

太湖流域农业非点源污染优先识别区研究 ——以昆山为例

王小治¹, 王爱礼¹, 尹微琴¹, 郁志华², 王德建³, 封克¹

(1.扬州大学环境科学和工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.江苏昆山土壤肥料站, 江苏 昆山 215300; 3.中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:在现场调查和收集农业环境数据的基础上,通过地理信息系统及计算机等辅助手段,将已建立的农业非点源污染发生潜力评价系统(APPI)应用于县域范围,研究了昆山市 11 个城镇非点源污染负荷情况并识别出优先控制区。结果表明,昆山市非点源污染氮磷总排放量约为 $4.54 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,其中农田氮磷排放总量约为 $4.30 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,农村居民氮磷排放总量约为 $1.44 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,城镇居民氮磷排放总量约为 $1.36 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,畜禽氮磷排放总量约为 $1.31 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。昆山市农业非点源污染发生潜力最大的 3 个乡镇为千灯镇、张浦镇和淀山湖镇,并对各乡镇不同类型污染源的负荷做了分析。该评价系统在太湖地区县域范围有一定的推广价值,具体参数仍需进一步完善。

关键词:农业非点源污染;潜力指数;太湖;地理信息系统

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)09-1874-06

Application of Agricultural Non-point Source Pollution Potential Index in Typical Area of Taihu: A Case Study in Kunshan City

WANG Xiao-zhi¹, WANG Ai-li¹, YIN Wei-qin¹, YU Zhi-hua², WANG De-jian³, FENG Ke¹

(1.Environment Science and Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Soil and Fertilizer Station of Agricultural Bureau, Kunshan 215300, China; 3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The model of agricultural non-point source pollution potential index (APPI) was applied in Kunshan city, based on the field experiments and basic agro-environmental data with geographical information system. The load and its distribution of the agricultural non-point source (NPS) pollution in Kunshan were studied. Results showed that total discharge of nitrogen and phosphorus was approximately $4.54 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, to which fields, rural dwellers, town dwellers and livestock contributed about 4.30×10^5 , 1.44×10^6 , 1.36×10^6 and $1.31 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The critical areas identified for NPS control in Kunshan city were Qiandeng, Zhangpu and Dianshanhu where the APPI ranged the top three by total discharge of nitrogen and phosphorus. The model is suitable to judge the non-point source pollution in Taihu region although the parameters in the model need to be further modified.

Keywords: agricultural non-point source pollution; potential index; Taihu; geographical information system

太湖是我国的第三大淡水湖泊。近年来,太湖水体富营养化问题日趋严重,由 20 世纪 80 年代初期至今,太湖水体富营养化状态上升二个等级,由中等富营养为主上升至以富营养为主^[1]。有研究认为农业非点源污染物的大量输出是导致受纳水体富营养化的原因之一^[2-3],来自点源和非点源营养物质的大量

输入是导致太湖富营养化的主要原因^[4],因此对农业非点源污染的研究已日益受到人们的重视^[5-10]。

由于农业非点源污染具有随机性、污染物及排放途径的不确定性、污染负荷的时空差异性大等特点^[11-12],增加了开展农业非点源污染环境研究的难度,为准确估算农业非点源污染物排放量、防治污染地表水环境带来了困难。目前流行的地理信息系统 (GIS) 和非点源模型可以很好地结合在一起,通过 GIS 软件、计算机等辅助手段,对太湖地区非点源污染发生潜力进行评价,并识别出优先控制区,以便投

收稿日期:2009-03-03

基金项目:江苏省科技厅太湖专项(BK2007737,BS2007164)

作者简介:王小治(1975—),男,江苏新沂人,博士,副教授,主要从事农业资源与环境研究。

入有限的资源取得最大的效益^[13]。

郭红岩等参考美国 PENNSYLVANIA 水土资源保护局评价非点源污染发生潜力的方法,在太湖流域建立了一套评价农业非点源发生潜力的指数系统 APPI (Agricultural Non—point Source Pollution Potential Index)^[14-15],并在镇域范围内进行了实践应用^[15-16],但迄今为止,尚未在更大的区域内应用。本文参考该模型,以昆山市为研究对象,通过数据收集、实地调查、小区试验等方法重新确定模型中的参数值,对昆山地区非点源污染发生潜力进行评价,为昆山非点源污染控制提供依据,也为在更大范围内推广该模型的使用提供参考。

1 模型介绍

农业非点源发生潜力的指数系统 APPI 模型将影响非点源污染发生的因素分为:年径流量指数(Runoff Index, RI),用于评价区域内的地表径流产生能力;泥沙流失量指数(Sediment Production Index, SPI),用于评价区域的泥沙流失潜力;化肥使用量指数(Chemical Use Index, CUI),用于评价区域内化肥使用对非点源污染发生潜力的贡献;人畜排放量指数(People and Animal Loading Index, $PALI$),用于评价区域内人畜排泄物的发生潜力及其对水体的影响。模型如下:

$$APPI = RI_i \cdot WF_1 + SPI_i \cdot WF_2 + CUI_i \cdot WF_3 + PALI_i \cdot WF_4 \quad (1)$$

式中: $APPI$, 农业面源污染潜在指数; RI , 年径流量指数; SPI , 泥沙流失量指数; CUI , 化肥使用量指数; $PALI$, 人畜排放量指数; i 表示不同的乡镇; WF (Weighting Factors), 表示不同指数的权重。

2 参数的计算和确定

2.1 径流量指数(RI)

昆山市属于中小型汇水流域,降雨径流指数采用美国农业部土壤保护局发展起来的用于估算农业流域次降雨径流的(Soil Conservation Service)SCS 模型^[17]进行计算。结合昆山土地利用状况,计算不同土地利用方式下的各月降雨的径流量并逐月累加,得到不同土地利用方式下的全年径流量数据 Q 值作为 RI 进行区域间的比较。

2.2 泥沙流失量指数(SPI)

本文采用美国农业部经过 40 年研究得出的通用土壤流失方程(ULSE, Universal Soil Loss Equation)^[18],在合理选用 USLE 模型因子算法的前提下,结合 GIS

软件 Mapinfo 进行流域土壤侵蚀量的预测和估算。该模型的基本形式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

式中: A , 年土壤侵蚀量, $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; R , 降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$; K , 土壤侵蚀因子, $t \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$; L , 坡长因子, m ; S , 坡度因子, $\%$; C , 植被与经营管理因子, 无量纲; P , 水土保持因子, 无量纲。

2.2.1 降雨侵蚀力因子 R 的估算

本文采用 Wischmeier 建立的计算 R 值方法^[18],该方法既考虑了年降水总量,又考虑了降水的年内分布,数据也容易获取,具有较好的应用价值。从昆山历年气象资料中整理出各月平均降雨量及年平均降雨量计算出流域的 R 值,该区的年均降雨量为 1 096.7 mm, R 值为 39.26。

2.2.2 土壤侵蚀因子 K 的估算

Williams 等在 EPIC 模型中,发展了土壤可侵蚀性因子 K 的估算方法,通过土壤有机碳和土壤颗粒组成,即可估算 K 值^[19]。本文根据土壤普查资料数据中有有机质含量分布图,并结合相应的土壤机械组成测定结果,估算一定区域内的 K 值。

2.2.3 地形参数 L 与 S 的估算

坡长因子 L 采用陈克平等^[20]建立的方程式计算。

坡度因子 S 用下式进行计算:

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (\text{坡度 } \theta < 5^\circ)$$

$$S = 21.91 \sin \theta - 0.96 \quad (\text{坡度 } \theta \geq 5^\circ)$$

2.2.4 植被与经营管理因子 C 的确定

C 值是一个无量纲的数值,它的取值范围在 0 到 1 之间,在地表完全没有植被保护的情况下, C 值定为 1,反之为 0。本文参考美国通用土壤流失方程中 C 值表及不同土地利用类型年植被覆盖率的统计情况确定 C 值。

2.2.5 水土保持因子 P 的确定

本文根据《湖泊富营养化调查规范》^[21],确定不同土地利用类型的 P 值分别为:居民点为 0.2,旱地和水田为 0.6,菜地为 0.5,水体为 0。

2.3 化肥使用量指数(CUI)

本文根据不同土地利用类型的施肥量的大小,将不同土地使用类型 CUI 分别指标化为 3、2、1、0。将一定区域内各种土地利用类型的面积占总面积的比例分别乘以相应的指数,其总和即为该区域的 CUI 值。

2.4 人畜排放量指数($PALI$)

依据太湖地区的调查结果,结合国家环保局太湖水系水质保护研究国家“七五”科技攻关环境保护项

目成果^[21]获得。

3 结果与分析

3.1 权重的确定及结果

采用上述的分级模型进行计算,获得全市各镇 4 项指数,采用美国 PENNSYLVANIA 水土资源保护局评价非点源污染发生潜力的方法中标准化(Normalize)的方法^[22],标准化(Norm)的值为各指数与同组数值平均数的差值除以同组数据相对标准偏差的计算结果,如表 1。

尽管昆山市的区域范围不大,降雨变化很小,但 *RI* 差别明显,这主要是因为径流的产生除与降雨量、雨强有关外,还与能够反映该地区的坡度、植被覆盖、土地利用等因素的 *CN* 值有关。

昆山市有黄泥土、乌栅土等多种土壤类型,有水田、旱地、果园、菜园等多种土地利用方式,而地形和土壤类型的差异对土壤的可侵蚀性、径流情况都会产生较大影响,不同土地利用方式下植被覆盖情况不同,并且反映出管理参数上的差异,所以昆山市不同乡镇之间,*SPI* 值也表现出了明显差异。

由于昆山市农田面积相对较小,其 *CUI* 相对较小,最大的为千灯镇达 1.19,最小的为周市镇,*CUI* 值为 0.39。*PALI* 主要与单位面积上的人口数和畜禽养殖数量有关。

上述各个因子依据相应的权重相加即表示该地区非点源污染发生潜力的大小。根据本研究区域的地形地貌、土地利用、人口密度等情况,参考近几年对太湖地区农业非点源污染方面的研究^[14-16,23],采用专家

调查法,确定单个指数的权重分别为:*RI* 0.26,*SPI* 0.14,*PALI* 0.5,*CUI* 0.1。根据各指数的标准化结果,依据 *APPI* 计算公式可求得昆山各乡镇的农业非点源污染发生潜力指数 *APPI*,结果见表 2。

表 2 农业面源污染发生潜在指数及其排序
Table 2 Agricultural NPS pollution potential index and its ranks

名称	面积/ km ²	<i>RI</i> Norm	<i>SPI</i> Norm	<i>CUI</i> Norm	<i>PALI</i> Norm	<i>APPI</i>	Rank
巴城镇	157.00	0.84	-0.61	-1.44	-1.43	-0.73	11
淀山湖镇	63.11	0.74	-0.13	0.49	0.44	0.44	3
花桥镇	50.11	-1.12	-0.26	0.29	-0.58	-0.59	9
锦溪镇	90.69	0.83	-0.09	-0.51	-1.05	-0.37	8
开发区镇	92.67	-1.04	-0.30	0.79	-0.14	-0.30	6
陆家镇	49.16	-1.46	-0.89	0.61	0.73	-0.08	5
千灯镇	71.70	0.25	0.82	1.54	1.94	1.31	1
玉山镇	116.45	-0.64	-0.67	-0.84	-0.57	-0.63	10
张浦镇	116.27	1.03	2.51	1.08	1.14	1.29	2
周市镇	81.56	-0.92	-1.23	-1.75	0.55	-0.31	7
周庄镇	38.96	1.49	0.85	-0.26	-1.04	-0.04	4

注:Norm 为各村 *RI* 值与所有 *RI* 值的平均数的差值除以 *RI* 相对标准偏差的计算结果。

将表 2 数据(Rank)利用 Mapinfo 生成专题地图,可得到形象表示太湖流域昆山地区各乡镇农业非点源污染发生潜力大小的专题地图(见图 1)。该图清楚地反映了农业面源污染发生潜力最大的地区为千灯镇、张浦镇、淀山湖镇,这些区域也就是应加强投入需优先控制的区域。

3.2 各区域非点源污染负荷及分配情况估算

参考在太湖区域武进和常熟农田径流氮磷排放

表 1 昆山市农业非点源污染发生潜力指数

Table1 Results of *APPI* in Kunshan city

名称	面积/km ²	年径流量指数		泥沙流失量指数		化肥使用量指数		人畜排放量指数	
		<i>RI</i> /mm	Norm	<i>SPI</i> /t·km ⁻² ·a ⁻¹	Norm	<i>CUI</i> /kg·a ⁻¹ ·km ⁻²	Norm	<i>PALI</i> /kg·a ⁻¹ ·km ⁻²	Norm
巴城镇	157.00	236.23	0.84	0.04	-0.61	0.47	-1.44	2 507.44	-1.43
淀山湖	63.11	230.30	0.74	0.05	-0.13	0.94	0.49	5 211.16	0.44
花桥镇	50.11	124.60	-1.12	0.04	-0.26	0.89	0.29	3 748.68	-0.58
锦溪镇	90.69	235.28	0.83	0.05	-0.09	0.69	-0.51	3 065.77	-1.05
开发区	92.67	129.31	-1.04	0.04	-0.30	1.01	0.79	4 375.56	-0.14
陆家镇	49.16	105.01	-1.46	0.03	-0.89	0.97	0.61	5 639.11	0.73
千灯镇	71.70	202.44	0.25	0.07	0.82	1.19	1.54	7 394.71	1.94
玉山镇	116.45	151.83	-0.64	0.03	-0.67	0.61	-0.84	3 763.24	-0.57
张浦镇	116.27	246.74	1.03	0.11	2.51	1.08	1.08	6 223.68	1.14
周市镇	81.56	135.78	-0.92	0.02	-1.23	0.39	-1.75	5 381.81	0.55
周庄镇	38.96	273.22	1.49	0.07	0.85	0.76	-0.26	3 079.48	-1.04

注:Norm 为各村 *RI* 值与所有 *RI* 值的平均数的差值除以 *RI* 相对标准偏差的计算结果。

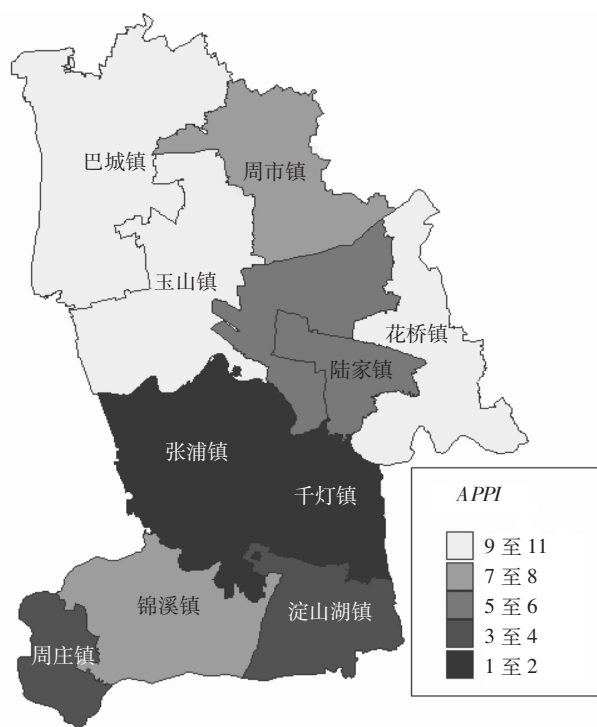


图 1 昆山市农业非点源污染发生潜力大小示意图

Figure 1 The map of APPI in Kunshan city

试验结果^[15,22]及昆山市各乡镇城镇居民和农村居民人口数量、畜禽养殖量和氮磷排放系数等,计算出昆山市各乡镇各种类型污染源单位负荷,见表 3。全年农田氮、磷排放总量分别为 4.13×10^5 kg、 1.65×10^4 kg,农村居民全年排放氮、磷总量分别为 1.36×10^6 kg、 8×10^4 kg,城镇居民全年排放氮、磷总量分别为 1.16×10^6 kg、 2.01×10^5 kg,畜禽养殖全年氮、磷排放量分别为 9.85×10^5 kg、 3.27×10^5 kg。在只考虑这 4 种主要非点源污染

源的情况下,可以计算出其各自污染负荷所占比例,结果如图 2。

从图 2 可见,农村生活污水排放是昆山非点源氮排放的最大来源,占总排放量的 34.6%,其次是畜禽养殖;对磷素排放而言,畜禽养殖占的比例最大,达 51.5%,城镇生活污水排放为第二位(31.7%)。从氮磷总体排放来看,农村生活污水排放占的份额最大(31.7%),农田氮磷排放所占比例最小,为 9.4%。这主要是由于昆山是一个工业发达城市,农田面积较少,故其对非点源氮磷排放贡献较小。因此在控制农业非点源氮污染时,农村生活污水的排放应作为工作的重点,而对于控制磷素排放,对畜禽养殖的排放控制应给予高度重视。

从表 3 可以看出,千灯镇、张浦镇和陆家镇单位负荷分别为 $8\,013.43$ 、 $6\,860.23$ 和 $6\,154.21$ $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,位列昆山市各乡镇单位负荷的前 3 位,前 2 位次序和 APPI 指数排序相同,说明千灯镇和张浦镇为昆山市非点源污染高风险区域,也就是应优先控制的区域。而 APPI 指数排序的第 3 位淀山湖镇在负荷估算中列第 4 位,表明 APPI 系统应用于县域范围非点源污染评价有一定的推广价值,同时也提示该模型参数和指数权重等还需进一步校准、完善。

将上述 4 种主要非点源污染源利用 Mapinfo 生成专题地图(见图 3)。从该图可以看出昆山市各个乡镇中农村人口氮磷排放量及畜禽养殖氮磷排放量占总量的比例较高,而在优先控制的千灯镇和张浦镇,畜禽养殖排放量所占比例分别为 39.8% 和 33.0%,说明在污染较重的地区,畜禽养殖业是造成污

表 3 昆山各类型非点源污染负荷估算

Table 3 Estimation of ANPS pollution from different sources in Kunshan city

名称	氮排放量/ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$				磷排放量/ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$				单位负荷氮磷排放量/ $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
	城市人口	农村人口	农田	畜禽	城市人口	农村人口	农田	畜禽	
巴城镇	67 853	166 827	43 507	98 875	11 732	11 077	1 742	37 311	2 795.65
淀山湖	97 224	76 005	34 711	97 118	16 810	5 046	1 389	36 676	5 783.19
花桥镇	46 044	108 490	28 838	13 183	7 961	7 203	1 154	4 969	4 347.21
锦溪镇	41 805	128 341	40 640	66 919	7 228	8 521	1 626	25 225	3 531.82
开发区	103 197	149 242	52 774	89 778	17 843	9 909	2 113	35 519	4 967.84
陆家镇	134 283	76 565	24 347	31 632	23 217	5 084	975	6 441	6 154.21
千灯镇	124 231	146 380	42 653	172 367	21 479	9 719	1 709	56 029	8 013.43
玉山镇	168 249	131 038	40 030	79 749	29 090	8 700	1 603	21 408	4 120.76
张浦镇	221 858	187 811	71 162	192 307	38 359	12 470	2 849	70 829	6 860.23
周市镇	140 164	111 104	17 173	129 109	24 234	7 377	688	26 957	5 600.80
周庄镇	19 307	73 349	17 079	13 882	3 338	4 870	684	5 233	3 535.41

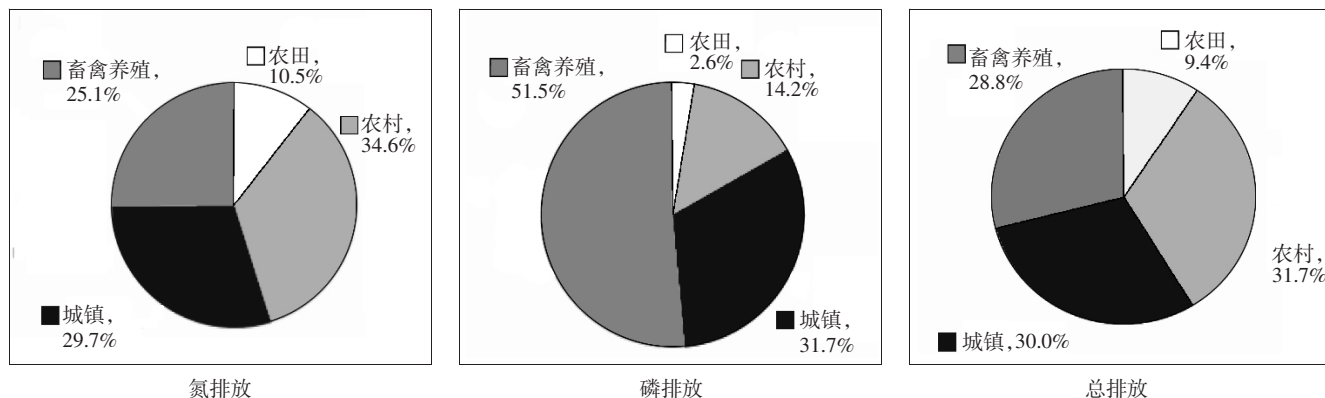


图 2 各种类型农业非点源污染所占比例示意图

Figure 2 Distribution of N and P pollutants from different sources

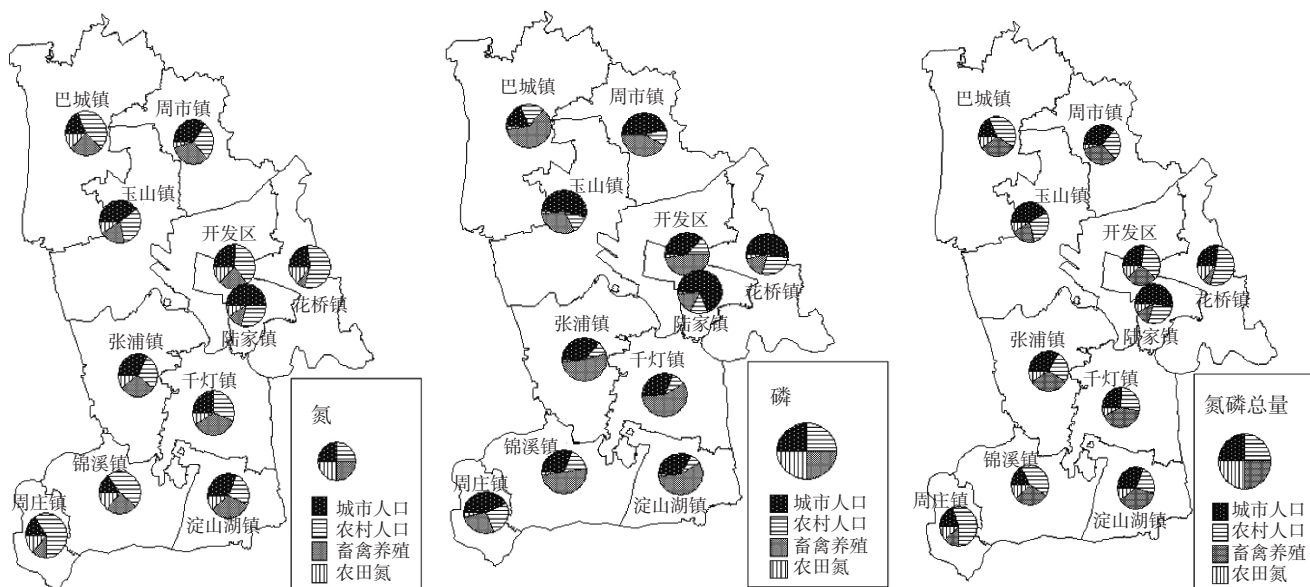


图 3 各乡镇各类型非点源污染负荷所占比例示意图

Figure 3 Distribution of N and P pollutants from different sources in each town

染的重要原因。

4 结论

采用农业非点源污染发生潜力的指数系统 *APPI* 来识别昆山各乡镇的污染发生潜力, 结果表明千灯镇、张浦镇和淀山湖镇是非点源污染发生高风险区域, 应优先控制和治理。

昆山市非点源污染排放负荷及分配情况为: 农田氮磷排放总量约为 $4.30 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 农村居民氮磷排放总量约为 $1.44 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 城镇居民氮磷排放总量约为 $1.36 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 畜禽氮磷排放总量约为 $1.31 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 总排放量约为 $4.54 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。畜禽养殖占非点源污染总量的 28.8%, 在发生潜力最大的千灯镇

为 39.8%, 表明畜禽养殖业已是造成非点源污染的重要原因。

千灯镇、张浦镇和陆家镇单位负荷位列昆山市各乡镇的前 3 位, 前 2 位次序和 *APPI* 指数排序相同, 但第 3 位次序不同, 表明 *APPI* 系统应用于昆山市非点源污染评价基本符合现实状况, 在县域范围有一定的推广价值, 同时也提示该模型参数和指数权重等还需进一步校准、完善。

参考文献:

- [1] 金相灿, 叶 春, 颜昌宙, 等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 1-5.
JIN Xiang-can, YE Chun, YAN Chang-zhou, et al. Comprehensive

- treatment plan for key-polluted regions of Lake Taihu[J]. *Research of Environmental Science*, 1999, 12(5):1-5.
- [2] 吴炳方. 水田植物营养素的流失和控制措施[J]. 环境科学, 1991, 12(3):88-91.
- WU Bing-fang. Plant nutrient loss by runoff in paddy field and its control measure[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1991, 12(3):88-91.
- [3] Coote D R, MacDonald E M, Dickinson W T, et al. Agriculture and water quality in the Canadian Great Lakes Basin I. Representative agricultural watersheds[J]. *Environ Qual*, 1982, 11:473-481.
- [4] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3):291-299.
- QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3):291-299.
- [5] 马立珊, 汪祖强. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):39-47.
- MA Li-shan, WANG Zu-qiang. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu lake, Jiangsu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(1):39-47.
- [6] 吕耀. 苏南太湖流域农业非点源污染及农业可持续发展战略[J]. 环境科学动态, 1998(2):1-4.
- LU Yao. Non-point sources pollution and strategies of sustainable agricultural development in Taihu region[J]. *Environmental Science Trends*, 1998(2):1-4.
- [7] 王小治, 高人, 朱建国, 等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5):600-604.
- WANG Xiao-zhi, GAO Ren, ZHU Jian-guo, et al. Study on nitrogen loss via runoff and leaching from soil added different urea types with monolith lysimeters[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5):600-604.
- [8] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):59-63.
- LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63.
- [9] 邱卫国, 唐浩, 王超. 水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):740-744.
- QIU Wei-guo, TANG Hao, WANG Chao. Rule of lose of nitrogen in the surface water of rice fields and the control technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):740-744.
- [10] 高超, 张桃林. 农业非点源磷污染对水体富营养化的影响及对策[J]. 湖泊科学, 1999, 11(4):369-373.
- GAO Chao, ZHANG Tao-lin. Contribution of agricultural phosphorus losses to eutrophication of waters and its controlling strategies[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(4):369-373.
- [11] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1):66-71.
- BAO Quan-sheng, WANG Hua-dong. The research and prospect on Non-point source pollution of water environment in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(1):66-71.
- [12] Capenter S R, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecology*, 1998, 8(3):559-560.
- [13] Stevens R G, Sobecki T M, Spofford T L. Using the phosphorus assessment tool in the field[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4):487-492.
- [14] Guo H Y, Wang X R, Zhu J G. Quantification and index of non point sources pollution of Taihu Lake Region with GIS[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26:147-156.
- [15] Guo H Y, Zhu J G, Wang X R, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emission from paddy field in Taihu region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26:209-219.
- [16] 周徐海, 王宁, 郭红岩, 等. 农业非点源污染潜力指数系统 (APPI) 在太湖典型区域的应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):1029-1034.
- ZHOU Xu-hai, WANG Ning, GUO Hong-yan, et al. Preliminary application of agricultural non-point source pollution potential index in typical area of Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):1029-1034.
- [17] Bonsznay M. Generalization of SCS curve number method[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1989, 115(1):139-144.
- [18] Wischmeier W H, et al. A soil erodibility nomograph farm land and construction sites[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26:189-193.
- [19] Williams J R, Renard K G, Dyke, P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5):381-383.
- [20] 陈克平, 宁大同. 基于 GIS 非点源污染模型的地形因子分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1997, 33(2):281-284.
- CHEN Ke-ping, NING Da-tong. Gis-based non-point source pollution and terrain analysis on the topographic factor[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 1997, 33(2):281-284.
- [21] 全国主要湖泊、水库富营养化调查研究课题组. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1987:126-127.
- Nation Group for Lake and Reservoir Eutrophication Survey. Criterion of Lake Eutrophication Survey (Second Edition)[M]. Beijing: Environment Science Press of China, 1987:126-127.
- [22] Environmental Resources Research Institute. Evaluation of agricultural nonpoint pollution in Pennsylvania using a geographic information system[R]. October 1991.
- [23] 王小治, 高人, 钱晓晴, 等. 利用大型径流场研究太湖地区稻季氮素的径流排放[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):831-835.
- WANG Xiao-zhi, GAO Ren, QIAN Xiao-qing, et al. Nitrogen loss via runoff from paddy field using the large catchment area in TaiHu Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):831-835.