

Estimation of Total Nitrogen and Phosphorus Load of Non-Point Source in the Xiangxi River Basin

Xuecai Du¹, Bo Hu^{2*}, Xiaoxia Tong²

¹Administration Bureau of Water Diversion Project in Central Yunnan, Kunming Branch, Kunming Yunnan

²Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan Hubei

Email: *hubchina@hotmail.com

Received: Mar. 23rd, 2020; accepted: Apr. 27th, 2020; published: May 14th, 2020

Abstract

Taking the Xiangxi River Basin of the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) as the research area, the output coefficients of different pollution source load models were determined by means of field observation experiments and literature review, and the three pollution source loads of land use, animal husbandry and residential life in the small Xiangxi River Basin were estimated. The results indicate that forest land and dry land are the biggest contribution factors in the load of land use pollution sources. The order of nitrogen load of different pollution sources from high to low is livestock and poultry breeding, land use, domestic pollution, while the order of phosphorus load of different pollution sources from high to low is land use, livestock breeding, domestic pollution. Therefore, reasonable farmland management, optimized control methods of forest and dry land fertilization and sewage discharge of livestock and poultry breeding are of great importance to the prevention and control of total nitrogen and phosphorus in the Xiangxi River basin of TGRA.

Keywords

Export Coefficient Method, Observation Experiments, Numerical Simulation, Non-Point Source Pollution, Total Nitrogen and Total Phosphorus

香溪河流域非点源总氮总磷负荷估算

杜学才¹, 胡波^{2*}, 童晓霞²

¹云南省滇中引水工程建设管理局昆明分局, 云南 昆明

²长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉

Email: *hubchina@hotmail.com

收稿日期: 2020年3月23日; 录用日期: 2020年4月27日; 发布日期: 2020年5月14日

作者简介: 杜学才, 男, 1974年8月出生, 云南省昆明市人, 本科学历, 高级工程师, 主要从事工程建设与管理、水环境研究等方面的工作。
*通讯作者。

摘要

以三峡库区香溪河流域为研究区,利用现场观测实验及查阅文献等方法确定不同污染源负荷模型输出系数,估算得出香溪河小流域土地利用、畜牧养殖及居民生活三种污染源负荷。结果表明,林地和旱地是土地利用污染源负荷中贡献率最大的,香溪河小流域总氮负荷量(TN)由高到低依次为畜牧养殖污染 > 土地利用污染 > 居民生活污染,而总磷负荷量(TP)由高到低依次为土地利用污染 > 畜牧养殖污染 > 居民生活污染。因此,选择合理的农田管理措施,有效控制林地、旱地施肥量及畜牧养殖污水排放,是防控三峡库区香溪河流域非点源污染的关键。

关键词

输出系数模型, 现场观测, 数值模拟, 非点源污染, 总氮总磷

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三峡库区是我国重要的淡水水源地,是我国南水北调中线工程的重要补给水源。由于库区次级河流氮磷浓度较高,自三峡水库蓄水以来,受水位壅升和回水顶托的影响,“水华”频发。随着库区点源污染逐步控制,非点源污染(又称面源污染)逐渐成为库区水环境污染的主要原因,因此开展对三峡库区非点源氮磷负荷的估算和预测研究,对库区的水环境安全和水污染的治理具有重要的理论和实践意义。

随着国家重大水专项的进展,水污染治理进入新阶段,开展对非点源污染的控制和治理成为重要的课题,而输出系数模型在非点源污染年负荷模拟和分析中发挥着重要的作用。目前,很多研究者利用输出系数模型,对国内外相关流域的非点源污染负荷进行了模拟分析研究,结果均表明输出系数模型在资料缺测地区进行非点源污染负荷模拟研究优势明显[1]-[12]。同时,总体上可以看出,目前的研究多基于输出系数模型采用定性分析等方法对面源污染负荷进行估算,模型的相关计算参数主要通过理论计算或者查阅相关文献来确定,未在研究区开展相关观测实验。

本文拟针对三峡库区的香溪河典型小流域,结合研究区径流小区实验结果及相关文献,基于输出系数模型估算研究区非点源污染负荷,主要包括总氮(Total nitrogen, TN)负荷、总磷(Total phosphorus, TP)负荷,分析不同污染源对研究区非点源污染负荷的贡献,以期对香溪河流域乃至整个三峡库区非点源污染防控提供决策依据。

2. 研究区概况

香溪河是三峡库首的第一大支流,位于湖北省兴山县境内,流域总面积约为 3150 km²,拥有南阳河、古夫河、高岚河 3 条主要支流(图 1)。香溪河流域属亚热带大陆型季风气候,多年平均气温 17.1℃,多年平均降雨量为 900~1200 mm,年均降雨日为 130 d,降雨主要集中在 5~9 月。土壤类型繁多,有黄壤,黄棕壤,石灰土,紫色土,水稻土,潮土等。香溪河流是三峡库区典型的农林复合小流域,土地利用类型主要分为水田、旱地、林地、果园、草地、水域和城镇用地。土地利用类型及面积见表 1。

Table 1. The land use of the Xiangxi River basin
表 1. 香溪河流域土地利用情况表

序号	土地利用类型	面积(km ²)	占流域面积比例(%)
1	水田	54.81	1.74
2	旱地	120.02	3.81
3	林地	2774.70	88.08
4	果园	15.12	0.48
5	草地	164.13	5.21
6	水域	16.07	0.51
7	城镇用地	5.36	0.17
8	合计	3150.21	100

随着三峡水库的建设,库区内的人口进行了大规模的迁移,区域内人口快速的增长,库区的畜牧养殖业主要以养殖牛、猪、羊和家禽为主,根据查阅《兴山县统计年鉴》及香溪河流域相关区县 2010 年政府工作报告等相关资料,得出 2010 年香溪河流域农业人口为 13.1251 万人,香溪河流域畜牧养殖规模为:牛 2624 头,猪 312,519 头,羊 107,249 头,家禽 378,200 只。

因库区人多地少,实践“高投入,高产出”传统的经营模式,在降雨条件下水土流失、化肥流失及养殖污水排放引起的非点源污染是香溪河水体富营养化的重要原因。

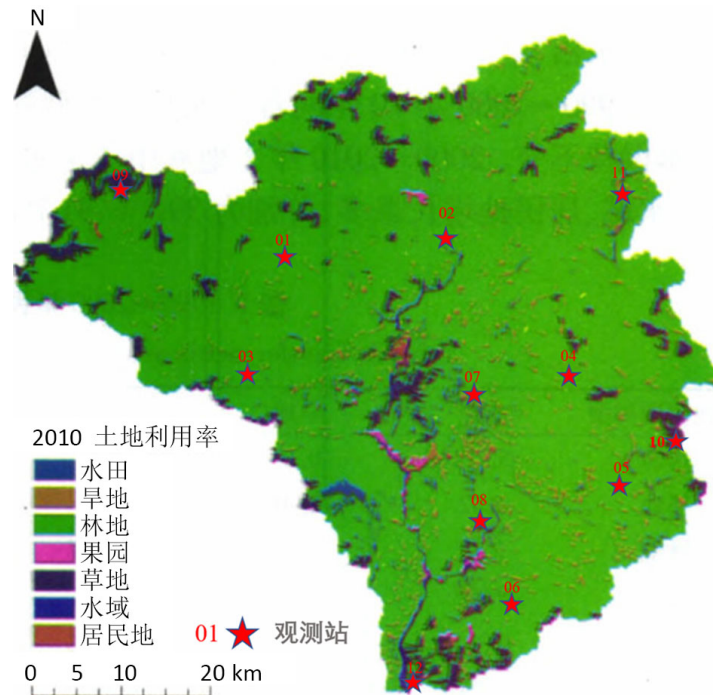


Figure 1. The location of the Xiangxi River basin
图 1. 香溪河流域意图

3. 模型模拟计算

经过对香溪河流域面源污染源进行分类调查统计分析,明确了库区氮、磷面源污染负荷主要来源分别为土地利用、畜牧养殖和居民生活污染源。

本文在三峡库区香溪河流域及其他与香溪河流域相似的典型小流域不同土地利用区选取典型观测试验区,对不同土地利用单位面积污染负荷输出进行试验观测。通过实验,确定不同土地利用类型的氮、磷负荷输出系数,然后根据整个小流域面积及输出系数,利用输出系数模型,估算得到整个小流域不同土地利用类型的面源污染负荷输出量。

畜牧养殖及生活污染源的输出系数则通过对小流域的人口、社会经济、养殖规模等指标进行调查,结合相关计算标准,并参考目前已有相关文献,计算得出畜牧养殖及居民生活污染源的氮、磷负荷输出系数,根据畜牧养殖规模及居民人口等,估算出小流域畜牧养殖及居民生活面源污染负荷输出量。

3.1. 输出系统模型

Johns [13]于1996年建立了输出系数模型,该模型引入了牲畜、人口等因素,建立在土地利用与接纳水体的非点源污染负荷量的基础上。模型大大简化了非点源污染形成过程,提高了土地利用状态发生变化时的灵敏性,降低了对监测数据的依赖性和监测费用,为大流域非点源污染的量化模拟研究提供了一种具有一定精度的模型方法。

输出系数模型计算方程式如下,

$$L = \sum_n^{i=1} E_i [A_i (I_i)]$$

式中: L 为营养物的输出量; E_i 为第 i 种营养源的输出系数(即单位面积年负荷量); A_i 为第 i 类土地利用类型的面积或第 i 种牲畜的数量、人口数量; I_i 为第 i 种营养物输入量。

3.2. 确定输出系数

3.2.1. 土地利用输出系数

在明确流域土地利用类型的基础上,获取输出系数的常用途径是查阅文献和现场监测法。现场监测法需要通过长时间监测流域水质水量,通过计算负荷量,得到相应的输出系数值,该方法所获取的参数有较高的精度,但是耗时长、费用高。另一种途径是利用前人的研究成果,通过查阅文献获取系数值。

通过收集三峡库区香溪河流域兴山监测站12个不同土地利用径流小区共6次产流过程,各不同土地利用径流小区全年观测结果见表2。

Table 2. Runoff and TN and TP load of observation station under different land cover

表 2. 不同植被覆盖类型径流小区的径流、TN 和 TP 负荷

序号	植被覆盖类型	面积(m ²)	坡度(°)	径流量(m ³)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
01	杨树	20 × 5	20	3.307	1.625	0.02
02	杨树	20 × 5	20	8.316	2.443	0.019
03	柏树	20 × 5	20	11.282	2.943	0.019
04	柏树	20 × 5	20	13.519	0.297	0.019
05	杨+柏	20 × 5	20	15.907	0.365	0.02
06	杨+柏	20 × 5	20	18.126	0.531	0.019
07	秋葵瓜	20 × 5	20	22.0118	2.772	0.019
08	秋葵瓜	20 × 5	20	25.983	2.993	0.018
09	荒草	20 × 5	20	28.704	1.429	0.017
10	荒草	20 × 5	20	30.805	1.346	0.016
11	对照	20 × 5	20	34.787	0.36	0.015
12	对照	20 × 5	20	39.092	0.157	0.013

由表中数据, 可将 12 个不同植被覆盖类型的径流小区分为 3 类: 旱地(对照、秋葵瓜)、林地(杨树、柏树)、草地(荒草)。这三类土地利用类型的输出系数可通过实验数据计算得出。研究区其他土地利用类型如城镇用地、水田、水域等的输出系数, 则查阅相关文献获取[14] [15] [16]。由此得出香溪河流域不同土地利用类型输出系数见表 3。

Table 3. The export coefficients values of different land use in the Xiangxi River basin

表 3. 不同土地利用养分输出系数

类型	TN (t/km ² ·a)	TP (t/km ² ·a)
城镇用地	0.716	0.395
水田	0.54	0.185
旱地	0.628	0.309
林地	0.104	0.034
草地	0.282	0.037
水域	0.58	0.164
未利用地	0.45	0.087

3.2.2. 畜牧养殖输出系数

在三峡库区香溪河流域及其他与香溪河流域相似的典型小流域开展了对农户畜牧养殖调查, 结果见表 4。

Table 4. The investigation results of livestock and poultry manure disposal in typical watershed

表 4. 香溪河典型小流域畜禽养殖调查

序号	大牲口			猪			家禽		
	数量	粪便去向	存栏数	出栏数	粪便去向	存栏数	出栏数	粪便去向	
1	2	就地堆放	2	1	有机肥	3	2	有机肥	
2	2	就地堆放	1	2	有机肥	10	2	有机肥	
3	1	就地堆放	2	0	有机肥	0	0	有机肥	
4	2	就地堆放	0	2	有机肥	0	0	有机肥	
5	1	就地堆放	2	2	有机肥	2	1	有机肥	
6	1	就地堆放	0	0	有机肥	5	10	有机肥	
7	2	就地堆放	1	1	有机肥	3	2	有机肥	
8	1	就地堆放	0	0	有机肥	5	2	有机肥	
9	1	就地堆放	3	1	有机肥	2	0	有机肥	
10	2	就地堆放	2	2	有机肥	4	2	有机肥	

结合小流域典型农户调查结果, 参照相关文献资料[17] [18] [19] [20], 确定香溪河流域畜牧养殖污染输出系数见表 5。

Table 5. The export coefficients of livestock and poultry in the Xiangxi River basin

表 5. 香溪河流域畜禽养殖氮磷输出系数表

项目	TN [kg/(ca·a)]	TP [kg/(ca·a)]
牛	7.320	0.310
猪	1.390	0.142
羊	1.400	0.045
家禽	0.060	0.005

3.2.3. 生活污染源输出系数

在调研过程中发现,居民对生活排泄物、垃圾方式处理不一:在部分居民户中,使用的是浅坑旱厕,建于屋外,浅坑旱厕的使用,极不利于农村环境的改善。部分居民户使用水冲厕,这部分居民普遍认为水冲厕使用方便、干净卫生。此外,在调研过程中,课题组发现,约90%的居民户将粪便作为肥料还田,约有1%左右的居民,直接将粪便堆放在路边或倒入沟渠,极少数统一收集并集中处理使用。

关于人粪尿的排污系数,目前已有相关研究。马啸[17]对三峡库区的农村生活调查表明,每个成年人均年产氮磷量为5.715 kg、1.17 kg。农村人的粪尿,部分当作肥料使用,其余直接排放到环境或水体中,流失率约为21%。而农村生活污水基本上全部直接排放到自然环境中。库区内农村地区生活垃圾和水处理设施建设较为滞后,农村生活污水和粪便很难得到有效的处理。结合库区实际情况,确定农村生活污染氮磷输出系数为:农村生活氮输出系数为:1.872 [kg/(ca·a)],农村生活磷输出系数为0.214 [kg/(ca·a)]。

3.3. 计算结果

根据本文通过实验及查阅文献所得的各种污染源的输出系数,根据研究区基础数据资料,基于输出系数模型计算可得不同污染源的污染负荷结果见表6。

Table 6. TN and TP load of different pollution sources in the Xiangxi River basin
表 6. 香溪河流域不同污染源非点源 TN、TP 负荷

总氮总磷	土地利用污染(t)	居民生活污染(t)	畜牧养殖污染(t)	合计(t)
TN	459.79	245.70	626.45	1331.94
TP	153.71	28.09	51.91	233.71

4. 结果分析

4.1. 不同土地利用总氮、总磷负荷特征分析

根据香溪河流域土地利用类型情况及本文所得的土地利用输出系数,所得的不同土地利用类型非点源 TN、TP 负荷估算值见表7。不同土地利用利用总氮、总磷贡献率见图2。

Table 7. Estimated TN and TP load of land use source in the Xiangxi River basin
表 7. 香溪河流域土地利用污染源总氮、总磷负荷估算表

土地利用类型	土地利用面积(km ²)	TN (t)	TP (t)
城镇用地	5.36	3.84	2.12
水田	54.81	29.60	10.14
旱地	120.02	75.37	37.09
林地	2774.7	288.57	94.34
草地	164.13	46.28	6.07
水域	16.07	9.32	2.64
果园	15.12	6.80	1.32
总量	3150.21	459.79	153.71

从图中可以看出,从总量上看,林地的总氮、总磷排放量最大,其次是旱地、草地和水田。分析其中原因可知,因林地面积占整个流域面积的比例高达88.08%,所以林地的总氮排放量占流域总排放量的63%,总磷排

放量占流域总排放量的 61%。旱地的总氮、总磷排放量在整个流域所占比例也较大,分别为 16%和 24%。因此,在香溪河小流域,林地、旱地氮、林流失的控制应为基于土地利用类型的面源污染防控的重点。

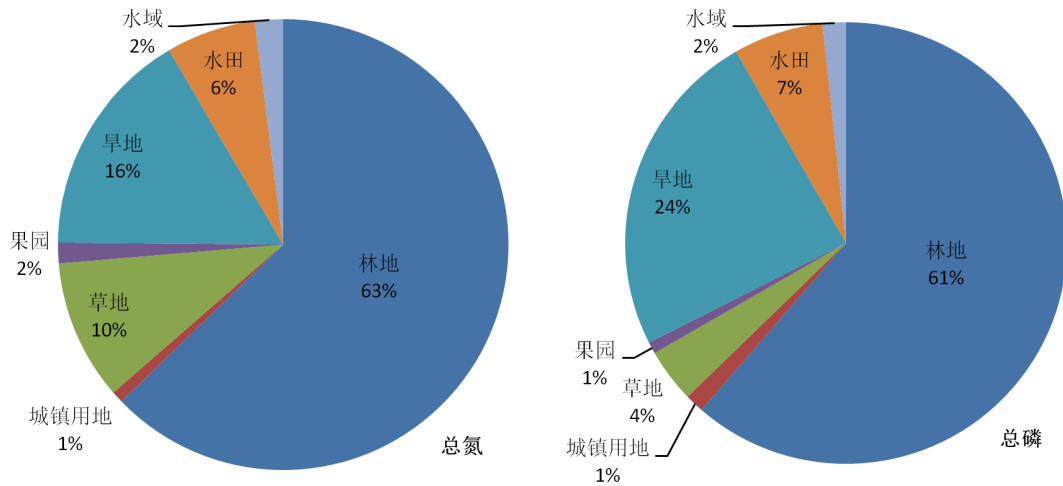


Figure 2. Contribution figures of TN and TP of different land use in the Xiangxi River basin
图 2. 香溪河流域不同土地利用总氮、总磷负荷贡献率示意图

4.2. 不同污染源总氮、总磷负荷特征分析

香溪河流域不同污染源总氮、总磷负荷示意图见图 3。

从图中可以看出,香溪河流域总氮负荷量由高到低依次为畜牧养殖污染 > 土地利用污染 > 居民生活污染,而总磷负荷量由高到低依次为土地利用污染 > 畜牧养殖污染 > 居民生活污染。因此,控制总氮污染负荷的关键在于控制畜牧养殖污水排放,而控制总磷污染负荷的关键在于合理优化农业种植模式,减少农田施肥量。

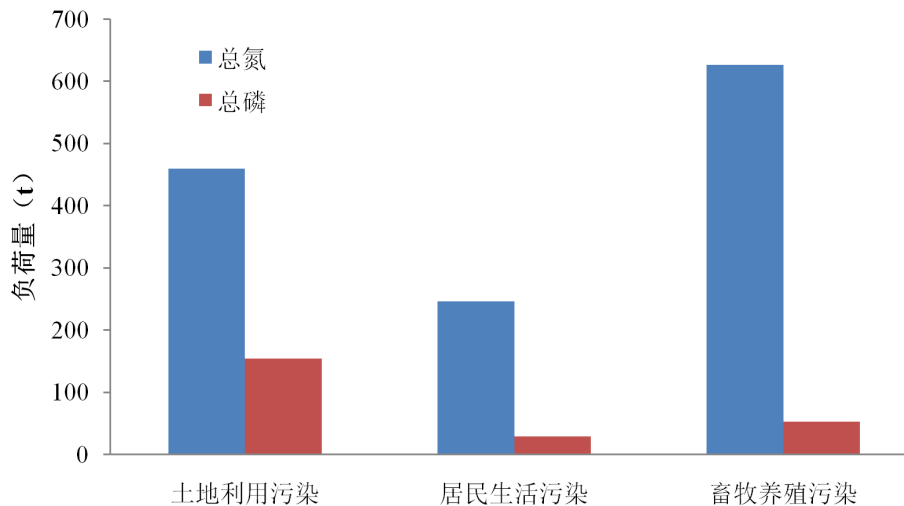


Figure 3. TN and TP load of different pollution sources in the Xiangxi River basin
图 3. 香溪河流域不同污染源总氮、总磷负荷

5. 结论

本文基于输出系数模型,利用试验观测数据计算和参考文献查阅的方法,确定了土地利用、畜牧养殖及农村居民生活污染源的输出系数,估算了三峡库区香溪河小流域 2010 年各污染源的总氮、总磷负荷量,并进行

了相关分析, 结果表明不同土地利用类型非点源氮、磷排放负荷总量最大的为林地和旱地, 合理管理林地及早地化肥施用是防控土地利用污染的关键。对于不同污染源的总氮、总磷负荷排放量, 畜牧养殖污染源排放的总氮负荷最高, 而土地利用排放的总磷负荷最高。因此, 选择合理的农田管理措施, 有效控制林地、旱地施肥量及畜牧养殖污水排放是防控三峡库区香溪河小流域非点源污染的关键。

致 谢

感谢国家水体污染控制与治理科技重大专项课题对本文的支持。

基金项目

国家重点研发计划(2017YFC0404504); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2019410TB)。

参考文献

- [1] JORDAN, C., MCGUCKIN, S. O., and SMITH, R. V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations. *Soil Use and Management*, 2000, 16(1): 27-35. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00168.x>
- [2] MATTIKALLI, N. M., RICARADS, K. S. Estimation of surface water quality changes in response to land use change: Application of the export coefficient model using remote sensing and geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 1996, 48(3): 263-282. <https://doi.org/10.1006/jema.1996.0077>
- [3] ZOBRIST, J., REICHERT, P. Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(1-2): 207-223. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.014>
- [4] KHADAM, I. M., KALUARACHCHI, J. J. Water quality modeling under hydrologic variability and parameter uncertainty using erosion-scaled export coefficients. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(1-2): 354-367. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.033>
- [5] 梁常德, 龙天渝, 李继承, 等. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 26-30. LIANG Changde, LONG Tianyu, LI Jicheng, et al. Importation load of non-point source nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 26-30. (in Chinese)
- [6] 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, 35(7): 40-45. CAI Ming, LI Huaen, ZHUANG Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(7): 40-45. (in Chinese)
- [7] 王秀娟, 刘瑞民, 何孟常. 松辽流域非点源污染 TN 时空变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 192-196. WANG Xiujuan, LIU Ruimin, and HE Mengchang. Spatial-temporal characteristic of non-point source pollution(NPS) nitrogen in Songliao Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4): 192-196. (in Chinese)
- [8] 庄咏涛. 渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2002. ZHUANG Yongtao. Analysis on non-point source nitrogen pollution of sections above Lintong on the Weihe. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [9] 刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 677-682. LIU Ruimin, SHEN Zhenyao, DING Xiaowen, et al. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River basin. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 677-682. (in Chinese)
- [10] 刘瑞民, 何孟常, 王秀娟. 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 663-667. LIU Ruimin, HE Mengchang, and WANG Xiujuan. Risk Assessment of nitrogen and phosphorus export in upper reach of Daliao river watershed. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(3): 663-667. (in Chinese)
- [11] 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): 4025-4032. DING Xiaowen, SHEN Zhenyao. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fujiang watershed. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(11): 4025-4032. (in Chinese)
- [12] 朱梅, 吴敬学, 李瑞波. 海河流域农村生活非点源污染负荷量估算及环境风险分析[J]. 农业环境与发展, 2010(5): 66-71. ZHU Mei, WU Jingxue, and LI Ruibo. Risk assessment and load estimation of rural life non-point source pollution in Hehai watershed. *Agro-Environment and Development*, 2010(5): 66-71. (in Chinese)
- [13] 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 modelling approach. *Journal of Hydrology*, 1996, 183: 323-349.

[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02951-6)

- [14] 田甜, 刘瑞民, 王秀娟, 等. 三峡库区大宁河流域非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6): 185-190.
TIAN Tian, LIU Ruimin, WANG Xiujuan, et al. Risk assessment of nitrogen and phosphorus export in Daning River of TGRA. *Environmental Science and Technology*, 2011, 34(6): 185-190. (in Chinese)
- [15] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574-581.
LONG Tianyu, LIANG Changde, LI Jicheng, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 574-581. (in Chinese)
- [16] 杨彦兰, 申丽娟, 谢德体, 等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J]. 西南大学学报, 2015, 37(3): 112-119.
YANG Yanlan, SHEN Lijuan, XIE Deti, et al. Estimation of pollution in three gorges on the export loads from agricultural non-point sources reservoir area (Chongqing) based coefficient modeling approach. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2015, 37(3): 112-119. (in Chinese)
- [17] 马啸, 李晔, 杜双, 等. 三峡库区湖北段城镇生活源污染负荷现状与预测[J]. 武汉理工大学学报, 2011(4): 118-121.
MA Xiao, LI Ye, DU Shuang, et al. Pollution loading evaluation from urban life source and its forecast in the Hubei region of TGRA. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011(4): 118-121. (in Chinese)
- [18] 高银超. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域农业面源污染负荷研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
GAO Yinchao. The study of agricultural non-point source pollution of Xiaojiang watershed in TGRA based on AnnAGNPS model. Master's Thesis. Chongqing: Southwest University, 2011. (in Chinese)
- [19] 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 Linxu, LIU Defu, XIAO Shangbin, et al. Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the TGRA based on SWAT model. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 267-275. (in Chinese)
- [20] 吴磊, 龙天渝, 刘霞. 三峡库区小流域氮磷污染负荷估算[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 120-124.
WU Lei, LONG Tianyu, and LIU Xia. Nitrogen and phosphorus pollution load estimation in small watershed in TGRA. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(21): 120-124. (in Chinese)