非点源污染物的实际排放量;  $AL$ ——区域的国土面积。

1.3.5 分解分析法 本文利用分解分析法找出驱动总污染变动的最主要的核算单元,并分析该单元的污染变动的原因,对应的产污单元可称之为“驱动污染总量变动的最活跃单元”<sup>[19]</sup>。设非点源污染可分解为  $n$  个污染单元(污染途径),第  $t$  年整个地区非点源污染总量  $E_t$  可写成  $n$  个分单元非点源污染量  $E_{it}$  之和,即

$$E_t = \sum_{i=1}^n E_{it} \quad (11)$$

对该式进行差分变换,且左右两边同除以  $E_{(t-1)}$ ,得到非点源污染变化率方程为:

$$\frac{E_t - E_{t-1}}{E_{t-1}} = \sum_{i=1}^n \frac{E_{it} - E_{i(t-1)}}{E_{i(t-1)}} \times \frac{E_{i(t-1)}}{E_{(t-1)}} \quad (12)$$

公式(5)又可变换为:

$$TC_t = \sum_{i=1}^n UC_{it} \times W_{i(t-1)} \quad (13)$$

式中: $TC_t$ ,  $UC_{it}$ ——分别表示一个地区总非点源污染

变化率和第  $i$  个单元产生的非点源污染变化率;  $W_{i(t-1)}$ ——权重。

非点源污染变化率方程的含义是:一个地区的整个非点源污染量变化率等于各个污染来源的非点源污染量变化率的加权平均,权重为各污染源单位第( $t-1$ )年非点源污染量与该地区( $t-1$ )年所有非点源污染总量之比,即

$$100\% = \sum_{i=1}^n \frac{UC_{it} \times W_{i(t-1)}}{TC_t} \quad (14)$$

1.3.6 聚类分析法 聚类分析是将物理或抽象对象的集合分成相似对象类的过程。本研究分析的数据为南四湖流域各子流域的等标污染负荷平均强度值,采用的聚类类型为系统聚类,聚类方法为 Ward 法,度量标准为平方 Euclidean 距离,标准化方法为 Z 得分。

## 2 结果与分析

### 2.1 南四湖流域非点源污染时间特征分析

据《山东省水资源公报》显示,2013 年南四湖上级湖和下级湖全年期水质评价均为Ⅲ类,下级湖的营养状态评价为中营养,上级湖为轻度富营养,其中,TN 和 TP 是主要入湖污染物。对污染源情况调查分析,结果表明该两种污染物的非点源污染排放量占总污染量的比例分别为 62.70%和 59.20%。通过对流域非点源污染排放量变化趋势(图 1)分析,可知 1990—2013 年期间南四湖流域非点源 TN 和 TP 污染排放量整体变化趋势是先上升再下降后趋于平稳。在 1990—1995 年期间,TN 排放量从  $1.89 \times 10^5$  t/a 增大到  $2.02 \times 10^5$  t/a,TP 排放量由  $1.11 \times 10^4$  t/a 增大到  $1.17 \times 10^4$  t/a;在 1995—2000 年期间,TN 排放量降低到  $1.75 \times 10^5$  t/a,TP 排放量降低到 9 394.140 t/a;在 2000—2013 年期间,TN 和 TP 多年的排放量变化率不大。由图 1 可知,南四湖流域非点源污染中 TN 相对于 TP 是主要污染物,每年贡献率均达到 94%以上。

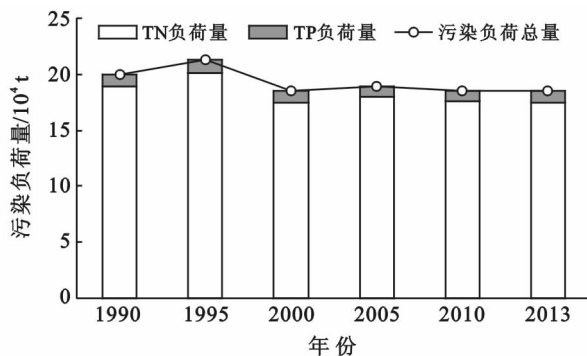


图 1 南四湖流域非点源污染排放量

从南四湖流域非点源污染物输出结构(图 2)看,非点源污染物 TN 的主要来源是土地利用,多年平均

排放量为  $1.14 \times 10^5$  t/a, 平均贡献率达到 62.48%, 畜禽养殖和农业生活在污染总量中的贡献率较低, 多年平均排放量分别为  $3.92 \times 10^4$  t/a,  $2.57 \times 10^4$  t/a, 贡献率分别达到 21.20% 和 14.06%, 降水的贡献率最低, 仅 2.26%。非点源污染物 TP 的主要来源是农业生活和畜禽养殖, 多年平均排放量为 4 300.00,

4 189.43 t/a, 贡献率达到 41.74% 和 40.30%, 其次是土地利用, 多年平均排放量为 1 765.07 t/a, 占多年平均排放总量的 17.17%, 降水贡献率最低, 仅 0.79%。将图 1 和图 2 相结合, 得到 1995 年南四湖流域非点源 TN 和 TP 变大的原因是 1995 年流域的畜禽养殖数量有所增加。

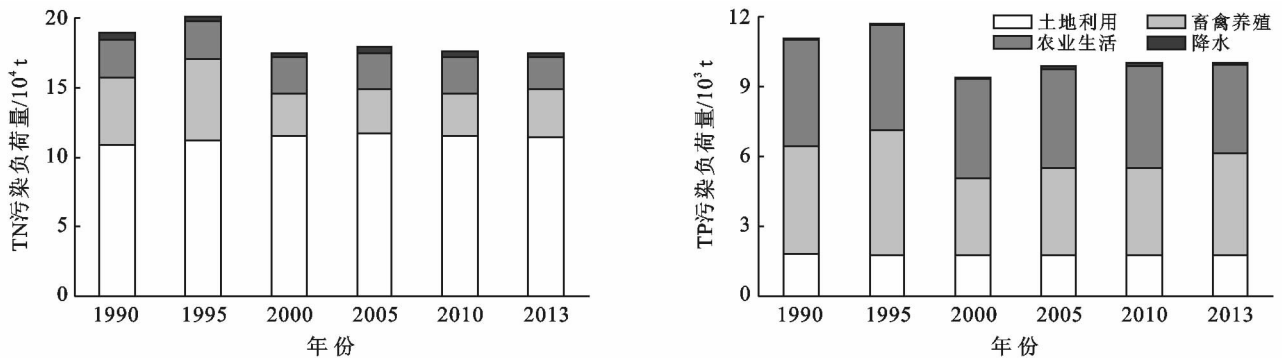


图 2 南四湖流域非点源污染物输出结构

本研究运用分解分析法对南四湖流域非点源污染变化进行分析, 以期找出不同核算单元中驱动污染总量变动的最活跃单元, 结果详见表 4。①TN 变动的最活跃单元分析。近 24 a 间, 南四湖流域 TN 的变化率为 -7.59%, 说明 TN 污染物减少了 7.59%, 其中在 1990—1995 年, 2000—2005 年和 2010—2013 年 3 个阶段中, 1990—1995 年阶段的 TN 具有增长趋势, 1995—2000 年和 2005—2010 年 2 个阶段的 TN 具有减少趋势。在 1990—1995 年, 2000—2005 年和 2005—2010 年 3 个阶段中, 降水营养物中的 TN 的排放变化率相对最高, 分别达到 -21.02%, 23.56% 和 -17.64%, 其次畜禽养殖排放的 TN 变化率较高, 分别为 19.96%, 5.94% 和 -5.18%, 土地利用和农业生活排放的 TN 变化率较低, 说明在这 3 个阶段中, TN 变动的最活跃单元为降水。1995—2000 年期间, 畜禽养殖排放的 TN 变化率相对最高, 达到 -47.95%, 其次为农业生活 (-5.71%), 土地利用和降水排放的 TN 变化率较低, 说明在此阶段, TN 变动的最活跃单元为畜禽养殖。2010—2013 年期间, 畜禽养殖排放的 TN 变化率最高, 达到 13.79%, 其次为降水 (-12.87%) 和农业生活 (-12.68%), 土地利用最低, 说明该阶段中 TN 变动的最活跃单元为畜禽养殖。整体而言, 降水营养物中 TN 的排放变化率达到 -30.120%, 其次是畜禽养殖, TN 变化率为 -28.63%, 再次是农业生活, TN 变化率为 -15.86%, 土地利用排放的 TN 变化率最低, 说明降水是 TN 变动的最活跃单元。②TP 变动的最活跃单元分析。1990—2013 年期间, TP 整体成减少

趋势, 变化率为 -9.70%, 其中在 1990—1995 年, 2000—2005 年, 2005—2010 年和 2010—2013 年 4 个阶段中, TP 具有增长趋势, 在 1995—2000 年期间, TP 具有减少趋势。1990—1995 年和 2000—2005 年 2 个阶段中, 降水营养物中的 TP 的排放变化率相对最高, 分别达到 -21.020% 和 23.560%, 其次畜禽养殖排放的 TP 变化率较高, 分别为 15.030% 和 12.560%, 土地利用和农业生活排放的 TN 变化率较低, 说明在这 2 个阶段中, TP 变动的最活跃单元为降水。在 1995—2000 年期间, 畜禽养殖排放的 TP 污染物的变化率较高, 达到 -38.35%, 其次是农业生活, 变化率达到 -5.710%, 土地利用和降水排放的 TP 变化率较低, 仅 -0.27% 和 -0.21%, 说明该阶段 TP 变动的最活跃单元是畜禽养殖。在 2005—2010 年期间, 降水为 TP 变动的最活跃单元, 变化率达到 -17.64%, 其次是农业生活和畜禽养殖, TP 变化率分别为 2.09% 和 1.43%, 土地利用排放的 TP 变化率最低。在 2010—2013 年期间, 畜禽养殖是 TP 变动的最活跃单元, 变化率达到 16.00%, 其次是降水和农业生活, TP 变化率分别为 -12.87% 和 -12.68%, 土地利用排放的 TP 变化率最低。整体而言, 降水营养物中的 TP 排放量变化率最高, 达到 -30.12%, 其次为农业生活, TP 变化率为 -15.86%, 畜禽养殖和土地利用排放的 TP 变化率较低, 分别为 -6.070% 和 -2.35%, 说明降水是 TP 变动的最活跃单元。

## 2.2 南四湖流域非点源氮磷污染空间分布演变特征

为了解近 24 a 南四湖流域非点源污染空间分布

变化特征,运用 ArcGIS 10.1 软件的 Plus 工具对这 6 a 的 TN,TP 等标污染负荷强度分布图进行叠加,得

到南四湖流域非点源 TN,TP 总等标污染负荷强度图(图 3)。

表 4 各污染源的 TN 和 TP 排放变化对流域整体 TN 和 TP 排放变化的影响

年份	污染物	土地利用	畜禽养殖	农业生活	降水	总计
1990—1995	TN	3.550	19.960	-0.840	-21.020	6.510
	TP	-0.590	15.030	-0.840	-21.020	5.690
1995—2000	TN	2.890	-47.950	-5.710	-0.210	-13.050
	TP	-0.270	-38.350	-5.710	-0.210	-19.760
2000—2005	TN	1.180	5.940	0.950	23.560	2.460
	TP	-0.680	12.560	0.950	23.560	4.900
2005—2010	TN	-1.800	-5.180	2.090	-17.640	-2.270
	TP	-0.200	1.430	2.090	-17.640	1.250
2010—2013	TN	-0.870	13.790	-12.680	-12.870	0.340
	TP	-0.640	16.000	-12.680	-12.870	0.370
总计	TN	4.930	-28.630	-15.860	-30.120	-7.590
	TP	-2.350	-6.070	-15.860	-30.120	-9.700

注:各污染源污染物的排放变化率以假设南四湖流域非点源污染排放总量变化为 100%为前提,其中负号表示总量减少。农业生活和降水中的氮和磷在单位体积内含有量是一定的,每年农业生活和降水量不同,使的 TN,TP 负荷量不同,但每个时间段变化率一致。

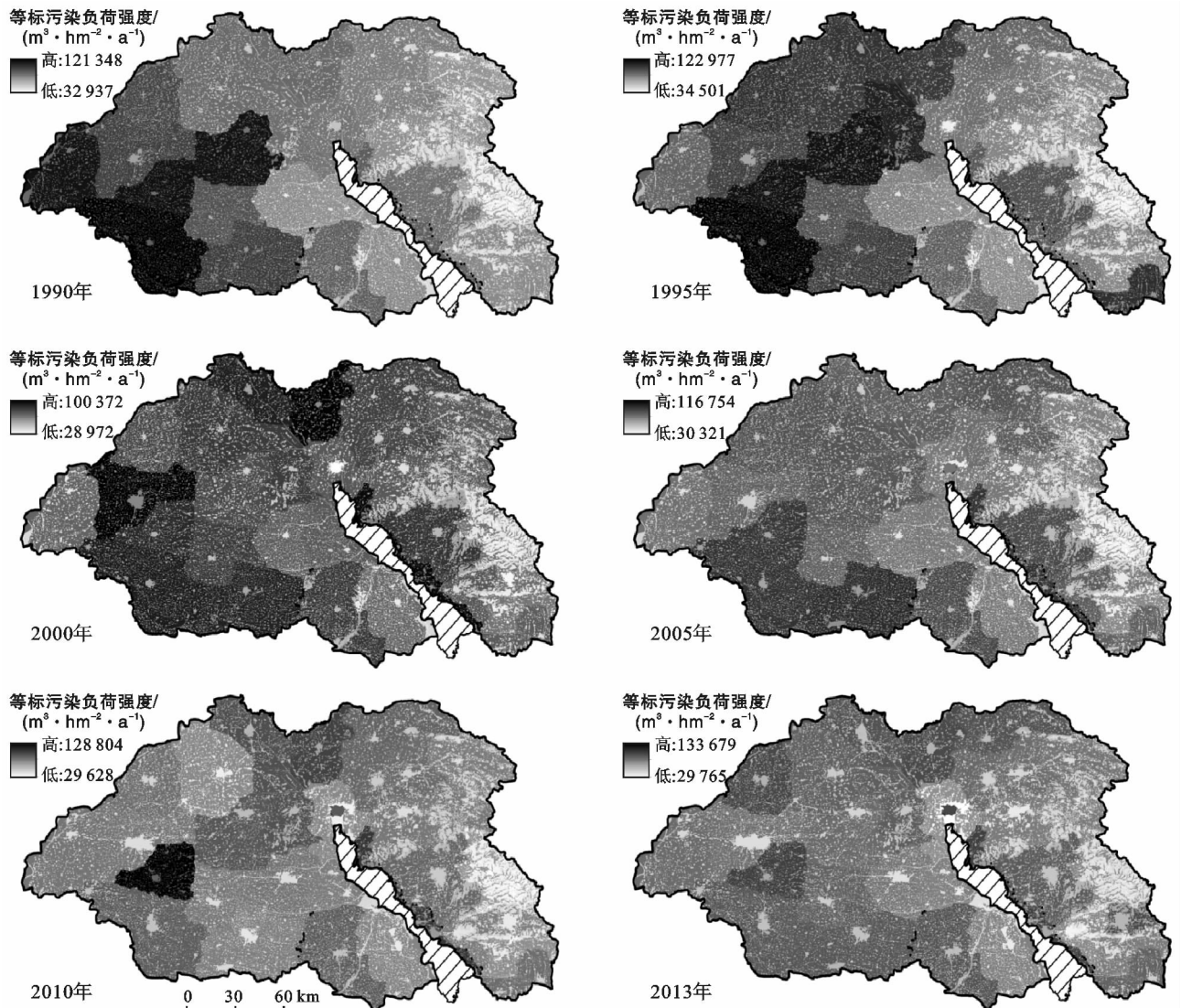


图 3 南四湖流域非点源 TN,TP 总等标污染负荷强度

由图 3 可知,南四湖流域非点源 TN,TP 总等标污染负荷强度地区分布不均衡,地区差异明显,经过近 24 a 的变化,非点源污染程度地区差异呈缩小趋势。整体而言,湖西地区污染程度比湖东地区严重,湖西地区的菏泽市污染相对较为严重,湖东地区中的微山县和枣庄市西南部污染相对严重。出现该现象的主要原因南四湖流域的湖西地区的经济发展水平低于湖东地区;湖东和湖西地区生产总值在 2000 年分别为 629.69 和 482.5 亿元,2005 年分别为 1 454.58 和 1 137.64 亿元,2010 年分别为 3 086.87 和 2 694.24 亿元,2013 年分别为 4 296.52 和 4 238.25 亿元。湖西地区农村和农业面积较大;整个流域农业用地面积均逐年减少,直到 2013 年湖西地区耕地面积占整个湖西地区 76%,而湖东地区耕地占地 65%,且每年湖西耕地面积比重均高于湖东。湖西地区使用的化肥和农药量比湖东地区大,随年份增加化肥使用量增多,自 2000 年以来,每年湖西地区化肥使用折纯量比湖东地区高  $5.00 \times 10^5$  t 以上,2013 年分别达到  $9.61 \times 10^5$  t 和  $4.17 \times 10^5$  t,湖西地区每年农药使用量比湖东地区多  $1.00 \times 10^4$  t,且大部分随雨水径流流入南四湖流域。

### 2.3 南四湖流域非点源氮磷污染防治分区演变分析

依据南四湖流域实际地形特征、土地利用精度和 DEM 数据精度,利用 ArcGIS 水文分析功能,对研究区 DEM 数据进行洼地填充、流向计算、汇流累积量计算及河网提取等处理,根据主要入湖河流的流域面积大小划分出 14 个子流域(图 4)。

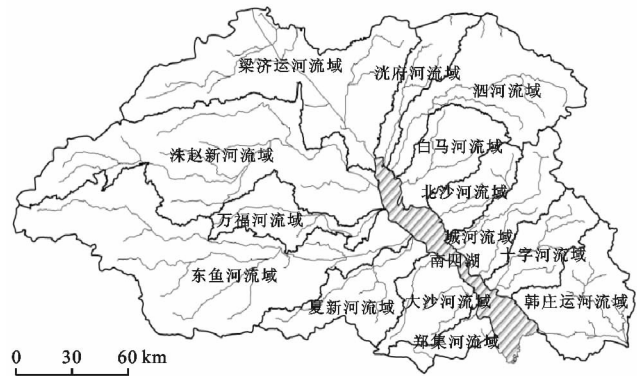


图 4 南四湖流域子流域分布

由表 5 可知,1990—2013 年期间,湖东地区的子流域非点源污染程度普遍偏低,且变化程度较小。其中十字河流域、韩庄运河流域污染属于轻度污染负荷区,泗河流域、白马河流域和城河流域属于中度污染负荷区。但湖东的北沙河流域的污染程度有加重趋势,由 II 区变为 III 区。湖西地区中,除大沙河流域和郑集河流域外,其他子流域污染程度较高。大沙河流域与郑集河流域在 24 a 间污染程度皆有一定的变化,大沙河流域污染变化幅度较小,而郑集河流域污染变化幅度较大,由 III 区变为 I 区又恢复到 III 区污染水平。沈府河流域、梁济运河流域和复新河流域,在近 24 a 间污染程度加重,属于重度污染负荷区。万福河流域污染变化幅度较大,由 IV 区变为 III 区,再升为 V 区,后降为 IV 区污染水平,属于重度污染负荷区。洙赵新河流域和东鱼河流域污染变化幅度较小,但属于重度污染负荷区。

表 5 流域非点源污染控制分区结果

流域	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2013 年
十字河流域	I	I	I	I	I	I
韩庄运河流域	II	II	I	I	II	II
大沙河流域	II	I	I	II	II	II
泗河流域	II	II	II	II	III	II
白马河流域	II	II	II	II	III	II
城河流域	II	III	II	III	II	II
北沙河流域	II	II	II	III	III	III
郑集河流域	III	I	II	III	III	III
沈府河流域	III	III	III	V	IV	IV
万福河流域	IV	IV	III	V	IV	IV
洙赵新河流域	V	IV	IV	V	V	IV
梁济运河流域	III	III	V	V	V	V
复新河流域	IV	IV	IV	IV	IV	V
东鱼河流域	V	V	V	IV	V	V

综上所述,南四湖流域湖西地区非点源污染较为严重,是重点治理区;北沙河流域、沈府河流域和梁济

运河流域污染程度有加重趋势,是优先控制和重点治理区。

### 3 结论

(1) 南四湖流域非点源 TN 和 TP 污染排放量在 1990—2013 年不断变化,先上升后下降,最后趋于平稳。TN 是南四湖流域非点源污染的主要污染物,每年贡献率均达到 94% 以上。TN 主要来源是耕地,多年平均贡献率达到 62.480%;TP 的主要来源是农业生活和畜禽养殖,多年贡献率达到 41.740% 和 40.300%;降水是影响 TN 和 TP 变动的最活跃的单位。

(2) 南四湖流域非点源污染程度空间分布不均匀,在近 24 a 间,地区差异有缩小的趋势。湖东地区的各子流域非点源污染程度普遍偏低,且变化程度较小;湖西地区中,除大沙河流域和郑集河流域外,其他子流域污染程度较高。南四湖流域湖西地区非点源污染严重,是重点治理区,北沙河流域、洸府河流域和梁济运河流域污染程度有加重趋势,是优先控制区。

由于研究区范围大,实地检测工作量较大未进行开展,估算结果缺乏数据对照。同时在污染物和污染源中的选取中,也未考虑农药、农膜等污染源和  $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  等污染物。因此,为了使研究结果更贴近真实状况,在下一步的研究工作中,将综合考虑流域非点源污染的影响因素,结合实际监测数据,更加真实、精确地反映流域非点源污染负荷及其分布特征。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Shao Weiwei, Yang Dawen, Hu Heping, et al. Water resources allocation considering the water use flexible limit to water shortage: A case study in the Yellow River Basin of China [J]. *Water Resources Management*, 2009,23(5):869-880.
- [2] Tang Wenzhong, Cui Jingguo, Shan Baoqing, et al. Heavy metal accumulation by periphyton is related to eutrophication in the Hai River Basin, Northern China [J]. *Plos One*, 2014,9(1):e86458.
- [3] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究 [D]. 北京:中国农业科学院,2011.
- [4] 屠清瑛,顾丁锡,尹登清,等. 巢湖—富营养化研究 [M]. 安徽 合肥:中国科技大学出版社,1990.
- [5] Reckhow K H, Simpson J T. A procedure using modeling and error analysis for the prediction of La. [J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2011, 37(9):1439-1448.
- [6] Johnes P J. 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]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183 (3/4):323-349.
- [7] 邱凉,罗小勇,程红光. 长江流点源污染域大尺度空间非负荷研究 [J]. *人民长江*, 2011,42(18):81-84.
- [8] Wang Weiliang, Liu Xiaohui, Wang Yufan, et al. Analysis of point source pollution and water environmental quality variation trends in the Nansi Lake basin from 2002 to 2012 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016,23(5):4886-4897.
- [9] Wu Lei, Liu Xia, Ma Xiaoyi. Spatio-temporal variation of erosion-type non-point source pollution in a small watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016,23(11):1-11.
- [10] Lu Jun, Gong Dongqin, Shen Yena, et al. An inversed Bayesian modeling approach for estimating nitrogen export coefficients and uncertainty assessment in an agricultural watershed in eastern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2013,116(2):79-88.
- [11] 孟晓云,于兴修,泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 [J]. *环境科学*, 2012,33(6):1789-1794.
- [12] 赵倩,马建,问青春,等. 浑河上游大苏河乡农业非点源污染负荷及现状评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(2):126-131.
- [13] 高祥照,申眺,郑义,等. 肥料实用手册 [M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- [14] 杨淑静,张爱平,杨正礼,等. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探 [J]. *中国农业科学*, 2009,42(11):3947-3955.
- [15] 叶飞,卞新民,胡大伟,等. 江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策 [J]. *水资源保护*, 2006,22(6):86-88.
- [16] 李恒鹏,刘晓玫,杨桂山. 太湖地区西苕溪流域营养盐污染负荷结构分析 [J]. *湖泊科学*, 2004,16(S):90-97.
- [17] 崔巍,白音包力皋,陈文学,等. 中小河流非点源污染治理负荷估算及分区分类研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2013,11(1):14-19,26.
- [18] 李怀恩,王莉,史淑娟. 南水北调中线陕西水源区非点源总氮负荷估算 [J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2010,40(3):540-544.
- [19] 姜峰. 江苏省农业面源污染时空特征及削减方案研究 [D]. 江苏 南京:南京农业大学,2012:47-48.