

城市小流域面源污染输出特征及污染负荷分类核算研究

张明睿^{1,2}, 郑俊^{1,2}, 徐力刚^{3,4*}, 范宏翔^{3,4}, 张德伟²

(1. 安徽工业大学, 安徽 马鞍山 243032; 2. 安徽华骐环保科技股份有限公司, 安徽 马鞍山 243032; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院流域地理学重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:以南京市上秦淮片区二横沟小流域为例,在污染源调查的基础上,采用分类法,利用改进后的污染输出系数模型进行流域污染负荷核算,得到外源污染物入河负荷量及各污染源的贡献率。研究表明,上秦淮片区二横沟流域内污染物排放负荷总量为 COD 229.9 t/a、TN 25.8 t/a、NH₃-N 22.4 t/a、TP 1.7 t/a,入河负荷量为 COD 47.1 t/a、TN 5.5 t/a、NH₃-N 4.6 t/a、TP 0.36 t/a,主要来自面源污染,点源污染较小。其中,生活面源污染年入河贡献率最高,为44.5%,林地面源污染贡献率最低,为0.1%,水产面源、道路面源、水田面源和旱地面源贡献率分别为31.6%、16.2%、6.2%和1.4%。

关键词: 面源污染; 污染负荷核算; 贡献率; 上秦淮二横沟

中图分类号: X52 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2021)04-0025-05

Research on Non-point Source Pollution Output Characteristics and Pollution Load Classification Accounting of Urban Small Watershed

ZHANG Ming-rui^{1,2}, ZHENG Jun^{1,2}, XU Li-gang^{3,4*}, FAN Hong-xiang^{3,4}, ZHANG De-wei²

(1. *Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China*; 2. *Anhui Huaqi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui 243032, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China*)

Abstract: The load of external pollutants into the river and the contribution rate of each source of pollution were obtained by classification method and calculating the pollution load in the watershed using improved pollution output coefficient model, based on the investigation of pollution source, taking the Erheng ditch watershed in the upstream Qinhuai River in Nanjing as example. The results showed that the total pollutant discharge load in that watershed was: COD 229.9 t/a, TN 25.8 t/a, NH₃-N 22.4 t/a, TP 1.7 t/a. The load into the river was: COD 47.1 t/a, TN 5.5 t/a, NH₃-N 4.6 t/a, TP 0.36 t/a. Non-point source pollution was the main pollution, while point source pollution was relatively weak. The annual contribution rate of domestic non-point source pollution into the river was the highest of 44.5%, the annual contribution rate of forest non-point source pollution into the river was the lowest of 0.1%. The annual contribution rates of aquaculture non-point source, road non-point source, paddy field non-point source and dry land non-point source into the river were 31.6%, 16.2%, 6.2% and 1.4%, respectively.

Key words: Non-point source pollution; Pollution load accounting; Contribution rate; The Erheng ditch watershed in the upperstream Qinhuai River

水体污染一般来源于点源污染和面源污染两方面^[1]。面源污染是指污染物以颗粒态或溶解态

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971137, 42001109); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20201102); 中国长江三峡集团有限公司联合基金资助项目(201903145)

作者简介: 张明睿(1996-), 男, 安徽滁州人, 硕士, 研究方向为流域生态治理和水污染处理。

* 通信作者: 徐力刚 E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

的形态从非特定的地域在降水或径流的冲刷作用下随径流汇入受纳水体而引起的污染。面源污染过程可分为产污和迁移两部分^[2-4],有广泛性、分散性、隐蔽性和不易监测等特点,带来的危害通常超过点源污染^[5-6]。目前,面源污染已成为我国江河湖泊尤其是巢湖、太湖、滇池等湖泊水质恶化的主要成因^[7-8]。李怀恩^[9]在缺乏面源污染监测数据的情况下提出了平均浓度法,对流域水污染及水环境预测进行更加简便的估算;秦耀民等^[10]、全为民等^[11]运用GIS技术与SWAT模型相结合的方法探讨了黑河流域土地利用与面源污染的关系。

近年来,南京市上秦淮二横沟流域外源污染负荷由于不合理和不科学地使用农药与化肥耕种农田、工厂日益增多、水产养殖业和制造业快速发展,以及人类活动种类增多而不断增加,导致了富营养化、黑臭水体等问题的出现。此前袁君梦等^[12]基于差异化的敏感程度建议将秦淮河流域划分制定流域分区控制指引,而缺少针对上秦淮二横沟小流域内外源污染负荷核算的相关研究。今以秦淮二横沟流域为研究区域,在该流域内污染源详细调查的基础上,利用改进后的污染输出系数模型进行污染负荷核算,得到二横沟外源污染物入河负荷总量,研究结果可为二横沟的污染治理与污染结构调整提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

上秦淮地区位于南京市南部,江宁区方山以南片区,介于E118°49′46.54″~E118°51′58.31″,N31°49′43.58″~N31°53′47.97″之间。二横沟流域位于秦淮河河湾南侧,全长3.2 km,流域面积为7.85 km²,主要有行洪与纳污双重功能,流域内有少量支流汇入。

二横沟周边环境复杂多变,污染源种类繁多。根据历史数据及现场情况,在调研过程中布设了11个有代表性的取样点,监测分析二横沟水质污染状况。结果表明,所有点位的TP质量浓度均高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称《标准》) V类标准限值(0.4 mg/L),超标率100%,平均值为0.85 mg/L。NH₃-N平均质量浓度为3.56 mg/L,有5个点位高于V类标准,占45%。I_{Mn}平均质量浓度为8.54 mg/L,达到IV类标准。监测的TP、NH₃-N和I_{Mn}严重超标,且现

场水体存在富营养化、黑臭等问题,外源TN、TP和COD输入可能超标,故选择COD、NH₃-N、TN和TP作为面源污染研究的主要指标。

1.2 研究方法

1.2.1 面源污染输出系数模型

Johns输出系数模型是面源污染核算常用的模型之一,其加入了牲畜和人口等因素的影响,综合考虑了土地利用类型、牲畜数量和分布状况、农村居民的面源污染物排放和处理水平等不同污染源类型的输出系数^[13],模型参数少,操作较简单。

今采用陈莹^[14]的研究成果计算降雨输入的污染物总量,对Johns输出系数模型作改进,并采用改进后的输出系数模型进行估算,见公式(1)。

$$Q_i = P_i \times A_i \times \alpha_i \quad (1)$$

式中: Q_i 为污染物*i*的总负荷量,kg/a; A_i 为污染物*i*在该土地利用类型中的输出系数,kg/hm²,或第*i*种畜禽每头排泄系数,kg/(头·a),或人口每人输出系数,kg/(人·a)等; P_i 为研究区域中土地利用类型*i*的面积,hm²,或第*i*种牲畜数量,头,或人口数量,人; α_i 为污染物入河修正系数。

城市路面径流年污染负荷利用道路多场径流平均浓度,如降水平均浓度和道路年平均降水量来计算,见公式(2)。

$$L = C_f \times \phi \times A \times P \times C \times 0.01 \quad (2)$$

式中: L 为径流年污染负荷,kg/a; C_f 为不产生径流的降水校正因子,即产生径流的降水事件占总降水事件的比例,缺乏资料时取0.9; ϕ 为集水区平均径流系数,是径流量与降水量的比值; A 为集水区面积,hm²; P 为年平均降水量,mm; C 为多场降水径流平均浓度,如次降雨径流平均浓度(EMC),mg/L;0.01为单位换算因子。

1.2.2 模型参数的确定

根据谷歌Map影像地图及其高程数据,划分二横沟的土地利用类型及面积为居民用地17.68 hm²、林地16.66 hm²、水田125.30 hm²、旱地83.53 hm²、草地70.62 hm²、工业用地179.91 hm²、道路35.60 hm²、水体155.86 hm²和其他99.84 hm²。不同污染源由于位置、排污方式不同,其污染物入河负荷量也各不相同,模型计算中的人河系数按照《全国水环境容量核定技术指南》^[15]提供的参考值确定。不同土地利用类型的产污系数参考刘庄等^[16]的研究结果;不同种类畜禽的特征污染物产污系数参考《污染源普查产排污系数

手册》^[17];参考刘庄等^[16]研究结果,结合水质和底泥的分析测试结果,计算得出鱼类水产养殖单位面积水域产污系数为 COD 500 kg/(hm²·a)、TN 30 kg/(hm²·a)、TP 3 kg/(hm²·a)、NH₃-N 29.2 kg/(hm²·a)。

2 结果与讨论

2.1 小流域点源污染负荷估算

经调查,河道内未见生活污水排水口,无生活点源污染;河道内有数个已搬迁工厂废置的排水管仅接纳地表径流,按照其他用地计算排污量,取距离修正1,渠道修正0.95,温度修正0.9,计算得出入河修正系数为0.86;流域内临河有大量草地,草地河岸由生态砌砖构成,草地径流由透水生态砌砖直接进入河道,故以点源概化处理草地面源污染^[18],通过卫星影像资料及现场调研,二横沟区域临河草地面积有25.72 hm²,取距离修正1,渠道修正0.95,温度修正0.9,计算得出入河修正系数为0.86;区域内仅有1个养殖场,且位置沿河,畜禽主要为鸡,约40只,入河污染物修正系数取0.86。依据上述参数计算点源污染负荷,结果见表1。

由表1可知,点源污染入河负荷量估算结果为 COD 1 467.4 kg/a、TN 455.2 kg/a、NH₃-N 221.3 kg/a、TP 28.6 kg/a。其虽然对环境的影响较小,但依旧不可忽视。

2.2 小流域面源污染负荷估算

将二横沟小流域的面源污染分为生活面源、水田面源、旱地面源、林地面源、水产面源和道路面源污染,计算各污染源占非点源污染负荷的比例。经调查二横沟汇水区内居民生活污水由管网和渠道收集。调查中居民不明确具体人口总数,以人口密度973人/km²计算,二横沟区域内常住居民人口总数1560人。农村生活污水中含有机物、氮磷营养物、悬浮物及病菌等污染成分,按照江苏不同地区典型农村生活污水处理适用技术^[19](日用水量

90 L),各污染物排放量一般为 COD 59.13 kg/(人·a)、TN 10 kg/(人·a)、NH₃-N 9.46 kg/(人·a)、TP 0.59 kg/(人·a)。根据《全国水环境容量核定技术指南》^[15]《主要水污染物总量分配指导意见》^[20]和李静等^[21]的研究结果,结合现场实际调查情况,生活面源、水田面源、旱地面源、林地面源和水产面源污染入河系数均取0.2。上述面源污染按照公式(1)计算污染负荷,见表2。二横沟汇水区内公路总集水面积为35.60 hm²,年平均降水量1 041.7 mm,南京道路径流系数0.79。依据陈莹^[14]的研究,城市路面径流中各污染物的 EMC 为可溶性 COD 167.4 mg/L、NH₃-N 2.78 mg/L、Pb 0.058 mg/L、Zn 0.122 mg/L。结合实际情况,由于汇水区面积较小,取入河修正系数0.2。按照公式(2)计算得到城市路面径流污染负荷,见表2。

由表2可知,用输出系数模型核算的各污染类型所有污染物的年排放量为生活面源123 522.8 kg/a、水田面源17 146.8 kg/a、旱地面源3 891.8 kg/a、林地面源277.1 kg/a、水产面源87 624.5 kg/a、道路面源44 792.0 kg/a,年污染物入河量为生活面源24 704.6 kg/a、水田面源3 429.4 kg/a、旱地面源778.3 kg/a、林地面源55.4 kg/a、水产面源17 524.9 kg/a、道路面源8 958.5 kg/a。

2.3 小流域面源污染负荷空间分布特征分析

图1(a)~(d)为二横沟流域 COD、NH₃-N、TN 和 TP 污染负荷空间分布。

(1) COD 污染负荷空间分布特征。由图1(a)可见,面源污染产生的 COD 负荷广泛分布于农田和水体中,其输移途径可能是大规模的农田灌溉、降雨冲刷,以及地表径流,其中生活面源、水产面源和道路面源是 COD 排放的主要来源,排放量分别为92 242.8 kg/a、77 930.0 kg/a 和44 059.0 kg/a,入河贡献率分别为40.42%、34.14%和19.30%;

表1 点源污染负荷核算结果

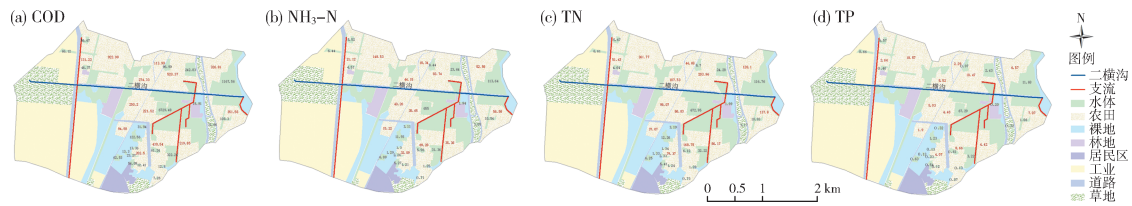
Table 1 Calculation results of point source pollution load

类型	污染物排放量 $Q/(kg \cdot a^{-1})$					污染物入河量 $Q/(kg \cdot a^{-1})$				
	COD	TN	NH ₃ -N	TP	合计	COD	TN	NH ₃ -N	TP	合计
工业点源	1 415.1	446.9	191.7	28.3	2 082.0	1 216.9	384.4	164.9	24.3	1 790.5
草地径流点源	280.2	79.8	63.9	3.9	427.8	240.9	68.7	55.0	3.3	367.9
养殖点源	11.2	2.4	1.6	1.2	16.4	9.6	2.1	1.4	1.0	14.1
共计	1 706.5	529.1	257.2	33.4	2 526.2	1 467.4	455.2	221.3	28.6	2 172.5

表2 面源污染负荷核算结果

Table 2 Calculation results of non-point source pollution load

类型	污染物排放量 $Q/(kg \cdot a^{-1})$					污染物入河量 $Q/(kg \cdot a^{-1})$				
	COD	TN	$NH_3 - N$	TP	合计	COD	TN	$NH_3 - N$	TP	合计
生活面源	92 242.8	15 600.0	14 757.6	922.4	123 522.8	18 448.6	3 120.0	2 951.5	184.5	24 704.6
水田面源	10 901.1	4 272.2	1 754.2	219.3	17 146.8	2 180.2	854.5	350.8	43.9	3 429.4
旱地面源	2 923.6	634.0	280.7	53.5	3 891.8	584.7	126.8	56.1	10.7	778.3
林地面源	181.3	51.7	41.6	2.5	277.1	36.3	10.3	8.3	0.5	55.4
水产面源	77 930.0	4 675.8	4 551.1	467.6	87 624.5	15 586.0	935.2	910.2	93.5	17 524.9
道路面源	44 059.0	0	733	0	44 792.0	8 811.9	0	146.6	0	8 958.5
共计	228 237.8	25 233.7	22 118.2	1 665.3	277 255.0	45 647.7	5 046.8	4 423.5	333.1	55 451.1

图1 COD、 $NH_3 - N$ 、TN 和 TP 污染负荷空间分布 (kg/a)Fig. 1 Spatial distribution of COD、 $NH_3 - N$ 、TN and TP pollution load(kg/a)

水田面源、旱地面源和林地面源对 COD 的贡献率较低,分别为 4.78%、1.28% 和 0.08%。二横沟流域内较大的人口密度、集中便利的交通及发达的养殖业,导致了生活面源、道路面源和水产面源对 COD 的贡献率远远大于其他污染源。

(2) $NH_3 - N$ 负荷空间分布特征分析。由图 1 (b)可见,二横沟流域内有大面积农田种植和大规模水产养殖,过度的农药使用、大量的农田灌溉用水,以及大量的水产养殖污水输移,使 $NH_3 - N$ 广泛分布于农田、水体及裸地中。生活面源是 $NH_3 - N$ 排放的主要来源,排放量为 14 757.6 kg/a,入河贡献率为 66.72%;水产面源的贡献率为 20.58%,需要引起重视;水田面源和旱地面源污染的贡献率分别为 7.93% 和 1.27%;道路面源的贡献率为 3.31%,主要是由路面径流产生的污染;林地面源的贡献率仅有 0.19%,主要原因可能是土壤污染。

(3) TN、TP 负荷空间分布特征分析。由图 1 (c)可见,二横沟流域内生活面源的 TN 贡献率最大,为 61.82%;水田面源和水产面源的贡献率相近,分别为 16.93% 和 18.53%,水田面源的 TN 污染可能是因为氮肥的使用,减少氮肥的使用可有效控制水田面源的 TN 污染;旱地面源和林地面源的贡献率较小,分别为 2.51% 和 0.21%。

由图 1 (d)可见,不同污染类型对 TP 的贡献率从大到小依次为生活面源 (55.39%) > 水产面源

(28.07%) > 水田面源 (13.18%) > 旱地面源 (3.21%) > 林地面源 (0.15%)。生活面源对 TP 贡献率大的主要原因可能是人口密度大,以及雨水冲刷生活垃圾造成的径流污染;水产面源的 TP 污染是由残饵、肥料等随养殖废水排入水体造成的水环境恶化,减少养殖废水直排可以降低水产养殖对 TP 的贡献;农田 (水田和旱田) 对 TP 的贡献率合计为 16.39%,可能是由于化肥和农药等过量使用,残留部分随雨水径流进入水体,造成污染;道路面源不产生 TN 和 TP 污染。

2.4 小流域入河污染负荷总量核算与来源解析

计算结果表明,二横沟流域内污染物排放负荷总量为 COD 229.9 t/a、TN 25.8 t/a、 $NH_3 - N$ 22.4 t/a、TP 1.7 t/a;入河负荷量为 COD 47.1 t/a、TN 5.5 t/a、 $NH_3 - N$ 4.6 t/a、TP 0.36 t/a。其中,年排放负荷总量面源污染贡献率达到 99.1%,点源污染仅为 0.9%;年入河负荷量面源污染贡献率为 96.2%,点源污染仅为 3.8%。由此可见,二横沟小流域内主要污染类型为面源污染。生活面源、水产面源和道路面源污染是二横沟流域内的主要污染来源,年入河负荷贡献率分别为 44.5%、31.6% 和 16.2%,对环境的影响严重,应采取相关措施削减污染负荷。水产养殖区 COD 和 $NH_3 - N$ 的污染负荷较大,农田区 TP 的污染负荷较大。

二横沟流域内污染源分布较为分散,点源污染

主要分布在西侧工业园区,主要来源于工业污染;面源污染物负荷主要来源于生活面源污染及水产面源污染。面源污染高可能是因为面源污染的地理边界与发生位置难以确定,随机性强,成因复杂,潜伏周期长。流域内遍布绿化草地及荒地,由于降雨所产生的径流会携带污染物进入水体;农田主要以水田为主,稻田水一部分由于田埂较低直接携带污染物排入河中,一部分下渗进入土壤中,土壤中部分营养盐溶解进入下渗水中,经排水管携带污染物入河,造成水体污染;水产面源污染主要是养殖用的饲料等有机污染物随换水过程进入水体造成污染。随着经济的迅速发展,若不加治理,则这种影响会不断增大,导致流域内水生态环境崩溃,造成环境恶化等问题。因此,适当减少环境污染,农村地区污水和生活垃圾的日常处理显得非常重要。除此之外,畜禽养殖业的快速发展对环境质量的不良影响也须引起足够的重视^[13,22]。政府应当加大治理与管理的力度,采用污染负荷削减技术如污染物入河削减技术、浮动湿地技术、人工曝气复氧技术等综合治理。

3 结论

研究运用改进的输出系数模型估算2018年南京市上秦淮片区二横沟小流域内不同类型污染源的负荷总量,计算结果表明:

(1) 上秦淮片区二横沟小流域内污染物排放负荷总量为 COD 229.9 t/a、TN 25.8 t/a、NH₃-N 22.4 t/a、TP 1.7 t/a;入河负荷量为 COD 47.1 t/a、TN 5.5 t/a、NH₃-N 4.6 t/a、TP 0.36 t/a。

(2) 上秦淮片区二横沟小流域内污染主要来自面源污染,点源污染较小;其土地利用类型显著影响面源污染物负荷的空间分布;不同面源污染入河贡献率从大到小依次为生活面源(44.5%)>水产面源(31.6%)>道路面源(16.2%)>水田面源(6.2%)>旱地面源(1.4%)>林地面源(0.1%)。

(3) 流域内污染与人类活动有密切关系,经济发展使得二横沟流域内的土地利用结构组成不断发生变化,人口的增加、农田的减少等都会影响核算结果的准确性,故需要不断校正相关系数,优化计算公式,保证核算结果的准确性和及时性。

[参考文献]

[1] 陶春,高明,徐畅,等. 农业面源污染影响因子及控制技术的

- 研究现状与展望[J]. 土壤,2010,42(3):336-343.
- [2] 宋珉. 汾河水库上游流域面源污染负荷研究[D]. 太原:太原理工大学,2011.
- [3] 孙丽娜,梁冬梅,马继力. 辽河源头区典型小流域农业非点源污染模拟[J]. 中国农村水利水电,2011(5):33-35,38.
- [4] 赵新峰,陈利顶,杨丽蓉,等. 基于水流路径与景观单元相互作用的非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报,2010,30(3):621-630.
- [5] 张棋霞,陈国伟. 对水环境非点源污染的治理及其控制分析[J]. 科技视界,2016(11):242,284.
- [6] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [7] 杨善莲,郑梦蕾,刘纯宇,等. 农业面源污染模型研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(3):8-13.
- [8] 李丽娜,谢靖,盛思远,等. 农业面源污染控制研究[J]. 南方农机,2018,49(7):37-38.
- [9] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报,2000,20(4):397-400.
- [10] 秦耀民,胥彦玲,李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报,2009,29(2):440-448.
- [11] 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.
- [12] 袁君梦,吴凡. 基于 GIS 的秦淮河流域水生态安全格局探讨[J]. 浙江农业科学,2019(12):2291-2294,2356.
- [13] 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.
- [14] 陈莹. 西安市路面径流污染特征及控制技术[D]. 西安:长安大学,2011.
- [15] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R/OL]. [2021-07-07]. <https://wenku.baidu.com/view/34b78f4069eae009581becc7.html>.
- [16] 刘庄,李维新,张毅敏,等. 太湖流域非点源污染负荷估算[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(S1):45-48.
- [17] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
- [18] 张铁亮,刘凤枝,李玉浸,等. 农村环境质量监测与评价指标体系研究[J]. 环境监测管理与技术,2009,21(6):1-4.
- [19] 阮晓卿,蒋岚岚,陈豪,等. 江苏不同地区典型农村生活污水处理适用技术[J]. 中国给水排水,2012,28(18):44-47.
- [20] 生态环境部. 主要水污染物总量分配指导意见[R/OL]. [2021-07-07]. <https://wenku.baidu.com/view/64c503a70029bd64783e2c19.html>.
- [21] 李静,闵庆文,李文华,等. 太湖流域平原河网区农业污染研究——以常州市和宜兴市为例[J]. 生态与农村环境学报,2014,30(2):167-173.
- [22] 刘邵伟,武升,刘佩诗,等. 舒城县丰乐河小流域农业面源污染现状调查与评价[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(6):43-46.