

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.

TANG Xiao-yang, TANG De-shan, LU Jia-hui, et al. Source apportionment of agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2242–2251.

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善*, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

(河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 农业面源污染是水体污染的重要污染源。为明确汉江流域农业面源污染负荷及其空间分布, 运用输出系数法, 对2015年汉江流域范围内的13个地市的农业面源污染总氮(TN)、总磷(TP)污染负荷量进行估算, 采用等标污染负荷法进行污染评价, 再运用GIS软件分析农业面源污染负荷空间分布格局, 通过快速聚类法划分汉江流域各地市的农业面源污染类型。结果表明: 2015年汉江流域的TN、TP污染负荷量分别为179 127、26 975 t, 相应的等标污染负荷量为 2.26×10^{11} 、 $1.68 \times 10^{11} \text{ m}^3$; 汉江流域农业面源污染TN等标污染负荷贡献率最大的污染源是农田化肥, TP等标污染负荷贡献率最大的污染源是畜禽养殖; TN、TP的等标污染负荷在空间分布上有很强的一致性, 但各地市的等标污染负荷仍存在差异, 等标污染高负荷区集中在流域中游, TN、TP的等标污染负荷最大值均出现在流域中游的南阳市; 基于快速聚类结果确定汉江流域主要有6种污染类型。汉江流域的农业面源氮磷污染物污染负荷和空间分布研究为汉江流域面源污染的防治提供了决策参考。

关键词: 汉江流域; 农业面源污染; 等标污染负荷; 空间分布

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2242-10 doi:10.11654/jaes.2017-1751

Source apportionment of agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin

TANG Xiao-yang, TANG De-shan*, LU Jia-hui, CHANG Wen-qian, TANG Xin-yue

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Agricultural nonpoint source pollution is an important type of water pollution. To clarify the agricultural nonpoint source pollution load and its spatial distribution in the Hanjiang River Basin, the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) pollution loads from agricultural nonpoint source pollution of 13 cities in the Hanjiang River Basin in 2015 were estimated according to the export coefficient model approach. Pollution evaluation was carried out using an equivalent standard pollution load method. The spatial distribution of the agricultural nonpoint source pollution load was drawn via GIS. The types of agricultural nonpoint source pollution in the cities of the Hanjiang River Basin were divided through rapid clustering. The results demonstrated that the TN and TP loads from agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin in 2015 were 179 127 and 26 975 t, respectively, and the corresponding equivalent standard pollution loads were 2.26×10^{11} and $1.68 \times 10^{11} \text{ m}^3$. In the Hanjiang River Basin, the pollution source with the largest contribution rate of TN standard pollution load was farmland fertilizer, and the pollution source with the largest contribution rate of TP standard pollution load was livestock and poultry breeding. There was a strong consistency in the spatial distribution of TN and TP standard pollution loads, but differences existed among the pollution loads of different cities. Equivalent standard pollution high load areas were concentrated in the middle of the river basin, with the highest in the city of Nanyang. Based on the rapid clustering method, the Hanjiang River Basin could be divided into six types of pollution. Study on pollution load and spatial distribution of the TN and TP from agricultural nonpoint sources pollutants provide a decision reference for the prevention and treatment of nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin.

Keywords: Hanjiang River Basin; agricultural nonpoint source pollution; equivalent standard pollution load; spatial distribution

收稿日期: 2017-12-23 录用日期: 2018-04-10

作者简介: 唐肖阳(1994—), 女, 湖北天门人, 博士研究生, 研究方向为水利水电系统规划与工程经济、水污染防治。E-mail: hhtxy@163.com

*通信作者: 唐德善 E-mail: tds808@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405805-04); 江苏高校优势学科建设工程

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2017YFC0405805-04); The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

随着点源污染治理力度的加强,面源污染特别是农业面源污染的严重性和防治的必要性已经引起了国内外学者和管理部门的注意。很多研究表明,面源污染已经成为水体污染的重要污染源,甚至首要污染源。据报道,美国的面源污染占污染总量的2/3,其中农业面源污染贡献率占68%~83%^[1]。荷兰的农业面源污染产生的总氮(TN)、总磷(TP)污染负荷占水环境污染总负荷的60%和40%~50%^[2]。在我国,2010年《第一次全国污染源普查公报》显示,农业面源污染是总氮、总磷排放的主要来源,其排放量分别为270.46万t和28.47万t,分别占排放总量的57.2%和67.4%。与点源污染相比,面源污染具有多源性、随机性、分散性、分布广、间歇性和难以监测性的特点,其治理难度大于点源污染,因此估算面源污染负荷,解析污染源具有重要意义。

目前,国内外常用的污染负荷估算方法有输出系数法^[3]、排污系数法^[4]、监测法^[5]等,污染负荷评价的方法主要有等标污染负荷法^[6]、清单法^[7]、模型法^[8]。由于缺乏与农业面源污染有关的水文和水质系统的、长期的实测数据,而输出系数法则避开了面源污染发生的复杂过程,所需参数少,操作简便,且能保证一定的精度,因此在我国面源污染研究中得到了广泛的应用。输出系数法最初由Omernik^[9]等提出,由此建立了输出系数模型。此后最为重要的进展是Johnes等^[10]在以往模型的基础上综合考虑了土地利用类型、人口和牲畜数量等因素对面源污染的影响,建立了更为完善的输出系数模型。卢少勇等^[11]利用输出系数法分析、评价了洞庭湖区农业面源污染负荷;刘菊等^[12]利用输出系数模型和生态系统服务与权衡综合评价模型估算了四川省宝兴县面源污染物总氮、总磷负荷;蔡明等^[12]采用了考虑降雨因素影响和污染物在迁移过程中损失的改进的输出系数法对渭河流域总氮负荷量进行了估算。以上研究说明了输出系数法在面源污染研究中的优越性。

汉江中上游的丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,汉江干流也是南水北调备用水源,但汉江流域内农村区域面积大,农村人口众多,土地利用强度高,水环境承载压力巨大,因此控制好汉江流域的农业面源污染是保证南水北调水质的重要任务。张军等^[13]研究发现丹汉江流域是农业非点源污染主要敏感区,随干流向南北两侧敏感性递减,许策等^[14]对汉江流域荆门段面源污染负荷时空分布与污染现状进行了分析和评价,但是目前关于汉江整个流域农业

面源污染现状的研究较少。本文以汉江流域范围的13个地市为研究对象,采用输出系数模型估算2015年汉江流域TN、TP的污染负荷,运用等标污染负荷法对TN、TP的污染负荷进行评价,运用ArcGIS软件绘制面源污染空间分布,采用快速聚类法划分污染类型,旨在为汉江流域面源污染有的放矢地防治提出数据的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

汉江发源于陕西省汉中市宁强县冢山,干流流经陕西省和湖北省,在武汉市注入长江,全长1577 km,是长江最长的支流。汉江流域分为3段,丹江口市以上江段为上游,丹江口市至钟祥市江段为中游,钟祥至汉口龙王庙江段为下游。由于农业面源污染的治理一般以行政区划为单位分区治理,故参照汉江流域的范围,选择陕西省汉中市、安康市、商洛市;河南省南阳市;湖北省十堰市、神农架林区、襄阳市、荆门市、天门市、潜江市、仙桃市、孝感市和武汉市共13个行政区为研究对象,研究区域示意图见图1。

1.2 研究方法

1.2.1 污染负荷量估算方法

本文采用输出系数法(ECM)估算汉江流域各地市TN、TP的污染负荷,公式为^[10]:

$$L_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} A_j + P \quad (1)$$

式中: L_i 为污染物 i 的负荷量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; E_{ij} 为在第 j 种土地利用类型导致的第 i 种污染物的输出系数($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)或第 j 种畜禽养殖导致的污染物 i 的输出系数[$\text{kg} \cdot \text{头}(\text{只})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]或人口因素导致的污染物 i 的输出系数($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$); A_j 为第 j 种土地利用类型的面积(hm^2)或第 j 种畜禽养殖的数量[头(只)]或人口数量(人); P 为降雨输入的污染物总量(因缺乏相关监测数据且其相对于农业面源污染物总量可忽略不计,本文不考虑此项影响), $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; n 为流域内污染源数量。

结合汉江流域的实际情况,本文的农业面源污染源主要考虑农田化肥源、畜禽养殖源和农村生活源这3大类污染源,其中农业用地类型主要考虑水田、旱田和园地3种,畜禽养殖主要考虑牛、猪、羊和家禽4种类型。

估算污染物的负荷量关键在于确定输出系数的值。影响输出系数的因素主要有地形、地貌、水文、气候、土地利用、土壤类型、植被覆盖和人类活动等,其主要获取方法有现场监测法和查阅文献法^[9]。鉴于汉

江流域无输出系数的实测结果,兹参照已有的研究成果确定输出系数的值。

Beaulac 和 Reckhow 以及 Frink 通过调查不同土地利用方式下的氮和磷输出系数的变化范围,取其平均值作为所研究区域的土地利用输出系数^[15]。因此,在

考虑了研究区域和研究年份两方面因素后,取国内不同研究区域结果的平均值作为本文的不同农业土地利用类型的输出系数取值。已有研究中的不同区域的不同农业土地利用方式下 TN、TP 的输出系数及本文的取值见表 1。

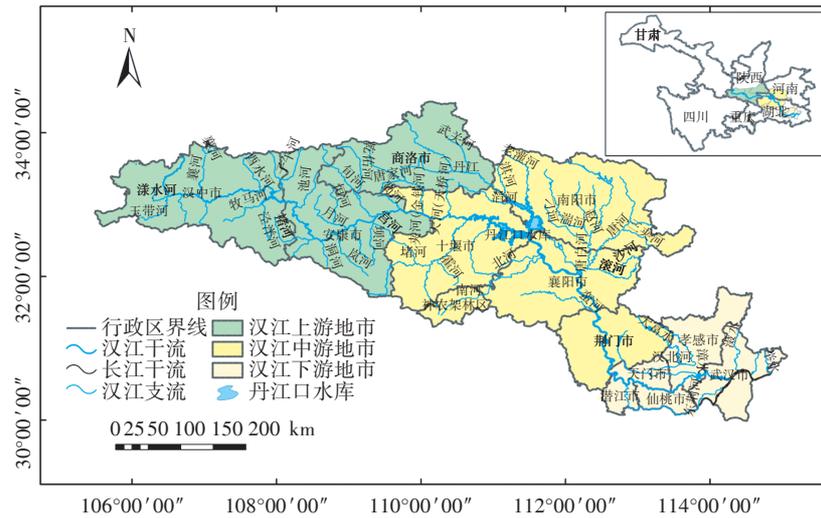


图1 研究区域示意图

Figure 1 The diagrammatic sketch of research area

表1 不同区域输出系数的分类和取值

Table 1 The export coefficient classification and value of different regions

参考文献	研究区域	研究年份	污染物	输出系数取值/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$		
				水田	旱地	园地
卢少勇等 ^[11]	洞庭湖	2014年	TN	16.97	15.62	—
			TP	1.22	1.62	—
刘增进等 ^[13]	河南省	2013年	TN	27.74	27.74	9.01
			TP	1.92	1.92	1.31
刘菊等 ^[11]	四川宝兴	2010年	TN	25.00	30.00	15.00
			TP	0.90	0.90	0.90
刘亚琼 ^[15]	北京市	2006年	TN	—	20.20	9.01
			TP	—	2.02	1.31
Ma Xiao等 ^[16]	湖北省	2007年	TN	21.40	46.30	—
			TP	4.30	1.40	—
史志华等 ^[17]	汉江中下游流域	2002年	TN	26.37	18.85	11.92
			TP	2.00	4.08	2.46
傅春等 ^[18]	鄱阳湖	2007年	TN	24.00	24.00	—
			TP	0.70	0.70	—
张静等 ^[19]	浑河流域	2007年	TN	—	29.00	—
			TP	—	0.90	—
周跃龙等 ^[20]	太湖流域	2011年	TN	18.32	18.32	—
			TP	2.56	2.56	—
本文取值	汉江流域	2015年	TN	22.83	25.56	11.24
			TP	1.94	1.79	1.50

畜禽养殖输出系数参照沈珍瑶等^[1-3]的研究成果。由于各类畜禽的养殖周期不同,当年的畜禽数量是目前研究的争议所在^[21]。牛和羊的平均饲养期一般长于一年,而猪和家禽的平均饲养期不足一年,故本文牛和羊当年的数量取为年末存栏数量,猪和家禽当年的数量取为年内出栏数量^[22]。

农村生活污染输出系数参照国家环保总局推荐的人口输出系数^[15]。汉江流域不同污染源的输出系数的分类及取值见表2。

表2 汉江流域不同污染源的输出系数的分类及取值

Table 2 Classification and value of export coefficient of different pollution sources in the Hanjiang River Basin

污染源	污染物	总氮TN		总磷TP	
		总氮TN	总磷TP	总氮TN	总磷TP
农田化肥/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	水田	22.83	1.94		
	旱地	25.56	1.79		
	园地	11.24	1.50		
畜禽养殖/kg·头(只) ⁻¹ ·a ⁻¹	牛	6.11	1.01		
	猪	0.45	0.17		
	羊	0.23	0.045		
	家禽	0.028	0.012		
农村生活/kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹	人	1.58	0.16		

1.2.2 污染负荷评价方法

为了让不同的污染物能在同一尺度上加以比较,本文采用等标污染负荷法进行污染负荷评价。某污染物或某污染源的等标污染负荷量是指单位时间内排放的含该污染物的废水的等标体积^[23]。某区域第*j*个污染源的等标污染负荷量计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{L_{ij}}{C_0} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为第*j*个污染源第*i*个污染物的等标污染负荷量,10⁶ m³·a⁻¹; L_{ij} 为第*j*个污染源第*i*个污染物的污染负荷量,t·a⁻¹; C_0 为污染物*i*评价标准值。汉江流域水质以Ⅱ、Ⅲ类为主,结合各地市的环境状况公报和水资源公报中汉江流域水质情况,汉中市、安康市、商洛市、十堰市和神农架林区的评价标准值采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类标准系列的阈浓度的下限值进行核算,其余地市采用Ⅲ类标准系列的阈浓度的下限值进行核算。(其中,Ⅱ类水下限值TN为0.5 mg·L⁻¹,TP为0.1 mg·L⁻¹;Ⅲ类水下限值TN为1 mg·L⁻¹,TP为0.2 mg·L⁻¹)。

若某区域第*j*个污染源有*n*个污染物,则该区域第*j*个污染源的等标污染负荷量 P_j 为:

$$P_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (3)$$

式中: P_j 为某区域第*j*个污染源的等标污染负荷量,m³·a⁻¹; P_{ij} 为某区域第*j*个污染源的等标污染负荷量,m³·a⁻¹。

若某区域第*i*个污染物有*m*个污染源,则该区域的第*i*个污染物等标污染负荷量 P_i 为:

$$P_i = \sum_{j=1}^m P_{ij} \quad (4)$$

式中: P_i 为某区域第*i*个污染物的等标污染负荷量,m³·a⁻¹; P_{ij} 为某区域第*i*个污染物的第*j*个污染源的等标污染负荷量,m³·a⁻¹。

若某区域有*n*个污染物、*m*个污染源,则该区域的等标污染负荷量 P 为:

$$P = \sum_{j=1}^m P_j = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (5)$$

式中: P 为某区域的等标污染负荷量,m³·a⁻¹; P_i 为某区域第*i*个污染物的等标污染负荷量,m³·a⁻¹; P_j 为某区域第*j*个污染源的等标污染负荷量,m³·a⁻¹; P_{ij} 为某区域第*j*个污染源的等标污染负荷量,m³·a⁻¹。

1.2.3 数据来源

研究主要分析汉江流域13个地市的农业面源氮磷污染,所需基础数据包括水田面积、旱地面积、园地面积、牛、猪、羊、家禽和农村人口的数量。以上基础数据来源于《2015年湖北省统计年鉴》、《2015年河南统计年鉴》、《2015年陕西统计年鉴》及2015年各地市的统计年鉴或者国民经济和社会发展统计公报。汉江流域各地市的农村常住人口、农业统计数据见表3。

2 结果与讨论

2.1 汉江流域农业面源污染负荷量估算

采用输出系数法估算了2015年汉江流域13个地市的土地利用、畜禽养殖和农村人口3大类污染源产生的TN、TP污染负荷量及负荷贡献率,计算结果见表4、表5。

2015年汉江流域的TN、TP污染负荷量分别为179 127 t, 26 975 t, TN污染负荷量是TP污染负荷量的6.64倍。在现有研究中,TN与TP的污染负荷量之比在5~9之间^[1],本文结果与已有研究结果间具有一致性。从空间分布上来看,南阳市和襄阳市的TN、TP

表3 2015年汉江流域各地市农村常住人口和农业统计数据

Table 3 The rural resident population and agricultural statistics of cities in the Hanjiang River Basin in 2015

地市	水田/万hm ²	旱地/万hm ²	园地/万hm ²	牛/万头	猪/万头	羊/万只	家禽/万只	农村常住人口/万人
汉中市	9.69	10.72	11.36	29.42	406.88	35.25	1 430.56	179.47
安康市	3.33	16.31	12.09	25.07	312.16	97.75	1 241.93	147.55
商洛市	0.19	13.17	3.20	12.72	100.77	38.53	828.00	129.66
南阳市	2.66	102.64	8.23	130.40	639.24	255.52	5 572.76	497.97
十堰市	3.85	13.71	3.86	45.45	199.55	120.01	3 126.00	246.38
神农架	0.43	0.31	0.07	0.61	5.06	3.03	31.28	1.92
襄阳市	20.66	24.73	6.13	105.27	620.44	140.49	8 317.04	294.83
荆门市	19.13	7.73	2.53	24.33	408.91	47.47	4 752.00	45.79
天门市	4.95	6.04	0.07	7.96	100.56	1.69	1 144.00	63.95
潜江市	4.14	3.08	0.15	3.34	106.40	1.95	1 676.00	44.55
仙桃市	5.78	3.25	0.11	0.91	107.35	0.41	871.00	52.44
孝感市	21.04	5.76	5.24	49.39	395.26	28.89	11 634.00	226.34
武汉市	11.74	7.90	1.65	18.73	304.04	5.38	5 247.40	243.56

表4 2015年汉江流域各地市不同污染源TN污染负荷量(t)及负荷贡献率(%)

Table 4 The pollution loads and loads contribution rate of TN of different pollution sources of cities in the Hanjiang River Basin in 2015

地市	农田化肥污染			畜禽养殖污染				农村生活污染	合计	氮负荷贡献率
	水田	旱地	园地	牛	猪	羊	家禽			
汉中市	2211	2739	1277	1798	1831	81	401	2836	13 174	7.35
安康市	760	4168	1358	1532	1405	225	348	2331	12 127	6.77
商洛市	44	3365	359	777	453	89	232	2049	7368	4.11
南阳市	608	26 235	925	7967	2877	588	1560	7868	48 628	27.15
十堰市	878	3504	434	2777	898	276	875	3893	13 535	7.56
神农架	99	79	8	37	23	7	9	30	292	0.16
襄阳市	4716	6321	688	6432	2792	323	2329	4658	28 259	15.78
荆门市	4368	1976	284	1487	1840	109	1331	723	12 118	6.77
天门市	1130	1545	8	486	453	4	320	1010	4956	2.77
潜江市	945	787	17	204	479	4	469	704	3609	2.01
仙桃市	1320	831	13	56	483	1	244	829	3777	2.11
孝感市	4802	1471	589	3018	1779	66	3258	3576	18 559	10.36
武汉市	2681	2020	185	1144	1368	12	1469	3848	12 727	7.11
合计	24 560	55 041	6145	27 715	16 680	1786	12 844	34 356	179 127	100
氮负荷贡献率	13.71	30.73	3.43	15.47	9.31	1.00	7.17	19.18	100	

污染负荷量比较高,主要原因是这2个地市的农业土地利用面积大、畜禽养殖业发达、农村人口多。相比之下,神农架林区、仙桃市、潜江市、天门市和商洛市的农业土地利用面积小、畜禽养殖少、农村人口少,故TN、TP污染负荷量都比较低。

根据表4、表5的数据,通过计算可得出,汉江流域各地市的TN、TP的污染负荷均以农田化肥和畜禽养殖为主。其中,神农架林区和仙桃市的农田化肥对该地区的TN负荷贡献率分别为63.70%和57.29%,孝感市和襄阳市的畜禽养殖对该地区的TN负荷贡献率

分别为43.76%和42.03%;神农架林区和南阳市的农田化肥对该地区TP负荷贡献率分别为37.84%和33.54%;孝感市和荆门市的畜禽养殖对该地区的TP负荷贡献率为73.05%和71.16%。鉴于此,汉江流域农业面源污染应将重点放在农田化肥污染和畜禽养殖污染上。

2.2 汉江流域农业面源污染负荷评价

2.2.1 汉江流域TN、TP等标污染负荷总量特征

运用等标污染负荷法,计算不同污染源的TN、TP等标污染负荷及贡献率见表6。

表5 2015年汉江流域各地市不同污染源TP污染负荷量(t)及负荷贡献率(%)

Table 5 The pollution loads and loads contribution rate of TP of different pollution sources of cities in the Hanjiang River Basin in 2015

地市	农田化肥污染			畜禽养殖污染				农村生活污染	合计	磷负荷贡献率
	水田	旱地	园地	牛	猪	羊	家禽			
汉中市	188	192	170	297	692	16	172	287	2014	7.47
安康市	65	292	181	253	531	44	149	236	1751	6.49
商洛市	4	236	48	128	171	17	99	207	910	3.37
南阳市	52	1836	123	1317	1087	115	669	797	5996	22.23
十堰市	75	245	58	459	339	54	375	394	1999	7.41
神农架	8	5	1	6	9	1	4	3	37	0.14
襄阳市	401	442	92	1063	1055	63	998	472	4586	17.00
荆门市	372	138	38	246	695	21	570	73	2153	7.98
天门市	96	108	1	80	171	1	137	102	696	2.58
潜江市	80	55	2	34	181	1	201	71	625	2.32
仙桃市	112	58	2	9	182	0	105	84	552	2.05
孝感市	409	103	78	499	672	13	1396	362	3532	13.09
武汉市	228	141	25	189	517	2	630	390	2122	7.87
合计	2090	3852	818	4581	6301	349	5505	3479	26 975	100
磷负荷贡献率	7.75	14.28	3.03	16.98	23.36	1.29	20.41	12.90	100	

2015年汉江流域农业面源污染等标污染负荷总量为 $3.94 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。在各污染源中,农田化肥源的等标污染负荷总量为 $1.50 \times 10^{11} \text{ m}^3$,畜禽养殖源的等标污染负荷总量为 $1.76 \times 10^{11} \text{ m}^3$,农村生活源的等标污染负荷总量为 $6.9 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。畜禽养殖源的等标污染负荷总量最多,占流域等标污染负荷总量的44.62%,说明汉江流域的首要污染源是畜禽养殖源。

TN的等标污染负荷量贡献率顺序为:农田化肥(47.45%)>畜禽养殖(32.40%)>农村生活(20.16%),TP的等标污染负荷量贡献率顺序为:畜禽养殖

(61.01%)>农田化肥(25.3%)>农村生活(13.68%)。由此可见,汉江流域农业面源污染的TN主要来源是农田化肥,TP主要来源是畜禽养殖,该结果与河南省农业面源污染的研究结果规律一致^[9]。农田化肥对TN等标污染负荷贡献率的影响高于畜禽养殖和农村生活,而畜禽养殖对TP的等标污染负荷贡献率的影响明显高于土地利用和农村生活。

2.2.2 汉江流域TN、TP等标污染负荷量空间分布特征

本文借助ArcGIS 10.0软件,将等标污染负荷量结果填加到行政区划图的表格属性中,绘制了2015年汉江流域各地市农业面源污染TN、TP的等标污染负荷空间分布格局,见图2、图3。在空间分布上,TN、TP的等标污染负荷空间分布有很强的一致性,其空间分布特征是:农业土地利用面积大、畜禽养殖业发达、农村人口多的地市等标污染负荷较大,反之亦然。汉江流域上游至下游的等标污染负荷量呈现出先增加后减少的趋势,流域等标污染高负荷区集中在流域中游。上游的汉中市、安康市和商洛市共3个地市的等标污染负荷贡献率之和是28.44%,中游的十堰市、南阳市、襄阳市、神农架林区和荆门市共5个地市的等标污染负荷贡献率之和是50.93%,下游的天门市、潜江市、仙桃市、孝感市和武汉市共5个地市的等标污染负荷贡献率之和是20.63%。中游5个地市的等标污染负荷量约占汉江流域的一半,说明了汉江流域中游的农业面源污染现状的严重性和治理的必要性。

表6 2015年汉江流域不同污染源TN、TP的等标污染负荷量及贡献率

Table 6 The equivalent standard pollution load and its contribution rate of TN and TP of different pollution sources in the Hanjiang River basin in 2015

污染源	等标污染物负荷量/ 10^{10} m^3		等标污染负荷贡献率/%		
	TN	TP	TN	TP	
农田化肥	水田	2.86	1.21	12.66	7.21
	旱地	6.89	2.41	30.54	14.31
	园地	0.96	0.64	4.25	3.78
农村生活	人	4.55	2.3	20.16	13.68
畜禽养殖	牛	3.46	2.86	15.35	17
	猪	2.13	4.02	9.44	23.87
	羊	0.25	0.24	1.09	1.43
	家禽	1.47	3.15	6.52	18.71
合计	22.56	16.84	100	100	

由图2、图3可知,TN、TP等标污染负荷的最大值均出现在南阳市,其中TN等标污染负荷量贡献率达21.55%,TP等标污染负荷量贡献率达17.80%。南阳市内有汉江最大的支流唐白河,当支流的污染物汇入汉江干流,会加剧汉江的污染程度,故应加大对南阳市农业面源污染的治理。其次是汉中市、安康市、十堰市和襄阳市,TN等标污染负荷量贡献率达10.75%~12.52%,TP等标污染负荷量贡献率达10.39%~13.61%。等标污染负荷最小的地市是神农架林区、天门市、潜江市和仙桃市,TN等标污染负荷量贡献率仅为0.26%~2.20%,TP等标污染负荷量贡献率仅为0.22%~2.07%。

2.2.3 不同污染源对汉江流域各地市TN、TP等标污染负荷的贡献

为便于分析,将污染源划分为水田、旱地、园地、畜禽养殖和农村生活共5种污染源,利用ArcGIS软

件,绘制了2015年汉江流域各地市不同污染源TN、TP的等标污染负荷图,见图4、图5。汉江流域内,十堰市、襄阳市和孝感市的TN等标污染负荷贡献最大的为畜禽养殖,而其他10个地市TN等标污染负荷贡献最大的均为农田化肥。这10个地市中,汉中市、安康市、商洛市和南阳市的农田化肥源中旱地的等标污染负荷较大,而神农架林区、荆门市、潜江市、仙桃市和武汉市的农田化肥源中水田的等标污染负荷较大。汉江流域内各地市的TP等标污染负荷则表现出明显的规律特征,即均以畜禽养殖为主。对于流域内等标污染负荷最大的南阳市,其TN等标污染贡献最大的是旱地,TP等标污染贡献最大的是畜禽养殖。

再将污染源按照农田化肥、畜禽养殖和农村生活3大类进行划分,将TN等标污染负荷与TP等标污染负荷叠加后,得到2015年汉江流域各地市不同污染源等

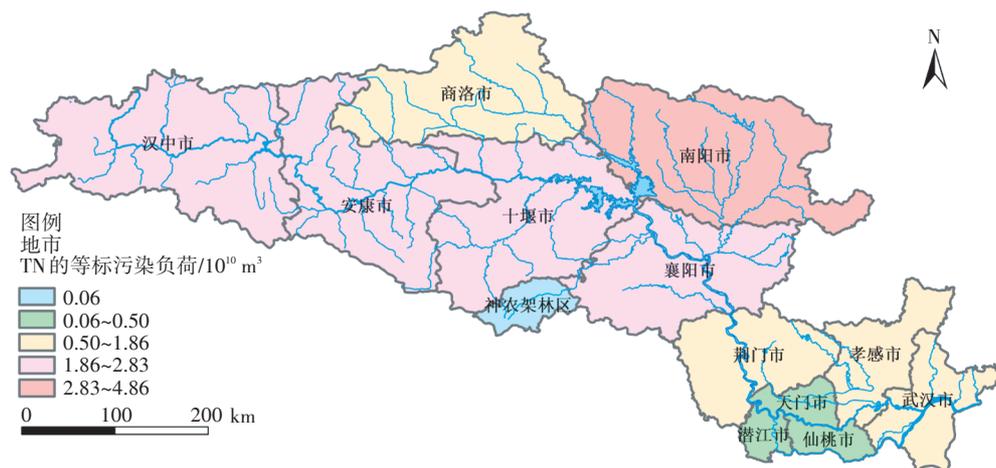


图2 2015年汉江流域各地市TN等标污染负荷空间分布格局

Figure 2 Spatial distribution pattern of the equivalent standard pollution load of TN of cities in the Hanjiang River Basin in 2015



图3 2015年汉江流域各地市TP等标污染负荷空间分布格局

Figure 3 Spatial distribution pattern of the equivalent standard pollution load of TP of cities in the Hanjiang River Basin in 2015

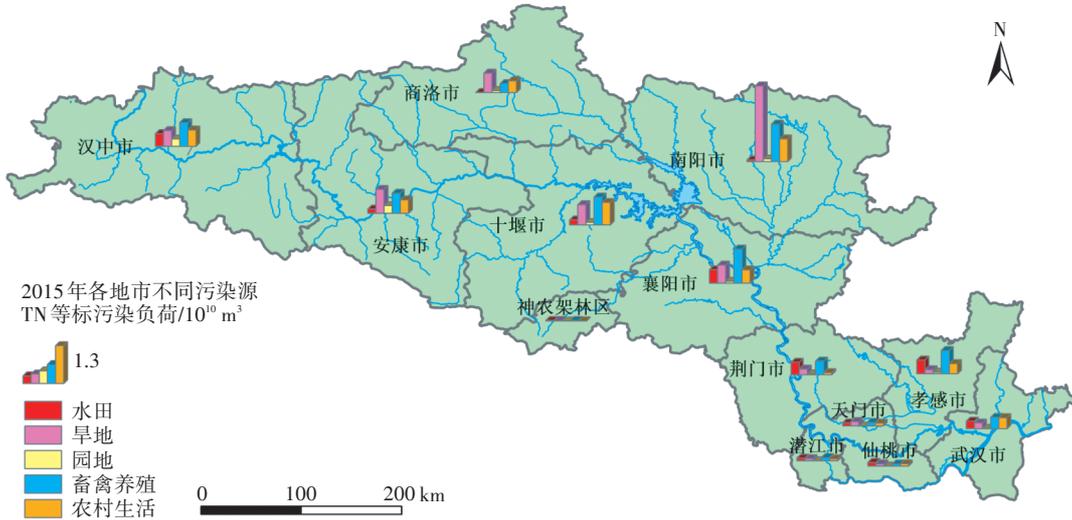


图4 2015年汉江流域各地市不同污染源TN等标污染负荷

Figure 4 The equivalent standard pollution load of TN of different pollution sources of cities in the Hanjiang River Basin in 2015

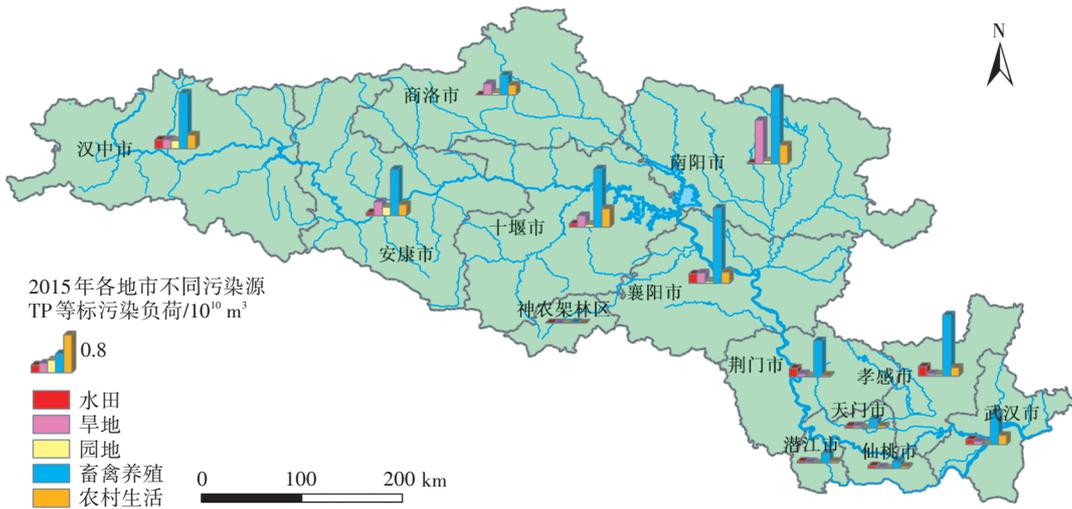


图5 2015年汉江流域各地市不同污染源TP等标污染负荷

Figure 5 The equivalent standard pollution load of TP of different pollution sources of cities in the Hanjiang River Basin in 2015

标污染负荷贡献率见图6所示。汉江流域各地市农田化肥源和畜禽养殖源的等标污染负荷贡献率均相对较高,农村生活源的等标污染负荷贡献率均相对较低。

2.3 汉江流域农业面源污染类型划分

为因地制宜地开展农业面源污染防治,对各地市按污染类型进行分类。本文采用SPSS软件中快速聚类(K-Means Cluster)的方法,以各地市农田化肥源、畜禽养殖源和农村生活源这3大污染源的等标污染负荷贡献率为聚类对象,进行聚类分析。通过聚类分析将各地市划分成了6种污染类型,各污染类型的空间分布情况见图7。

第I类为农田化肥污染主导型,该类型包含神农架林区和南阳市,其农田化肥源在各类污染源中最为

典型,农田化肥源的等标污染贡献率分别为54.04%和48.12%。第II类为畜禽养殖污染主导型,该类型的地市分布在汉江流域中下游,包括襄阳市和孝感市,畜禽养殖源的等标污染贡献率较高,畜禽养殖源的等标污染贡献率分别为54.25%和58.04%。第III类为农田化肥和畜禽养殖污染复合主导型,该类型只包含荆门市,其畜禽养殖源的等标污染贡献率为54.31%,农田化肥源的等标污染贡献率为40.93%。第IV类为畜禽养殖和农村生活污染复合主导型,该类型的地市包括十堰市和武汉市,其畜禽养殖源和农村生活源的等标污染贡献率之和分别为71.51%和70.62%。第V类为农田化肥和农村生活污染主导型,该类型的地市包括商洛市和仙桃市,其农田化

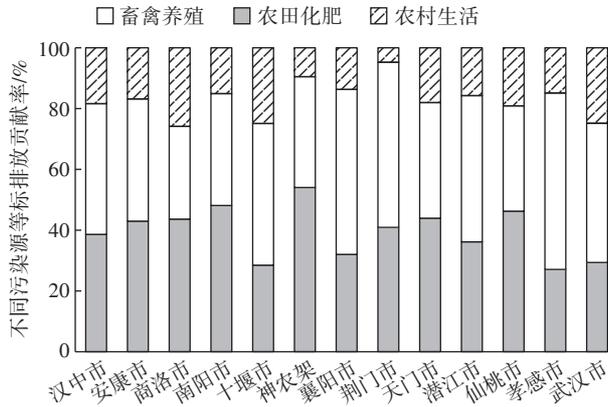


图6 2015年汉江流域各地市不同污染源等标污染负荷贡献率
Figure 6 Contribution rate of equivalent standard pollution load of different pollution sources of cities in the Hanjiang River basin in 2015

肥源和农村生活源的等标污染贡献率之和分别为65.35%和69.53%。第Ⅵ类为混合污染型,该类型的地市分散在汉江流域上游段和下游段,其农田化肥源的等标污染贡献率均在36.18%以上,畜禽养殖源的等标污染贡献率均在38.03%以上,农村生活源的等标污染贡献率均在15.74%以上。

3 结论

本文采用输出系数模型法、等标污染负荷法、ArcGIS技术和快速聚类法,估算了2015年汉江流域各地市的农业面源污染TN、TP的污染负荷量、等标污染负荷量及空间分布情况,结果表明:

(1)2015年汉江流域的TN、TP污染负荷量分别为179 127 t、26 975 t,相应的等标污染负荷量为

$2.26 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、 $1.68 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

(2)TN的等标污染负荷量贡献率顺序为:农田化肥(47.45%)>畜禽养殖(32.40%)>农村生活(20.16%),TP的等标污染负荷量贡献率顺序为:畜禽养殖(61.01%)>农田化肥(25.3%)>农村生活(13.68%)。农田化肥源和畜禽养殖源是汉江流域农业面源污染的重点污染源。

(3)TN和TP的等标污染负荷的空间分布有很强的一致性,且分布特征明显。即农田面积大、畜禽养殖业发达、农村人口多的地市等标污染负荷较大,反之亦然。汉江流域内各地市的等标污染负荷量存在一定的差距,等标污染高负荷区集中在流域中游,上游的等标污染负荷其次,下游最低。TN、TP的等标污染负荷最大值均出现在汉江流域中游的南阳市,南阳市是流域面源污染控制的重点区域。

(4)基于各地市不同污染源的等标污染负荷贡献率,运用快速聚类方法,将汉江流域各地市分为了农田化肥污染主导型、畜禽养殖污染主导型、农田化肥和畜禽养殖污染复合主导型、畜禽养殖和农村生活污染复合主导型、农田化肥和农村生活污染复合主导型和混合污染型6种污染类型。

参考文献:

- [1] 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.
LU Shao-yong, ZHANG Ping, PAN Cheng-rong, et al. Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2278-2286.
- [2] 沈珍瑶, 刘瑞民, 叶 闽, 等. 长江上游非点源污染特征及其变化规

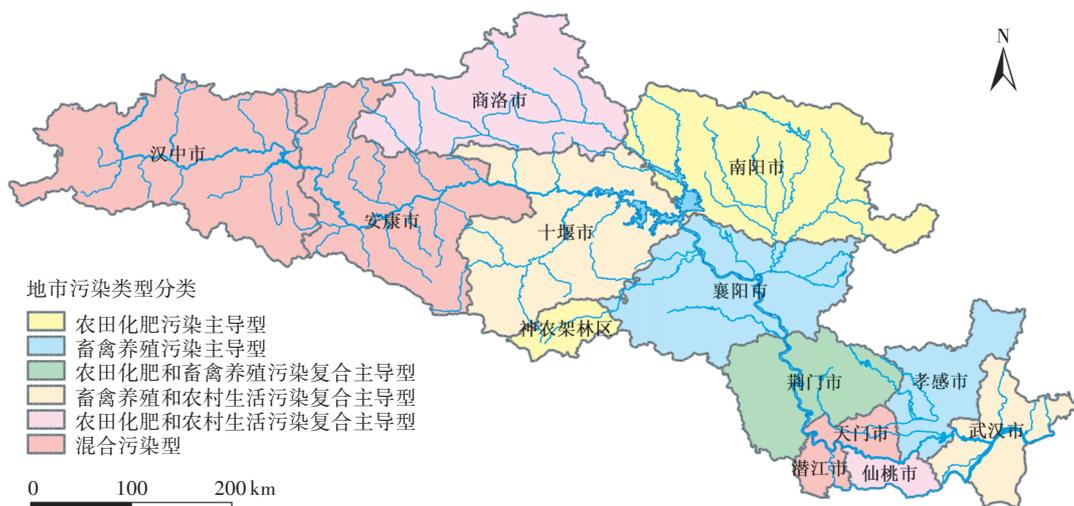


图7 汉江流域各地市污染类型空间分布格局

Figure 7 Spatial distribution pattern of pollution types of cities in the Hanjiang River Basin

- 律[M].北京:科学出版社,2008:1-2.
SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min, YE Min, et al. The non-point source pollution characteristics and change rules of the Yangtze River upstream[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-83.
- [3] 刘增进, 张关超, 杨育红, 等. 河南省农业非点源污染负荷估算及空间分布研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 1-6.
LIU Zeng-jin, ZHANG Guan-chao, YANG Yu-hong, et al. Estimation and spatial distribution of agricultural non-point source pollution loads in Henan Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(11): 1-6.
- [4] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1421-1430.
CAI Jin-zhou, FAN Xian-peng, HUANG Min, et al. Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1421-1430.
- [5] 张思聪, 刘铭环. 竹竿河流域面源污染模拟计算和分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(5): 51-57.
ZHANG Si-cong, LIU Ming-huan. Calculation and analysis of the non-point source pollution of Zhuganhe watershed[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(5): 51-57.
- [6] 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.
HU Yun-yun, WANG Yong-dong, LI Ting-xuan, et al. Characteristics analysis of agricultural non-point source pollution on Tuojiang River basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18): 3654-3665.
- [7] 严素定. 黄石市农业面源污染的解析及其空间异质性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 225-228.
YAN Su-ding. Source apportionment and spatial heterogeneity of agricultural non-point source pollution in Huangshi, Hubei Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(9): 225-228.
- [8] Grunwalda S, Norton L D. Calibration and validation of a nonpoint source pollution model[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45: 17-39.
- [9] Omernik J M. The influence of land use on stream nutrient levels[M]. Corvallis: United States Environmental Protection Agency, 1976: 77-105.
- [10] 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: 323-349.
- [11] 刘菊, 傅斌, 王玉宽, 等. 四川山区农村面源污染负荷估算与评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 218-225.
LIU Ju, FU Bin, WANG Yu-kuan, et al. Estimation and evaluation of non-point source pollutants loads in mountainous area of Sichuan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 218-225.
- [12] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, 7: 40-45.
CAI Ming, LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao, et al. application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 7: 40-45.
- [13] 张军, 李鹏, 唐润芒, 等. 陕西省丹江流域农业非点源污染区划[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 325-329.
ZHANG Jun, LI Peng, TANG Run-mang, et al. Zoning of agricultural non-point source pollution in Dan-Han River Basin in Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 325-329.
- [14] 许策, 李晔, 束继年, 等. 汉江流域荆门段面源污染负荷时空分布与污染现状评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 63-68.
XU Ce, LI Ye, SHU Ji-nian, et al. Spatial distribution and evaluation of non-point pollution source in Jingmen Region of Hanjiang Watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 63-68.
- [15] 刘亚琼, 杨玉林, 李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 7-12.
LIU Ya-qiong, YANG Yu-lin, LI Fa-hu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 7-12.
- [16] Ma X, Li Y, Zhang M, 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, 412/413: 154-161.
- [17] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于GIS的湖北汉江农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 473-477.
SHI Zhi-hua, CAI Chong-fa, DING Shu-wen, et al. Research on nitrogen and phosphorus load of agricultural non-point sources in middle and lower reaches of Hanjiang River based on GIS[J]. *ACTA Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4): 473-477.
- [18] 傅春, 康晚英. 环鄱阳湖区农业面源污染TN/TP时空变化与分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(7): 864-868.
FU Chun, KANG Wan-ying. Research on spatical characteristics of TN&TP of agricultural non-point source pollution in the surrounding area of the Poyang Lake[J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2012, 21(7): 864-868.
- [19] 张静, 何俊仕, 周飞, 等. 浑河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 69-73.
ZHANG Jing, HE Jun-shi, ZHOU Fei, et al. Estimation and evaluation of non-point source pollution in the Hunhe River Basin[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 69-73.
- [20] 周跃龙, 汪怀建, 余辉, 等. 应用输出系数模型对太湖流域面源污染负荷测算研究[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(3): 678-683.
ZHOU Yue-long, WANG Huai-jian, YU Hui, et al. Estimation of nutrient export loads in Taihu Lake Watershed based on the export coefficient model[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, 36(3): 678-683.
- [21] 李翠梅, 张绍广, 姚文平, 等. 太湖流域苏州片区农业面源污染负荷研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 354-359.
LI Cui-mei, ZHANG Shao-guang, YAO Wen-ping, et al. Study on agricultural non-point source pollution[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 354-359.
- [22] 吴义根, 冯开文, 李谷成. 我国农业面源污染的时空分异与动态演进[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 186-199.
WU Yi-gen, FENG Kai-wen, LI Gu-cheng. Spacial-temporal pattern and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(7): 186-199.
- [23] 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.
ZHAO Qian, MA Jian, WEN Qing-chun, et al. Load and status quo of agricultural non-point source pollution in Dasuhe Township on the upperstreams of Hun River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 126-131.