文章编号:1673-9469(2022)02-0086-06 DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.013

海河流域邯郸境内农业非点源污染估算与解析

齐拴旺[1],王自群[2],邢红霞[3],高五洲[3],马保国[1*]

(1.河北工程大学 水利水电学院,河北 邯郸 056000; 2.邯郸市大名县农业农村局,河北 邯郸 056900;
3.邯郸市永年区农业农村局,河北 邯郸 057150)

摘要:为了准确把握海河流域邯郸境内农业非点源污染现状,采用输出系数法、等标污染负荷法、ArcGIS技术和系统聚类法对邯郸各县进行污染估算和系统解析。2019年邯郸市农业非点源污染物化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮(NH_3-N)排放量分别为58 396、6 046、1 348和4 669 t,COD污染物排放量最大。等标污染负荷评价显示总氮和总磷是主要污染物,负荷比分别为29.67%和33.08%。畜禽养殖源和化肥流失源是主要污染来源,负荷比分别为41.97%和38.72%,化肥流失污染是TP主要贡献者,畜禽养殖污染是NH_3-N主要贡献者,各污染源对COD和TN的贡献率较为平均。将邯郸市农业非点源污染划分为6种污染类型,确定严格监管区并提出相应治理措施,为未来综合治理提供参考和指导。

关键词:输出系数法;等标污染强度;ArcGIS;聚类分析;非点源污染

中图分类号:TG333.17 **文献标识码**:A

Estimation and Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution in Handan of Haihe River Basin

QI Shuanwang[1], WANG Ziqun[2], XING Hongxia[3], GAO Wuzhou[3], MA Baoguo[1*]

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056000, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of DaMing County, Handan, Hebei 056900, China; 3. Agricultural and Rural Bureau of YongNian District, Handan, Hebei 057150, China)

Abstract: In order to accurately grasp the current situation of agricultural non-point source pollution in Handan of Haihe River Basin, this paper used the output coefficient method, equal standard pollution load method, and ArcGIS technology and system clustering method to estimate and analyze the pollution of counties of Handan city. In 2019, the chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and ammonia nitrogen (NH_3-N) of pollutants in Handan city were 58396t, 6046t, 1348t and 4669t respectively, and the COD pollutants were the largest. The equivalent pollution load evaluation showed that TN and TP were the main pollutants, and the load ratios were 29.67% and 33.08%, respectively. Livestock and poultry breeding source and fertilizer loss source were the main pollution sources, and the load ratios were 41.97% and 38.72%, respectively. The fertilizer loss pollution was the main contributor to TP while the livestock and poultry breeding pollution was the main contributor to NH_3-N, and the contribution rates of each pollution source to COD and TN were relatively average. The agricultural non-point source pollution in Handan city was divided into six pollution types, the strict supervision area was determined, and the corresponding treatment measures were put forward so as to provide a reference and guidance for comprehensive treatment in the future.

Key words: hydrologic analysis method; equal standard pollution intensity; ArcGIS; cluster analysis;

收稿日期:2021-09-06

基金项目:河北省科学技术研究与发展计划资助项目(12220802D)

作者简介:齐拴旺(1995-),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事水资源综合利用及保护研究。

*通讯作者:马保国(1966-),男,河北邯郸人,博士,教授,主要从事水资源高效利用、环境生态修复研究。

non-point source pollution

目前,在我国环境污染方面,农业的贡献率已超过工业。第二次全国污染源普查显示[1],2017年中国农业污染源(包括农村生活源)中 COD、TN 和 TP 的排放量分别占当年各污染物排放总量的73%、61%和 79%,远高于工业污染,对我国水环境影响日益显著。美国、欧洲国家的研究已经表明,影响水环境的重要原因是非点源污染,尤其是农业非点源污染[2-4]。2015 年以来,国家相关部委密集出台了一系列规划和文件[5],开启了农业非点源污染防控攻坚战。

农业非点源污染源多样、分散且隐蔽,污染发生和传播具有随机性和复杂性,不像点源污染一样有明确的排污口,因此很难准确的监测和定量计算。近年来,农业非点源污染负荷估算有很多研究[3,6-8],可分为模型法和经验系数法两大类。Zhu 等[9]采用 ITO3dE 模型和 GIS 耦合对重庆市非点源污染进行分析,冯麟宇等[10]采用 SWAT 模型对泗合水流域非点源污染进行解析,通常模型法需要高基础数据,所涉及的参数很难校准和验证。而经验系数法相对简单,参数少,估算结果具有一定准确性。宋嘉等[11]采用经验系数法对丹江流域陕西段农业非点源污染负荷估算,Tao 等[12]基于输出系数法对白洋淀流域潜在农业非点源污染估算 TN、TP、COD 和 NH_3-N 的排放量。

本文以低成本、快速简单,保证一定精度的角度,采用输出系数法估算农业非点源污染,利用等标污染负荷法对邯郸市农业非点源污染进行评价和解析,通过 ArcGIS 技术对研究区进行污染风险等级划分,使用聚类法将研究区污染类型进行区域划分,确定研究区内污染风险高的地区为严格监管区,为未来农业非点源污染防控提供参考和指导。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

邯郸位于河北省南端,与山东、河南和山西三省接壤,地处华北平原,海河流域南部。邯郸地势西部高东部低,海拔最高 1 898.7 m,最低 32.7 m,西部多为山区,东部为平原。邯郸市属暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨、热和光条件好,全年无霜期 200 d,年日照 2 557 h,年平均降雨 539.4 mm,年平均气温 13.5 ℃,是河北省重要的农作物产区。

1.2　数据来源

研究中所用基础数据包括农业人口、猪、羊、牛和家禽的数量、化肥施用量和降雨量(表 1),数

表 1 各区县基础数据

Tab. 1 Basic data of districts and counties

县区名	面积/km^2	农业人口	畜禽养殖/头			旱地面积/km^2	水田面积/km^2	化肥/t		
			猪	牛	家禽			氮肥	磷肥	复合肥
武安市	1 818	390 435	901 500	27 800	2 395 400	772	0	6 514	2 438	3 419
鸡泽县	336	156 560	197 700	5 700	4 185 200	263	0	1 781	37	17 746
邱县	449	114 970	154 900	9 800	4 699 800	373	0	7 630	2 415	8 147
曲周县	677	236 840	297 600	15 700	5 421 200	562	0	8 193	1 210	34 842
馆陶县	453	160 309	289 600	10 300	10 236 700	342	0	8 907	2 595	8 014
涉县	1 499	158 169	111 600	8 500	2 552 300	444	4	2 559	988	3 127
广平县	314	140 509	95 400	1 200	1 491 700	260	0	6 618	3 439	2 392
成安县	481	186 542	314 600	9 500	3 141 500	380	0	18 862	6 485	12 799
魏县	864	391 343	379 700	9 800	2 212 600	648	0	11 957	4 756	22 354
磁县	716	204 389	209 500	8 800	5 009 200	403	0	3 421	130	9 359
临漳县	742	322 508	368 400	8 400	4 965 000	579	0	19 440	12 837	8 281
大名县	1 053	403 145	527 600	35 900	6 275 400	815	0	10 469	5 589	21 021
丛台区	402	71 589	8 600	100	470 600	247	1	21	7	793
复兴区	250	26 218	6 800	200	50 200	164	0	218	153	243
邯山区	430	66 816	24 500	4 500	78 700	298	0	546	27	7 439
峰峰矿区	321	117 016	198 600	1 600	2 248 400	186	0	2 608	869	1 408
永年区	761	447 239	325 400	18 100	8 847 600	533	0	3 409	440	36 270
肥乡区	503	182 949	320 300	18 600	3 914 600	414	0	4 723	1 304	31 945

据来源于《2019年邯郸市农业统计年鉴》和2014—2019年《水资源公报》以及问卷调查和实地调研,邯郸市数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所,精度为30 m。基于DEM数据,通过GIS导出土地利用面积和山区占比数据。调查以县(市、区)为基本对象。

1.3 研究方法

1.3.1 ArcGIS水文分析法

DEM地表水文分析是指利用ArcGIS中水文分析工具提取河流流向、汇点(洼地)、汇流累积量(阈值设置为400 000较为合适)、分水岭、河流网络以及流域分割等[13-14]。

1.3.2 各污染源输出系数法

采用输出系数法估算各污染源污染物排放量,估算公式如表2。

表2 各污染源污染物排放量估算公式

Tab. 2 Estimation formula of pollutant emission from various pollution sources

污染源	公式	污染物 i
化肥流失	PF_i=Σ化肥i用量×i污染物流失系数 PF_{COD}=Σ耕地类型面积×径流源强系数	TN、NH_3-N、TP
畜禽养殖	PL_i=Σ养殖周期×畜禽j数量×i污染物排放系数	COD、TN、NH_3-N、TP
农村生活	PR_i=Σ农业人口×i污染物年排放系数	COD、TN、NH_3-N、TP

化肥施用量采用统计年鉴中的折纯量,TN、TP用量分别为氮肥用量+0.3倍复合肥用量+0.185倍磷肥用量、0.3倍磷肥用量+复合肥用量,NH_3-N用量为0.1倍TN用量,TN、TP、NH_3-N流失系数分别为0.2、0.15、0.2[13]。根据《全国水环境容量核定技术指南———污染源调查》,结合研究区实际情况并查阅2019年水资源公报,取旱地和水田COD流失系数分别为425.25和1 818.19 kg/(hm^2·a),其入河系数为0.05[15]。

由于缺少羊和兔的污染物流失系数,依据2003年实施的《禽畜养殖业污染物排放标准》,将羊和兔饲养量折算成猪的数量[13,16-17]。根据畜禽饲养周期来确定饲养数量为出栏量还是存栏量,入河系数为0.29。农村居民人均污染物COD、TN、NH_3-N、TP年排放系数分别取14.60、1.83、1.46和0.16 kg/a[13]。

1.3.3 等标污染负荷法

等标污染负荷法是指在相同水质标准下通过比较介质量,对研究区的非点源污染进行空间分析,见式(1):

$$L_i = \Sigma L_{ik} = \Sigma R_{ik}/C_i \quad (1)$$

式中:L_i为污染物i的总负荷,×10^6 m^3/a;C_i为污染物i的评价标准,GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅲ类水质标准,mg/L;L_{ik}为污染源k中污染物i的负荷,×10^6 m^3/a;R_{ik}为污染源k中污染物i的入河量,t/a。

由于各地区的面积不同,等标污染负荷只能反映一个地区污染物放排量的大小,无法反映一个地区污染强度大小,引入等标污染强度指标[18],以便于全面评价农业非点源污染,见式(2):

$$T_i = \Sigma T_{ik} = \Sigma L_{ik}/A_i \quad (2)$$

式中:A_i为污染物所在地面积,km^2;T_{ik}为污染源k中污染物i的污染强度,×10^6 m^3/(km^2·a);T_i为污染物i的污染强度,×10^6 m^3/(km^2·a)。

等标负荷比,见式(3):

$$W_{ik} = L_{ik}/L_i \times 100\% \quad (3)$$

等标污染强度比,见式(4):

$$S_{ik} = T_{ik}/T_i \times 100\% \quad (4)$$

1.3.4 聚类分析法

本研究针对邯郸各县的化肥流失、畜禽养殖和农村生活等三个污染源的等标污染强度采用SPSS中系统聚类进行聚类分析,对邯郸市非点源污染进行污染类型划分。

2 结果与讨论

2.1 污染物排放量估算

2019年海河流域邯郸境内各县区化肥流失、畜禽养殖和农村生活污染源中COD、TN、TP和NH_3-N污染物排放量采用输出系数法计算结果(表3)。其中污染物排放量从大到小排序:COD>TN>NH_3-N>TP,COD排放量最大,占比高达82.88%。这与胡芸芸等[2]研究沱江流域时结果相似。本文估算结果与南方地区的研究有些偏差,是因为南方地区降雨充足,污染物流失系数大。TP排放量主要源于化肥流失,占比达68.81%,COD、TN和NH_3-N排放量主要源于畜禽养殖,占比分别为42.00%、44.51%和63.69%。化肥流失、畜禽养殖和农村生活等污染源贡献率分别为30.76%、43.32%和25.91%。朱梅等[15]对2007年海河流域非点源污染进行了估算,其中2007年河

北省农业非点源污染物 COD、TN、TP 排放量分别为 343 559、43 583、4 634 t。与本研究在单位耕地面积非点源污染排放量在同一量级上,估算结果具有一定合理性。

2.2　等标污染法评价

2.2.1　污染物等标污染负荷特征

“有河皆干,有水皆污”是海河流域的真实写照,是中国水污染最严重的流域,邯郸市是海河流域非点源污染严重的八大城市之一[15]。由表 4 知,2019 年海河流域邯郸农业非点源污染等标排放量由大到小排序为:TP>TN>NH_3-N>COD,等标污染负荷比分别为 33.08%、29.67%、22.92% 和 14.33%,可知 TN 和 TP 污染物是主要污染物,这与张梦婕等[19]对邯郸市面源污染调查与估算结果相似。同样 Tao 等[12]研究白洋淀流域时认为农业面源 TN 为主要潜在污染物。

邯郸市农业非点源污染主要来源于畜禽养殖和化肥流失,负荷比分别为 41.97%、38.72%。化肥流失污染对 TP 贡献率、畜禽养殖污染对 NH_3-N 贡献率均超过总量一半以上,各污染源对 COD 和 TN 的贡献率较为平均。张宝中等[20]在研究漳河上游流域时得出相似结论。同时,王磊等[21]研究表明京津冀地区化肥和畜禽粪尿高污染地区分布广泛。因此在海河流域农业非点源防控中应重点关注畜禽养殖和化肥流失污染源以及 TN 和 TP 的排放。

2.2.2　不同污染物及污染源贡献率空间分布特征

利用 ArcGIS 中反距离权重插值法以各县区中心点的 COD、TN、TP 和 NH_3-N 等标污染强度值进行插值绘制各污染物等标污染强度空间分布图,再叠加各县区化肥流失、畜禽养殖和农村生活污染源等标污染强度比 3D 柱状图。通过图 1 可以看出,COD、TN 和 TP 等标污染强度分布特征相似,均有明显的分界线,整体呈现出中部和西部污染轻东部污染严重现象。通过图 1(a)可知,邯郸中部地区 COD 污染主要源于化肥流失,其他县区(除涉县和广平县)COD 污染主要源于畜禽养殖。图 1(b)可知,西部山区各县 TN 污染主要源于畜禽养殖,中部地区 TN 污染主要源于农村生活,东部平原县区 TN 污染主要源于化肥流失。图 1(c)可知,西部山区 TP 污染主要源于化肥流失和畜禽养殖,中部和东部县区 TP 污染主要源于化肥流失。图 1(d)可知,NH_3-N 污染严重的地区是邯郸东北部,主要源于畜禽养殖,各县区化肥流失对 NH_3-N 污染贡献率较低。

2.3　海河流域邯郸境内农业非点源污染类型划分及控制对策

利用 SPSS 中系统聚类对污染源化肥流失、畜禽养殖和农村生活等标污染强度比进行聚类分析,将邯郸市非点源污染分为六种类型(图 2)。第Ⅰ类为综合低污染型,该类型总污染平均贡献率为 1.30%。第Ⅱ类为禽畜养殖主导型,该类型总污染平均贡献率为 3.77%,其中畜禽养殖平均贡献率为 53.89%。第Ⅲ类为化肥流失主导型,该类型总污染平均贡献率为 5.99%,其中化肥流失平均贡献率为 49.04%。第Ⅳ类为化肥流失源-畜禽养殖源复合主导型,该类型总污染平均贡献率为 6.65%,其中化肥流失和畜禽养殖平均贡献率分别

表 3　各县区不同污染源 COD、TN、TP 和 NH_3-N 污染物排放量

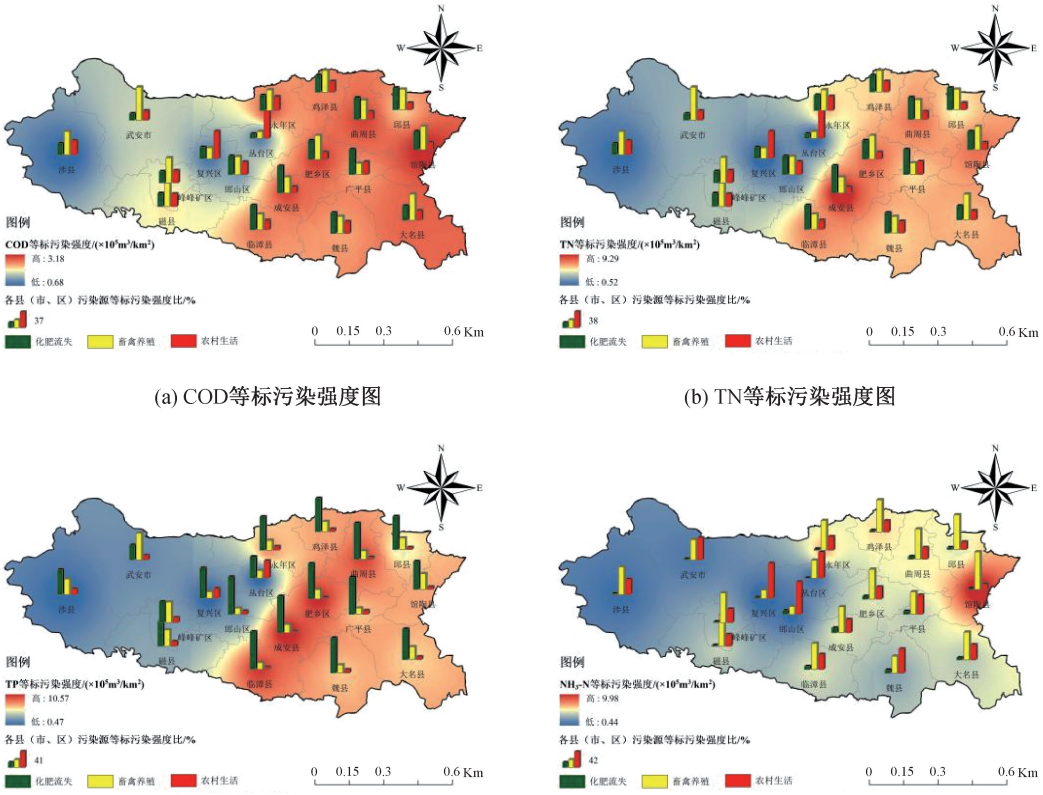
Tab. 3　Emissions of COD, TN, TP and NH_3-N pollutants from different pollution sources in each county

污染源	污染排放量/($\times10^3$ t)				贡献率/%			
	COD	TN	TP	NH3-N	COD	TN	TP	NH3-N
化肥流失	18.42	2.12	0.93	0.21	31.54	35.05	68.87	4.54
畜禽养殖	24.52	2.69	0.33	2.98	42.00	44.51	24.54	63.69
农村生活	15.45	1.24	0.09	1.48	26.46	20.44	6.60	31.77
合计	58.39	6.05	1.35	4.67	100.00	100.00	100.00	100.00

表 4　各县区不同污染源 COD、TN、TP 和 NH_3-N 污染物等标排放量及贡献率

Tab. 4　Contribution rates of COD, TN, TP and NH_3-N pollutants from different pollution sources in each county

污染源	等标污染排放量/($\times10^8$ $m^3\cdot a^{-1}$)				贡献率/%			
	COD	TN	TP	NH3-N	COD	TN	TP	NH3-N
化肥流失	9.21	21.19	46.38	2.12	31.54	35.05	68.81	4.54
畜禽养殖	12.26	26.91	16.60	29.74	42.00	44.51	24.63	63.69
农村生活	77.73	12.36	4.42	14.83	26.46	20.45	6.56	31.77
合计	29.20	60.46	67.40	46.69	100.00	100.00	100.00	100.00



(a) COD等标污染强度图 (b) TN等标污染强度图

(c) TP等标污染强度图 (d) NH_3-N等标污染强度图

图1 不同污染源等标污染强度比空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of different pollution sources

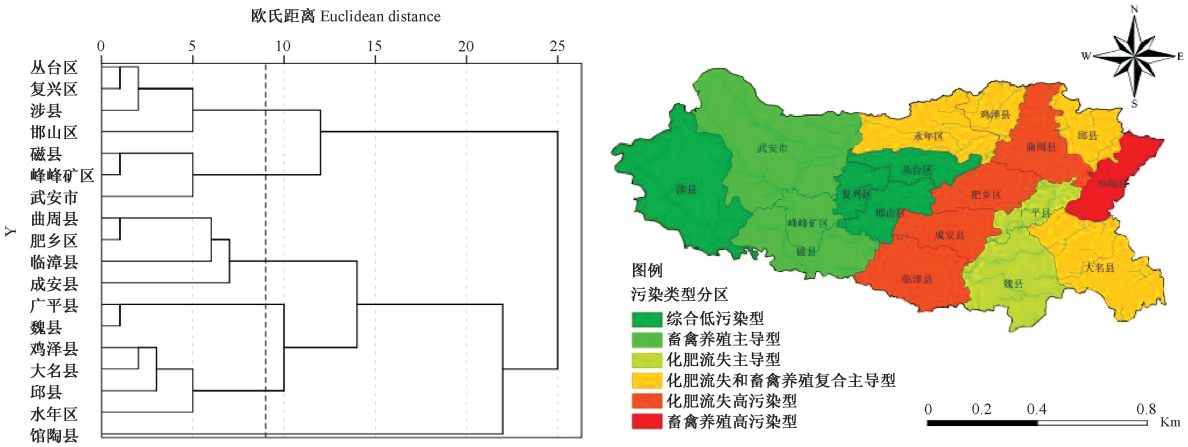


图2 各区县的聚类树形图及污染类型分区图

Fig. 2 Cluster tree and pollution type zoning map of each district and county

为37.54%和44.33%。第Ⅴ类为化肥流失高污染型,该类型总污染平均贡献率为8.76%,其中化肥流失平均贡献率为50.08%。第Ⅵ类为畜禽养殖高污染型,该类型总污染平均贡献率为9.45%,其中畜禽养殖平均贡献率为58.82%。

目前,治理农业非点源污染的思路为"控源-阻输-治汇"[2]。对于Ⅰ类区,应当采用选择性监控措施。对于Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ等主导型类区在治理过程中应当采取控源措施,根据主要污染来源进行因地制宜的选择对策。对于Ⅴ类区和Ⅵ类区,该类型县区属于高污染地区,确定为严格监管区,应当采取控源-阻输-治汇综合治理。Ⅴ类区化肥流失污染严重,该类型应当优化种植业结构,降低化肥用量,减少蔬菜、大蒜等高肥种植作物,采用水肥

一体化提高肥料利用率。Ⅵ类区仅包括馆陶县,鸡、鸭等家禽养殖数量大,应当强化畜禽粪污处理和资源化利用,配合节水技术降低污水排放,合理布置养殖厂,建造沼气池,规模化养殖。

3　结论

1)估算 2019 年海河流域邯郸境内农业非点源污染物总排放量为 7.04×10^4t,其中 COD 污染物贡献率最大,COD、TN 和 NH_3-N 排放量主要源于畜禽养殖,TP 排放量主要源于化肥流失。相比其他污染源,畜禽养殖源对农业非点源污染贡献率最大。

2)等标污染负荷评价显示 TN 和 TP 为邯郸市非点源污染主要污染物,畜禽养殖(贡献率 41.97%)和化肥流失(贡献率 38.72%)是主要污染源。在空间上,各污染物等标污染强度分布图显示中部、西部污染风险小东部污染风险大。

3)对污染源化肥流失、畜禽养殖和农村生活等标污染强度比进行聚类分析,可将邯郸市农业非点源污染划分为 6 种污染类型,确定研究区内污染风险高的地区(化肥流失高污染型和畜禽养殖高污染型)为严格监管区,为邯郸市农业非点源污染综合治理提供参考和指导。

参考文献:

[1]刘 涛,崔永正,李继霞. 基于水污染视角的中国农业生态用水效率及其影响因素[J]. 水土保持研究,2021,28(5):301-307.

[2]胡芸芸,王永东,李廷轩,等. 沱江流域农业面源污染排放特征解析[J]. 中国农业科学,2015,48(18):3654-3665.

[3]ONGLEY E D,XIAOLAN Z,TAO Y. Current Status of Agricultural and Rural Non-Point Source Pollution Assessment in China[J]. Environmental Pollution,2010,158(5):1159-1168.

[4]卢少勇,张 萍,潘成荣,等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. 中国环境科学,2017,37(6):2278-2286.

[5]朱哲江,杨艳,杨 硕. 河北省农业面源污染现状分析与防治举措研究[J]. 河北农业科学,2016,20(5):90-93.

[6]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.

[7]QIU W,ZHONG Z,LI Z. Agricultural Non-point Source Pollution in China:Evaluation,Convergence Characteristics and Spatial Effects[J]. Chinese Geographical Science,2021,31(3):571-584.

[8]BAI J,LI Y,SUN W. Research on Emission Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollution Based on Kuznets Fitting Curve[J]. Arabian Journal of Geosciences,2021,14(14):1-9.

[9]ZHU K W,YANG Z,HUANG L,et al. Coupling ITO3dE Model and GIS for Spatiotemporal Evolution Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Risks in Chongqing in China[J]. Scientific Reports,2021,11(1):1-4.

[10]冯麒宇,胡海英,刘俊达. 有限资料条件下基于 SWAT 模型的泗合水流域非点源污染模拟[J]. 水土保持研究,2021,28(5):128-133.

[11]宋 嘉,李怀恩,李家科,等. 丹江流域陕西段农业非点源污染负荷估算[J]. 中国农村水利水电,2020(11):67-72.

[12]TAO Y,LIU J,GUAN X,et al. Estimation of Potential Agricultural Non-point Source Pollution for Baiyangdian Basin,China,under Different Environment Protection Policies[J]. PLOS ONE,2020,15(9):e0239006.

[13]张昊天,周忠发,刘贤梅,等. 基于 GIS 的红枫湖流域平坝区境内农业非点源污染估算[J]. 环境工程,2019,37(3):174-179.

[14]李 萌,黎小东,敖天其,等. 基于 GIS 技术的农村非点源污染分析——以渠县境内巴河州河汇流断面上游区域为例[J]. 人民长江,2017,48(20):21-27.

[15]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.

[16]孟凡祥,赵 倩,马 建,等. 农业非点源污染负荷及现状评价——以大苏河地区为例[J]. 农业环境科学学报,2010,29(S1):145-150.

[17]麻德明,石洪华,丰爱平. 基于流域单元的海湾农业非点源污染负荷估算——以莱州湾为例[J]. 生态学报,2014,34(1):173-181.

[18]陈玉东,陈 梅,张龙江,等. 基于 GIS 的龙墩水库典型小流域面源污染氮磷负荷研究[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(4):492-499.

[19]张梦婕,邢威州. 邯郸市农业面污染源调查与分析估算[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(4):72-74.

[20]张宝中. 漳河上游流域农业非点源氮污染负荷估算[D]. 邯郸:河北工程大学,2017.

[21]王 磊,香 宝,苏本营,等. 京津冀地区农业面源污染风险时空差异研究[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1254-1265.

(责任编辑　周雪梅)