

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^①

杨彦兰¹, 申丽娟^{1,2,3}, 谢德体^{1,2,3},
骆云中¹, 倪九派^{1,2,3}

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市数字农业重点实验室, 重庆 400716;
3. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716

摘要: 由农业面源污染引起的水环境问题严重影响着三峡库区的生态环境. 利用输出系数模型对三峡库区(重庆段)的农业面源污染负荷进行了估算. 结果表明, 2011 年三峡库区(重庆段)农业面源污染物总氮和总磷负荷量分别是 $30\,786.9 \times 10^6$ 和 $4\,221.0 \times 10^6$ g/a, 且前者是后者的 7.3 倍. 土地利用和植被覆盖情况明显影响总氮和总磷负荷量, 不同污染源类型对污染负荷贡献的差异较大. 不同的污染源类型对面源污染物总氮负荷贡献率的大小顺序为: 耕地, 林地, 农村生活污水及废弃物, 畜禽养殖, 园地和牧草地; 对总磷负荷贡献率的大小顺序为: 耕地, 畜禽养殖, 林地, 园地, 农村生活污水及废弃物和牧草地. 各区县总氮和总磷负荷量和负荷强度的差异较大, 开县、江津区、涪陵区和万州区的总氮和总磷负荷量较大, 巴南区、长寿区、沙坪坝和南岸区的负荷强度则较大. 农业面源污染物氮和磷分布状况和负荷强度的研究, 不仅为分析三峡库区农业面源污染的区际和年际变化提供了基础数据, 而且为三峡库区区域规划和农业结构调整提供了科学依据.

关键词: 三峡库区; 农业面源污染; 输出系数模型; 污染负荷; 估算

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)03-0112-08

农业面源污染的监测、治理和控制是解决水资源环境必须要研究的问题, 其中各种基础资料的获取以及在此基础上的污染负荷估算是整个面源污染治理最关键而最有意义的奠基性工作.

农业面源污染的产生和形成机理非常复杂, 它是由降水径流过程引发, 并在人类活动特别是不合理的土地利用活动影响下得以增强的过程, 降水径流过程是面源污染发生和形成的关键自然原因, 而人类不合理的土地利用活动则是其最根本原因^[1-5]. 因此, 除了人类不可改变的自然因素外, 通过优化土地利用方式, 进行合理的土地利用活动和农田管理措施、调控水肥循环, 可以减轻污染物的产生负荷, 进而达到减少并控制农业面源污染的根本目的.

2011 年是三峡工程进入初步设计工期的最后一年, 也是三峡工程转入运行为主的一年. 据《长江三峡工程生态与环境监测公报 2012》显示, 重庆市三峡库区水土资源污染情况较为严重. 主要污染源为由水土流失、化肥和农药的大量施用及规模化畜禽养殖业畜禽粪便的不合理处理所带来的农业面源污染. 库区的生态环境问题令人堪忧, 引起国家的高度重视.

① 收稿日期: 2013-03-30

基金项目: 国家科技重大专项课题(2012ZX07104003); 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD15B04003); 国家自然科学基金(41371301).

作者简介: 杨彦兰(1990-), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理与现代生态农业园区研究.

通信作者: 谢德体, 教授, 博士, 博士研究生导师.

因此,开展库区农业面源污染负荷研究已刻不容缓.在三峡库区农业面源污染估算方面已有许多值得借鉴的成果.杨志敏基于压力—状态—响应模型对三峡库区重庆段的农业面源污染进行了研究^[6].高银超基于 AnnAGNPS 模型对三峡库区小江流域农业面源污染负荷进行了研究^[7].刘瑞民等应用输出系数模型估算了长江上游的非点源污染负荷^[8].已有的研究成果表明输出系数模型在三峡库区具有一定的适应性,同时,由于面源污染存在潜在性、突发性、不确定性等特点,且受限于缺乏长期的系列水文、地质、气候等资料,因此本文采用所需参数少,操作简便易行,能避开面源污染发生和发展的复杂过程,又具有一定精度的适用于大尺度区域负荷估算的输出系数模型对三峡库区的农业面源污染负荷进行了估算,为进一步掌握库区面源污染负荷特征并为库区的农业面源污染防治规划提供一定依据.

1 研究区域概况

三峡库区(重庆段)位于长江上游下段,东起巫山县、西至江津区、南起武隆县、北至开县地理范围在 $28^{\circ}31' - 31^{\circ}44'N$, $105^{\circ}49' - 110^{\circ}12'E$ 之间.三峡库区(重庆段)总面积 822.69 万 hm^2 , 约占整个三峡库区总面积的 85.6% .库区位于亚热带季风区,属湿润亚热带季风气候,多年平均气温 $15^{\circ}\text{C} \sim 18^{\circ}\text{C}$, 多年平均降雨量为 $1\,150.26 \text{ mm}$.地势东高西低,土壤类型主要为紫色土和黄壤等,最典型的地带性植被是亚热带常绿阔叶林.

三峡库区(重庆段)包括巫山县、江津区、万州区等 22 个区、县(自治县).2011 年是三峡后续工作规划实施的第 1 年,2011 年库区 15 区县地区生产总值突破 4 000 亿元,达到 4 000.01 亿元,同比增长 16.9% , 高于全市水平 0.5 个百分点.

2 输出系数模型及输出系数的取值

2.1 污染物输出系数、输出系数法和输出系数模型的概念

污染物输出系数是单位时间内某种土地利用方式下输出的污染物总负荷的标准化估计,多采用单位时间单位面积的负荷量来表示 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ^[9].

输出系数法于 20 世纪 70 年代初期在美国、加拿大首先提出,主要用于研究土地利用—营养负荷—湖泊富营养化之间的关系,这也是最早期的输出系数模型.输出系数法是指利用污染物输出系数来估算流域输出的面源污染负荷,其特点在于能够利用土地利用状况等资料,是一种集总式的简便面源污染负荷估算方法^[10].

输出系数模型则是输出系数法的一种具体体现,主要是利用相对容易得到的土地利用类型等数据,通过多元线性相关分析,直接建立流域土地利用类型与面源污染输出量之间的关系,然后通过对不同污染源类型的污染负荷求和,得到研究区域的污染总负荷^[11].早期的输出系数模型存在许多不足,在研究时它直接假设所有的土地利用类型的输出系数固定不变,然而这种假定和实际情况存在非常大的差异.为了弥补模型的缺陷,1996 年 Johnes 等建立了更为完备的输出系数模型,主要是在模型的实际应用中加入了牲畜、人口等因素的影响.改进后的输出系数模型对不同种类的牲畜家禽根据其数量和分布采用不同的输出系数;对不同利用类型的土地采用了不同的输出系数;对人口的输出系数则主要根据当地农村人口对生活污水及废弃物的利用和处理水平来定.同时,由于总氮的输入比较复杂,改进后的输出系数模型还加入了植物的固氮、氮的大气沉降等因素,使输出系数模型的内容更加更富,提高了该模型对土地利用状况发生改变的灵敏性. Johnes 模型因为其结构简单,所需资料相对较少且容易获得而在面源污染负荷估算中应用较多.同时,由于该模型一般直接评估和预测总氮和总磷的负荷量,而较少涉及氮、磷元素的具体存在形式,因而减少了许多繁琐的过程并使模型结果的可靠度大为提高^[12].该模型实质上是利用半分布式途径来计算流域尺度上年均污染(总氮、总磷)总负荷的数学加权公式,其模型方程^[10]如下:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + P \quad (1)$$

式(1)中: j 为污染物类型; i 为流域中土地利用类型的种类或者牲畜、人口类型,共为 m 种; L_j 为污染物 j 在该流域的总负荷量 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; E_{ij} 为污染物 j 在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$

或第 i 种牲畜每头的排泄系数(kg/a)、每人每口的输出系数(kg/a); A_i 为第 i 种土地利用类型的面积(hm^2)或第 i 种牲畜数量(头)、人口数量(人); P 为由降雨输入的污染物总量 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$, 在本文中不考虑此项的影响。

2.2 数据来源

由上述输出系数模型方程可知, 在计算和分析库区农业面源污染负荷时需要用到的主要数据有污染物输出系数、2011 年库区各区县的农村人口数量以及大牲畜牛、猪、羊和家禽数量、2011 年库区各区县的土地利用情况和植被覆盖数据。

本文的数据来源为: (1) 污染物输出系数, 主要通过查阅相关文献资料并结合三峡库区的实际情况而定。(2) 研究时段的库区农村人口数量以及大牲畜牛、猪、羊和家禽数量, 主要通过查询 2011 年库区各区县的国民经济和社会发展统计公报、2012 年库区各区县统计年鉴和相关核心文献。(3) 研究时段的库区土地利用情况和植被覆盖数据, 主要通过查阅《三峡工程重庆库区统计历史资料汇编 2005—2011》及相关文献资料。

各统计年鉴及资料的主要参考数据项目有: 耕地资源量、化肥总量、畜禽出栏/存栏量、农村人口数量等。

2.3 输出系数的取值

输出系数模型的关键是输出系数的确定。能对输出系数产生较大影响的因素很多, 这些因素包括研究区的地形地貌、水文、气候、土地利用、土壤类型和结构、植被及农田措施等^[13-14]。污染物输出系数与土地利用方式密切相关。因此, 估算大流域内的污染负荷时必须确定当地某种土地利用类型下的污染物输出系数^[15]。

引起农业面源污染的污染源主要包括土地利用、畜禽养殖和农村生活污水及废弃物等, 因此相应地将引起农业面源污染的因素归结为 3 类: 农用地、畜禽养殖和农村生活污水及生活垃圾, 据此来研究区域农业面源污染负荷的总量和特征^[11]。

获取输出系数的常见途径是现场监测和查阅文献值^[8, 11, 13, 18-24]。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流域的输出系数^[16-17]。本文中库区各种土地利用类型的输出系数, 为参考国内相似自然条件下的其他地区的研究结果而取其平均值并结合三峡库区相关研究资料和气候、水文、土壤、农业耕作特点和人类活动特点等因素而定^[8, 11, 13, 18-24]。最终确定的不同土地利用类型的输出系数值见表 1。畜禽养殖和农村生活部分的面源污染物输出系数分别采用国家环保总局推荐的排泄系数和人口输出系数^[11], 参考刘亚琼^[11]的研究结果, 畜禽养殖业的总氮和总磷输出系数分别取为各自排泄系数的 10%, 其值分别见表 2 和表 3。

表 1 不同土地利用类型的输出系数 /[(kg·(hm²·a)⁻¹]

项 目	输出系数的取值		项 目	输出系数的取值	
	总氮	总磷		总氮	总磷
耕地	18.00	2.50	林地	2.70	0.19
园地	12.40	2.62	牧草地	6.08	0.91

从表 1 可以看出, 不同土地利用方式的输出系数差别非常明显, 其中耕地最大, 而林地和牧草地比较小, 这和耕地化肥施用量最多、土质松软, 以及林地、牧草地对水土流失具有一定的滞留作用密切相关。因此, 所选输出系数具有一定的合理性。畜禽养殖的排泄系数代表牲畜排泄物直接进入受纳水体的比例, 而农村生活的输出系数则反映了当地农村人口对生活污水及废弃物的利用和处理水平。

表 2 每头畜禽养殖业的输出系数 /[(kg·a⁻¹)]

畜禽名称	总氮	总磷	畜禽名称	总氮	总磷
牛	6.11	1.01	羊	0.23	0.045
猪	0.45	0.17	家禽	0.028	0.012

注: 家禽为鸡鸭粪的平均值。

表 3 每人每口输出系数 / (kg · a⁻¹)

项 目	总氮	总磷	项 目	总氮	总磷
农村人口	1. 58	0. 16	城镇人口	2. 48	0. 25

3 结果与分析

3.1 不同污染源类型对总氮和总磷负荷量的贡献

从表 4 可以发现,不同污染源类型产生的总氮负荷量以及对总氮负荷量的贡献率的大小顺序为:耕地,林地,农村生活污水及废弃物,畜禽养殖,园地和牧草地.不同土地利用类型和植被覆盖对农业面源污染物输出的影响,以耕地最大,林地、农村居民生活用地和畜禽养殖业的次之,园地和牧草地为最小.而表 5 的数据表明,不同污染源类型对总磷负荷贡献率的影响与对总氮污染负荷的影响具有相似的规律,但畜禽养殖业对总磷负荷的贡献明显大于园地和农村生活污水及废弃物对其的贡献.不同污染源类型对总磷负荷贡献率的大小顺序为:耕地,畜禽养殖,林地,园地,农村生活污水及废弃物和牧草地.以上数据显示,在不同土地利用类型中,2011 年库区的耕地对面源污染物总氮和总磷的贡献率最大,而农村生活污水及废弃物的贡献率也不小.因此,除了降低化肥、农药、农膜等农用化学品用量,还必须提高畜禽粪污资源化利用率和解决农村常住人口的生活垃圾和生活污水处理问题,才能有效减少氮磷污染物的排放,进而全面的防治农业面源污染.

表 4 2011 年三峡库区农业面源污染物总氮负荷量 / (t · a⁻¹)

区 县	农 业 用 地				畜禽养殖				农村生活	合计	氮负荷贡献率/%
	耕地	园地	林地	牧草地	猪	牛	羊	家禽			
渝北区	743. 4	76. 9	98. 3	1. 1	13. 5	2. 7	0. 7	20. 7	70. 4	1 027. 7	3. 3
巴南区	1 540. 8	85. 2	167. 9	2. 6	24. 8	6. 7	0. 1	16. 6	92. 3	1 936. 9	6. 3
江津区	2 043. 4	152. 4	19. 7	16. 5	45. 0	11. 6	0. 9	26. 9	149. 2	2 465. 7	8. 0
长寿区	938. 2	139. 8	124. 2	3. 0	28. 9	12. 8	0. 1	25. 1	98. 9	1 371. 1	4. 5
武隆县	1 149. 5	24. 1	519. 8	6. 2	16. 0	27. 3	2. 9	0. 8	47. 4	1 794. 0	5. 8
巫溪县	890. 3	15. 8	631. 8	193. 3	23. 9	2. 6	2. 7	8. 0	67. 8	1 836. 2	6. 0
石柱县	1 090. 6	69. 4	307. 3	295. 1	15. 4	28. 5	0. 2	4. 5	64. 0	1 875. 0	6. 1
万州区	1 595. 5	64. 6	325. 9	186. 0	39. 7	40. 1	0. 2	0. 6	185. 4	2 438. 2	7. 9
涪陵区	1 856. 4	66. 1	323. 6	6. 1	42. 3	19. 6	0. 8	16. 0	108. 4	2 439. 2	7. 9
丰都县	1 442. 1	4. 4	363. 7	0. 3	21. 0	76. 4	4. 6	17. 9	97. 9	2 028. 2	6. 6
忠县	1 301. 4	65. 1	18. 6	0. 2	29. 8	8. 7	2. 8	9. 0	125. 8	1 561. 6	5. 1
开县	1 517. 4	251. 9	396. 9	121. 6	45. 3	6. 0	1. 1	14. 6	183. 4	2 538. 1	8. 2
云阳县	1 180. 0	37. 3	378. 0	283. 7	66. 9	17. 4	8. 1	6. 7	95. 3	2 073. 5	6. 7
奉节县	1 065. 4	68. 1	563. 9	174. 9	165. 7	11. 5	4. 6	8. 4	139. 5	2 202. 0	7. 2
巫山县	916. 8	82. 7	407. 2	66. 9	21. 2	2. 6	2. 4	2. 9	77. 6	1 580. 1	5. 1
渝中区	0. 0	1. 6	1. 3	0. 0	0. 3	0. 0	0. 0	0. 1	0. 1	3. 5	0. 0
大渡口区	71. 6	2. 4	5. 9	0. 4	0. 5	0. 1	0. 0	0. 5	5. 1	86. 6	0. 3
江北区	87. 6	2. 5	22. 0	0. 1	1. 1	0. 5	0. 0	0. 2	5. 2	119. 3	0. 4
沙坪坝区	328. 8	2. 9	2. 8	0. 3	5. 9	0. 6	0. 0	10. 6	13. 5	365. 4	1. 2
九龙坡区	222. 1	27. 9	28. 0	0. 1	8. 1	0. 1	0. 0	0. 4	30. 4	317. 0	1. 0
南岸区	202. 2	2. 6	10. 7	0. 3	7. 5	0. 5	0. 1	2. 2	15. 8	242. 0	0. 8
北碚区	255. 7	167. 7	5. 0	0. 8	5. 8	0. 8	0. 1	4. 2	45. 5	485. 6	1. 6
总计	20 439. 0	1 411. 4	4 722. 5	1 359. 7	628. 7	277. 2	32. 6	196. 9	1 719. 0	30 786. 9	100. 0
氮负荷贡献率/%	66. 4	4. 6	15. 3	4. 4	2. 0	0. 9	0. 1	0. 6	5. 6	100. 0	

3.2 各区县总氮和总磷负荷量

利用输出系数模型计算了 2011 年三峡库区(重庆段)各区县不同污染源类型产生的农业面源污染物总氮和总磷的负荷量、负荷强度以及不同污染源类型的污染负荷贡献率等. 库区各区县农业面源污染物总氮和总磷负荷量计算结果分别见表 4 和表 5.

库区平均的总氮负荷量是总磷负荷量的 7.3 倍. 从空间分布上看, 开县、江津区、涪陵区和万州区的农业面源污染物总氮和总磷负荷量都较高(表 4 和表 5). 这些区县的耕地面积和农村人口较多, 是农业化程度相对较高的区域. 相较之下, 渝中区、江北区和南岸区的农业用地总面积和农村人口较少, 因此农业面源污染总量也较低. 根据表 4 和表 5 中的数据, 通过计算可以得出, 各区县的耕地、农村生活污水及废弃物和畜禽养殖业对面源污染物总氮和总磷负荷的贡献率都较高: 耕地和农村生活污水及废弃物对总氮负荷的贡献率分别为 66.4%和 5.6%, 对总磷负荷的贡献率分别为 67.3%和 4.1%. 其中江津区和涪陵区的耕地对该区的总氮负荷量的贡献率分别达 82.9%和 76.1%, 而丰都县和长寿区的畜禽养殖业对该区总氮负荷量的贡献率分别为 5.9%和 4.9%; 忠县和江津区的耕地对该区域总磷负荷的贡献率分别为 80.1%和 77.6%, 而巫山县和云阳县的畜禽养殖业对该区总磷负荷量的贡献率分别为 28.0%和 2.2%. 可见, 大面积、规模化的农田种植是造成农业面源污染物总氮和总磷负荷量较高的直接原因.

表 5 2011 年三峡库区农业面源污染物总磷负荷量 /(t·a⁻¹)

区 县	农 业 用 地				畜禽养殖				农村生活	合计	氮负荷贡献率/%
	耕地	园地	林地	牧草地	猪	牛	羊	家禽			
渝北区	103.3	16.2	6.9	0.16	5.1	0.45	0.14	8.9	7.1	148.3	3.5
巴南区	214.0	18.0	11.8	0.38	9.4	1.11	0.02	7.1	9.3	271.1	6.4
江津区	283.8	32.2	1.4	2.48	17.0	1.92	0.18	11.5	15.1	365.6	8.7
长寿区	130.3	29.5	8.7	0.45	10.9	2.12	0.02	10.7	10.0	202.9	4.8
武隆县	159.6	5.1	36.6	0.93	6.0	4.50	0.57	0.4	4.8	218.5	5.2
巫溪县	123.7	3.3	44.5	28.94	9.0	0.43	0.52	3.4	6.9	220.7	5.2
石柱县	151.5	14.7	21.6	44.16	5.8	4.70	0.04	1.9	6.5	250.9	5.9
万州区	221.6	13.7	22.9	27.85	15.0	6.64	0.05	0.2	18.8	326.7	7.7
涪陵区	257.8	14.0	22.8	0.91	16.0	3.24	0.15	6.8	11.0	332.7	7.9
丰都县	200.3	0.9	25.6	0.04	7.9	12.63	0.89	7.7	9.9	265.9	6.3
忠县	180.8	13.8	1.3	0.03	11.3	1.44	0.55	3.9	12.7	225.7	5.3
开县	210.8	53.2	27.9	18.20	17.1	0.99	0.21	6.2	18.6	353.2	8.4
云阳县	163.9	7.9	26.6	42.47	25.3	2.88	1.59	2.9	9.7	283.1	6.7
奉节县	148.0	14.4	39.7	26.18	62.6	1.91	0.90	3.6	14.1	311.4	7.4
巫山县	127.3	17.5	28.7	10.01	8.0	0.42	0.47	1.2	7.9	201.4	4.8
渝中区	0.0	0.3	0.1	0.00	0.1	0.00	0.00	0.0	0.0	0.6	0.0
大渡口区	9.9	0.5	0.4	0.07	0.2	0.01	0.00	0.2	0.5	11.9	0.3
江北区	12.2	0.5	1.6	0.02	0.4	0.08	0.00	0.1	0.5	15.4	0.4
沙坪坝区	45.7	0.6	0.2	0.04	2.2	0.10	0.00	4.6	1.4	54.8	1.3
九龙坡区	30.9	5.9	2.0	0.02	3.0	0.02	0.00	0.2	3.1	45.0	1.1
南岸区	28.1	0.6	0.8	0.05	2.8	0.08	0.03	1.0	1.6	35.0	0.8
北碚区	35.5	35.4	0.4	0.12	2.2	0.13	0.03	1.8	4.6	80.2	1.9
总计	2838.7	298.2	332.3	203.5	237.5	45.8	6.4	84.4	174.1	4 221.0	100.0
磷负荷贡献率/%	67.3	7.1	7.9	4.8	5.6	1.1	0.2	2.0	4.1	100.0	

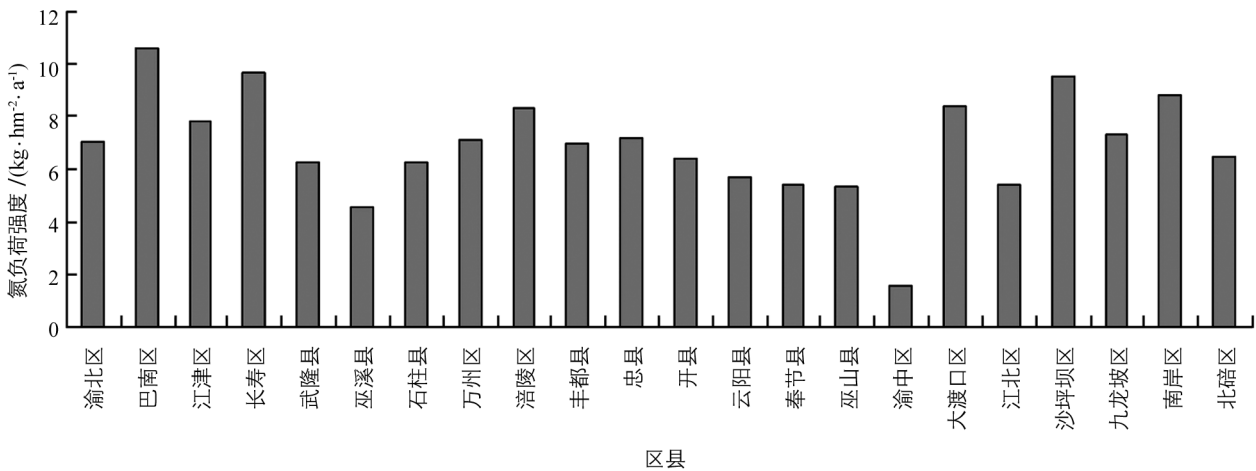


图 1 2011 年三峡库区各区县农业面源污染物总氮负荷强度

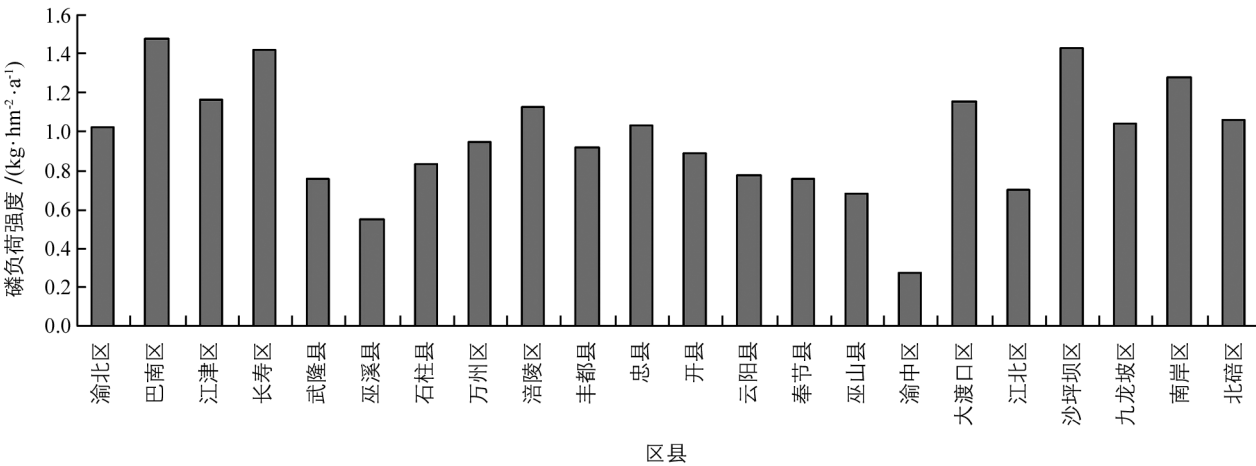


图 2 2011 年三峡库区各区县农业面源污染物总磷负荷强度

3.3 各区县的总氮和总磷负荷强度

2011 年三峡库区(重庆段)各区县农业面源污染物总氮和总磷负荷强度如图 1 和图 2 示. 从如图 1 和图 2 可以看出, 巴南区、沙坪坝区、长寿区和南岸区的农业面源污染物总氮和总磷负荷强度较高, 而且总氮的负荷强度远远大于总磷的负荷强度, 前者是后者的 7.3 倍左右. 长寿区、涪陵区和忠县由于位于三峡库区的平行岭谷区, 地形相对平缓、农业产业化程度较高、农垦历史悠久, 是库区耕地分布最为集中的区域. 同时, 由于农业资源较为丰富, 具有畜禽养殖所需要的资源、场地、人力等条件, 是重庆市主要的畜禽养殖基地分布区. 单位面积化肥农药施用量较高和规模化的畜禽养殖是造成农业面源污染物总氮和总磷负荷强度较高的主要原因. 而巴南区、渝北区、沙坪坝区、和南岸区属于主城区, 位于三峡库区库尾, 区位优势独特, 人口密度大, 城镇化率较高, 经济基础雄厚. 高强度氮和磷负荷主要来源于高密度的居民生活导致了大量的氮磷面源污染物的输出.

4 结 论

本文通过使用输出系数模型法, 在参考国内外和三峡库区已有输出系数研究成果的基础上, 估算了 2011 年三峡库区(重庆段)农业面源污染物总氮和总磷负荷量和负荷强度. 计算结果表明:

- 1) 2011 年三峡库区(重庆段)农业面源污染物总氮和总磷负荷量分别是 $30\,786.9\times10^6$ 和 $4\,221.0\times10^6$ g/a, 且前者是后者的 7.3 倍.
- 2) 不同土地利用类型的农业面源污染物总氮和总磷负荷量显著不同. 各种污染源类型对总氮负荷贡献

率的大小顺序为:耕地,林地,农村生活污水及废弃物,畜禽养殖,园地和牧草地;对总磷负荷贡献率的大小顺序为:耕地,畜禽养殖,林地,园地,农村生活污水及废弃物和牧草地。

3) 各区县的农业面源污染物总氮和总磷负荷量和负荷强度差异较大,开县、江津区、涪陵区和万州区的总氮和总磷负荷量较大,而巴南区、长寿区、沙坪坝区和南岸区的负荷强度则较大。

4) 研究结果不仅为分析三峡库区农业面源污染的区域和年际变化提供了基础数据,而且为三峡库区区域规划和农业结构调整提供了科学依据。

参考文献:

- [1] VLADIMIR N. Integrating Diffuse/Nonpoint Pollution Control and Water Body Restoration Into Watershed Management [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(4): 717—722.
- [2] TONG S T Y, CHEN W L. Modeling the Relationship Between Land Use and Surface Water Quality [J]. Journal of Environment Management, 2002, 66(4): 377—393.
- [3] FISHER D S, STEINER D M, ENDALE D M, et al. The Relationship of Land Use Practices to Surface Water Quality in the Upper Oconee Watershed of Georgia [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 128(1): 39—48.
- [4] MOHAMMAD N A, JAGATH J K. Modeling Nitrate Contamination of Groundwater in Agricultural Watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2007, 343(3/4): 211—229.
- [5] POLYAKOV V, FARES A, KUBO D, et al. Evaluation of a Non-Point Source Pollution Model, AnnAGNPS, in a Tropical Watershed [J]. Environment Modeling & Software, 2007, 22(11): 1317—1627.
- [6] 杨志敏. 基于压力—状态—响应模型的三峡库区重庆段农业面源污染研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 755—761.
- [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(3/4): 323—349.
- [11] 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.
- [12] 孟凡祥, 赵倩, 马建, 等. 农业非点源污染负荷及现状评价——以大苏河地区为例 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 145—150.
- [13] 王全金, 徐刘凯, 向速林, 等. 应用输出系数模型估算赣江下游非点源污染负荷 [J]. 人民长江, 2011, 42(23): 31—33.
- [14] 丁恩俊. 三峡库区农业面源污染控制的土地利用优化途径研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [15] RAST W, LEE G F. Nutrient Loading Estimates for Lakes [J]. Journal of Environmental Engineering-Asce, 1983, 109(2): 502—517.
- [16] BEAULAC M N, RECKHOW K H. An Examination of Land Use-Nutrient Export Relationships [J]. Journal of Water Resources Bulletin, 18(6): 1013—1024.
- [17] FRINK C R. Estimating Nutrient Export to Estuaries [J]. Journal of Environment Quality, 1991, 20(4): 717—724.
- [18] 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.
- [19] 刘瑞民, 杨志峰, 丁晓雯, 等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2407—2414.
- [20] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 326—331.
- [21] 陈西平, 梁荫. 涪陵地区农村径流水体中氮磷含量及分布特征 [J]. 长江流域资源与环境, 1994, 3(1): 66—70.

- [22] 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律 [M]. 北京: 科学出版社, 2008, 348—358.
- [23] 朱 波, 汪 涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷 [J]. 中国水土保持, 2010(10), 34—36+71.
- [24] 黄海凤, 汶铁刚, 连彩霞. 三峡库区面源污染负荷的核算与污染源评价 [J]. 科技信息, 2011(31): 442—443+368.

Estimation of Pollution Loads from Agricultural Nonpoint Sources in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing) Based on the Export Coefficient Modeling Approach

YANG Yan-lan¹, SHEN Li-juan^{1,2,3}, XIE De-ti^{1,2,3},
LUO Yun-zhong¹, NI Jiu-pai^{1,2,3}

1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;
2. Key Laboratory of Digital Agriculture of Chongqing, Chongqing 400716, China;
3. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Nonpoint Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China

Abstract: The agricultural nonpoint source pollution of the water environment seriously influences the ecological environment of the Three Gorges Reservoir area. In this study, pollution loads from agricultural nonpoint sources in Three Gorges reservoir area (Chongqing) were estimated with the approach of export coefficient modeling. In 2011, total nitrogen and total phosphorus loads in the study area were $30\,786.9 \times 10^6$ and $4\,221.0 \times 10^6$ g/a, respectively, the former being 7.3 times as much as the latter. Total nitrogen and phosphorus loads were affected significantly by the types of land utilization and vegetation coverage. The contributions to pollution load from various types of pollutant sources were different. The magnitude of contribution from various types of pollutant sources was in the order of cultivated land, forest land, wastewater and garbage from rural residents, livestock and poultry breeding, garden plot and grassplot for total nitrogen load, and cultivated land, livestock and poultry breeding, forest land, garden plot, wastewater and garbage from rural residents and grassplot for total phosphorus load. The differences among various districts/counties in total nitrogen and total phosphorus loads and their load intensities were great. Total nitrogen and total phosphorus loads were bigger in Kaixian, Jiangjin, Fuling and Wanzhou, and were higher in Banan, Changshou, Shapingba and Nan'an. The research about the distribution of nitrogenous and phosphorous pollutants and their load intensities from agricultural nonpoint sources can provide basic data for analyzing inter-regional and inter-annual variability and lay a foundation for regional planning and agricultural structure adjustment in Three Gorges Reservoir area.

Key words: Three Gorges Reservoir area; agricultural nonpoint source pollution; export coefficient modeling; pollution load; estimation

