

湖北省三峡库区农业面源污染解析

蔡金洲^{1,2}, 范先鹏^{1*}, 黄敏², 刘冬碧¹, 甘小泽³, 王丽娜³

(1.湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064; 2.武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430074; 3.湖北省农业生态环境保护站, 武汉 430070)

摘要:湖北省三峡库区农业面源污染物类型复杂,来源不明,底数不清,导致防控措施不力。采用综合调查法对4个库区县(区)2007年农业面源污染情况进行调查,运用排污系数法测算污染物负荷量,采用等标污染负荷法进行评价与源解析。结果显示,湖北省三峡库区2007年农业面源TN、TP和COD的排放/流失总量分别为2918.08、346.22、12461.10 t·a⁻¹;主要污染物是TN和TP,其等标污染负荷量分别为5836.16、3462.20 m³·a⁻¹,两者等标污染负荷比和为91.80%;库区内主要农业污染源是种植业和畜禽养殖业,其等标污染负荷比分别为56.08%和34.37%,而农村生活污染源只有7.99%;4个县(区)污染负荷的比重为夷陵区>巴东县>秭归县>兴山县。因此,针对湖北省三峡库区农业面源污染的控制策略:防控的污染物主要是TN和TP,防控的重点源为种植业和畜禽养殖业,防控的重点区域为夷陵区。

关键词:农业面源污染;源解析;等标污染负荷法;排污系数法;综合调查法;三峡库区

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)07-1421-10

Sources Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China

CAI Jin-zhou^{1,2}, FAN Xian-peng^{1*}, HUANG Min², LIU Dong-bi¹, GAN Xiao-ze³, WANG Li-na³

(1.Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2.School of Resource and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074, China; 3.Hubei Agricultural Ecological Environment Protection Station, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the progress of science and technology, point source pollution has been controlled gradually. Non-point source (NPS) pollution, however, has become more and more serious. In the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) of Hubei Province, the pollutants of agricultural NPS were very complex, as the sources, specific types and their quantity were not clear yet. So the recommendation on the prevention and control measures were not perfect. In this study, the authors investigated the agricultural NPS for four counties (districts) in TGRA in 2007 by comprehensive investigation method, calculated their pollutant load by pollution discharge coefficient method and made evaluation and sources analysis by equivalent pollution load method. The results showed that the total discharge or loss amount of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD) of agricultural NPS pollution in the studied area in 2007 is 2918 t·a⁻¹, 346 t·a⁻¹ and 12461 t·a⁻¹ respectively. The main pollutants were TN and TP, with equivalent pollution load 5836 m³·a⁻¹ and 3462 m³·a⁻¹ respectively, and totally accounting for 91.80% of the equivalent total pollution load ratio. The pollution sources mainly come from planting and live-stock breeding, with the equivalent pollution load ratio 56.08% and 34.37%, respectively. In addition, the equivalent pollution load ratio of rural life pollution was up to 7.99%, it should not be neglected. The equivalent pollution load ratio in the four counties (districts) was ranked as Yiling District>Badong County>Zigui County>Xingshan County. The authors suggest that the agricultural NPS control strategy in the TGRA should be: controlling the concentrations of main pollutants—TN and TP; controlling and preventing pollution from the key sources—planting and livestock breeding; and controlling and preventing pollution in the key area—Yiling District.

Keywords: agricultural non-point source pollution; sources analysis; equivalent pollution load method; pollution discharge coefficient method; comprehensive investigation method; Three Gorges Reservoir Area

收稿日期:2011-11-14

基金项目:全国污染源普查重大专项基金项目(WX-Z07-11);国际植物营养研究所(IPNI)中国项目部项目(IPNI-Hubei38)

作者简介:蔡金洲(1987—),男,湖北荆门人,在读硕士研究生,主要从事环境污染控制与防治研究。E-mail:jzcai2010@hotmail.com

* 通讯作者:范先鹏 E-mail:fan1965@163.com

随着科学技术的进步与人们环保意识的提高,对点源污染的控制与治理的力度越来越大,面源污染带来的环境问题日益突出^[1-2]。农业面源污染是面源污染最主要的组成部分^[3],主要来源于不合理使用而流失的化肥、畜禽养殖业、水产养殖业和农村生活排放的污染物^[4],这也将成为制约农业可持续发展和水环境质量的重要因素^[5]。因此,农业面源污染负荷的确定、来源解析已成为研究的热点之一^[6]。农业面源污染负荷的测算方法主要有实测法^[7-8]、模型法^[9-11]和排污系数法^[12-18],其中排污系数法相对简单,对参数要求低,可操作性强,适合在缺乏实验条件的情况下对污染负荷进行估算^[19]。国内外对农业面源污染进行源解析的方法主要是模型法^[20]、平均浓度法^[21]、水质水量相关法^[22]、综合调查法^[23]、单元调查法^[24]和清单法^[25],但多是从排放来源来考虑,没有考虑到对环境水质的危害程度,而等标污染负荷法则是从环境水体水质的功能要求来评价污染物的威胁。

三峡大坝是国家大型水利电力工程,库区水体的水质对长江中下游水质有着重要的影响。自 2003 年蓄水运行以来,水库水体富营养化问题突出,支流处于轻富营养状态的频率为 75%^[26]。库区范围包括重庆市和湖北省 26 个县(市、区),总面积约 7.9 万 km²,库区内农业面源污染物排放直接影响三峡水库水质。但三峡库区农业面源污染物类型复杂、底数不清、来源不明,因而污染防控不力。目前关于三峡库区农业面源污染的研究主要是应用模型来估算污染负荷^[11,27-29],但对库区农业面源缺少全面调查,进行污染源解析的研究也较少^[30-31]。因此,本研究以 2007 年为基准年,采用

综合调查法对湖北省三峡库区农业面源污染现状展开调查,调查结果运用排污系数法估算其污染负荷,采用等标污染负荷法进行综合评价分析,初步明确了湖北省三峡库区农业面源污染的主要污染物、主要污染来源和县(区)对污染的贡献情况,为湖北省三峡库区农业面源污染防控政策的制定及防控技术的采用提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

湖北省三峡库区位于湖北省西部,宜昌以西,紧邻重庆市,面积 11 397 km²,总人口 163.57 万人。4 个库区县(区)分别为夷陵区、兴山县、秭归县以及巴东县,研究区域图见图 1,共 43 个乡镇、972 个村,39.75 万农户,农村总人口 129.82 万人。各县(区)的基本信息见表 1^[32]。

1.2 农业面源污染调查方法

农业面源污染调查以乡(镇)为调查对象,分别对以下 4 种污染源展开调查。

1.2.1 种植业源

种植业源调查包括乡(镇)种植业基本情况普查和农户典型地块抽样调查。乡(镇)基本情况普查内容主要为乡(镇)各类种植模式及面积,农户典型地块按农户数量 0.6% 的比例抽取,调查内容包括地块基本情况、肥料使用等信息。

1.2.2 畜禽养殖业源

对达到规模化养殖(表 2)的畜禽养殖单元开展全面调查。调查内容包括畜禽种类、存栏量、出栏量,

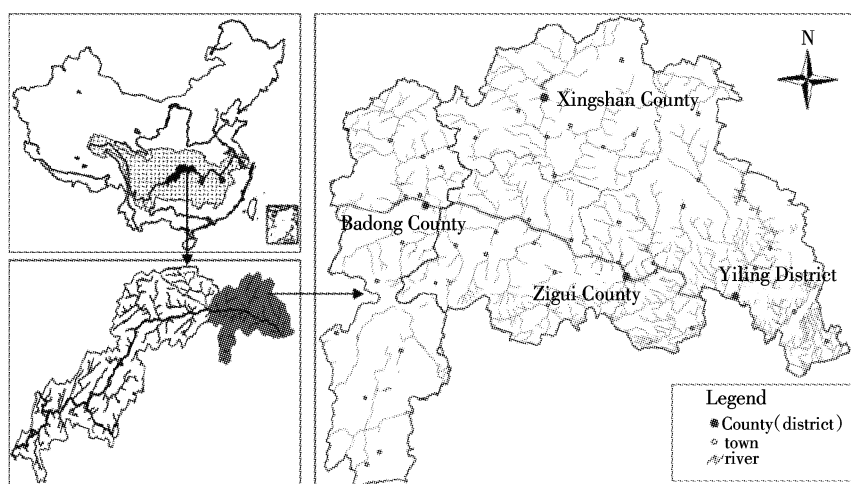


图 1 研究区域图

Figure 1 Chart of studied area

表 1 研究区域基本信息(2007 年)
Table 1 The basic information of studied area(2007)

县(区)	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
乡镇数/个	11	8	12	12	43
农耕面积/hm ²	56 793	19 053	35 151	44 613	155 610
农村人口/万人	39.72	13.96	32.37	43.77	129.82
农牧渔总产值(可比价)/万元	234 264	65 004	95 749	133 509	528 526
水环境功能分区 *	Ⅱ/Ⅲ	Ⅱ/Ⅲ	Ⅱ/Ⅲ	Ⅱ	—

注:* 水环境功能分区根据湖北省地表水功能区划类别划分,“—”表示无有效数据。

表 2 调查的畜禽养殖单元要求的养殖规模
Table 2 Requirements of the scale about survey of livestock and poultry breeding unit

养殖单元	养殖规模				
	生猪:年出栏量/头	奶牛:年存栏量/头	肉牛:年出栏量/头	蛋鸡:年存栏量/羽	肉鸡:年出栏量/羽
养殖场	≥500	≥100	≥200	≥20 000	50 000
养殖小区	≥500	≥100	≥200	≥20 000	50 000
养殖专业户	≥50	≥5	≥10	≥500	≥2 000

注:“养殖小区”指在同一规划区,由多个养殖业主共同组成,按照统一操作规程进行养殖和管理的养殖单元。

污染物的产生、排放情况,饲养阶段及清粪方式。

1.2.3 水产养殖业源

对池塘养殖的面积大于等于 3 335 m²、工厂化养殖水体体积大于等于 1 500 m³ 的水产养殖专业户和全部的规模化水产养殖场进行调查。调查内容包括水产养殖种类、养殖模式、养殖面积、投入品用量和水体交换情况等。

1.2.4 农村生活源

调查统计湖北省三峡库区各乡镇每个行政村农

村常住人口和外来人口数量,并抽样调查农户的用水方式、经济收入状况以及生活垃圾和生活污水处理方式。

1.3 污染负荷计算方法

采用排污系数法计算污染负荷,将各调查对象的调查结果与相对应污染源污染物产排系数(表 3 至表 6)对接,计算出每个调查对象的污染负荷,再按行政单元进行汇总,所有计算过程均由第一次全国污染源普查数据管理系统软件完成。

表 3 湖北省三峡库区种植业肥料流失系数(部分)
Table 3 Loss coefficient of planting fertilizer in TRGA, Hubei(Part)

序号	模式基本情况					流失量/kg·hm ⁻²				肥料流失系数/%	
	地形	梯田/非梯田	种植方向	土地利用方式	种植模式	TN		TP		TN	TP
						常规施肥区	不施肥区	常规施肥区	不施肥区		
1	缓坡地	非梯田	顺坡	旱地	大田两熟及以上	11.805	6.270	0.360	0.255	1.241	0.255
2	缓坡地	非梯田	顺坡	旱地	大田一熟	4.830	4.275	1.125	0.930	0.467	0.644
3	陡坡地	非梯田	横坡	旱地	园地	5.085	4.170	0.375	0.210	0.346	0.122
4	缓坡地	非梯田	横坡	旱地	园地	9.075	6.945	0.885	0.615	0.536	0.120
5	缓坡地	梯田	—	水田	稻油轮作	17.430	15.000	0.465	0.330	0.577	0.671
6	陡坡地	梯田	—	旱地	园地	4.665	3.030	0.885	0.615	0.676	0.289
7	缓坡地	非梯田	横坡	旱地	大田两熟及以上	5.670	3.840	0.105	0.045	0.528	0.188
8	陡坡地	非梯田	顺坡	旱地	大田两熟及以上	2.055	1.410	0.300	0.180	0.628	0.548
9	缓坡地	梯田	—	旱地	园地	5.805	4.740	0.075	0.045	0.174	0.072
10	缓坡地	梯田	—	旱地	园地	14.865	10.470	0.930	0.600	1.270	0.461
11	缓坡地	梯田	—	旱地	大田一熟	17.085	13.095	1.125	0.825	1.435	0.531
12	缓坡地	梯田	—	水田	单季稻	19.335	9.630	0.450	0.330	1.125	0.641
13	陡坡地	梯田	—	旱地	露地蔬菜	21.750	13.500	1.350	0.900	1.500	0.850
14	缓坡地	梯田	—	水田	稻麦轮作	17.430	15.000	0.465	0.330	0.577	0.671
15	平地	—	—	旱地	露地蔬菜	18.495	11.400	5.835	5.040	1.464	0.873
16	平地	—	—	水田	稻麦轮作	16.590	13.485	0.360	0.285	0.875	0.182
17	平地	—	—	水田	稻油轮作	19.515	16.680	0.825	0.555	1.123	0.280

注:系数来源于第一次全国污染源普查肥料流失系数手册,表中只列出研究区域主要模式的流失系数,共 17 种;“—”表示无有效数据。

表 4 湖北省三峡库区畜禽养殖业排污系数(部分)

Table 4 Pollution discharge coefficient of livestock and poultry breeding in TRGA, Hubei(Part)

动物种类	饲养阶段	参考体重/kg	污染物	单位	清粪工艺	排污系数		
						畜禽养殖场	畜禽养殖小区	畜禽养殖专业户
生猪	保育	27	COD	g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	干清粪	24.79	37.27	28.83
					水冲清粪	93.73	80.91	172.35
			TN		干清粪	5.67	8.16	7.29
					水冲清粪	9.11	9.77	12.48
			TP		干清粪	0.19	1.23	0.23
					水冲清粪	1.52	1.82	1.90
奶牛	产奶	624	COD	g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	干清粪	888.07	701.55	427.40
					水冲清粪	6 265.32	5 452.43	3 154.22
			TN		干清粪	148.41	159.66	103.78
					水冲清粪	264.77	319.09	147.95
			TP		干清粪	6.86	3.86	2.82
					水冲清粪	60.71	39.01	26.67
肉牛	育肥肉牛	316	COD	g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	干清粪	215.22	205.25	415.77
					水冲清粪	2 045.46	1 950.70	1 652.36
			TN		干清粪	32.15	30.79	40.84
					水冲清粪	60.42	57.86	65.64
			TP		干清粪	0.73	0.70	2.00
					水冲清粪	9.84	9.41	10.07
蛋鸡	产蛋	1.8	COD	g·只 ⁻¹ ·d ⁻¹	干清粪	0.30	0.23	0.37
					水冲清粪	8.49	6.50	5.69
			TN		干清粪	0.02	0.01	0.03
					水冲清粪	0.53	0.41	0.35
			TP		干清粪	0.01	0.01	0.14
					水冲清粪	0.12	0.09	0.18
肉鸡	商品肉鸡	0.6	COD	g·只 ⁻¹ ·d ⁻¹	干清粪	3.36	5.81	2.39
					水冲清粪	7.53	13.01	11.85
			TN		干清粪	0.11	0.19	0.08
					水冲清粪	0.32	0.55	0.39
			TP		干清粪	0.02	0.03	0.05
					水冲清粪	0.04	0.06	0.05

注：系数来源于第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册。表中只列出了中南区 5 种动物种类对应的某一个饲养阶段的排污系数；清粪工艺有 3 种，表中列出了 2 种，垫草垫料省略，其排污系数均为 0。

污染负荷具体的计算方法如下：

(1)种植业源,先根据种植业污染物流失系数与抽样地块的调查结果,计算出抽样地块的污染负荷,再以乡镇为单元,根据抽样地块的种植模式所占的比重计算出该种模式的污染负荷,最后对调查单元内所有种植模式的污染负荷进行汇总。

(2)畜禽养殖业源,根据畜禽养殖业污染物排污系数和单个养殖单元的调查结果,计算出每个养殖单元内不同养殖品种、不同生育阶段的污染负荷,汇总出该养殖单元的污染负荷,再按行政区划对区域内所有的养殖单元进行汇总。

(3)水产养殖业源,根据水产养殖业污染物排污系数与养殖单元的调查结果,以该养殖单元内不同养殖品种的年增产量,计算出每个养殖单元的污染负荷,再按行政区划单元进行汇总。

(4)农村生活源,根据三峡库区农村生活垃圾与农村生活污水排污系数和每个行政村及抽样农户的调查结果,计算每个行政村的农村生活源的污染负荷,再进行汇总。

1.4 评价方法

采用等标污染负荷的方法^[23,30]对各种污染物、污染源进行综合评价。相关公式计算如下：

$$P_i=\frac{Q_i}{C_{0i}}\times 10^{-6}$$
$$K_i=\frac{P_i}{\sum P_i}\times 100\%$$

式中: P_i 为污染物 i 的等标污染负荷量,单位为 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$;
 Q_i 为污染物 i 的排放量,单位为 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; C_{0i} 为污染物
 i 基于水环境功能分区的水质控制类别标准值(GB
3838—2002 地表水环境质量标准),单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; K_i
为污染物 i 的等标污染负荷比。

2 结果与分析

2.1 农业面源污染排放的污染物类型及其总量

湖北省三峡库区 4 个县(区)不同污染源排放/流
失的污染物类型及其总量见表 7,农业面源污染物类
型分别为总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD),
分别来源于种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和农村
生活源。通过计算,湖北三峡库区 2007 年农业面源排
放/流失的 TN、TP 和 COD 的总量分别为 2 918.08、
346.22、12 461.10 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.2 农业面源污染综合评价分析

不同的污染物和污染源具有不同的特征、不同的
环境效应、不同的危害,为了使它们能在同一尺度上
加以比较,采用一个共同的指标来衡量各类污染物或
污染源对外环境潜在的污染能力大小,需要对污染物
和污染源进行标化计算,最常用的特征数是等标污染
负荷,用来确定主要污染源或主要污染物。

2.2.1 农业面源主要污染物类型分析

湖北省三峡库区 4 个县(区)排放的 4 种污染
物的等标污染负荷表明(表 8):农业面源污染物等标污
染负荷为 10 129.10 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,TN 和 TP 的等标污染负荷

表 5 湖北省三峡库区水产养殖业排污系数(部分)
Table 5 Pollution discharge coefficient of aquaculture in TRGA,
Hubei(Part)

养殖规模	养殖品种	排污系数/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
		TN	TP	COD
池塘养殖	青鱼	1.184	0.218	17.625
	草鱼	0.681	0.134	7.755
	鲢鱼	2.642	0.458	19.967
	鲤鱼	0.634	0.117	9.441
	鲫鱼	2.169	1.018	22.591
	泥鳅	8.055	0.589	71.240
工厂化养殖	黄鳝	47.283	10.861	73.188
	龟	16.775	2.656	15.907
网箱养殖	鳖	39.295	6.221	37.262
	草鱼	32.762	6.195	36.685
	鲢鱼	23.714	4.200	29.115
	鲤鱼	47.630	8.557	42.588
	鲫鱼	15.723	7.538	22.086
	黄鳝	54.848	9.829	276.005

注:系数来源于水产养殖业源产排污系数手册。表中只列出研究
区域内主要养殖品种的排污系数。

比分别为 57.62%和 34.18%,所占比例相对较大。4 个
县(区)排放的不同污染物等标污染负荷比(图 2)都不
同,TN 和 TP 的等标污染负荷比都远大于其他污染
物,可见,TN 和 TP 是主要污染物。

2.2.2 农业面源污染源分析

用等标污染负荷比解析不同污染源,结果(图 3)
表明:湖北省三峡库区种植业和畜禽养殖业排放的污
染物等标污染负荷比分别为 56.08%和 34.37%,农村
生活排放的污染物等标污染负荷比之和相对较小,为
7.99%。4 个县(区)不同污染源排放污染物的等标污

表 6 湖北省三峡库区农村生活源排污系数
Table 6 Pollution discharge coefficient of rural life in TRGA, Hubei

序号	收入 水平	有无排 水措施	是否 处理后 排放	生活污水				生活垃圾			
				污水量/ $\text{L}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	COD/ $\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	TP/ $\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	TN/ $\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	垃圾量/ $\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	有机垃圾量/ $\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	TP/ $\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	TN/ $\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$
1	高	有	是	7.27	11.1	0.03	0.26	0.35	0.05	0.03	0.13
2	中	有	是	7.27	11.1	0.03	0.26	0.43	0.07	0.03	0.17
3	低	有	是	7.27	11.1	0.03	0.26	0.39	0.06	0.03	0.14
4	高	有	否	7.27	11.1	0.03	0.26	0.35	0.05	0.03	0.13
5	中	有	否	7.27	11.1	0.03	0.26	0.43	0.07	0.03	0.17
6	低	有	否	7.27	11.1	0.03	0.26	0.39	0.06	0.03	0.14
7	高	无	—	3.69	6.24	0.02	0.15	0.35	0.05	0.03	0.13
8	中	无	—	3.69	6.24	0.02	0.15	0.43	0.07	0.03	0.17
9	低	无	—	3.69	6.24	0.02	0.15	0.39	0.06	0.03	0.14

注:系数来源于第一次全国污染普查城镇生活源产排污系数手册。

表 7 4 个县(区)不同污染源排放/流失的污染物种类和总量

Table 7 The types and gross of pollutants from different pollution sources in 4 counties(districts)

污染源	污染物	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
种植业/t·a ⁻¹	TN	796.55	180.98	330.61	458.45	1 766.59
	TP	76.24	22.79	44.18	71.55	214.76
畜禽养殖业/t·a ⁻¹	TN	471.45	97.00	205.48	180.75	954.68
	TP	29.13	13.06	28.77	28.72	99.68
	COD	2 997.79	1 047.60	2 380.78	2 195.35	8 621.52
水产养殖业/t·a ⁻¹	TN	6.73	0	32.86	0.80	40.39
	TP	1.01	0	6.01	0.16	7.18
	COD	27.28	0.05	56.17	1.97	85.47
农村生活源/t·a ⁻¹	TN	50.20	14.13	34.70	57.39	156.42
	TP	7.97	2.28	5.59	8.76	24.60
	COD	1 269.23	312.57	758.14	1 414.17	3 754.11

表 8 不同污染物等标污染负荷(m³·a⁻¹)

Table 8 The equivalent pollution load of different pollutants in 4 counties(districts)(m³·a⁻¹)

污染物种类	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
TN	2 649.86	584.22	1 207.30	1 394.78	5 836.16
TP	1 143.50	381.30	845.50	1 091.90	3 462.20
COD	2 86.29	90.68	213.01	240.77	830.74
合 计	4 079.65	1 056.20	2 265.81	2 727.45	10 129.10

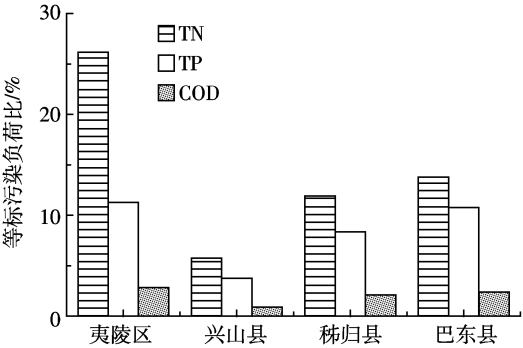


图 2 4 个县(区)不同污染物的等标污染负荷比

Figure 2 The equivalent pollution load ratio of different pollutants in 4 counties(districts)

染负荷比(图 4)显示不同的污染源对污染的贡献差别较大,种植业和畜禽养殖业对污染的贡献都明显大于水产养殖业和农村生活源。

2.3 农业面源污染分析

湖北省三峡库区农业面源污染源主要是种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和农村生活源。

2.3.1 种植业分析

湖北省三峡库区农用地面积 155 610 hm², 包括旱地、水田和园地。4 个县(区)氮、磷肥(以 N、P₂O₅ 计)的使用总量分别为 75 596.48、31 395.55 t·a⁻¹,每

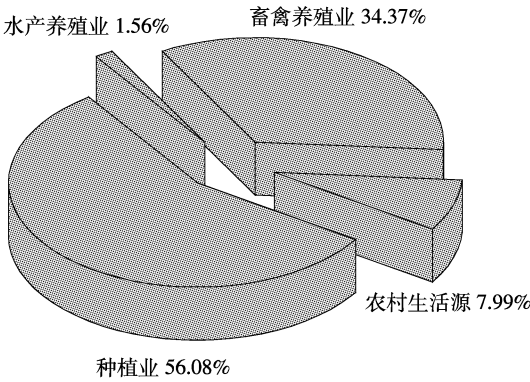


图 3 不同污染源等标污染负荷比

Figure 3 The equivalent pollution load ratio from different pollution sources

年的平均使用量分别为 485.80、201.76 kg·hm⁻²。4 个县(区)的 TN 和 TP 的流失总量分别为 1 766.59、214.76 t·a⁻¹(表 9)。县(区)之间相同污染物的流失量大小存在差异,但趋势相同,从大到小顺序为夷陵区>巴东县>秭归县>兴山县。

2007 年,湖北省三峡库区 4 个县(区)农田肥料 N、P 平均流失强度分别为 11.35、1.38 kg·a⁻¹·hm⁻², 库区农田肥料 N、P 当年流失量占施肥量的比例(流失率)分别为 0.86%、0.89%(表 10)。各县(区)肥料平均 N、P 流失率和流失强度整体表现出夷陵区和巴东县大于其他县(区),这与当地的农业发展程度相吻合。

2.3.2 畜禽养殖业分析

湖北省三峡库区 4 个县(区)共有畜禽养殖场 46 个,养殖小区 10 个,养殖专业户 1 248 个,主要饲养猪、奶牛、肉牛、蛋鸡和肉鸡。粪便和尿液的总产生量分别为 9.58 万 t·a⁻¹ 和 16.08 万 t·a⁻¹,排放到环境中

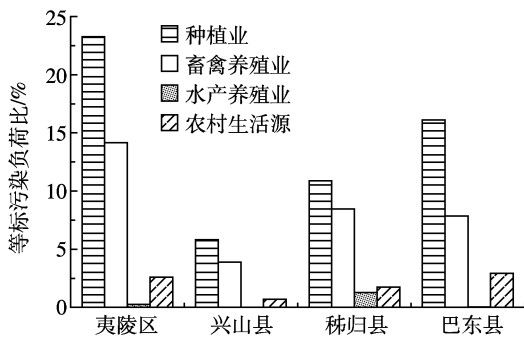


图 4 4 个县(区)不同污染源的等标污染负荷比

Figure 4 The equivalent pollution load ratio from different pollution sources in 4 counties(districts)

的主要污染物包括 TN($954.68\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)、TP($99.68\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)和 COD($8\,621.52\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)。畜禽养殖业排放的污染物等标污染负荷为 $3\,480.93\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (表 11),其中 TN 和 TP 的等标污染负荷比分别为 54.85%和 28.64%,对污染的贡献较大,为主要污染物。不同县(区)之间等标污染负荷比存在差异,从大到小依次为夷陵区>秭归县>巴东县>兴山县。

2.3.3 水产养殖业分析

湖北省三峡库区水产养殖主要有 3 种方式,即池

塘养殖、工厂化养殖和网箱养殖。库区 4 个县(区)无规模化水产养殖场,养殖专业户共有 361 户,养殖总面积为 267.32 hm^2 ,饲料、药物和肥料的使用总量分别为 $3\,995.97$ 、 229.41 、 $3\,337.37\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,排放的污水中包括 TN($40.39\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)、TP($7.18\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)和 COD($85.47\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)。水产养殖业排放的污染物等标污染负荷为 $158.28\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (表 12)。TN 和 TP 的等标污染负荷比分别为 51.04%和 45.36%,在污染物中比重很大,为主要污染物。按照县(区)分析,秭归县的等标污染负荷比(81.85%)最大,兴山县最小,几乎为 0。

2.3.4 农村生活分析

湖北省三峡库区 4 个县(区)包含 972 个村民委员会,户籍人口总数为 1 324 726 人(其中户籍常住人口 1 193 776 人),外来常住人口 49 682 人。农村生活产生的生活污水和生活垃圾很少经过处理而直接排放到环境中,生活污水和生活垃圾的产生总量分别为 $847.61\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $23.26\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,排放总量分别为 $235.39\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $17.82\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。排放的生活污水和生活垃圾中污染物主要包括 TN($156.42\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)、TP($24.60\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)和 COD($3\,754.11\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)。农村生活源排放的污染

表 9 4 个县(区)农田肥料 N、P 使用与流失情况($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 9 The use and loss of nitrogen and phosphorus from farmland fertilizer in 4 counties(districts)($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

项目		夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
肥料使用量	N	26 414.33	8 329.93	17 024.63	23 827.59	75 596.48
	P ₂ O ₅	9 540.60	3 374.16	7 649.00	10 831.79	31 395.55
	合计	35 954.93	11 704.09	24 673.63	34 659.39	106 992.04
TN 流失量	本年流失量	233.60	67.83	120.72	224.15	646.30
	基础流失量	562.95	113.15	209.89	234.31	1 120.30
	合计	796.55	180.98	330.61	458.45	1 766.59
TP 流失量	本年流失量	34.33	13.66	27.37	46.80	122.16
	基础流失量	41.91	9.13	16.82	24.76	92.62
	合计	76.24	22.79	44.18	71.55	214.76
NH ₃ -N 流失量	本年流失量	64.11	14.35	22.57	43.57	144.60
	基础流失量	45.19	10.63	19.99	32.41	108.22
	合计	109.30	24.99	42.56	75.98	252.83

注:基础流失量为农田本底流失量,即不施肥情况下的流失量;本年流失量为当年由于施肥造成的流失量。

表 10 4 个县(区)农田肥料 N、P 平均流失率与平均流失强度

Table 10 Average loss rate and erosion strength of nitrogen and phosphorus from farmland fertilizer in 4 counties(districts)

项目	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	湖北三峡库区
肥料 N 平均流失率/%	0.884	0.814	0.709	0.941	0.855
肥料 P 平均流失率/%	0.824	0.927	0.820	0.990	0.891
肥料 N 平均流失强度/ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$	14.025	9.500	9.405	10.276	11.353
肥料 P 平均流失强度/ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$	1.342	1.196	1.257	1.604	1.380

表 11 4 个县(区)畜禽养殖业排放污染物的等标
污染负荷($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 11 The equivalent pollution load of pollutants from livestock
breeding in 4 counties(districts)($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

污染物种类	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
TN	942.90	194.00	410.96	361.50	1 909.36
TP	291.30	130.60	287.70	287.20	996.80
COD	199.85	69.84	158.72	146.36	574.77
合 计	1 434.05	394.44	857.38	795.06	3 480.93

表 12 4 个县(区)水产养殖业排放污染物的等标
污染负荷($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 12 The equivalent pollution load ratio of pollutants from
aquaculture in 4 counties(districts)($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

污染物种类	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
TN	13.46	0	65.72	1.60	80.78
TP	10.10	0	60.10	1.60	71.80
COD	1.82	0	3.74	0.13	5.70
合 计	25.38	0	129.56	3.33	158.28

物等标污染负荷为 $809.11 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (表 13),TN、TP 和 COD 的等标污染负荷比分别为 38.67%、30.40%和 30.93%。各县(区)之间等标污染负荷比也存在差异,依次为巴东县(36.66%)>夷陵区(32.72%)>秭归县(21.73%)>兴山县(8.89%)。

表 13 4 个县(区)农村生活排放污染物的等标
污染负荷($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 13 The equivalent pollution load ratio of pollutants from
rural life in 4 counties(districts)($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

污染物种类	夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	合 计
TN	100.40	28.26	69.40	114.78	312.84
TP	79.70	22.80	55.90	87.60	246.00
COD	84.62	20.84	50.54	94.28	250.27
合 计	264.72	71.90	175.84	296.66	809.11

3 讨论

湖北省三峡库区农业面源污染主要污染源为种植业和畜禽养殖业,农村生活源也不容忽视,主要污染物为 TN 和 TP,说明湖北省三峡库区农业面源污染属于生产与生活复合型污染。张英鹏等^[33]曾对微山岛的农业面源污染源进行解析,结果表明微山岛的主要污染源是养殖业,以水产养殖业为主;曹彦龙等^[30]对重庆三峡库区面源污染源解析结果显示,化肥流失、水土流失、畜禽养殖业是面源污染的主要来源。而本区域种植业和畜禽养殖业是主要污染源,原因在于该

区域地处山区,农业产业结构与微山岛不同,与重庆山峡库区相似,主要以种植业和畜禽养殖为主,水产养殖由于地理环境的因素限制了其发展,对污染的贡献比例很小;区域内农村缺少生活垃圾及生活污水处理设施,农村生活对污染贡献比例比水产养殖大。区域内农业面源的主要污染物是 TN 和 TP,与周军等^[34]对黑龙江省阿什河流域的研究结果相似,可见农业面源污染中 N 和 P 是主要污染物,控制 N 和 P 排放量是防治湖北省三峡库区农业面源污染的有效手段。

湖北省三峡库区氮、磷肥(以 N 、 P_2O_5 计)的平均施用量分别为 485.80 、 $201.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是全国平均施用量($158 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[35]的 3 倍,氮、磷肥每年的使用总量($687.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)远高于国际上为防止水体污染而设置的化肥使用安全上限($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),是全国平均用量($375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 1.8 倍,是美国平均用量($108.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 6.3 倍^[36-37]。因此,合理使用化肥是湖北省三峡库区农业面源污染的防治重点。库区 4 个县(区) N、P 平均流失率与平均流失强度分析结果表明,N、P 的流失情况和对环境的压力要考虑多种因素影响,不仅要考虑 N、P 肥的使用情况,而且要考虑该地区的本底流失量、种植模式、地理地势、气候条件和地表径流等因素。由于在调查过程中未对以上因素进行详细调查,难以量化 N、P 流失量及对环境压力与众多因素之间的关系,在今后的研究中,我们将进一步研究它们之间的关系。

对各污染源污染物排放量和等标污染负荷进行分析,发现各污染源的主要污染物是 TN 和 TP,种植业中 TN 和 TP 的等标污染负荷比最大,说明 TN 和 TP 主要来源于种植业,COD 主要来源于畜禽养殖业;水产养殖业排放的污染物主要来自秭归县,兴山县几乎无污染物排放,水产养殖业对湖北省三峡库区内的贡献最小。这些则可以作为各县(区)制定面源污染防控政策的参考。

4 结论

(1)湖北省三峡库区 2007 年农业面源污染 TN、TP 和 COD 的排放/流失总量分别为 $2\,918.08$ 、 346.22 、 $12\,461.10 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$;主要污染物是 TN 和 TP,其等标污染负荷分别为 $5\,836.16$ 、 $3\,462.20 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,等标污染负荷比之和为 91.80%。

(2)湖北省三峡库区的主要污染源为种植业、畜禽养殖业,农村生活污染源也不容忽视,这 3 种污染源等标污染负荷比分别为 56.08%、34.37%、7.99%。

(3)湖北省三峡库区不同县(区)等标污染负荷比有所不同,依次为夷陵区>巴东县>秭归县>兴山县。

(4)种植业是N、P污染的主要来源。COD主要来源于畜禽养殖业,但畜禽养殖业排放的主要污染物仍然是TN,夷陵区是主要的防控对象。水产养殖业产生的污染物中TN和TP对污染的贡献都较大,主要来源于秭归县。农村生活污染源中TN、TP和COD都是主要污染物,重点防控区域为夷陵区和巴东县。

参考文献:

- [1] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modeling in China [J]. *Separ Purif Technol* (2011), doi: 10. 1016/j. seppur. 2011. 01. 18.
- [2] 周石池, 宋玉梅, 王 瑞, 等. 海南岛农田面源污染在生物气候区分布上的特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1660-1668.
ZHOU Shi-chi, SONG Yu-mei, WANG Rui, et al. Characteristics of agricultural non-point source pollution in bio-climatic division in Hainan Island, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1660-1668.
- [3] Miller G T. Living in the environment: An introduction to environmental science[M]. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992.
- [4] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口资源与环境, 2010, 20(4): 81-84.
LI Xiu-fen, ZHU Jin-zhao, GU Xiao-jun, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 81-84.
- [5] 郭春霞. 平原河网地区农村面源污染重点源和区的识别筛选: 以上海青浦区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1652-1659.
GUO Chun-xia. Identification of critical sources and areas of rural non-point source pollution in the plain river network area: A case study of Qingpu, Shanghai, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1652-1659.
- [6] 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 世纪初中国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 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [7] 纪丁愈, 王庆安, 余红英, 等. 川中丘陵地区小流域农业面源污染特征及水环境容量研究: 以黄腊溪小流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 81-84.
JI Ding-yu, WANG Qing-an, SHE Hong-ying, et al. Research on the agricultural non-point pollution characteristic and water environment capacity in hilly area of central Sichuan basin: A case study of Huang Laxi small watershed[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, 22(4): 81-84.
- [8] 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.
- [9] 侯彦林, 赵慧明, 李红英. 中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证 III: 估算模型的实证[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1337-1340.
HOU Yan-lin, ZHAO Hui-ming, LI Hong-ying. Estimation and demonstration of nitrogen non-point pollution in China III: Demonstration of the model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1337-1340.
- [10] Liu Jiang-chang, Zhang Luo-ping, Zhang Yu-zhen, et al. Validation of an agricultural non-point source (AGNPS) pollution model for a catchment in the Jiulong River watershed, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(5): 599-606.
- [11] 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]. *Sci Total Environ* (2011), doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2011. 09. 034.
- [12] 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.
- [13] 陈景春, 刘诗云, 彭绪亚. 重庆长寿湖农村生活污水污染及防治对策研究[J]. 农业环境与发展, 2008, 25(6): 94-98.
CHEN Jing-chun, LIU Shi-yun, PENG Xu-ya. Research on pollution of domestic wastewater and countermeasures in Changshou Lake, Chongqing[J]. *Agro-Environment & Development*, 2008, 25(6): 94-98.
- [14] 帅方敏, 王新生, 陈红兵, 等. 长湖流域非点源污染现状分析[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(5): 118-122.
SHUAI Fang-min, WANG Xin-sheng, CHEN Hong-bing, et al. Analysis of non-point pollution of current Changhu Drainage-area [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(5): 118-122.
- [15] 张 导, 张 琰, 宋学宏, 等. 苏州市环太湖农业面源污染调查及控制对策[J]. 农业环境与发展, 2009, 26(6): 71-75.
ZHANG Dao, ZHANG Yan, SONG Xue-hong, et al. Investigation and control measures of agricultural non-point source pollution in Huantai Lake, Suzhou[J]. *Agro-Environment & Development*, 2009, 26(6): 71-75.
- [16] 段 亮, 段增强, 夏四清. 太湖旱地非点源污染量化研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 40-43.
DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, XIA Si-qing. Quantification of non-point pollution from uplands in Taihu Lake catchment [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6): 40-43.
- [17] 伊 平, 张 磊, 包 键. 天目湖流域农业面源污染控制研究[J]. 污染防治技术, 2008, 21(6): 38-40, 43.
YI Ping, ZHANG Lei, BAO Jian. Study on controlling of the agricultural non-point source pollution in the Tianmu Lake Valley[J]. *Pollution Control Technology*, 2008, 21(6): 38-40, 43.
- [18] 王晓燕, 张雅帆, 欧 洋. 北京密云水库上游太师屯镇非点源污染损失估算[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 37-41.
WANG Xiao-yan, ZHANG Ya-fan, OU Yang. Economic loss caused by non-point source pollution: A case study of Taishitun Town, Upper Catchment of Miyun Reservoir, Beijing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4): 37-41.
- [19] 董蓓蓓, 马淑花, 曹宏斌, 等. 乌梁素海流域污染现状分析及防治对策[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10402-10405, 10408.
DONG Bei-bei, MA Shu-hua, CAO Hong-bin, et al. Analysis and

- countermeasures of pollution in Wuliangshuai Basin[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(17):10402-10405, 10408.
- [20] Grunwalda S, Norton L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45: 17-39.
- [21] 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.
- LI Huai-en. Mean concentration method for estimation of non-point source load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):397-400.
- [22] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4):384-386.
- HONG Xiao-kang, LI Huai-en. Correlation method of water quality and quantity and its application to load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(4): 384-386.
- [23] 钱秀红. 杭嘉湖平原农业非点源污染的调查评价及控制对策研究[D]. 杭州:浙江大学, 2001.
- QIAN Xiu-hong. Research on the investigation, assessment and control measures of agricultural non-point source pollution in Hang-Jia-Hu Plain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [24] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(9):1184-1187.
- LAI Si-yun, DU Peng-fei, CHEN Ji-ning. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2004, 44(9):1184-1187.
- [25] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6):751-755.
- CHEN Min-peng, CHEN Ji-ning, LAI Si-yun. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6):751-755.
- [26] 王丽娟, 郑邦辉, 李子成. 三峡库区及上游流域面源污染特征与防治策略[J]. 长江流域与环境, 2009, 18(8):783-788.
- WANG Li-jing, ZHENG Bing-hui, LI Zi-cheng. Characteristics and administrative strategy of non-point source pollution in Three Gorges Reservoir and its upstream watershed [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(8):783-788.
- [27] 许其功, 席北斗, 何连生, 等. 三峡库区大宁河流域非点源污染研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3):299-303.
- XU Qi-gong, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, et al. Research on non-point pollution sources in Daning River watershed of the Three Georges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Environment Engineering*, 2008, 2(3): 299-303.
- [28] 郝俊萍. 三峡库区典型小流域非点源污染模拟研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.
- HAO Jun-ping. Study on non-point source pollution simulation of representative small watershed in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [29] Shen Z Y, Hong Q, Yu H, et al. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. *Sci Total Environ*, 2008, 405(1-3):195-205.
- [30] 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.
- [31] 周淑春, 陈蓓, 程川. 三峡库区小城镇面源污染现状与应对措施:以万州区分水镇为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 665-669.
- ZHOU Shu-chun, CHEN Bei, CHENG Chuan. Non-point source pollution and control strategy in a small town of Three Gorges Reservoir: A case study in Fenshui of Wanzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):665-669.
- [32] 湖北省统计局. 2007年湖北省农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- Hubei Provincial Bureau of Statistics. Hubei rural statistical yearbook (2007)[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2007.
- [33] 张英鹏, 李彦, 孙明, 等. 微山岛农业面源污染源解析与防控对策[J]. 环境与可持续发展, 2010(4):51-55.
- ZHANG Ying-peng, LI Yan, SUN Ming, et al. Sources analysis and the prevention and control measures of agricultural non-point source pollution in Weishan Island[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2010(4):51-55.
- [34] 周军, 马云, 叶珍, 等. 阿什河流域农业非点源污染负荷及现状评价[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(5):164-168.
- ZHOU Jun, MA Yun, YE Zhen, et al. Load and status evaluation of agricultural non-point source pollution in Ashi River Basin[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(5):164-168.
- [35] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. 科技导报, 2005, 23(4):47-51.
- ZHU Zhao-liang, SUN Bo, YANG Lin-zhang, et al. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China[J]. *Science and Technology Review*, 2005, 23(4):47-51.
- [36] 周军, 叶珍, 马云, 等. 牡丹江流域农业面源污染特征及防治对策研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(2):46-48.
- ZHOU Jun, YE Zhen, MA Yun, et al. Research on the characters of agricultural non-point pollution and control countermeasures in Mudan River Basin[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(2): 46-48.
- [37] 薛旭初. 宁波市农业面源污染现状及对策研究[J]. 宁波农业科技, 2006(1):15-18.
- XUE Xu-chu. Status and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Ningbo[J]. *Ningbo Agricultural Science and Technology*, 2006(1):15-18.