

# 基于改进 APPI 系统的农业面源污染 发生潜力评估及优先控制区识别

——以常州市为例

陈 盾<sup>1</sup>, 黄 靖<sup>1</sup>, 陈 磊<sup>1</sup>, 尹 颖<sup>1</sup>, 杜文超<sup>2</sup>, 郭红岩<sup>1</sup>

(1. 南京大学 环境学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京师范大学 环境学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 研究优化了农业面源污染发生潜力评价(APPI)的指标体系,增加了 COD 产生指数并对人畜负荷指数的相关参数进行调整,并用改进后指数系统结合自然间断点分级法对常州市 6 个行政区的非城镇用地区域进行了农业面源污染发生潜力评价及优先控制区识别。

**关键词:** 农业面源污染; 发生潜力评价; APPI 模型; 优先控制区

中图分类号: TV882.9

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)10-0036-0005

## Assessment of the occurrence potential agricultural non-point source pollution and identification of priority control areas based on improved APPI system: taking Changzhou as an example

CHEN Dun<sup>1</sup>, HUANG Jing<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, YIN Ying<sup>1</sup>, DU Wenchao<sup>2</sup>, GUO Hongyan<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** This study improved the evaluation of agricultural non-point source pollution potential (APPI) system. The chemical oxygen demand production index was increased and the relevant parameters of the human and animal load index were adjusted. The improved APPI system combined with the natural breakpoint method was used to evaluate the potential of agricultural non-point source pollution and identify the priority control areas in Changzhou City without urban areas.

**Key words:** agricultural non-point source pollution; occurrence potential evaluation; APPI model; priority control area

## 1 概 述

当前农业面源污染主要来源于农村生活排污、农业种植、水产畜禽养殖,主要表征指标包括 COD、TN 和 TP 等<sup>[1]</sup>。面源污染在降雨降雪、水文过程、人类活动、地形地貌和土壤性质等众多因素影响下,具有来源分散复杂、排放随机、时空差异大和浓度

相对较低等特点,这些特征决定了面源污染不能像点源污染那样进行集中治理<sup>[2]</sup>。因此,当前面源污染防治的首要任务就是进行科学的面源污染评价并识别出关键治理源区,从而对其进行优先管控,提高治理效率。

自 20 世纪 90 年代,地理信息技术(Geographic Information System, GIS)和数学建模被应用于面源

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019064)

作者简介: 陈盾(1996—),女,博士研究生,研究方向为农业面源污染评价。E-mail: chendun@smail.nju.edu.cn

污染后,大多数研究都是利用模型估算来评价面源污染和识别关键源区<sup>[3]</sup>。国内已经有很多关于农业面源污染评价方面的研究,主要集中在氮磷污染物污染负荷估算、时空分布特征及环境风险评价,这些研究都能对区域内面源污染状况进行较好的定量描述<sup>[4]</sup>。目前,国内外较为成熟的源解析分析方法主要包括经验统计法、模型估算法、污染指数评价法等<sup>[5-6]</sup>。其中农业面源污染发生潜力指数(Agricultural Non-point Source Pollution Potential Index, APPI)评价,因仅需要输入相关气象、遥感、土壤和相关农业统计数据等,数据获取途径和计算方式较为简便,而且能科学地反映地区农业面源污染原始特征,综合考虑降雨径流和泥沙流失等自然因素及人畜负荷和化肥使用等人为因素对农业面源污染的贡献<sup>[7]</sup>。郭红岩等<sup>[8]</sup>运用该模型在太湖镇域范围对稻季农业面源污染的氮磷负荷量进行模拟和计算得出各污染源对负荷的贡献率;王小治等<sup>[9]</sup>利用GIS技术等手段,通过APPI模型研究了无锡市11个城镇的面源污染状况并提出优先控制区;王宁<sup>[10]</sup>优化了APPI模型参数,通过模拟大埔镇和宜兴市面源污染潜力从而确定优先控制因子和优先控制区。

本研究对农业面源污染发生潜力评价体系的指标参数进行优化,以常州市非城镇用地作为研究区,利用优化后的评价体系对研究区的农业面源污染发生潜力进行评价,并识别出该研究区内可优先防控的关键源区,为相关部门开展防治工作提供数据支撑。

2 研究方法

2.1 研究区概况

常州市位于江苏省南部,属长江下游平原,面积

为4 385 km<sup>2</sup>,包括金坛区、武进区、新北区、天宁区、钟楼区和溧阳市,属于北亚热带季风气候,四季分明,年平均气温17.5℃,年均降水量1 149.7 mm,除东北、西北、东北各有少量低山外,低山大部分分布在西部和南部。

2.2 数据来源

评价模型中考虑了降雨、土壤、植被覆盖和地形等自然因素,同时也考虑了农业种植、畜禽水产养殖和人口等人为因素。模型所需数据包括土地利用、年植被覆盖、数字高程地图、月降水量、土壤粒径分布、化肥施用量、水产畜禽养殖和常住人口等。所有数据统一转换为空间分辨率30 M的栅格数据,具体数据来源见表1。

2.3 评价方法

2.3.1 农业面源污染发生潜力评价方法

通过对相关文献的调研,对郭红岩等建立的APPI进行指标优化。原有体系中包含径流指数(Runoff Index, RI)、泥沙流失指数(Sediment Production Index, SPI)、化肥使用指数(Chemical Use Index, CUI)、人畜排放量指数(People and Animal Loading Index, PALI)。考虑到有些地区已经将农村生活污水纳入了城市污水管网体系,或者建立了分散的中小型农村生活污水处理设施,因此增加了生活污水产生系数和生活污水处理率的相关参数。此外,原有的体系中没有考虑到农田COD产生,通过相关文献和资料研究<sup>[11]</sup>后,增加了有机农药、作物秸秆和瓜果蔬菜降解的相关参数。在综合考虑了地表径流量、土壤侵蚀情况、土地利用状况、农业种植情况、水产畜禽养殖和农村生活污水等对农业面源污染发生潜力大小的影响后,提出了以下修正后的计算公式,可以筛选出研究区农业面源治理的

表1 主要空间数据

数据类型	数据属性	数据来源
降水	年与月降水量(气象站点数据)	中国气象数据网
土壤	土壤粒径分布/土壤有机质含量 (国家基础信息数据1:100万土壤类型数据)	中国土壤数据库
地形	坡度/坡长数据(基于ASTER全球DEM数据/30M提取)	地理空间数据云
遥感数据	NDVI数据(MOD13A2)	地理空间数据云
土地利用类型	基于Landsat TM影像通过人工目视解译生成	资源环境科学与数据中心
行政边界	县区级行政边界	全国地理信息资源目录服务系统
统计	农村常住人口数量/畜禽水产养殖量/化肥施用量/农药施用量/ 作物产量/蔬菜瓜果种植面积等23个指标数据	常州统计年鉴

关键源区并筛选出研究区的主要污染来源,提出污染评价和控制建议。

$$I_{APPL,i}=I_{RI,i}W_{F,1}+I_{SPL,i}W_{F,2}+I_{FUL,i}W_{F,3}+I_{CPL,i}W_{F,4}+I_{PALI,i}W_{F,5} \tag{1}$$

式中:  $I_{APPL,i}$  为区域  $i$  的农业面源污染发生潜力综合指数;  $I_{RI,i}$  为区域  $i$  的径流指数,评价研究区地表径流产流能力;  $I_{SPL,i}$  为区域  $i$  的泥沙产生指数,评价研究区的泥沙流失能力;  $I_{FUL,i}$  为区域  $i$  的化肥施用指数,评价研究区内化肥施用对非点源污染发生潜力的贡献力;  $I_{CPL,i}$  为区域  $i$  的化学需氧量产生指数,评价研究区内农业种植对非点源污染中化学需氧量发生潜力的贡献;  $I_{PALI,i}$  为区域  $i$  的人畜负荷指数,评价研究区人畜产生污染的潜力;  $W_F$  为各指数的相应权重。各指数具体所涉及参数如表2所示。

### 2.3.2 权重确认与分级方法

原评价方法中的权重是将实验结果与磷指数系统结合对各项指标进行赋权<sup>[12]</sup>。本研究沿用之前体系的权重对径流指数、泥沙流失指数和化肥施用指数进行赋权。考虑到有些地区已经将农村生活污水纳入了城镇污水管网体系以及建设了分散的中小型污水处理设施。再根据本研究中的研究区概况、土地利用情况、常驻人口、种植和养殖情况,参考相关农业面源污染的研究<sup>[13]</sup>,确定单个指数权重,见表3。

利用 Jenks 自然间断点分级法对面源污染发生潜力综合指数进行等级划分。因为前期已经将指标无量纲化,所以农业面源污染发生潜力评价值在 0~1 之间,越靠近 1 则农业面源污染发生潜力就愈大,反之,越靠近 0 则发生潜力就愈小。

## 3 结果与讨论

### 3.1 径流指数计算

降雨径流过程是造成农业非点源污染物输出的主要动力,本研究采用美国农业部水土保持局开发的径流曲线法 (Soil Conservation Service. Curve number method, SCS. CN)。将 2020 年均降水量通过 GIS 进行克里金空间插值,结合土地利用状况确定的 CN 值得出每个空间栅格上的径流量,再利用 GIS 空间分析的模糊隶属度完成栅格数据归一化处理,最后得出径流指数。

径流指数较低区域主要集中在常州市东部、西部和南部。这主要是因为常州市南部为主城区,土地利用类型为城镇用地,大量的城市建筑、道路和公共空间导致城市形成不透水下垫面。而研究区

表2 农业面源污染发生潜力指标体系

一级图层	二级图层指数	三级图层指标类别
农业面源发生潜力指数	径流指数	年降雨情况
		径流曲线数
	泥沙流失指数	月降水量
		土壤粒径分布
		土壤有机碳含量
		土地坡度
		植被覆盖度
		土地利用类型
	化肥使用指数	土地利用类型
		氮肥施用量
		磷肥施用量
		钾肥施用量
		复合肥施用量
	人畜负荷指数	土地利用类型
		农村常住人口数/生活污水产生系数
		生活污水处理率
		畜禽类别/存栏量
		畜禽排泄量/畜禽粪便利用率
		水产品类别/产量/产污系数
化学需氧量产生指数		土地利用类型
		农药种类/施用量
		作物种类/作物产量
		作物秸秆产出系数/秸秆综合利用率
		蔬菜瓜果种类/种植面积
		蔬菜瓜果单位面积产废率

西部和南部主要为林地,有良好的渗入性,减少了地表径流。

### 3.2 泥沙流失指数计算

采用美国农业部的通用土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, ULSE),进行流域内土壤侵蚀量的计算,主要涉及了降雨侵蚀力因子、土壤侵蚀因子、坡长因子、坡度因子、植被覆盖因子和水土保持因子。将月降雨、土壤性质、数字高程数据和归一化植被指等数据利用 ArcGIS 的栅格计算

表3 各指标权重

指数	$I_{RI}$	$I_{SPI}$	$I_{FUI}$	$I_{CPI}$	$I_{PALI}$
权重( $W_F$ )	0.20	0.30	0.14	0.18	0.18

器进行计算,得出空间分辨率30 M的土壤侵蚀量栅格图层。

水土流失是面源污染的一种形式,且泥沙本身就是一种污染物,又可以作为氮磷的载体,所以计算泥沙流失量,有助于估算面源污染发生潜力。泥沙流失量较大的主要集中于西部和南部的山区。因为研究区较小,降雨情况、土壤性质等影响因素差异较小,所以地形可能是影响泥沙流失主导因素。

3.3 化肥施用指数计算

将研究区内不同土地利用类型的化肥施用量除以该区域内的栅格数,得出单位栅格的化肥施用量,再经过数据归一化处理;化肥施用指数从小到大的顺序:武进区、天宁区、钟楼区、溧阳市、新北区、金坛区。其中武进区耕地面积较大为20 858 hm<sup>2</sup>,但年化肥施用量较低为4 048 t。而金坛区耕地面积为28 242 hm<sup>2</sup>,但化肥施用量却达武进区的5.25倍,所以导致了金坛区域的化肥施用指数较高。

3.4 化学需氧量产生指数计算

利用相关参数计算出作物秸秆遗弃量和蔬菜瓜果产废量,再结合农药施用量,将3个参数数据进行归一化后叠加生成化学需氧量产生指数。化学需氧量产生指数由低到高的排序为武进区、钟楼区、金坛区、溧阳市、新北区和天宁区。其中天宁区的化学需氧量产生指数较高,主要归因于其耕地面积和蔬菜瓜果种植面积仅占全市的1.8%和5.5%,但是农药施用、作物秸秆产废和蔬菜瓜果的贡献率相对较高。

3.5 人畜污染负荷指数计算

利用农村常驻人口数等相关参数获得农村生活污水排放量,再与水产畜禽污染排放量加权叠加后生成人畜污染负荷指数。人畜负荷指数由低到高的排序为新北区、溧阳市、钟楼区、金坛区、武进区和天宁区。6个区域的畜禽和水产养殖负荷差别

较小。武进区的农村常驻人口较多,但区域面积较大,所以生活污水负荷为中等水平。同时正是因为天宁区的区域面积较小,其单位面积生活和畜禽水产养殖污水负荷都相对较大。

3.6 农业面源污染发生潜力综合指数计算

将区域内径流指数、泥沙流失指数、化肥施用指数、化学需氧量产生指数和人畜负荷指数后加权叠加后得到农业面源污染综合指数。通过自然断点法进行分级得出农业面源污染发生潜力较低、低、中等、较高和高的区域,分级标准见表4,最后通过行政区划边界进行分区统计识别出研究区内农业面源污染的关键源区域,见图2。

由以上数据中可以看出,农业面源污染发生潜力指数值由大到小依次为金坛、溧阳、钟楼、天宁、新北、武进。由此可以得出金坛区是农业面源污染的优先控制区,其次是溧阳市。金坛区除人畜负荷指数外,其他4个指标RI、SPI、CPI、FUI都比较高,其中FUI最高。金坛区的农业面源污染发生潜力为0.4503,其中化肥施用指数最高。该区域耕地面积仅占到全市35.3%,但农药施用量和作物秸秆遗弃量分别占全市的40.2%和60.1%,这也增加了其面源污染发生潜力的贡献。溧阳市的APPI值位居第二,主要是因为范围内南部地形较为起伏,泥沙流失指数较高。且CPI为0.4930,位于全市中较高值。这可能是因为溧阳市的耕地面积仅占到全市的35.3%,但其中作物秸秆遗弃量却占到了全市的60.1%。

本研究基于文献调查与实地研究,在农业面源污染发生潜力评价指标中增加了化学需氧量生产指数和人畜负荷指数的相关参数,例如,生活污水产生系数、生活污水处理率、有机农药降解、作物秸秆遗弃和瓜果蔬菜产废等<sup>[14-15]</sup>。对原有的指标体系进行了优化,可以更加科学、细致地反映不同污染源中污染物对农业面源污染的贡献情况。但其中

表4 常州市非城镇用地区域农业面源污染发生潜力分级标准

	分级标准				
	低潜力	较低潜力	中等潜力	较高潜力	高潜力
综合指数	<0.2318	0.2318~0.3093	0.3093~0.3950	0.3950~0.4659	>0.4659

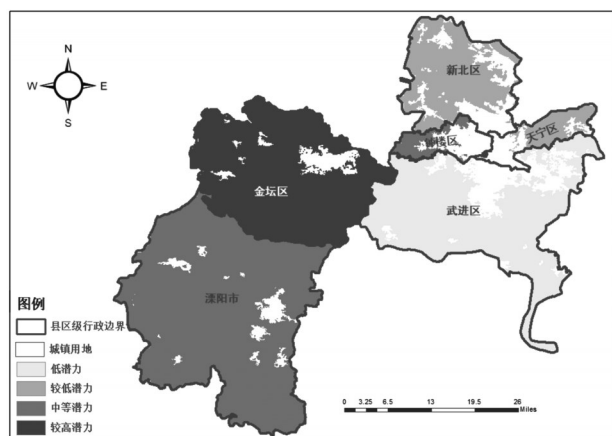


图2 常州市非城镇用地区域2020年农业面源污染关键源区识别

也存在着不足,比如各指数及参数因子的权重确认。各指数和参数因子的赋予不同的权重会给最终的评价结果带来很大的影响。本研究沿用之前体系的权重对径流指数、泥沙流失指数和化肥施用指数进行赋权。考虑到有些地区已经将农村生活污水纳入了城镇污水管网体系以及建设了分散的中小型污水处理设施,人畜负荷指数的权重有所调整,所以在本研究中化学需氧量产生指数和人畜负荷指数的权重分别赋予0.18和0.18。但是这种做法相对主观,在之后其他地区的研究中可以结合当地的实际情况进行改进。

## 4 结 语

研究对APPI模型的指标参数进行了优化,增加了化学需氧量产生指数,用优化后的模型评价了常州市非城镇用地得到区域的农业面源污染发生潜力,依据研究区内各县区的APPI值和各指标指数来确定本研究区内农业面源污染发生潜力较高区域及污染潜力主要来源。

依据所得的常州市非城镇用地的APPI值,利用GIS形成农业面源污染发生潜力空间分布图。金坛区和溧阳市是农业面源污染发生潜力较大的区域,为农业面源治理的关键源区,应该加大防控力度。金坛区则是因为化肥施用农药施用对发生潜力的贡献较大,而溧阳市农业面源污染发生潜力过大,主要是因为作物秸秆遗弃导致的化学需氧量产生潜力过大。建议相关部门就各地的APPI值采取相应的农业面源管理措施,包括增加水土保持措施、合理利用有机肥等措施。

## 参考文献:

- [1] 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等. 汉江流域农业面源污染的源解析[J]. 农业环境科学学报,2018,37(10):2242-2251.
- [2] 杨林章,施卫明,薛利红,等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.
- [3] AYUB R, MESSIER K P, SERRE M L, et al. Non-point source evaluation of groundwater nitrate contamination from agriculture under geologic uncertainty[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(4):939-56.
- [4] 曹文杰,赵瑞莹. 国际农业面源污染研究演进与前沿——基于CiteSpace的量化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019,33(7):1-9.
- [5] CAI Y, RONG Q, YANG Z, et al. An export coefficient based inexact fuzzy bi-level multi-objective programming model for the management of agricultural nonpoint source pollution under uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2018(557):713-25.
- [6] 马亚丽,王兴繁. 基于改进的输出系数模型龙溪河流域氮磷负荷评估[J]. 中国农学通报,2021,37(31):70-77.
- [7] GUO H Y, WANG X R, ZHU J G. Quantification and index of non-point source pollution in Taihu Lake Region with GIS[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2):147-156.
- [8] GUO H Y, ZHU J G, WANG X R, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu Region[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004,26(2):209-219.
- [9] 王小治,王爱礼,尹微琴,等. 太湖流域农业非点源污染优先识别区研究——以昆山为例[J]. 农业环境科学学报,2009,28(9):1874-1879.
- [10] 王宁. 农业非点源污染发生潜力指数模型及在宜兴市的应用研究[D]. 南京:南京大学,2011.
- [11] 魏欣. 中国农业面源污染管控研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [12] 曹昕鑫. 基于APPI指数系统的旱作农田面源污染发生潜力及优先控制区识别[D]. 合肥:安徽大学,2013.
- [13] 刘振峰. 石头口门水库双阳河流域农业非点源污染发生潜力评价[D]. 长春:东北师范大学,2006.
- [14] 张晓庆,王梓凡,参木友,等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报,2021,26(9):30-41.
- [15] 韩雪,常瑞雪,杜鹏祥,等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(4):377-382.