

兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析

崔超¹, 刘申^{1*}, 翟丽梅¹, 刘宏斌¹, 雷秋良¹, 张富林², 华玲玲¹, 李文超¹

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 2.湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064)

摘要:基于典型调查与统计分析,应用排污系数法估算了兴山县香溪河流域 2007—2013 年种植业源、畜禽养殖业源和农村生活源 TN、TP 污染物的排放量,并对排放量、排放强度及其时空格局进行了分析。结果表明,香溪河流域农业面源污染 TN、TP 年均排放量分别为 1 145.2、56.5 t·a⁻¹,排放强度分别为 44.5、2.14 kg·hm⁻²·a⁻¹。农业源 TN 和 TP 的年排放量逐年增加,2013 年较 2007 年增幅分别为 38.0%和 85.1%,TN:TP 为 21:1,TN 排放占主导,为香溪河流域兴山县段重点防控指标。从各类污染源贡献来看,畜禽养殖业源是 TN 的主要贡献源,占农业源污染总量的 77.9%;种植业源是 TP 的主要贡献源,占 55.4%。从不同源氮磷排放量空间格局来看,各乡镇中水月寺镇、黄粮镇和峡口镇的 TN、TP 排放量均最高。从氮磷排放强度空间格局来看,峡口镇、高桥乡和黄粮镇对 TN 排放强度最高;峡口镇、昭君镇和黄粮镇对 TP 排放强度最高。

关键词:香溪河流域;农业源;排污系数法;时空特征

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0937-10 doi:10.11654/jaes.2015.017

Estimates and Spatio-Temporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Discharges from Agricultural Sources in Xiangxi River Basin, Xingshan County

CUI Chao¹, LIU Shen^{1*}, ZHAI Li-mei¹, LIU Hong-bin¹, LEI Qiu-liang¹, ZHANG Fu-lin², HUA Ling-ling¹, LI Wen-chao¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2.Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract:Based on typical investigation and statistical analysis, the discharge loads of TN and TP from agricultural sources in the Xiangxi River basin, Xingshan County during 2007 to 2013 were estimated using pollutant discharge coefficient approach. The intensity and spatio-temporal pattern of three main types of agricultural non-point sources, rural domestic source, animal production and crop production, were also analyzed. The annual TN and TP discharges were 1 145.2 t·a⁻¹ and 56.5 t·a⁻¹, and their discharge intensities were 44.5 kg·hm⁻²·a⁻¹ and 2.14 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively. The agricultural source percentage of TN and TP discharges respectively increased by 38.0% and 85.1% from 2007 to 2013. The ratio of mean annual TN/TP discharge was 21:1, indicating that TN discharge was the main target of prevention and control in Xiangxi River basin. The animal production was the main source of TN discharges, accounting for 77.9% of TN discharges, while crop production was the main source of TP discharges, amounting to 55.4% of TP discharges. Shuiyuesi, Huangliang and Xiakou towns were the major sources of nitrogen and phosphorus discharges spatially. Xiakou, Gaoqiao and Huangliang towns had higher intensity of TN discharge among all the towns with Xiakou, Zhaojun and Huangliang towns being higher intensities of TP discharge.

Keywords:Xiangxi River basin; agricultural source; pollutant discharge coefficient; spatio-temporal characteristics

水体富营养化严重影响水体的质量与功能,已成为当今水环境问题的研究重点。据《全国第一次污染

源普查公报》显示:2007 年我国农业源总氮、总磷排放量分别为 270.46 万 t、28.47 万 t,分别占总排放量的 57.2%、67.4%^[1]。来自种植业源、畜禽养殖业源和农村生活源氮磷污染物的排放是造成农业面源污染的重要原因^[2-3]。

三峡库区流域范围包括重庆市和湖北省 26 个县(市、区),总面积约 7.9 万 km²^[4]。自 2003 年水库蓄水

收稿日期:2015-01-12

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303089)

作者简介:崔超(1990—),男,硕士研究生,主要从事流域氮磷养分管理及面源污染控制研究。

E-mail:cuichao5212009@163.com

*通信作者:刘申 E-mail:liushencom@163.com

后,长江天然河道属性发生改变,香溪河作为三峡库区坝首的第一大支流,因干流水位顶托,出现回水河段,流速缓慢,由于长期受到中游农业面源污染的影响,氮磷营养盐浓度较高,富营养化问题加剧^[5-6]。

农业源氮磷排放具有时空不确定性、迁移过程的高度非线性以及过程中降解的复杂性等特征^[7-8],增加了其排放量估算、来源解析的难度。科学准确地估算农业源氮磷排放量是农业面源污染防治的重要基础。近年来,用于农业面源污染排放量的测算方法主要有实测法^[9-10]、水文分割法^[11-12]、等标污染负荷法^[4,13]、模型法^[10,14-16]和排污系数法^[4,10,17]等,其中排污系数法相对简单,对参数要求低,可操作性强,适合在缺乏大量监测数据的情况下对氮磷排放量进行估算。

目前关于香溪河流域农业面源污染排放量估算的方法主要为实测法^[18-19]和模型模拟法^[16,20],但对流域农业面源氮磷排放的现状与动态缺少全面调查^[4],对污染源进行时空动态分析的研究也较少^[21]。

本研究针对三峡库区香溪河流域兴山县内各镇(乡)农业面源污染现状开展抽样调查,整合农业统计数据,运用农业源排污系数法估算种植业源、畜禽养殖

业源和农村生活源等不同农业源氮磷排放量,研究了香溪河流域农业面源氮磷排放空间格局和年度变化,为香溪河流域农业面源污染分区防控提供数据支撑,进而为三峡库区农业面源污染的综合整治奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

香溪河发源于湖北省宜昌市神农架林区,干流全长 95 km,途经兴山县(约 78 km)至秭归县,由河口处汇入三峡大坝,是三峡库区坝首的第一大支流。其在兴山县内有高岚河、古夫河和南阳河三大支流,处于上游的南阳河和古夫河在响滩汇流始称香溪,南流 14 km 由峡口镇汇高岚河至游家河入秭归境内。

香溪河流域总面积为 3099 km²,其中兴山县境内 2102 km²^[19],香溪河源头(香溪河上游河段)属天然林区,农业面源污染主要发生在香溪河流域兴山县内,因此本文香溪河流域农业面源污染研究对象主要为兴山县农业源。研究区概况如图 1 所示。

香溪河流域兴山县内共有八个镇(乡),分别为古夫镇、昭君镇、峡口镇、黄粮镇、水月寺镇、南阳镇、榛

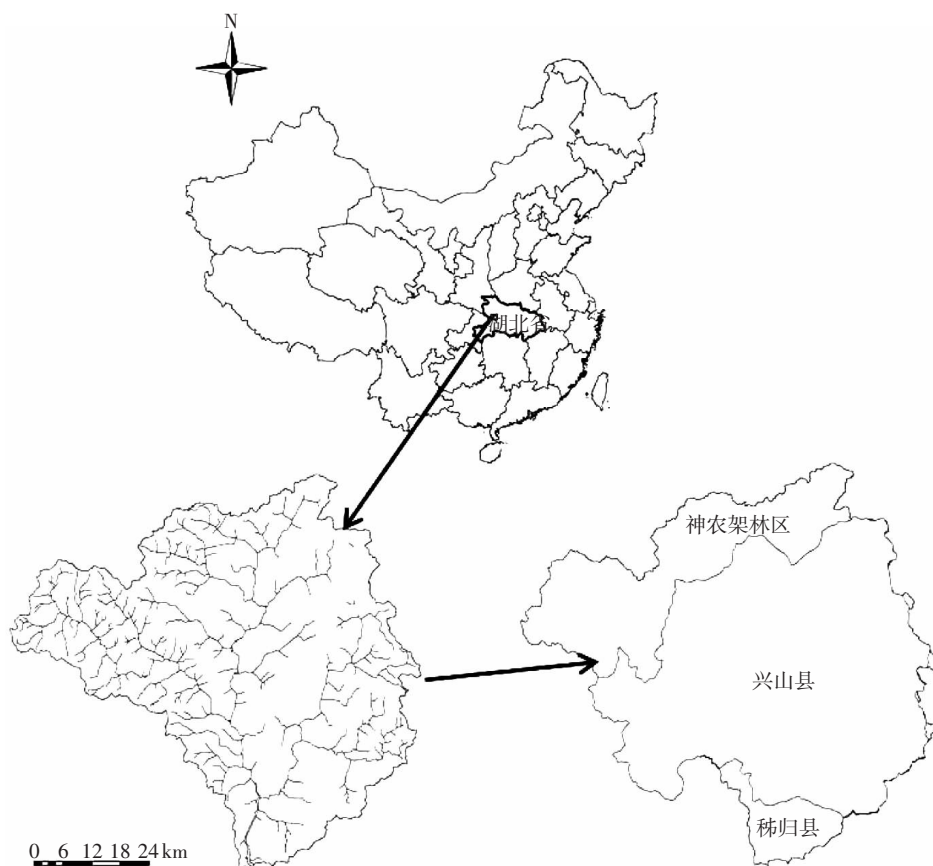


图 1 研究区概况图

Figure 1 Maps of studied area

子乡和高桥乡。随着当地种植业的快速发展,兴山县耕地面积逐年扩大,截止到 2013 年末,农用地面积(水田、旱地和园地)为 2.56 万 hm^2 。农业人口为 12.7 万人,占总人口的 72.1%,常住人口为 10.9 万人。兴山县山多地少,畜牧业发展特点显著,畜禽养殖类别主要是猪、肉牛、鸡,养殖模式以农户散养为主。研究区概况如表 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本文所用数据包括香溪河流域兴山县种植业源、畜禽养殖业源和农村生活源的统计数据与调查数据。统计数据属乡镇一级,来自 2007—2013 年发布的《兴山县农村经济综合年报》。调查数据来自 2007、2009、2012 年和 2013 年开展的乡镇实地调查。

1.2.2 调查方法

种植业源调查:包括乡镇农用地情况调查和典型地块调查。乡镇农用地情况主要调查兴山县各乡镇耕地面积、园地面积以及各类种植模式面积。典型地块调查依据香溪河流域 24 种主要种植模式(表 2),调查地块基本信息以及施肥量、施肥种类、施肥次数等信息。兴山县各乡镇典型地块按每种种植模式地块数量 0.6% 的比例抽取,样本总数约 3000 份。

畜禽养殖业源和农村生活源调查:香溪河流域畜禽养殖主要以农户散养为主,抽样调查将对畜禽养殖与农村生活调研同步展开,包括乡镇畜禽养殖与农村基本情况调查和典型农户调查。乡镇畜禽养殖情况主要调查生猪、奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡的存栏量、出栏量等,乡镇农村生活情况主要调查常住人口数量。典型农户调查主要包括畜禽养殖种类、养殖数量、清粪方式、污水处理方式、常住人口数、经济收入、有无污水设施、污水处理方式等。兴山县各乡镇典型农户样本总数约 1000 份。

1.2.3 计算方法与排污系数

本文采用排污系数法计算种植业源、畜禽养殖业

源和农村生活源氮磷排放状况。

种植业源排污计算公式如下:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i(S_i P_i) + \sum_{i=1}^n Q_i S_i \quad (1)$$

式中: L 是香溪河流域种植业源总排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; E_i 为第 i 种种植模式下流失系数, %; S_i 为第 i 种种植模式面积, hm^2 ; P_i 为第 i 种种植模式肥料单位面积施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; Q_i 为第 i 种种植模式下单位面积本底流失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

系数参考南方山地丘陵区 and 南方平原区各种植模式肥料流失系数和本底流失量^[22](表 2)。

畜禽养殖业源排污计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^n f_0 A_i \quad (2)$$

式中: F 为畜禽养殖业源总排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; f_0 为对应该畜禽清粪方式下的排污系数, $\text{kg} \cdot \text{只}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; A_i 为畜禽养殖动物数量, 只。

系数参考畜禽养殖业源中南区产排污系数^[23](表 3)。

农村生活源排污计算公式如下:

$$P = [(Q_a A + Q_b B) + (M_c C + M_d D + M_e E)] \times 365 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: P 为人生活污水和垃圾的总排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; Q_a 、 Q_b 、 M_c 、 M_d 、 M_e 分别表示有下水设施人数、无下水设施人数、高收入人数、中收入人数和低收入人数; A 、 B 、 C 、 D 、 E 分别表示对应各类人的生活污水和垃圾的排污系数, $\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。系数参考重点流域农村生活源三峡库区生活污水和垃圾排污系数^[24](表 4)。

1.2.4 农业源氮磷排放计算过程

本文假定相邻年份间各乡镇种植模式面积比重、畜禽养殖动物种类和清粪方式比重以及农村生活各类人口比重不变,即依据 2007、2009、2012 年和 2013 年共 4 年实地调查数据,结合 2007—2013 年《兴山县农村经济综合年报》中农业源统计数据,分别推导 2008、2010、2011 年比重,获得 2007—2013 年香溪河

表 1 研究区概况(2013 年)

Table 1 Basic information of studied area(2013)

乡镇	古夫镇	昭君镇	峡口镇	高桥乡	南阳镇	榛子乡	黄粮镇	水月寺镇
农村常驻人口数/万人	1.90	1.16	1.77	0.91	0.83	0.91	1.57	1.86
农用地面积/万 hm^2	0.34	0.31	0.41	0.16	0.25	0.29	0.36	0.44
畜禽状况	母猪/万头	0.17	0.17	0.33	0.22	0.97	0.03	0.24
	生猪/万头	4.78	2.73	6.45	4.7	2.96	1.49	6.49
	肉牛/头	271	154	187	605	53	409	539
	鸡/万只	8.77	3.19	6.99	5.09	2.76	3.00	10.42

表 2 湖北省三峡库区种植业肥料流失系数

Table 2 Fertilizer loss coefficients of crop production systems in Three Gorges Reservoir Region, Hubei Province

分区	地形	梯田/非梯田	土地利用方式	种植模式	肥料流失系数/%		本底流失/kg·hm ⁻²	
					TN	TP	TN	TP
南方山地 丘陵区	缓坡地	非梯田	旱地	大田作物	0.68	0.30	4.11	0.33
	缓坡地	梯田	旱地	大田作物	1.35	0.50	11.9	0.71
	缓坡地	非梯田	旱地	露地蔬菜	1.72	0.98	15.2	1.05
	缓坡地	梯田	旱地	露地蔬菜	1.50	0.85	13.5	0.9
	缓坡地	非梯田	旱地	园地	0.40	0.10	5.31	0.51
	缓坡地	梯田	旱地	园地	0.17	0.072	4.74	0.05
	缓坡地	梯田	水田	水旱轮作	1.21	1.11	13.3	0.48
	缓坡地	梯田	水田	其他水田	1.47	0.82	11.4	0.56
	陡坡地	非梯田	旱地	大田作物	0.48	0.30	2.84	0.35
	陡坡地	梯田	旱地	大田作物	0.40	0.24	1.89	0.18
	陡坡地	非梯田	旱地	露地蔬菜	1.65	0.94	14.9	0.99
	陡坡地	梯田	旱地	露地蔬菜	1.50	0.85	13.5	0.9
	陡坡地	非梯田	旱地	园地	0.40	0.29	6.59	0.78
	陡坡地	梯田	旱地	园地	0.68	0.29	3.03	0.61
	陡坡地	梯田	水田	水旱轮作	0.52	0.60	13.5	0.29
	陡坡地	梯田	水田	其他水田	1.37	0.75	9.68	0.41
南方湿润 平原区	平地	—	旱地	露地蔬菜	1.46	0.87	11.4	5.04
	平地	—	旱地	大田一熟	0.96	0.87	11.6	0.73
	平地	—	旱地	大田作物	1.05	0.41	7.15	0.41
	平地	—	水田	单季稻	1.05	0.36	9.73	0.46
	平地	—	水田	稻油轮作	1.12	0.28	16.7	0.55
	平地	—	水田	其他水田	1.44	0.26	8.04	0.36
	平地	—	旱地	园地	0.86	0.51	17.2	1.21
	平地	—	旱地	保护地	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3 湖北省三峡库区畜禽养殖业排污系数

Table 3 Pollutant discharge coefficients of animal production systems in Three Gorges Reservoir Region, Hubei Province

动物种类	清粪工艺	排污系数/kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹	
		TN	TP
母猪	干清粪	10.3	0.28
母猪	水冲清粪	13.2	2.01
生猪	干清粪	2.25	0.044
生猪	水冲清粪	3.55	0.52
肉牛	干清粪	14.9	0.73
肉牛	水冲清粪	0.52	24.0
蛋鸡	干清粪	0.008	0.034
蛋鸡	水冲清粪	0.12	0.047
肉鸡	干清粪	0.003	0.002
肉鸡	水冲清粪	0.016	0.002

注:清粪工艺有 3 种,表中列出 2 种,垫草垫料省略,其排污系数均为 0。

流域各乡镇种植业源农田种植模式面积与肥料用量、畜禽养殖动物清粪方式头数、农村生活源各类人口

表 4 湖北省三峡库区农村生活源排污系数

Table 4 Pollutant discharge coefficients of rural domestic sources in Three Gorges Reservoir Region, Hubei Province

分类	排污系数/g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹	
	TN	TP
污水	有下水设施	0.20
	无下水设施	0.17
垃圾	高收入	0.44
	中收入	0.45
	低收入	0.43

数,对接种植模式流失系数、畜禽养殖业源产排污系数以及农村生活源产排污系数,利用公式 1、公式 2 和公式 3,计算香溪河流域各类农业源氮磷排放状况。

2 结果与讨论

2.1 农业源氮磷排放总量特征

2007—2013 年香溪河流域农业面源 TN 和 TP 年

均排放量分别为 $1\,145.2$ 、 $56.5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 排放强度分别为 44.5 、 $2.14\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图 2)。从年均排放量和排放强度来看, TN:TP 为 21:1, 说明 TN 排放占主导地位, 为香溪河流域重点防控指标。2007—2013 年间, 香溪河流域农业面源污染总氮和总磷排放量均表现不断升高的趋势。2007 年农业源 TN 和 TP 的年排放量分别为 988.4 、 41.7 t , 至 2013 年分别增至 $1\,363.7$ 、 77.2 t , 增幅分别为 38.0% 和 85.1%。香溪河流域虽然氮磷排放量不断增长, 但排放强度相对于其他流域偏低, 例如海河流域 TN、TP 的平均排放强度分别为 139.7 、 $29.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[25]; 涪江流域总氮污染负荷为 $9.11\times 10^4\text{ t}$, 全区平均负荷强度为 $3100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[26]。这主要因为香溪河流域属丘陵库区, 森林覆盖度高, 耕地面积少, 农户分散, 且农业常驻人口数量相对较少, 而海河流域、涪江流域农村人口相对较多且集中、农事活动操作频繁。

2.2 农业源氮磷排放组成特征

从各类农业源年均排放量组成状况(图 3)来看,

畜禽养殖业源 TN 和 TP 年均排放量分别为 895.7 、 $20.6\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 种植业源氮磷排放量分别为 228.9 、 $31.3\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。农村生活源对氮磷排放量的贡献最小, 分别为 25.6 、 $4.65\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。根据以上结果, TN 排放量主要来源于畜禽养殖业源, 占农业源排放总量的 77.9%; TP 排放量主要来源于种植业源, 占农业源排放总量的 55.4%。畜禽养殖业源和种植业源对香溪河流域氮磷排放贡献最大, 与蔡金洲等^[11]、曹彦龙等^[27]对三峡库区农业面源污染贡献源解析中得出的结论一致。

从图 4 看出, 种植业源氮磷排放量占比逐年增加。种植业源氮磷排放量分别由 2007 年 189.1 、 $18.7\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 到 2013 年 322.0 、 $49.4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 增幅分别为 69.7% 和 163.8%; 畜禽养殖业源氮磷排放占比逐年减小, 氮排放量占比较高, 约为 75.0%。畜禽养殖业源氮磷排放量分别由 2007 年 781.3 、 $18.0\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 到 2013 年 $1\,019.4$ 、 $23.3\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 增幅分别为 30.5% 和 29.3%。而农村生活源的污染物排放量呈现逐年减小的趋势, 分别由 2007 年 27.3 、 $4.96\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 到 2013 年 24.7 、 $4.48\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, 减幅分

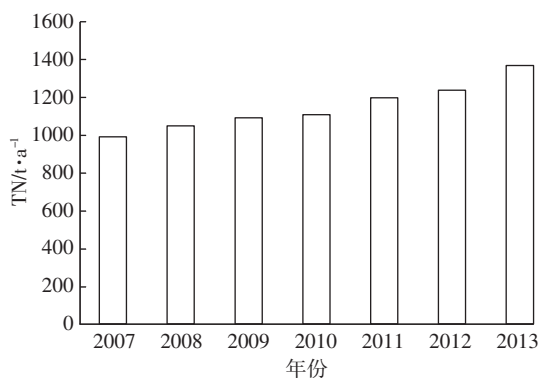


图 2 2007—2013 年农业源 TN 和 TP 排放总量

Figure 2 Annual TN and TP discharges from agricultural sources during 2007 to 2013

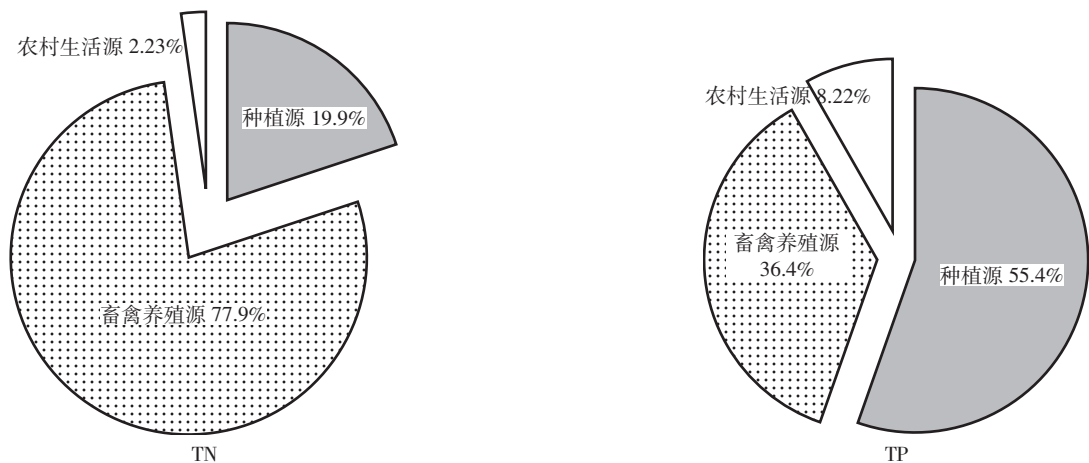


图 3 各类污染源年均 TN、TP 排放贡献

Figure 3 Mean annual contributions of different sources to gross TN and TP discharges

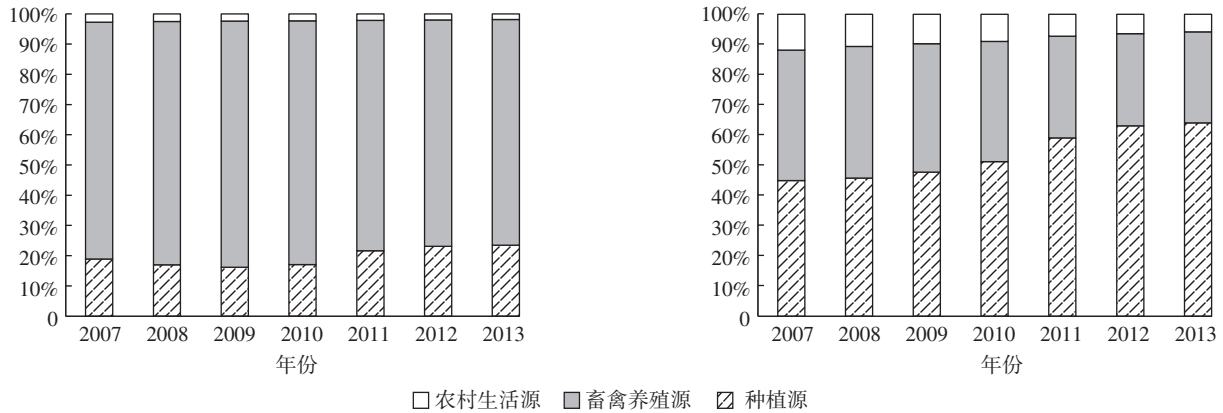


图4 2007—2013年各类污染源TN、TP排放组成年变化特征

Figure 4 Variation characteristics of annual TN and TP discharges from different sources during 2007 to 2013

别为 9.68% 和 6.34%。

2.3 各类农业源排放动态变化

2007—2013 年香溪河流域种植业源氮磷肥料施用及流失情况如图 5 所示。氮肥施用量和流失量均表现为先减小后增大的趋势。并在 2009 年同时达到最低值,本底流失量在 2007—2010 年间缓慢升高。从氮排放量组成来看,种植业源氮主要以本底流失为主;从种植业源磷的变化趋势来看,磷肥施用量、流失量和本底流失量均逐年升高。磷肥的施用量与流失量在 7 年间增幅较大,分别为 178.2% 和 232.1%,而磷本底流失量增幅较小。从磷本底流失量与磷肥流失量来看,磷肥流失量在 2007—2008 与本底流失量相当,2009 年以后磷肥流失量占主导地位。这主要是由于农用地面积(水田、旱地和园地)不断扩大,由 2007 年的 1.91 万 hm^2 扩大到 2013 年的 2.56 万 hm^2 ,增幅达 34.6%,且经济作物(园地、露地蔬菜)种植面积由 2007 年 7 168.8 hm^2 扩大到 2013 年 17 086.8 hm^2 ,比重不断加大,年均氮磷施用量分别为 377.8、174.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,肥料投入量高。

hm^{-2} ,肥料投入量高。

畜禽养殖业源对氮磷的排放贡献逐年增加(图6)。2007—2013 年间氮磷排放贡献增幅分别占到 30.5% 和 29.3%。畜禽养殖业源年均 TN:TP 为 44:1,说明其 TN 排放占主导地位。香溪河流域畜禽养殖种类主要以生猪养殖为主,从研究区农业经济统计年报来看,生猪出栏量由 2007 年 28.5 万头发展到 2013 年 33.8 万头,增幅为 18.3%。研究区内生猪养殖模式以散养为主,畜禽粪污处理方式主要为干清粪,在圈旁堆腐后直接返田,堆腐过程中氮磷流失严重。随着畜禽养殖数量及规模的扩大,畜禽养殖业污染对面源污染的贡献日益突显。

农村生活源氮磷排放量逐年减小(图 7)。2007—2013 年间,在农村生活源氮磷排放量中,农村污水减幅分别为 9.34% 和 10.2%,农村垃圾分别为 9.3% 和 9.54%。香溪河流域农村生活垃圾在生活源中 TN、TP 的贡献占主要地位。农村生活源对氮磷排放量贡献减小的原因主要是随着香溪河流域城镇化的快速发展,

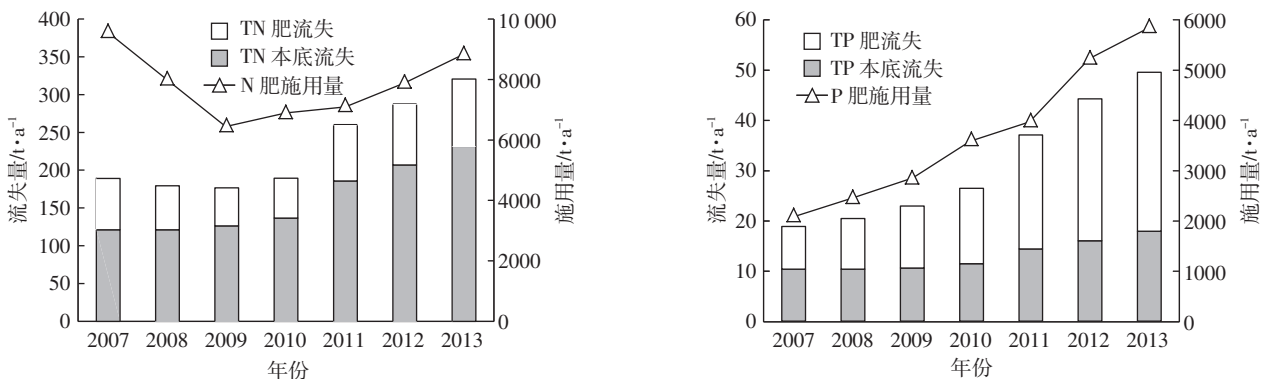


图5 种植业源TN、TP流失和施用量年变化特征

Figure 5 Annual variation characteristics of TN and TP losses and fertilizer uses in crop production systems

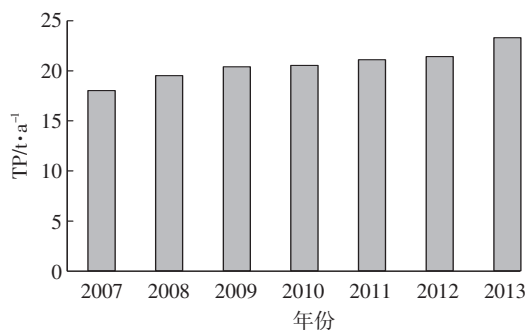
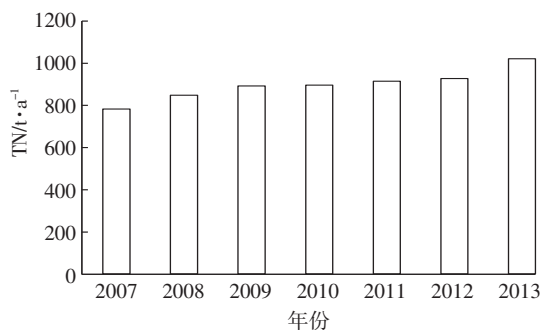
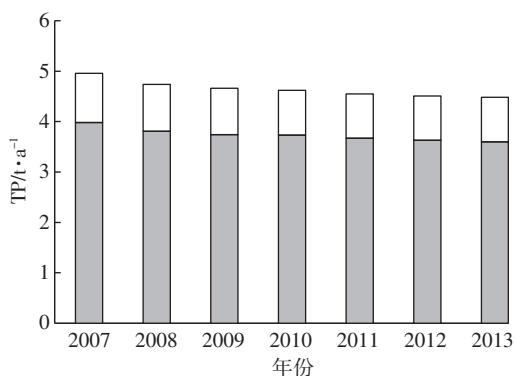
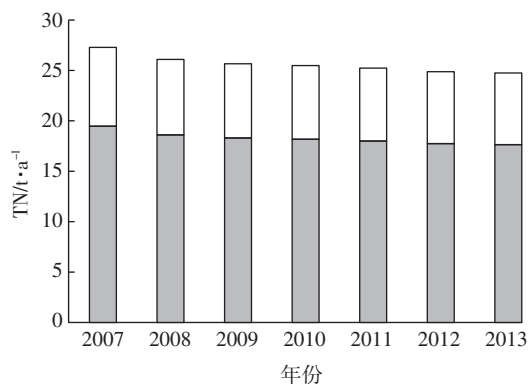


图 6 2007—2013 年畜禽养殖业源 TN、TP 年排放特征

Figure 6 Annual variation characteristics of TN and TP discharges from animal production systems during 2007 to 2013



□ 污水 ■ 垃圾

图 7 2007—2013 年农村生活源 TN、TP 年排放特征

Figure 7 Variation characteristics of annual TN and TP discharges from rural domestic sources during 2007 to 2013

7 年间农村人口数减幅 9.37%, 排污基数减小; 农村生活水平的提高, 房屋内污水处理设施的完善。

2.4 农业源氮磷排放空间分布特征

从年均氮磷排放总量空间分布(图 8)来看, TN 为水月寺镇>黄粮镇>峡口镇>古夫镇>高桥乡>昭君镇>

南阳镇>榛子乡。由此可知, 水月寺镇($203.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、黄粮镇($199.6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、峡口镇($192.6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、古夫镇($146.9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)为 TN 的重点控制区。由于畜禽养殖业为 TN 的主要贡献源, 且生猪养殖为氮的主要排放源, 上述四个地区年均猪养殖总量占整个研究区的 66.5%, 属畜

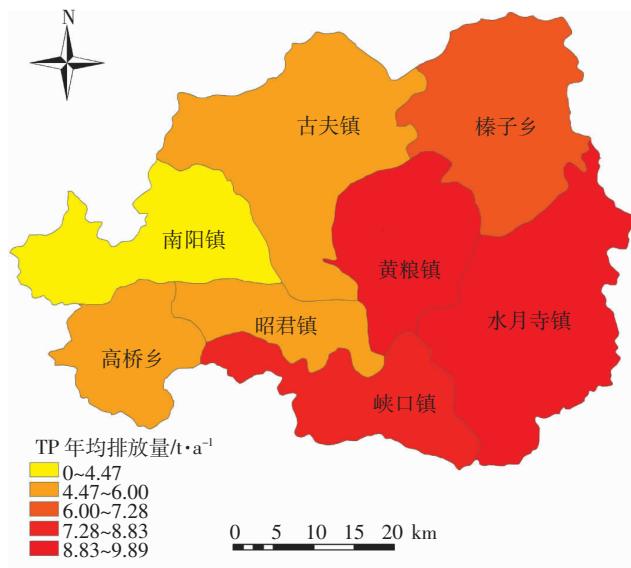
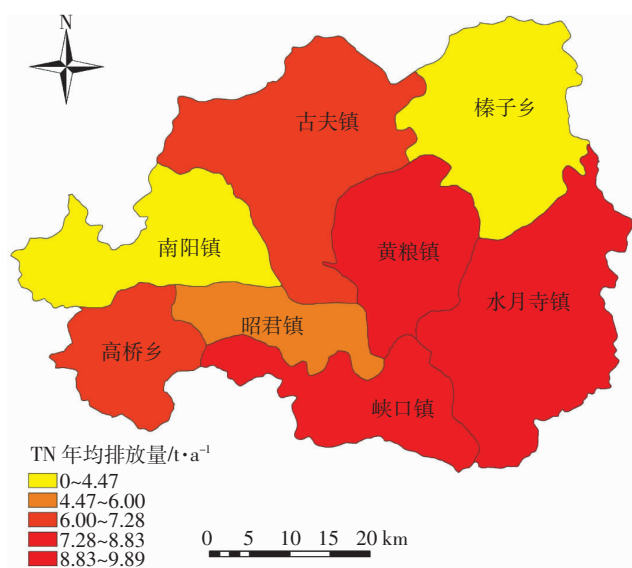


图 8 各镇(乡)TN 和 TP 年均排放量空间格局

Figure 8 Spatial pattern of mean annual TN and TP discharges from different towns

禽养殖密集区,氮排放占年均 TN 的64.5%,加之传统的农户畜禽散养管理习惯,因此氮排放量较其他乡镇更大(图9)。

TP 排放总量为水月寺镇>黄粮镇>峡口镇>榛子乡>古夫镇>昭君镇>高桥乡>南阳镇。由此可知,水月寺镇($9.89 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、黄粮镇($9.46 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、峡口镇($8.83 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、榛子乡($7.28 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)为 TP 的重点控制区。种植业源为 TP 的主要贡献源,其主要原因是农用地面积增加和种植模式变化,施肥量与施肥次数有所增加。黄粮镇和水月寺镇种植业以水田、旱地为主,其年均面积占比分别为 68.6%和 64.1%,种植模式主要为水稻-油菜(地块年均氮磷施用量分别为 550.5 、 $106.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)轮作和玉米-油菜(地块年均氮磷施用量分别为 378.1 、 $137.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)轮作。水月寺镇因得天独厚的地理条件发展茶园(地块年均氮磷施用量分别为 262.5 、

$83.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),加之地形多为坡地,易发生种植业源氮磷流失;峡口镇内园地面积占比 65.0%,以经济作物柑橘(地块年均氮磷施用量分别为 414.1 、 $136.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为主,用肥量高,坡度大,流失较高;榛子乡因其独特地理气候发展高山蔬菜(番茄、辣椒)、烟叶等经济作物,一年一茬,氮磷平均施用量分别为 207.2 、 $226.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥投入量较其他以大田作物为主的乡镇比例高,但农用耕地面积少,占其他乡镇的 8.96%,因此 TP 排放仅占各镇(乡)中间位置(图9)。

香溪河流域农业面源污染排放的年均 TN 和 TP 总量在空间上呈现较强的区域性分布(图10)。从总

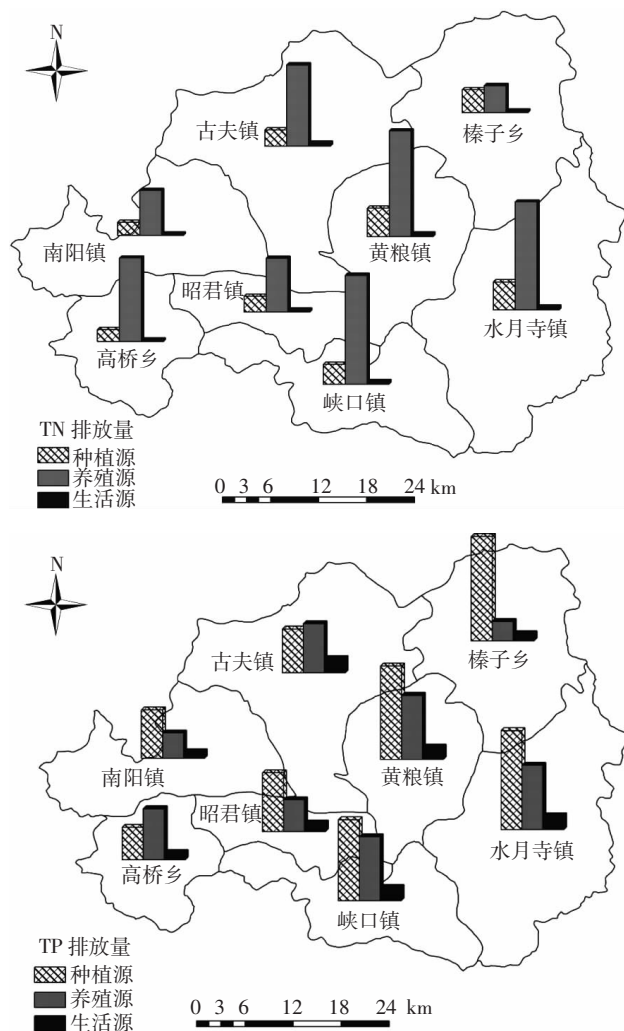


图9 镇(乡)各类污染源年均 TN 和 TP 排放量空间分布
Figure 9 Spatial variation of mean annual TN and TP discharges from different sources in different towns

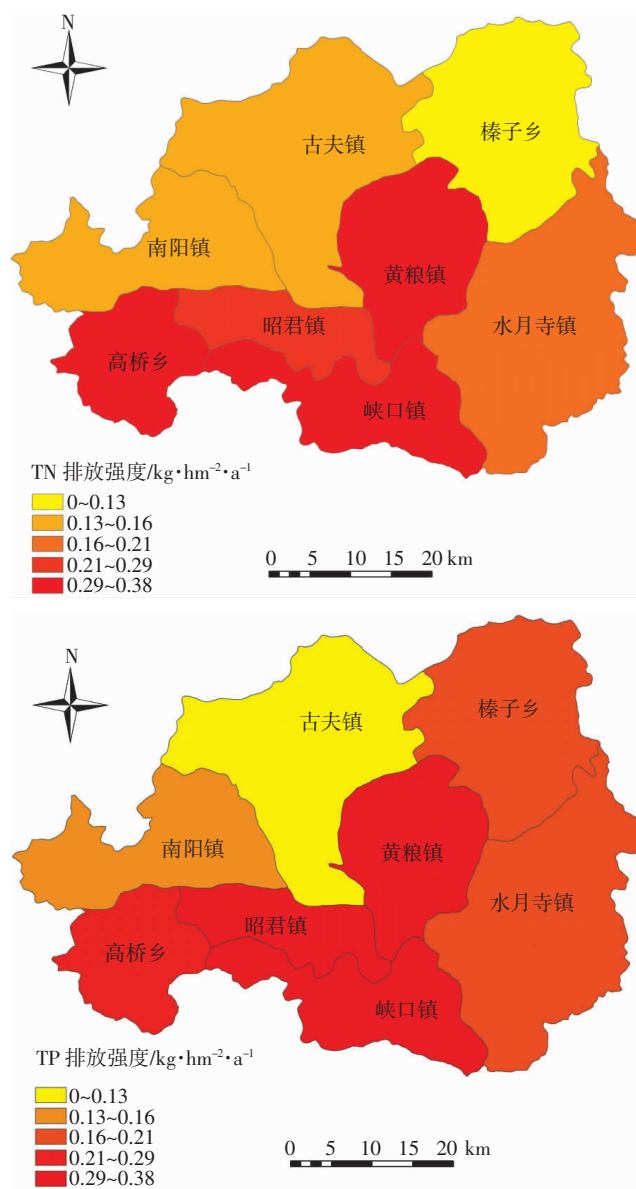


图10 镇(乡)年均 TN 和 TP 排放强度空间格局
Figure 10 Spatial pattern of mean annual TN and TP discharge intensities from different towns

体来看,香溪河流域中下游地区(兴山县中南部)排放强度较高,流域上游(西北部)排放强度较低。从排放强度的跨度来看,TN 的排放强度跨度较 TP 而言更大一些,分别为 $2.14\sim 8.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.13\sim 0.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。从排放强度的行政区划来看,峡口镇、高桥乡、黄粮镇的 TN 排放强度最高,分别为 8.38 、 7.99 、 $7.94\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;峡口镇、昭君镇、黄粮镇的 TP 排放强度最高,分别为 0.39 、 0.38 、 $0.37\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

3 结论

香溪河流域农业源 TN 和 TP,年排放量及排放强度逐年增加。畜禽养殖业源和种植业源对香溪河流域氮磷排放贡献最大,其中畜禽养殖业源为 TN 的主要贡献源,种植业源为 TP 的主要贡献源。农业源氮磷排放强度呈现较强的区域性分布,香溪河流域中下游地区(兴山县的中南部)排放强度较高,流域上游(西北部)排放强度较低。畜禽养殖业密集区为 TN 的重点防控源区,种植业发达区为 TP 的重点防控源区。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部.第一次全国污染源普查公报[R].中华人民共和国国家统计局,2010. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/201002/t20100211_30641.html.
- [2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies: I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [3] 杨林章,冯彦房,施卫明,等.我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(1):96-101.
YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang, SHI Wei-ming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):96-101.
- [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] 胡念三,刘德富,纪道斌,等.三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响[J]. 环境科学与技术,2012,35(10):6-11.
HU Nian-san, LIU De-fu, JI Dao-bin, et al. Effect of backward flow from mainstream on nutrients distribution of tributaries in Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(10):6-11.
- [6] 叶麟.三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究[D].北京:中国科学院研究生院,2006.
YE Lin. Studies on the eutrophication and the spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of Three-Gorge Reservoir[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [7] 郝芳华,程红光,杨胜天.非点源污染模型-理论方法与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
HAO Fang-hua, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian. Non-point source pollution model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [8] 张召喜.基于 SWAT 模型的风羽河流域农业面源污染特征研究[D].北京:中国农业科学院,2013.
ZHANG Zhao-xi. Study on characteristics of agricultural non-point source pollution in Fengyu River Basin based on SWAT model[D]. Beijing: the Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [9] 王婧,单保庆,张钧.杭嘉湖水网地区农村面源污染研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊):357-361.
WANG Jing, SHAN Bao-qing, ZHANG Jun. Non-point pollution from village area in Hang-Jia-Hu Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl):357-361.
- [10] 李文超.风羽河流域农业面源污染负荷估算及关键区识别研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
LI Wen-chao. Evaluating the loads of agricultural non-point source pollution and identifying critical source areas in Fengyu Basin[D]. Beijing: the Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [11] 陈友媛,惠二青,金春姬,等.非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究,2003,16(1):10-13.
CHEN You-yuan, HUI Er-qing, JIN Chun-ji, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1):10-13.
- [12] 郑炳辉,王丽婧,龚斌.三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J]. 环境科学研究,2009,22(2):125-131.
ZHENG Bing-hui, WANG Li-jing, GONG Bin. Load of non-point source pollutants from upstream rivers into Three Gorges Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2):125-131.
- [13] 林秀春,张宇,江明坤.荻芦溪流域农业面源污染负荷研究[J]. 中国水土保持,2013,(8):50-53.
LIN Xiu-chun, ZHANG Yu, JIANG Ming-kun. Pollution load of agricultural non-point source in Qiulu watershed[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013, (8):50-53.
- [14] 郭翔,杜蕴慧,刘孝富,等.东江湖流域农业面源污染负荷研究[J]. 环境工程技术学报,2013,3(4):351-357.
GUO Xiang, DU Yun-hui, LIU Xiao-fu, et al. Research of agricultural non-point source pollution load in Dongjianghu Lake watershed[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(4):351-357.
- [15] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等.茅坪河流域非点源污染负荷模拟[J]. 环境科学,2006,27(11):2176-2181.
XU Qi-gong, LIU Hong-liang, SHEN Zhen-yao, et al. Simulation of

- non-point source pollution load in Maoping River watershed[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(11):2176-2181.
- [16] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1):267-275.
SONG Lin-xu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, et al. Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area based on SWAT[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1):267-275.
- [17] 严婷婷, 王红华, 孙治旭, 等. 滇池流域农村生活污水产排污系数研究[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(4):46-48.
YAN Ting-ting, WANG Hong-hua, SUN Zhi-xu, et al. Research on coefficients of producing and discharging pollutants of domestic wastewater in rural areas in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2010, 29(4):46-48.
- [18] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8):990-996.
SONG Lin-xu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin. Experimental study on non-point source nutrient output from Xiangxi Basin in Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(8):990-996.
- [19] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. 生态学报, 28(5):2073-2079.
LI Feng-qing, YE Lin, LIU Rui-qiu, et al. Dynamics of the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorge Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(5):2073-2079.
- [20] 张超. 非点源污染模型研究及其在香溪河流域的应用[D]. 北京: 清华大学, 2008.
ZHANG Chao. Distributed non-point sources pollution modeling and its application in Xiangxi watershed[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [21] 朱联东, 李兆华, 陈红兵, 等. 兴山香溪河流域农业面源污染问题及防治对策研究[J]. 环境研究与监测, 2009, 11(2):11-13.
ZHU Lian-dong, LI Zhao-hua, CHEN Hong-bing, et al. Study on non-point sources pollution problems and controlling measures from Xiangxi River in Xingshan county[J]. *Environmental Study and Monitoring*, 2009, 11(2):11-13.
- [22] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查: 肥料流失系数手册[Z]. 2009.
The leading group office of the state council in the first national pollution source census. Fertilizer loss coefficient manual from the first national pollution census[Z]. 2009.
- [23] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查: 畜禽养殖业源产排污系数手册[Z]. 2009.
The leading group office of the state council in the first national pollution source census. Pollutant generation and discharge coefficients of animal production from the first national pollution census[Z]. 2009.
- [24] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查: 重点流域农村生活污染源产排污系数手册[Z]. 2009.
The leading group office of the state council in the first national pollution source census. Pollutant generation and discharge coefficients of rural domestic in key basins from the first national pollution census[Z]. 2009.
- [25] 邱斌, 李萍萍, 钟晨宇, 等. 海河流域农村非点源污染现状及空间特征分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3):564-570.
QIU Bin, LI Ping-ping, ZHONG Chen-yu, et al. Characteristics and spatial distribution of the rural non-point source pollution in Haihe River Basin[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(3):564-570.
- [26] 丁晓雯, 沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学, 2012, 33(11):4025-40.
DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fuling Watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11):4025-40.
- [27] 曹彦龙, 李崇明, 阚平. 重庆三峡库区面源污染源评价与聚类分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):857-862.
CAO Yan-long, LI Chong-ming, KAN Ping. Evaluating and clustering analysis of non-point source pollution in Chongqing Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):857-862.