

基于改进输出系数模型的潍坊地区 非点源氮磷污染特征分析

张雪¹, 韩策², 王昊³, 刘玉玉¹

(1. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022;

2. 国家管网集团东部原油储运有限公司项目管理中心, 江苏 徐州 221008;

3. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013)

摘要: 为更好地提高潍坊地区水环境质量, 探究潍坊市非点源污染状况非常必要。借助 ENVI、ArcGIS 软件、结合网络资料及实地调研, 采用改进输出系数模型对潍坊地区 2004—2020 年总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP) 非点源污染负荷进行估算并分析其时空变化特征和污染来源; 通过单位面积负荷系数法评价氮磷污染程度。结果表明: 潍坊市非点源氮磷污染负荷在时间上呈现先下降后上升的趋势, 且 TN 的总污染负荷是 TP 的 7.15~7.37 倍; 在空间上整体分布不均, 表现为“中间低四周高”; 居民生活和土地利用是主要污染源, 其中耕地是最主要的污染来源。潍坊市氮磷污染整体上对环境影响较大。

关键词: 非点源污染; 污染负荷; 改进输出系数模型; 总氮; 总磷; 潍坊地区

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2024)04—0200—08

Characterization of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution in Weifang Based on Improved Output Coefficient Modeling

ZHANG Xue¹, HAN Ce², WANG Hao³, LIU Yuyu¹

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China;

2. Pipe China Eastern Crude Oil Storage & Transportation Company Limited, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: In order to better improve the quality of water environment, it is necessary to explore the nonpoint source pollution situation in Weifang. With the help of ENVI and ArcGIS software, combined with network data and field research, the improved output coefficient model was utilized to estimate the nonpoint source pollution load of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in Weifang from 2004 to 2020 to analyze its spatial and temporal change characteristics and pollution sources and evaluate the degree of nitrogen and phosphorus pollution by the method of load coefficient per unit area. The results are as follows. The non-point source pollution load of nitrogen and phosphorus in Weifang City shows a decreasing and then increasing trend, and the total pollution load of TN is 7.15~7.37 times of that of TP. The overall distribution is uneven, showing "low in the middle and high in the surroundings". Residential life and land use are the main sources of pollution, of which, arable land is the most significant source of pollution. Nitrogen and phosphorus pollution in Weifang City has a greater impact on the environment.

Keywords: non-point source pollution; pollution loads; improved output coefficient model; total nitrogen; total phosphorus; Weifang City

目前,非点源污染已成为全球地表水、地下水的
一个主要污染源^[1]。随着点源污染的治理,非点源
污染日益成为水生生态系统和人类关注的重要环境
问题,成为水质控制和水环境管理的关键^[2-4]。非
点源污染是指污染物由于没有经过适当的处理,在
降雨、地表径流等作用下,随径流进入水、土壤或大
气中而形成的污染^[5-6]。非点源污染尤其是氮磷污
染的识别和控制是基础科学问题^[7],氮、磷是作物
生长的营养因子^[8],水生环境中大量的氮和磷会引
起各种各样的问题。

非点源污染由于其排放的随机性、分散性、不确
定性和时空变异性给其测量和模拟带来困难^[9-10]。
在流域尺度上,模型是将非点源氮磷污染负荷研究
从多点检测扩展到全流域的必要手段^[11]。其中,输
出系数模型可以较好地模拟非点源污染物的输出情
况,并能保证一定的精确度,在非点源污染的研究中
表现出一定的优越性,因此被广泛用于非点源污染
的研究。Li 等^[12]估算了水库汇水区的农业非点源
污染负荷,并与实际水质监测数据计算的输出负荷
进行对比,表明模型模拟具有较高精度,具有可靠
性。郝桂珍等^[13]定量研究了清水河上游农业氮磷
污染负荷,并分析其时空变化特征及污染来源。王
有霄等^[14]定量评估胶州湾海岸带氮、磷污染负荷及
时空变化规律,并将结果与实测氮磷入海通量对比
得到胶州湾海岸带的氮磷入海系数。

后来更有众多学者对输出系数模型进行改进,
高田田等^[15]利用改进输出系数法对巢湖北岸炯炆
河流域的面源污染氮、磷输出值进行估算。Wang
等^[16]建立了污染物生产系数和污染物拦截系数,将
这两个因子作为加权因子去修正不同土地利用类型
的输出系数。

以上学者的研究成果推动了输出系数模型在非
点源污染负荷估算中的应用,提高了输出系数模型
在非点源污染负荷估算应用的精度,为后续学者在
研究缺乏资料地区的非点源污染负荷时提供了参考
依据。目前,山东关于非点源污染的研究主要集中
在胶东半岛、胶州湾、渤海和南四湖流域等地,对于
地区非点源污染的研究较少。潍坊地区农业发达,
是山东乃至全国重要的蔬菜生产基地,在农业发展
迅速、作物蔬菜产量提高的同时,产生了化肥施用量
大而利用率低的问题,导致潍坊地区水环境受到影
响,现结合潍坊地区现状,利用考虑降雨侵蚀力因子

的改进输出系数模型对潍坊市氮、磷污染来源负荷
进行估算及分析其时空变化特征,从而为潍坊地区
非点源污染的控制和水环境保护提供参考。

1 研究区域概况

潍坊市位于山东半岛西部(118°10′—120°01′
E,35°41′—37°26′N),现辖 4 个区 8 个县 4 个功能
区,总面积为 1.62 万 km²^[17]。潍坊东与青岛、烟台
连接,西邻淄博、东营,南连临沂、日照,北濒渤海莱
州湾,属暖温带季风型半湿润大陆性气候,地貌自北
向南由低到高。

2023 年末,潍坊市常住人口 936.95 万人。潍
坊是世界风筝之都,是世界风筝文化交流的中心,并
且是山东乃至全国重要的蔬菜生产基地。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所使用的数据包括土地利用数据、社会经
济数据、气象数据以及污染普查资料等。2004—
2020 年土地利用数据来源于地理空间数据云(ht-
pp://www.gscloud.cn)的 landsat 遥感影像,利用
ENVI 5.3 和 Arc GIS 10.7 处理后得到 2004—2020
年土地利用数据;2004—2020 年各年份人口、作物
类型和畜禽养殖等社会经济数据来自潍坊市统计年
鉴;2004—2020 年降雨量数据来自山东省水文中
心,利用泰森多边形法和克里金插值法获得各年的
月降雨分布,并计算年降雨量和年均降雨侵蚀力。

2.2 改进输出系数模型

Johnes 的经典输出系数模型^[18]如下:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i I_i \tag{1}$$

式中: L 为总污染负荷; n 为土地利用、畜禽或人口等
不同污染源的数量; E_i 为第 i 种土地利用、畜禽或人
口的输出系数; A_i 为第 i 种土地利用的面积或畜禽、
人口的数量; I_i 为第 i 种污染物的污染负荷。

经典输出系数模型表征的是多年平均产污量,
无法反映污染物年际间的变化。降雨侵蚀力能够较
好地表征降雨量、降雨强度的作用,更能反映出降雨
特性对产污的作用及产污量的年际变化^[19]。因此
结合降雨侵蚀力影响系数 φ_i ^[19-20],对原模型改进,
即:

$$L_i = \varphi_i \sum_{k=1}^n E_k A_k I_k \tag{2}$$

$$\varphi_i = R_i / \bar{R} \tag{3}$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_{i,j} \tag{4}$$
$$r_{i,j} = \frac{125.92 \times F_{i,j}^{0.603} - 111.173 \times F_{i,j}^{0.691} + 68.73 \times F_{i,j}^{0.841}}{3} \tag{5}$$
$$F_{i,j} = P_{i,j}^2 / P_i \tag{6}$$

式中： φ_i 为第 i 年的降雨侵蚀力影响系数； R_i 为第 i 年降雨侵蚀力值； $\bar{R}$ 为多年平均侵蚀力的值； $r_{i,j}$ 为第 i 年 第 j 月的月降雨侵蚀力； $F_{i,j}$ 为第 i 年 第 j 月的 Fournier 指数； $P_{i,j}$ 为第 i 年 第 j 月的月降雨量； P_i 为第 i 年的年降雨量。

2.3 单位面积负荷系数法

通过单位面积负荷系数^[21]评价研究区氮磷污染程度,其计算公式为:

$$K = \frac{q_x}{\sum q_x} \tag{7}$$

$$q_x = \frac{L}{S} \tag{8}$$

式中： K 为多年平均单位面积负荷系数； q_x 为某区县多年平均污染物排放强度； S 为某区县行政面积。

以 K 值大小为依据,将潍坊市各区县氮磷污染程度划分为 4 个级别^[22], $K < 0.6$ 对环境不构成威胁; $0.6 \leq K \leq 0.8$ 对环境稍有威胁; $0.8 \leq K \leq 1.0$ 对环境构成威胁, $K > 1.0$ 对环境构成严重威胁。

表 2 不同土地利用类型及居民生活氮磷输出系数

类型	输出系数		其他流域输出系数	
	TN	TP	TN	TP
耕地/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	1.345	0.224	0.421~2.320 ^[14,24-26]	0.069~0.224 ^[14,24-26]
林地/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	0.238	0.010	0.238~0.483 ^[14,24,26]	0.010~0.020 ^[14,24,26]
草地/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	0.856	0.050	0.435~0.856 ^[14,24-26]	0.038~0.070 ^[14,24-26]
水域/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	1.305	0.030	1.100~1.305 ^[24,26]	0.020~0.030 ^[24,26]
未利用地/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	1.490	0.051	1.155~1.490 ^[24,26-27]	0.042~0.063 ^[24,26-27]
建设用地/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	1.100	0.050	1.100~1.343 ^[14,24,26]	0.050~0.094 ^[14,24,26]
城镇人口/(kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	2.480	0.250	2.480 ^[14,28]	0.250 ^[14,28]
农村人口/(kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	1.810	0.140	0.142~2.140 ^[24,26,29-30]	0.018~0.214 ^[24,26,29-30]

3.2 畜禽养殖

养殖业的污染排放量与地区、气候和养殖规模有较强的相关性^[31],潍坊市位于华东地区。猪和牛的排污系数参考《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》^[32]。羊和家禽的排污系数采用国家环保总局发布的污染物排放量的排污系数,畜禽养殖排放的污染物作为有机肥大部分被植物吸收,另外一部分随下渗水进入地下水系统,并非全部进入地表环境^[33]。因此,在计算输出系数时,应考虑相关损失,借鉴前人经验,研究区域畜禽养殖 TN、

3 输出系数取值

实地监测和查阅文献^[23]是确定系数值的两个途径,由于潍坊市幅员辽阔,通过实地监测获得输出系数的方法在实际应用中实施难度大,不确定性高。因此,本文通过查阅文献和资料确定输出系数,从土地利用、畜禽养殖和居民生活 3 个方面探究潍坊地区的氮磷污染来源。

3.1 土地利用

根据土地利用数据对潍坊地区土地利用类型进行划分,2004—2020 年潍坊市土地利用类型分类表如表 1 所示。由于缺乏潍坊市输出系数的试验数据,因此土地利用输出系数参考其他流域的取值,取相似自然条件下的临近地区的取值结果见表 2。

表 1 2004—2020 年潍坊市土地利用类型分类表

类型	面积/×10 ³ hm ²				
	2004 年	2009 年	2012 年	2016 年	2020 年
耕地	1153.71	1120.05	1102.38	1071.67	1044.70
林地	55.56	55.03	55.75	63.50	69.14
草地	37.92	33.25	30.79	31.48	25.30
水域	38.55	46.10	49.44	45.01	58.57
未利用地	32.91	29.81	25.95	20.48	8.58
建设用地	253.33	287.75	307.67	339.84	365.69

TP 的输出系数取其排污系数的 10%^[13,28,33],具体数值见表 3。

表 3 畜禽养殖氮磷输出系数

种类	饲养周期/d	排污系数		输出系数	
		/(kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹)		/(kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹)	
		TN	TP	TN	TP
猪	199	56.02	0.639	5.602	0.064
牛	365	5.05	7.250	0.505	0.725
羊	365	2.28	0.450	0.228	0.045
家禽	—	0.28	0.120	0.028	0.012

3.3 居民生活

因城镇居民和农村居民在取水和排水方式上有所不同,即用水方式存在差异,所产生的生活废水量也不相同,所以要分别估算城镇居民和农村居民的生活 TN、TP 输出系数^[31]。根据城市分类,参考《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》^[34]并计算得出居民生活 TN、TP 输出系数,农村居民排放系数取相应城镇系数的 50%^[31],具体取值见表 2。

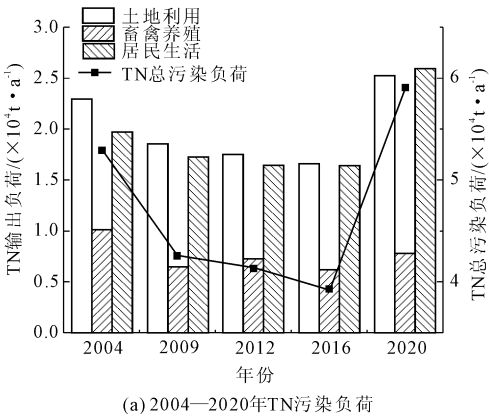
4 结果与分析

4.1 氮磷污染负荷计算结果

根据所选输出系数,计算得出潍坊地区非点源氮磷污染负荷,如表 4 所示。

表 4 2004—2020 年潍坊市氮磷污染负荷

污染物类型	年份	土地利用 /(10 ⁴ t·a ⁻¹)	畜禽养殖 /(10 ⁴ t·a ⁻¹)	居民生活 /(10 ⁴ t·a ⁻¹)	总计 /(10 ⁴ t·a ⁻¹)
TN	2004	2.304	1.013	1.979	5.297
	2009	1.864	0.657	1.738	4.259
	2012	1.756	0.731	1.648	4.136
	2016	1.662	0.624	1.640	3.926
	2020	2.533	0.780	2.601	5.915
TP	2004	0.322	0.245	0.171	0.738
	2009	0.254	0.171	0.158	0.584
	2012	0.239	0.189	0.151	0.578
	2016	0.224	0.161	0.149	0.535
	2020	0.335	0.229	0.239	0.803



4.2 氮磷污染负荷时间变化特征

2004—2020 年氮磷污染负荷时间变化如图 1 所示。潍坊地区氮污染负荷整体趋势为先下降后上升,2016 年是拐点年(见图 1(a))。从三种污染源上看,氮污染主要来源于居民生活和土地利用,以 2020 年计算结果为例,居民生活约占总量的 43.98%,且城镇居民贡献率大于农村居民;土地利用约占 42.82%,贡献率最大的为耕地;畜禽养殖约占 13.20%,且其贡献率按降序排序为家禽、猪、牛、羊。另外,土地利用污染负荷变化趋势与 TN 总污染负荷变化趋势基本一致。

与 TN 类似,潍坊地区磷污染负荷整体趋势为先下降后上升,2016 年是拐点年(见图 1(b)),且 TN 的输出负荷约为 TP 的 7.15~7.37 倍。以往研究中 TN 与 TP 污染负荷比在 5~10 之间,本结果与以往研究类似^[7,12,14],说明本研究结果的可靠性,但与前人研究北方地区氮磷负荷比为 8 的结果相比,磷排放较高。原因在于研究区域内种植了大量蔬菜、瓜果这种磷当量高的作物,所以本结果的磷排放较高。磷污染主要来源为土地利用,居民生活和畜禽养殖也占有较大比例。以 2020 年计算结果为例,土地利用、畜禽养殖、居民生活所占比例分别为 41.70%、28.50%、29.80%。

从时间上来看,氮磷负荷有较大变化,TN、TP 整体变化规律相似,并且与降雨侵蚀力影响因子呈明显的正相关关系,表明降雨是非点源污染负荷的重要影响因素。

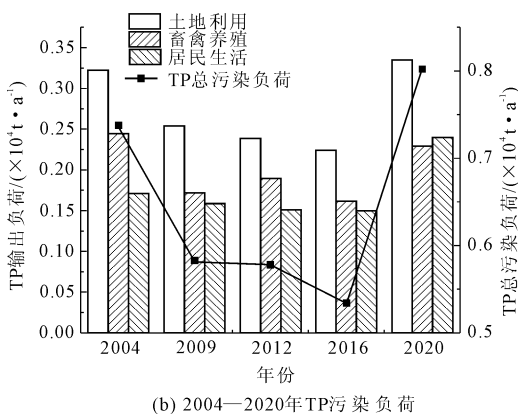


图 1 2004—2020 年氮磷污染负荷时间变化

4.3 氮磷污染负荷空间变化特征

采用 Origin 2022 绘制 2004—2020 年潍坊市各地区氮、磷污染负荷(见图 2—图 3),采用 ArcGIS 10.7 绘制 TN、TP 非点源污染负荷的空间分布(见图

4—图 5)。

4.3.1 TN 污染负荷空间变化

氮污染空间上分布不均,整体而言,总氮污染负荷的空间分布情况表现为“中间低四周高”。高值

区分布在诸城市、寿光市、高密市、安丘市,2020 年诸城市达到研究期间最大值($0.835 \times 10^4 \text{ t}$);而低值区主要位于潍城区、奎文区,2016 年潍城区达到研究期间最小值($0.103 \times 10^4 \text{ t}$)。另外,研究区多年平

均 TN 污染负荷按降序排序:诸城市 > 寿光市 > 高密市 > 安丘市 > 临朐县 > 青州市 > 昌邑市 > 昌乐县 > 寒亭区 > 坊子区 > 奎文区 > 潍城区。

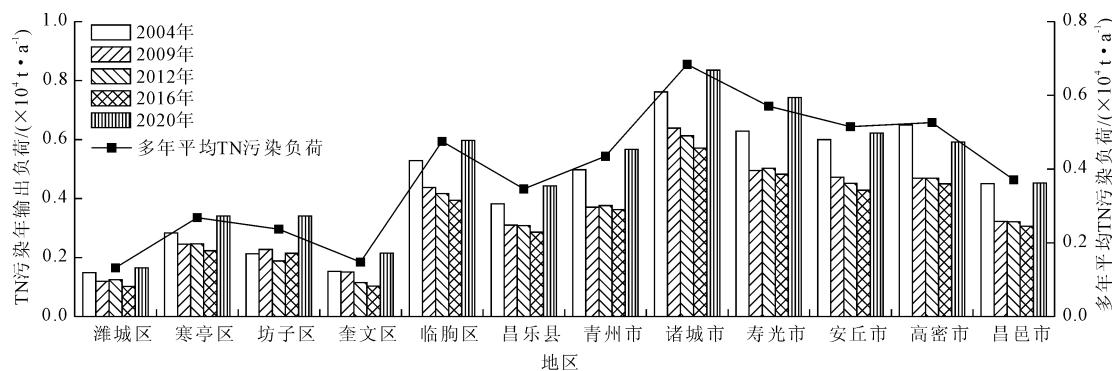


图 2 2004—2020 年潍坊市各地区氮污染负荷

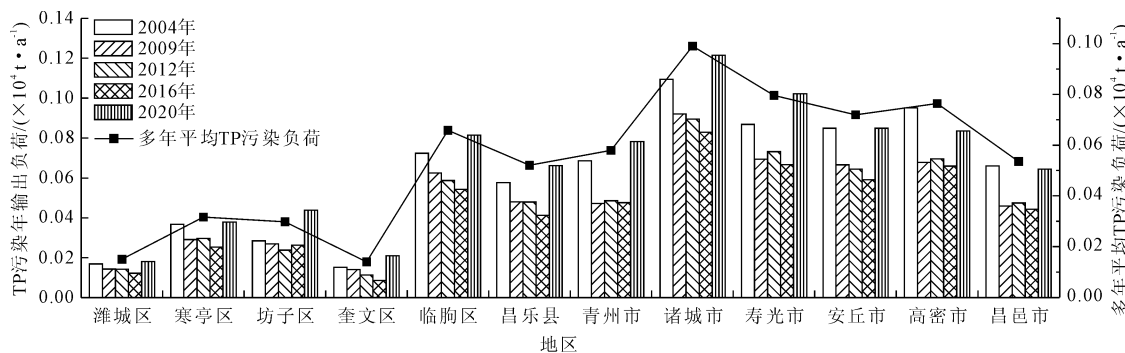


图 3 2004—2020 年潍坊市各地区磷污染负荷

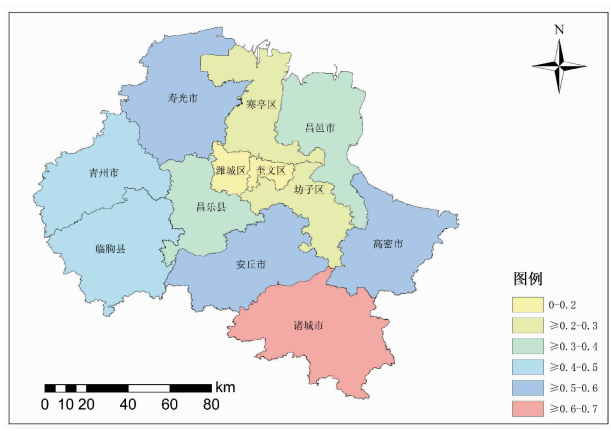


图 4 2004—2020 年潍坊市各地区平均 TN 污染负荷分布

4.3.2 TP 污染负荷空间变化

TP 污染负荷的空间变化与 TN 类似,总磷污染负荷的空间分布情况表现为“中间低四周高”。其中,高值区仍分布在诸城市、寿光市、高密市、安丘市,2020 年达到研究期间最大值($0.122 \times 10^4 \text{ t}$);低值区位于潍城区、奎文区,2016 年奎文区达到研究

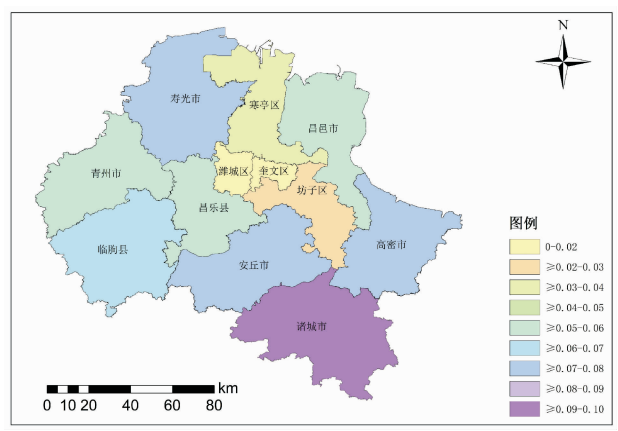


图 5 2004—2020 年潍坊市各地区平均 TP 污染负荷分布

期间最小值($0.009 \times 10^4 \text{ t}$)。另外,研究区多年平均 TP 污染负荷按降序排序:诸城市 > 寿光市 > 高密市 > 安丘市 > 临朐县 > 青州市 > 昌邑市 > 昌乐县 > 寒亭区 > 坊子区 > 潍城区 > 奎文区。

4.4 污染程度评价

经计算得到 2004—2020 年潍坊市各地区平均

单位面积污染负荷系数分布情况(见图 6),由此可知,潍坊市 8.33% 区县的 TP 的 K 值小于 0.6,33.33% 和 16.67% 区县的 TN、TP 的 K 值在 0.6~0.8 之间,41.67% 和 33.33% 区县的 TN 和 TP 的 K 值在 0.8~1.0 之间,25% 和 41.67% 区县的 TN 和 TP 的 K 值大于 1.0。寒亭区、昌邑市、坊子区、临朐县的氮污染对环境稍有威胁;寿光市、青州市、昌乐县、安丘市、诸城市的氮污染对环境构成威胁;潍城区、奎文区、高密市的氮污染对环境构成严重威胁。寒亭区的磷污染对环境不构成威胁;昌邑市、坊子区的磷污染对环境稍有威胁;寿光市、青州市、临朐县、安丘市的磷污染对环境构成威胁;潍城区、奎文区、昌乐县、高密市、诸城市的磷污染对环境构成严重威胁。因此,潍坊市非点源氮磷污染控制重点应放在对环境影响较大的区县。

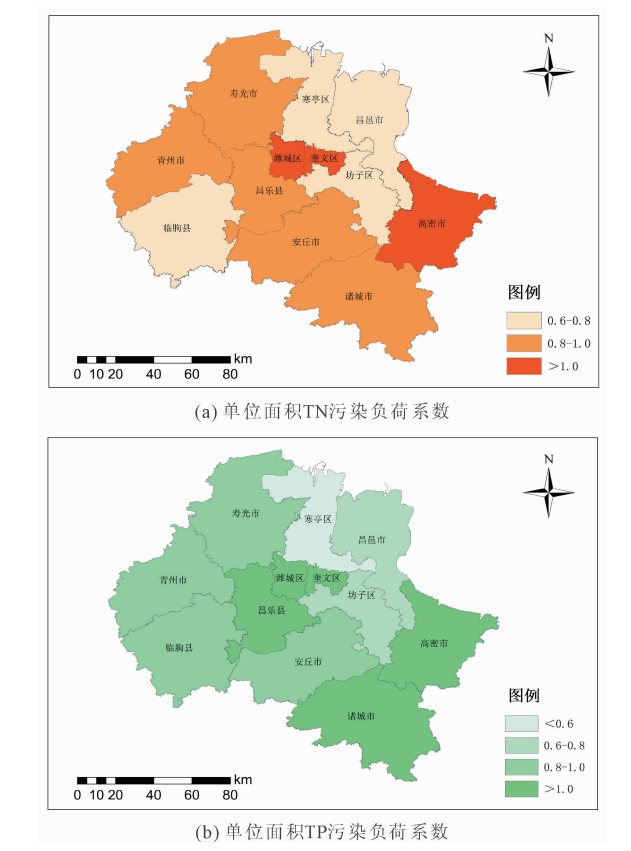


图 6 2004—2020 年潍坊市各地区平均单位面积污染负荷系数

4.5 污染源分析

根据计算结果,分别从土地利用、畜禽养殖、居民生活 3 个方面对研究区域氮磷污染来源进行分析。

4.5.1 土地利用

研究期间,土地利用产生的氮磷污染负荷从

2004 年开始先减少后增长,2016 年是拐点年,可见潍坊地区在农业大力发展的背景下也产生了更多的氮磷污染。由氮磷污染负荷各污染源的贡献率可知,土地利用是第一大污染源,且耕地为其中的最主要污染源。原因主要在于潍坊市农业发达,尤其是寿光市是著名的蔬菜之乡,种植蔬菜种类丰富、数量繁多。另外,青州市和昌乐县也是潍坊市蔬菜和粮食生产的重要地区,这也是以上三个地区非点源污染负荷强度较高的原因。近年来,随着潍坊地区粮食蔬菜等变得产业化,化肥、农药施用过量导致过量的营养物质随地表径流等方式进入河道,成为潍坊市非点源氮磷污染的最重要来源。

4.5.2 畜禽养殖

研究期间畜禽养殖所产生的氮磷污染呈波动趋势,畜禽养殖也是非点源氮磷污染的一个重要来源。其中,家禽是最主要输出源,主要原因在于家禽养殖数量庞大,数量远远超过猪、牛、羊的养殖数量;其次是牛和猪,由于其体积较大,排污量较高。

污染物主要来源于所养殖动物的排泄物。养殖动物的排泄物的未及时得到收集处理。大多数养殖者将动物粪便当作肥料对农田进行施肥,少部分将动物粪便随意排放,受降雨径流等影响造成河流污染。随着研究区产业结构的调整,规范化养殖水平的提高,在畜禽养殖方面产生氮磷污染的比例有所下降,但仍是研究区非点源污染的重要来源之一。

4.5.3 居民生活

居民生活是非点源氮磷污染的重要来源,研究期间产生的氮磷污染整体均呈先下降后上升的趋势,就 2020 年计算结果可知,城镇居民和农村居民 TN 污染负荷分别为 1.572×10^4 t、 1.029×10^4 t,TP 污染负荷分别为 0.158×10^4 t、 0.081×10^4 t,城镇居民负荷量几乎是农村居民的 10 倍甚至超出 10 倍。由于城市化发展,城镇人口增多,产生的污染也相应增加。居民生活产生的氮磷污染主要来源于居民生活污水、生活垃圾和居民排泄物。由于潍坊部分地区尚未建立完善的生活垃圾及生活污水处理系统,无法很好的处理居民生活产生的污染物,因此污染物进入河道,造成河流的污染。

5 结 论

通过对潍坊地区非点源氮磷污染负荷估算及其时空变化分析,得出下列结论:

(1) 潍坊市非点源氮磷污染负荷整体趋势先下降后上升,且 TN 的输出负荷约为 TP 的 7.15~7.37

倍,氮磷负荷变化明显,与降雨侵蚀力影响因子呈显著正相关关系,表明降雨是非点源氮磷污染负荷的重要影响因素。

(2) 分别从土地利用、畜禽养殖、居民生活对潍坊市氮磷污染来源进行分析,不同污染源对氮磷污染负荷贡献率有所不同,以 2020 年计算结果为例,三者对 TN 污染负荷的贡献率分别占 43.98%、13.20%、42.82%;对 TP 污染负荷的贡献率分别占 41.70%、28.50%、29.80%。居民生活和土地利用是主要污染源。

(3) 2004—2020 年,潍坊市 TN、TP 的污染负荷呈明显的时空差异特征且氮磷污染在时间和空间上的变化规律都具有相似性。时间上,TN、TP 污染输出负荷整体呈现先下降后上升的趋势;空间上,TN、TP 污染负荷的分布情况表现为“中间低四周高”,高值区主要分布在诸城市,低值区分布在潍城区、奎文区。

(4) 潍坊市 8.33% 区县的 TP 的 K 值小于 0.6,对环境不构成威胁;33.33% 和 16.67% 区县的 TN、TP 的 K 值在 0.6~0.8 之间,对环境稍有威胁;41.67% 和 33.33% 区县的 TN 和 TP 的 K 值在 0.8~1.0 之间,对环境构成威胁;25% 和 41.67% 区县的 TN 和 TP 的 K 值大于 1.0,对环境构成严重威胁。

(5) 合理设置化肥施用量,调整灌溉方式,综合处理居民生活污水及生活垃圾分类回收、集中处理,可有效减少非点源氮磷的污染。

参考文献:

- [1] Kourakos G, Harter T. Parallel simulation of groundwater nonpoint source pollution using algebraic multigrid preconditioners[J]. Computational Geosciences, 2014, 18(5):851-867.
- [2] 马广文,王圣瑞,王业耀,等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1285-1291.
- [3] Ma Xiao, Li Ye, Zhang Meng, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei province, China[J]. Science of the Total Environment, 2011, 412: 154-161.
- [4] Miller J D, Schoonover J E, Williard K W J, et al. Whole catchment land cover effects on water quality in the lower Kaskaskia river watershed[J]. Water Air and Soil Pollution, 2011, 221:337-350.
- [5] Li Wenchao, Wang Jiehua, Zhou Yuankai, et al. Effects of heavy rain on the concentrations and forms of carbon, nitrogen and phosphorus in urban rivers of northern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30:64971-64981.
- [6] Li Xin, Shang Jie. Spatial interaction effects on the relationship between agricultural economic and planting non-point source pollution in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30:51607-51623.
- [7] Zhang Baolei, Cui Bohao, Zhang Shumin, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from non-point source pollution in Nansi Lake Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19):19101-19113.
- [8] Giles J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution[J]. Nature, 2005, 433(2):791.
- [9] Xie Hui, Chen Lei., Shen Zhenyao. Assessment of agricultural best management practices using models: current issues and future perspectives[J]. Water, 2015, 7:1088-1108.
- [10] Zhang Xiuming, Wu Yiyun, Liu Xuejun, et al. Ammonia emissions may be substantially underestimated in China[J]. Environmental Science and Technology, 2017, 51:12089-12096.
- [11] Wu Lei, Long Tianyu, Li Chongming. The simulation research of dissolved nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Xiao-Jiang Watershed of Three Gorges reservoir area[J]. Water Science and Technology, 2010, 61(6):1601-1616.
- [12] Li Na, Han Weizheng, Shen Mengnan, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8):224-230.
- [13] 郝桂珍,宋凤芝,徐利,等. 基于输出系数模型的水河上游农业非点源污染负荷估算[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33):13919-13927.
- [14] 王有霄,钟萍丽,于格,等. 胶州湾氮、磷非点源污染负荷估算及时空分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(2):85-97.
- [15] 高田田,谢晖,万能胜,等. 巢湖典型农村流域面源氮磷污染模拟及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11):2428-2438.
- [16] Wang Jinliang, Shao Jingan, Wang Dan, et al. Simulation of the dissolved nitrogen and phosphorus loads in different land uses in the Three Gorges Reservoir Region-based on the improved export coefficient model[J]. Environmental Science-Processes and Impacts, 2015, 17:1976-1989.
- [17] 高凤如,王伟涛,张兴国,等. 潍坊市畜禽粪污土地承

-

Zhang T, Zhang X F, Li P F, et al. Experimental research on fatigue performance of reinforced concrete T-shaped beams under corrosion-fatigue coupling action [J]. Materials, 2023, 16: 1-26.

马亚飞, 齐洪鹤, 苏小超, 等. 锈蚀疲劳耦合作用下钢筋混凝土梁性能退化试验 [J]. 实验力学, 2020, 35 (3): 472-478.

欧阳祥森, 罗小勇, 万翱宙, 等. 考虑耐久性损伤的钢筋混凝土梁疲劳寿命试验研究 [J]. 铁道学报, 2018, 40 (11): 112-120.

许见超, 吴洁琼, 刁波, 等. 配筋率和氯腐蚀环境对钢筋混凝土梁疲劳损伤累积的影响 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (2): 16-19.

- [20] 陈长久,黄文腾,弓扶元,等. 锈蚀钢筋混凝土梁弯曲疲劳性能的材料——结构协同数值模拟研究[J]. 混凝土,2022(8):29-35.
- [21] 马亚飞,王 磊,张建仁. 基于 EIC 增长的锈蚀钢筋混凝土梁疲劳寿命评估[J]. 公路交通科技,2019,36(4):80-87.
- [22] 颜全哲. 东南沿海大气环境下公路钢筋混凝土 T 梁桥服役期内疲劳损伤演化与疲劳寿命评估[D]. 福州:福州大学,2019.
- [23] 公路桥涵标准图(1973 年—1993 年)常用结构标准图汇编——第二部分:钢筋混凝土、预应力混凝土 T 形梁桥:JTG/QB011—1973[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.