

三峡库区(重庆段)农村面源污染驱动因素分析^①

彭 滔¹, 邵景安¹, 王金亮¹, 倪九派², 谢德体²

1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716

摘要: 为了分析研究三峡库区(重庆段)农村面源污染物全氮(TN)、全磷(TP)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD₅)排放量与其驱动因素与的作用关系, 在重庆市库区 21 个区县级尺度上, 用主成分分析法从 19 个原始指标中提取了 4 个主成分, 并用传统线性回归模型、空间自相关模型和空间自回归模型分析污染物和驱动因素之间的空间相关性. 结果表明: 1) 农业生产生活强度、土地利用类型及水土流失因子对三峡库区腹地外围和腹地沿江地区的农村面源污染影响较大, 农资使用与畜禽养殖、农村社会环境因子对三峡库区的库中地区影响较大, 三峡库区库尾都市核心区受 4 个主成分因子影响作用较小. 2) 污染物 COD, BOD₅ 主要受到驱动因素农业生产活动强度、农资使用和水土流失的影响, 污染物 COD, BOD₅ 排放量受本区域驱动因素的影响要大于邻近区域的驱动因素. 3) 污染物 TP, TN 主要受到驱动因素农业生产活动强度、畜禽养殖与农资使用的影响, 污染物 TN 的排放量还受到土壤侵蚀和不同土地利用类型的影响, 污染物 TP, TN 的排放量受邻近区域扩散因素非常重要.

关键词: 农村面源污染; 驱动因素; 主成分分析; 空间自回归模型

中图分类号: X501

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)03-0126-10

农业面源污染是在农业生产生活过程中, 农田中的泥沙、营养盐、农药及其它污染物, 通过农田地表径流、农田排水和地下渗漏等形式进入水体而形成的面源污染. 由于污染源分散, 污染发生位置难以识别, 再加上具有成因复杂、随机性强、潜伏周期较长的特点, 对农业面源污染的防控治理较为困难^[1-3]. 更为重要的是, 农业面源污染所引起的耕地质量下降、水体富营养化等一系列的生态环境问题尤为突出, 进而影响到区域的社会经济发展. 因此, 农业面源污染已成为生态环境科学的研究热点问题之一^[4].

国内外很多学者对面源污染进行了研究. 早在 1930 年美国学者就研究了面源污染与洪水的关系^[3,5]. 国内对农业面源污染的研究起步较晚, 始于 20 世纪 80 年代初对湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划研究^[6], 在此基础上, 很多学者对面源污染的形成机理和变化规律(包括降雨径流、土壤侵蚀和污染物迁移转化过程)^[7-13]、污染负荷模型化^[14-16]、防控措施^[17-18]等方面进行了大量深入的研究工作. 关于农业面源污染负荷的确定、来源解析方面的研究, 更多的主要集中在“应用典型相关分析、聚类分析、层次分析法等方法来评价影响因子的作用大小^[19-20]”, “通过入河系数等公式推导污染物排放量和等标排放量来判断影响因子重要性^[21]”, 以及“基于各类模型计算面源污染负荷”等方面^[22-23]. 这些研究在一定程度上揭示了污染物的来源和作用大小, 但同时也存在一定的局限性, 缺乏对污染物与污染源之间的空间相关性研究, 没有充分考虑到从污染物与污染源在空间上的分布关系和作用关系方面来研究面源污染的驱动因素.

① 收稿日期: 2014-07-13

基金项目: 国家科技重大专项“水体污染控制与治理”(2012ZX07104-003); 重庆市自然科学基金重点基金“基于库周气象数据的三峡水库地表覆被变化气候效应的情景模拟”(2010JJ0069).

作者简介: 彭 滔(1989-), 男, 重庆人, 硕士生, 主要从事农业面源污染与土地利用研究.

通信作者: 邵景安, 博士, 研究员.

三峡库区(重庆段)位于长江上游的末端,具有重要的生态地理位置^[24]. 自 2003 年三峡工程蓄水发电,随着水位提升,农业面源污染已成为库区水体污染和土壤污染的主要原因之一^[25],制约了库区生态环境和经济的可持续发展. 鉴于此,本文在已有的研究基础上,以三峡库区(重庆段)为研究区域,在区县的尺度上,采用主成分分析法剔除与农业面源污染相关的驱动因子变量之间的多重共线性后,引入传统线性回归模型、空间自相关模型和空间自回归模型来分析各类污染物排放量与驱动因素之间的空间相关性,并从空间分析模型的角度来说明驱动因素与污染物的关系和作用大小,目的在于丰富三峡库区面源污染驱动因素的问题研究,并为采取相应的防治管理措施提供科学的依据.

1 研究区域概况

三峡库区(重庆段)位于长江上游下段,地理范围在 $28^{\circ}28' - 31^{\circ}44'N$ 、 $105^{\circ}49' - 110^{\circ}12'E$ 之间,东起巫山县、西至江津市、南起武隆县、北至开县,西南与川黔相邻,西北与川陕交界,东南、东北与鄂西接壤. 三峡库区(重庆段)包括重庆市 22 个区县,幅员面积 $46\,158.53\text{ km}^2$,约占整个三峡库区面积的 85.6% ,覆盖了大部分三峡库区的范围. 2008 年末三峡库区(重庆段)农业总人口为 $1\,300.095\,2$ 万人,农业总产值 $4\,516\,293$ 万元^[26-27].

研究区域属于亚热带季风性湿润气候区,具有冬暖春早,夏热秋雨,四季分明的特点,自然灾害频繁. 该区地处川鄂湘黔隆起褶皱带、川东褶皱带和大巴山断褶带三大构造单元的交汇处;地貌发育以流水作用为主,区内地形高低起伏,结构较复杂. 库区主要有山地草甸土、新积土、粗骨土、水稻土、潮土、石灰(岩)土、黄棕壤、黄壤、紫色土、棕壤等土壤类型^[28];库区内主要植被类型有:亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、暖性针叶林和温带暗针叶林. 其中亚热带常绿阔叶林类型的物种密集程度最高,生态效益最显著^[29].

2 数据获取与研究方法

2.1 指标的确定与污染物等标排放量的计算

以区县为尺度,从影响三峡库区(重庆段)农业面源污染的自然、经济、资源、生态环境等层面,并考虑到数据的可获取性,最终共选取 19 个评价指标用于分析对农村面源污染物 TP、TN、COD 和 BOD_5 的驱动影响. 这些指标的数据主要来源于《2009 年统计年鉴》、《重庆市 2008 年各区县主要农产品生产、贸易及排名》、2008 年重庆市全市土地更变调查数据、2008 年重庆市全市土地资源二类调查图、研究区水土流失强度类型图(2008 年;分级标准采用水利部颁发的水土流失(土壤侵蚀)分类分级标准(SL190-96)).

农村面源污染物 TP、TN、COD 和 BOD_5 绝对实物排放量的计算参见表 1. 由于各区县国土面积大小不同,加之各类污染物的排放标准不一,无法在同一尺度上比较其污染程度. 为此在分析前将各类污染物的实物排放量除以对应区县的国土面积,即可得到污染物的等标排放量,将各类污染物的等标排放量作为分析中的因变量.

表 1 各类污染物实物排放量计算公式与系数

指 标	公 式	变 量
化肥污染排放量($t \cdot a^{-1}$)	化肥施用量(折纯量)×入河系数	据重庆市农业环境检测站调查研究,氮、磷肥的入河系数为 0.100 7 和 0.059 9. 以氮肥、磷肥的折纯量分别计算 TN、TP 的排放量,不考虑化肥的 COD、 BOD_5 的排放量
有机肥污染排放量($t \cdot a^{-1}$)	有机肥施用量×(1-有机肥利用率)×有机肥养分含量×入河系数	入河系数取 0.01,利用率为抽样调查取得、有机肥养分含量分别由相关资料提供 ^[30]
作物秸秆污染排放量($t \cdot a^{-1}$)	某作物产量×某作物秸秆产出系数×(1-秸秆利用率)×秸秆养分含量×入河系数	入河系数取 0.01,其综合利用率为抽样调查取得. 秸秆产出系数与养分含量由相关文献提供 ^[30-31]

续表 1		
指 标	公 式	变 量
畜禽养殖污染排放量($t \cdot a^{-1}$)	养殖总量×畜禽粪便排放系数×粪便中污 染物平均含量×污染物入河系数	畜禽粪便排放系数、畜禽粪便中污染物平均含量及 其入河系数由国家环保总局推荐 ^[32]
水产养殖($t \cdot a^{-1}$)	淡水养殖产量×污染物排放系数	水产养殖污染排放量根据淡水鱼类产品,借助其它 城市的排放系数计算 ^[33]
生活污水污染排放量($t \cdot a^{-1}$)	乡村人口总数×农村生活污水排放系数× 污水平均含量×入河系数	抽样调查显示重庆市农村人均生活污水排放量为 $0.67 L \cdot d^{-1}$,参考重庆市环境监测中心的检测结 果,COD,BOD ₅ ,TN,TP 分别取 292.69,138.33, 44.14,4.49 $mg \cdot L^{-1}$,乡村入河系数取 0.30
生活垃圾污染排放量($t \cdot a^{-1}$)	乡村人口总数×农村生活垃圾排放系数× 垃圾渗滤液平均含量×入河系数	抽样调查显示重庆市农村人均生活垃圾排放量为 $0.67 kg \cdot d^{-1}$,其 COD,BOD ₅ ,TN,TP 参考垃圾渗 滤液,分别取 50.00,5.00,1.00,0.2 $mg \cdot kg^{-1}$,乡 村入河系数取 0.20
农田土壤侵蚀排放量($t \cdot a^{-1}$)	$W_i = S_i \times DA \times C_i \times 10^{-6}$	W_i 为水土流失带入河流的污染量($t \cdot a^{-1}$); S_i 为 区域土壤年侵蚀量,即水土流失面积与侵蚀模数的 乘积($t \cdot a^{-1}$),数据来源重庆市土地利用调查数据; DA 为水体泥沙转移比,取 0.046; C_i 为土壤中污染 物背景值 ^[34] ($mg \cdot kg^{-1}$). COD,BOD ₅ ,TN,TP 分别取 15 000,2 000,100,20 $g \cdot t^{-1}$

2.2 主成分分析法

考虑到选取的指标个数较多,指标之间的相关程度较高,很难准确地衡量与污染物 TN,TP,COD,BOD₅ 等标排放负荷总量之间的相关关系. 首先用 SPSS 软件对 19 个原始指标进行降维处理,消除变量之间的多重共线性.

用 Z-score 法对原始指标的数据进行标准化变换:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \overline{x_j}) / S_j \qquad i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, n$$

(1)

式中: $\overline{x_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$, $S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \overline{x_j})^2$.

根据每个特征根求出相应的特征向量, $L_g = l_{g1}, l_{g2}, \cdots, l_{gp} (g=1, 2, \cdots, p)$, 将标准化后的指标变量转换为主成分: $F_g = l_{g1}Z_1 + l_{g2}Z_2 + \cdots + l_{gp}Z_p (g=1, 2, \cdots, p)$. F_1 为第一主成分, F_2 为第二主成分, $\cdots$, F_p 为第 p 主成分^[35].

求每个主成分的线性加权值 $F_g = l_{g1}Z_1 + l_{g2}Z_2 + \cdots + l_{gp}Z_p (g=1, 2, \cdots, p)$, 再对 p 个主成分进行加权求和, 得到最终主成分得分系数值^[36], 研究中用来评价影响因子对各区县面源污染的作用大小, 得分越大, 表明因子的影响作用越大.

2.3 空间自相关模型

为了进一步研究面源污染驱动因素与污染物 TN,TP,COD,BOD₅ 排放负荷总量之间的空间相关性, 将上述主成分用 GeoDA 软件进行空间自相关和空间回归分析.

本研究通过空间自相关系数来分析驱动因素与污染物在空间分布上是否具有集聚性. 莫兰 I (Moran' I) 指数是最早应用于全局聚类检验的方法^[37-38], 用作检验整个研究区中邻近地区间是相似、相异(空间正相关、负相关), 还是独立的. 计算公式如下:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j \omega_{ij} (x_i - \overline{x})(x_j - \overline{x})}{(\sum_i \sum_j \omega_{ij}) \sum_i (x_i - \overline{x})^2}$$

(2)

式中: N 为研究区内地区总数; ω_{ij} 为空间权重; x_i, x_j 为分别表示区域的 i 和 j 属性; $\overline{x}$ 为属性的平均值.

莫兰 I 指数可以看作是观察值与它的空间滞后之间的相关系数. 变量 x 的空间滞后是 x 在邻域 j 的平

均值, 定义为:

$$x_{i,-1} = \sum_j \omega_{ij} x_j / \sum_j \omega_{ij} \tag{3}$$

因此, 莫兰 I 指数值处于-1 到 1 之间, 值接近 1 时表明具有相似的属性集聚在一起; 值接近-1 时表明具有相异的属性集聚在一起; 值接近于 0 表明属性是随机分布的, 或者不存在空间自相关性.

2.4 空间自回归模型

Anselin 根据自变量与因变量之间的空间相关性, 给出空间回归方程的通用形式^[39-40]:

$$S = y = \rho w_1 y + x\beta + u \tag{4}$$

$$\mu = \lambda w_2 \mu + \epsilon \tag{5}$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

式中: y 为被解释变量, x 为解释变量, 研究中被解释变量为污染物 TN,TP,COD,BOD₅ 等标排放负荷总量, 解释变量为从原始变量中提取的 4 个主成分; β 为与解释变量 x 相关的参数向量; ρ 为空间滞后项 $w_1 y$ 的系数; λ 为空间误差项的回归系数; w_1, w_2 为与被解释变量和残差的空间自回归过程相关的权重矩阵; I_n 为残差的空间自相关系数.

根据其中 ρ 和 β 取值不同, 有 4 种不同的空间模型结构^[41], 本研究涉及其中的 2 种: (1) 当 $\rho \neq 0, \beta \neq 0, \lambda = 0$ 时, 为混合回归-空间自回归模型, 即空间滞后模型; (2) 当 $\rho = 0, \beta \neq 0, \lambda \neq 0$ 时, 为残差空间自回归模型, 即空间误差模型.

本文先将 4 个主成分变量与污染物等标排放量建立空间误差模型后(模型 I), 发现有的变量变得不显著($p > 0.05$), 为了研究结果的精确性, 剔出不显著的变量再次对剩下的变量与污染物等标排放量建立空间误差模型(模型 II).

3 结果与分析

3.1 污染物等标排放量分析

图 1 为三峡库区(重庆段)21 个区县各类污染物的等标排放量情况. 由图 1 可以看出, 污染物 COD 和 BOD₅ 等标排放量较多的区域尤以库区腹地沿江的云阳、库中的长寿及核心区的江北最为典型. 污染物 TN 排放量的高值区主要集中在库区腹地沿江的云阳, 库中的长寿、涪陵和江北等地; 污染物 TP 排放量的高值区主要集中在主城沙坪坝, 其次是云阳、忠县和丰都等地.

污染物 COD,BOD₅,TN,TP 等标排放量的低值区都主要集中分布在库区外围山地丘陵区 of 巫山、巫溪和奉节以及库中的武隆等地.

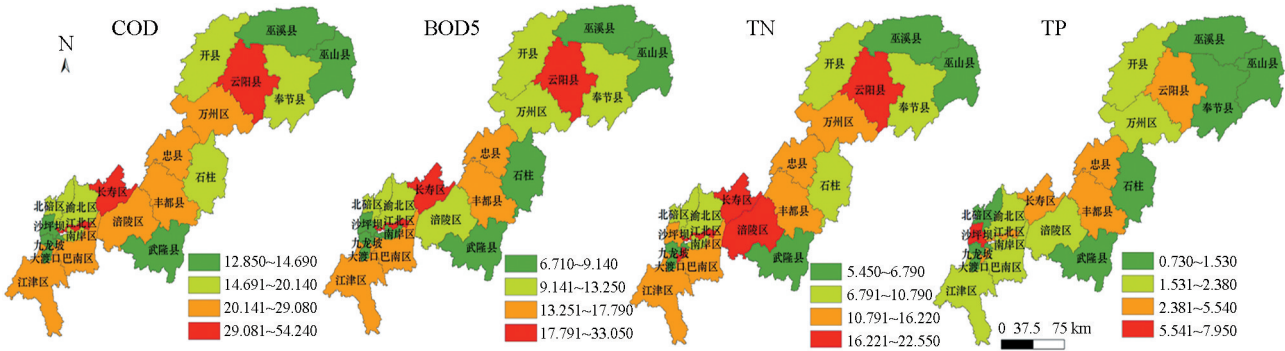


图 1 2008 年三峡库区(重庆段)各类污染物等标排放量

3.2 驱动因素的主成分分析

表 2 为旋转平方和载入的特征值、方差比例和累计方差比例, 前面 4 个主成分的方差贡献率为别为 42.399%,20.5%,13.993%和 7.48%, 其累计方差率达到了 84.372%, 尽管小于主成分法中规定的 85%, 依据主成分的方差贡献率的多少来选择评价指标^[42-43], 当第 1 主成分的方差比例 $< 80\%$, 则依次将前几个主成分线性加权综合, 使得方差比例的和超过 80%. 因此, 对三峡库区(重庆段)21 个区县的 19 个指标提

取了 4 个主成分作为评价的综合指标，评价的可信度为 84.372%，其中第 1 个主成分是最重要的，包含的信息量和变量最多，对库区农村面源污染的影响作用也最大。

表 2 特征值和方差比例及累计方差比例

主成分	特征值	方差比例/%	累计方差比例/%
1	9.315	42.339	42.339
2	4.510	20.500	62.839
3	3.078	13.993	76.832
4	1.646	7.480	84.313

从表 3 主成分荷载大小来看，与第 1 主成分相关程度较高的有农业总产值、畜牧业总产值、农业总人口、粮食播种面积、农用居民点面积、农药施用量和耕地面积等指标，将第 1 主成分描述为农业生产生活强度，这些指标与第 1 主成分的相关系数绝对值大多都超过了 0.8。与第 2 主成分相关程度较高的有土壤侵蚀模数、林地面积、牧草地面积等指标，将第 2 主成分描述为土地利用类型及水土流失。同样地，将第 3 主成分描述为农资使用与畜禽养殖，第 4 主成分描述为农村社会环境。

表 3 主成分荷载矩阵

变量	主 成 分			
	农业生产生活强度 (主成分 1)	土地利用及水土流失 (主成分 2)	农资使用与畜禽养殖 (主成分 3)	农村社会环境 (主成分 4)
农业总产值	0.965	−0.014	0.035	0.014
畜牧业总产值	0.950	0.119	0.173	0.079
农业总人口	0.924	0.244	0.225	−0.069
粮食播种面积	0.895	0.317	0.173	0.201
农用居民点面积	0.888	0.239	0.150	−0.122
农药施用量	0.881	0.115	0.014	0.171
耕地面积	0.879	0.276	0.141	0.278
猪年存栏量	0.838	0.411	0.259	0.073
水产品产量	0.828	−0.367	−0.010	0.070
有机肥施用量	0.824	0.090	0.225	0.393
复种指数	0.518	0.238	0.313	0.278
农田土壤侵蚀	0.301	0.909	0.079	0.198
林地面积	0.210	0.897	0.137	0.256
牧草地面积	0.128	0.856	−0.231	−0.065
农民人均收入	0.068	−0.742	−0.340	0.037
化肥施用量	−0.368	−0.739	−0.336	−0.375
家禽粪便排放量	0.279	−0.040	0.748	−0.266
牛年存栏量	0.131	0.470	0.514	0.297
生活垃圾排放量	−0.242	−0.240	−0.051	−0.859

图 2 为 4 个主成分得分系数空间分布图。开县、万州、涪陵、江津、云阳等地的农村面源污染受到农业生产生活强度因子的影响较大；巫溪、奉节、石柱、巫山、开县等地的面源污染受到土地利用类型和水土流失因子的影响较大；云阳、丰都等地的面源污染受到农资使用和家禽养殖因子的影响较大；丰都、涪陵和武隆等地的面源污染受到农村社会环境因子的影响较大。总的来看，农业生产生活强度和土地利用类型及水土流失驱动因子对以山地为主的腹地外围和腹地沿江地区影响较大；农资使用与畜禽养殖和农村社会环境驱动因子对库中地区影响较大；三峡库区库尾都市核心区的面源污染受 4 个驱动因子的影响很小。

3.3 驱动因素与污染物的空间相关性分析

从表 4 可以看出，4 个主成分因子存在一定的空间相关性，说明空间地理位置对各因子有一定的影响。4 个主成分中，农资使用与畜禽养殖因子的空间自相关系数为负数，说明在研究区内农资使用与畜禽养殖的影响分布表现出空间异质性；土地利用类型及水土流失因子的空间自相关系数较大，说明在研

究区内土地利用类型和水土流失的影响分布表现出空间集聚性，土壤类型和水土流失的分布在空间上具有较强的结构性。

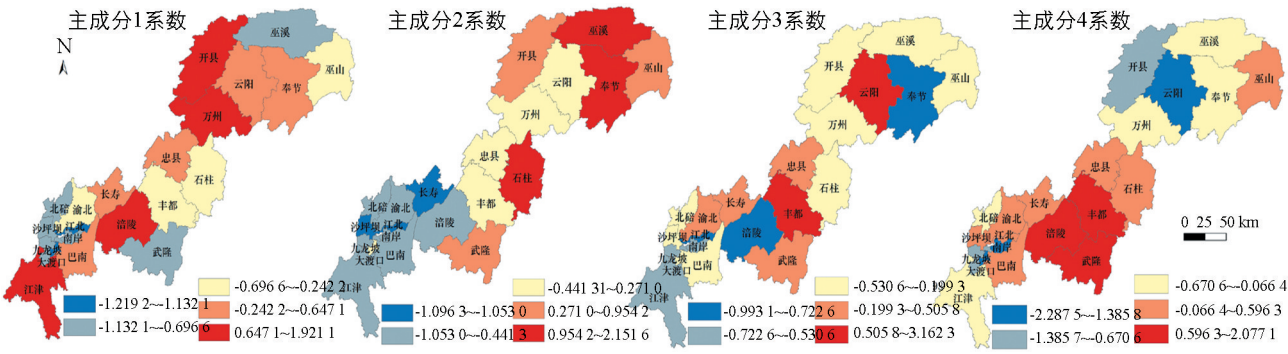


图 2 主成分得分系数分布图

表 4 农村面源污染驱动因素空间自相关系数

自 变 量	空间自相关指数	自 变 量	空间自相关指数
农业生产生活强度	0.175 8	农资使用与畜禽养殖	—0.117 3
土地利用类型及水土流失	0.598 3	农村社会环境	0.303 5

用传统线性回归模型对污染物 TN,TP,COD,BOD₅ 排放量进行回归分析，然后对其残差进行空间自相关分析。由表 5 可以看出 TN,TP,COD,BOD₅ 传统回归模型的残差存在较为明显的空间正相关性，这说明在研究区内各类污染物排放量高值的区县空间相邻，排放量低值的区县空间相邻，因此需要进行空间自回归分析。

表 5 TN,TP,COD,BOD₅ 传统线性回归模型残差的空间自相关系数

污 染 物	区县数	空间自相关指数	污 染 物	区县数	空间自相关指数
TN	21	0.485 4	COD	21	0.427 4
TP	21	0.274 8	BOD ₅	21	0.421 0

3.4 驱动因素的空间回归分析

表 6 为 TP 的传统线性回归模型、空间误差回归模型的分析结果。由表 6 可以看出空间误差模型 I 和 II 的伪 R²,LIK,AIC 和 SC 值变化不大，剔除不显著的变量后模型的拟合度变化不大，但空间误差模型 II 中的所有变量都是显著的，说明空间误差模型 II 又优于 I。

同理，污染物 TN,COD,BOD₅ 空间误差回归模型主要参数见表 7。对 TP,TN,COD 和 BOD₅ 经过空间误差回归模型分析后，Moran’ I 检验统计量都变小且近似于 0(表 8)，TP,TN,COD 和 BOD₅ 自相关性消失，这说明包括在模型中的空间自回归误差项排除了传统线性回归模型中的所有空间自相关现象。

表 6 TP 3 种回归模型参数

自变量	回归系数			标准差			t 值			p 值		
	OLS	I	II	OLS	I	II	OLS	I	II	OLS	I	II
常数	0.230 5	0.227 1	0.228 5	0.015 2	0.019 7	0.019 62	15.206 0	11.523 0	34.309 3	0	0	0
农业生产生活强度	0.110 9	0.107 7	0.107 9	0.015 5	0.015 4	0.015 35	7.141 3	6.977 5	12.468 5	0.000 002 3	0	0
土地利用及水土流失	0.034 3	0.024 4		0.015 5	0.017 7		2.210 6	1.376 5		0.041 971 0	0.168 662 6	
农资使用与畜禽养殖	0.194 0	0.190 9	0.191 3	0.015 5	0.014 2	0.014 11	12.491 1	13.434 9	4.988 2	0	0	0
农村社会环境	-0.014 2	-0.007 9		0.015 5	0.015 6		-0.914 7	-0.504 4		0.373 925 6	0.613 961 6	
λ	0.282 2	0.285 1		0.257 3	0.255 0		1.097 0	1.096 7		0.027 27	0	
模型拟合度检验	R ² =	R ² =	R ² =	LIK=	LIK=	LIK=	AIC=	AIC=	AIC=	SC=	SC=	SC=
	0.93	0.92	0.92	29.07	33.66	34.89	-48.13	-57.31	-56.17	-42.91	-52.09	-52.05

注：一空间误差项的回归系数。

表 7 TN,COD,BOD₅ 空间自回归模型参数

自变量	回归系数			标准差			t 值			p 值		
	TN	COD	BOD ₅	TN	COD	BOD ₅	TN	COD	BOD ₅	TN	COD	BOD ₅
常数	0.310 7	0.252 9	0.247 1	0.009 0	0.009 9	0.010 3	34.505 23	25.351 93	23.990 48	0	0	0
农业生产生活强度	0.183 2	0.1398	0.137 4	0.014 2	0.013 6	0.014 0	12.869 89	10.268 72	9.818 769	0	0.000 002 3	0
土地利用及水土流失	0.063 7	0.0611	0.061 0	0.011 8	0.011 9	0.012 3	5.403 793	5.133 679	4.973 565	0	0.000 000 3	0.000 000 7
农资使用与畜禽养殖	0.155 4	0.1491	0.149 0	0.017 2	0.015 3	0.015 7	9.011 688	9.735 582	9.491 934	0	0	0
农村社会环境		-0.018 3	-0.020 6		0.012 7	0.013 0		-1.445 331	-1.585 759		0.048 365 1	0.011 279 4
λ	0.257 5	-0.403 8	-0.394 7	0.341 1	0.341 7	0.341 5	-1.927 58	-1.181 472	-1.1559 78	0	0.023 741 5	0.024 769 0

注：一空间误差项的回归系数。

表 8 TN,TP,COD,BOD₅ 空间误差模型残差的空间自相关系数

污染物	区县数	空间自相关指数	污染物	区县数	空间自相关指数
TN	21	-0.189 7	COD	21	-0.051 2
TP	21	0.004 9	BOD ₅	21	-0.039 3

3.5 农业生活强度、农资使用等驱动因素对污染物 TP,TN 的影响分析

从表 6 和表 7 可以看出，污染物 TP,TN 在空间误差模型中各影响因素的回归系数都达到了显著性水平($p<0.05$)。在空间误差模型的设定下，根据自变量 t 值绝对值大小，可以看出 TP,TN 的排放量主要受到农业生产生活强度、农资使用与畜禽养殖的影响。此外，污染物 TN 的排放量还受到土壤侵蚀量和土地利用类型的驱动影响并呈较强的正相关。

通过对各驱动因素的回归系数进行分析，TP,TN 的排放量与农业生产生活强度、农资使用与畜禽养殖总量有较强的正相关，农畜牧业总产值越高的区域，TP,TN 的排放量就相对较大，这是由于三峡库区(重庆段)农村面源污染的特点属于生产型的污染，即污染主要来源于畜牧业和种植业^[44]。

从误差项的回归系数来看，TP,TN 的误差项回归系数比影响因素的回归系数大，说明污染物 TP,TN 的排放量除了受到本区域驱动因素影响以外，邻近区域扩散因素非常重要。在库区腹地沿江以山地丘陵区为主的云阳、万州、库区腹地外围的开县以及库中的丰都、涪陵等区域为污染物 TP,TN 排放量密集区，这些区域面源污染的防治措施可能还要考虑到邻近区域驱动因素的影响。

3.6 农业生产生活强度、农资使用与畜禽养殖、水土流失面积等驱动因素对污染物 COD,BOD₅ 的影响分析

从表 7 可以看出，污染物 COD,BOD₅ 在空间误差模型中各影响因素的回归系数都达到了显著性水平($p<0.05$)。在空间误差模型的设定下，根据自变量 t 值绝对值大小，COD,BOD₅ 排放总量主要受到农业生产生活强度、农资使用与畜禽养殖、水土流失面积的影响。从各驱动因素的回归系数来看，COD,BOD₅ 排放总量与农业生产生活强度、农资使用与畜禽养殖、水土流失面积存在较强的正相关。

其中，农业生产生活强度驱动因子主要包括了农业总产值、畜牧业总产值、农业总人口、粮食播种面积等变量，说明各类农业生产产值、农业总人口、农业用地面积、农资使用与畜禽养殖和水土流失面积等都是污染物 COD,BOD₅ 的主要驱动因子，对 COD,BOD₅ 的排放量有促进作用。

农业生产生活、农资使用与畜禽养殖影响的主要区域大致集中在三峡库区腹地外围和腹地沿江地区，由于这些地区农业生产方式较为落后，人地矛盾尖锐，农业生产生活强度较大，农药和化肥的使用量较多；再者，畜禽养殖数量多，粪便的入河排放量大；加上库区腹地外围和腹地沿江地区属于水土流失生产污影响区和频繁区，这些都是导致污染物 COD,BOD₅ 排放量增加的驱动力。

然而农村社会环境驱动因子的回归系数为负值，说明污染物 COD,BOD₅ 排放量与农村社会环境驱动因子呈负相关，说明农村社会环境相对较好的区域，生活垃圾排放量相对较少，COD,BOD₅ 的排放量相对较少，农村社会环境对 COD,BOD₅ 排放量起到一定的抑制作用。

从误差项的回归系数来看，污染物 COD,BOD₅ 的误差项回归系数比影响因素的回归系数小，说明影响污染物 COD,BOD₅ 排放量受本区域驱动因素的影响要大于邻近区域的驱动因素，在腹地沿江地区和外

围地区的云阳、开县、万州以及库尾以低山丘陵为主的江津等区域为污染物 COD, BOD₅ 排放量密集区, 这些区域面源污染的防治措施要更重视本区域的污染源。

4 结 论

1) 对 19 个指标提取的 4 个主成分中, 农业生产生活、土地利用类型及水土流失因子对三峡库区腹地外围和腹地沿江地区的农村面源污染影响较大, 农资使用与畜禽养殖、农村社会环境因子对三峡库区的库中地区影响较大, 三峡库区库尾都市核心区受 4 个主成分因子影响作用较小。库区不同区域的农村面源污染受到不同驱动因素的影响, 其影响程度也不同。并且 4 个主成分因子存在一定的空间相关性, 污染物 TP, TN, COD, BOD₅ 传统线性回归模型的残差存在自相关, 说明传统线性回归模型没有考虑这 4 类污染物的驱动因素数据中的空间自相关性的影响。因此, 采用空间自回归模型来分析这 4 类污染物排放量与驱动因素之间的作用关系。

2) 三峡库区(重庆段)农村面源污染中的污染物 TP, TN, COD, BOD₅ 的空间误差回归结果表明: 污染物 COD, BOD₅ 排放量的驱动因素为农畜牧业总产值、农业总人口、粮食播种面积等农业生产活动强度和农药、化肥等农资使用, 农业生产生活及农药化肥的使用过程中, 会产生大量的 COD, BOD₅, 并且农业生产生活强度越高及农药化肥施用量越高的区域, 污染物 COD, BOD₅ 排放量就越大。此外 COD, BOD₅ 受到农村社会环境驱动因素的抑制作用。污染物 COD, BOD₅ 排放量受本区域驱动因素的影响要大于邻近区域的驱动因素。

3) 污染物 TP, TN 排放量的驱动因素除了农业生产活动强度外, 还受到畜禽养殖、农资使用的重要影响, 说明畜禽养殖的粪便排放和农药化肥的使用是污染物 TP, TN 的主要来源, 畜禽养殖和农药化肥使用较多的区域, 污染物 TP, TN 排放量就越大。此外, TN 还受到土壤侵蚀和不同土地利用类型驱动因素的影响, 说明污染物 TN 的产生还受到不同程度水土流失的影响。最终得出三峡库区(重庆段)农村面源污染属于生产型污染的结论, 即畜牧业和种植业, 这与前人研究结果相一致^[21]。污染物 TP, TN 的排放量除了受到本区域驱动因素影响以外, 邻近区域扩散因素非常重要。

文中由于数据的可获取性, 在模型中直接使用的入河系数, 没有对污染物的入河距离进行量化, 可能会忽略部分污染物量的增加或流失, 今后要考虑不同的污染物入河距离、高程等因素, 采用更详细的空间量化方法来更精确地描述和计算。文中分析的三峡库区(重庆段)农村面源污染驱动因素仅仅只是最后的响应部分, 要为最终的政策框架提供更好的依据, 还需要从政策、市场和小农经济等根本原因进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望 [J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66—71.
- [2] 宋秀杰. 农村面源污染控制及环境保护 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [3] LINE D E, MCLAUGHLIN R A, OSMOND D L, et al. Non-Point Sources. Water Environment Research, 1998, 70(4): 895—911.
- [4] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, KOLBE H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008—1017.
- [5] ROBERTA PARRY. Agricultural Phosphorus and Water Quality, U. S. A Environment Protection Agency Perspective [J]. Journal of Environment Quality, 1998, 27: 258—261.
- [6] 张水龙, 庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势 [J]. 生态学杂志, 1998, 17(6): 51—55.
- [7] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 陈伟伟, 孙娟. 农业非点源污染田间模型及其应用 [J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3509—3513.
- [8] 邹桂红. 基于 AnnAGNPS 模型的非点源污染研究——以大沽河典型小流域为例 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [9] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique European, “SHE”, I: History and philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System. Hydro [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1—2): 45—59.

- [10] GAYNOR J D, FINDLAY W I. Soil and Phosphorus Loss from Conservation and Conventional Tillage in Corn Production [J]. Environ Qual, 1995, 24(4): 734—741.
- [11] 洪华生, 黄金良, 曹文志. 九江流域农业非点源污染机理与控制研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] Daniel T C, Sharpley A N, Edwards D R, et al. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 49(2): 36—38.
- [13] 梁流涛, 冯淑怡, 曲福田. 农业面源污染形成机制: 理论与实证 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 74—80.
- [14] 潘 影, 刘云慧, 王 静, 宇振荣. 基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析 [J]. 生态学报, 2011, 31(2): 529—537.
- [15] 丁恩俊, 谢德体, 魏朝富, 倪九派. 基于 MUSLE 模型的三峡库区重庆段农业非点源污染危险性评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(5): 96—101.
- [16] SHRESTHA S, KAZAMAA F, NEWHAM L. A Framework for Estimating Pollutant Export Coefficients from Long-Term in-Stream Water Quality Monitoring Data [J]. Environment Modelling & Software, 2008, 23(2): 182—194.
- [17] 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.
- [18] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制 [J]. 环境科学, 2000(2): 98—100.
- [19] 杨志敏, 陈玉成, 魏世强, 等. 重庆市农业面源污染影响因子的系统分析 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 999—1004.
- [20] 杨 蓉. 重庆市农业面源污染分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [21] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 基于“压力-响应”态势的重庆市农业面源污染的解析源 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2362—2369.
- [22] 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.
- [23] 曹彦龙. 三峡重庆库区面源污染分析及数字模拟研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [24] 李月臣, 刘春霞, 闵 婕, 等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价 [J]. 生态学报, 2013, 33(1): 168—178.
- [25] 汪 祥, 李晓玲, 张 敏, 等. 三峡库区秭归县农业面源污染原因及发展可持续生态农业的策略 [J]. 农业科技通讯, 2008(12): 98—100.
- [26] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴(2009) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [27] 张玉启, 李 彤, 郑钦玉, 等. 论三峡库区农业面源污染控制的生态补偿措施 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 230—234.
- [28] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(2): 788—796.
- [29] 李杰霞, 杨志敏, 陈庆华, 等. 重庆市农业面源污染负荷的空间分布特征研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(7): 145—151.
- [30] 李茂松, 汪亚峰. 近 20 年中国主要农作物秸秆资源动态及现状 [J]. 中国农学通报, 2004, 20(11): 151—154.
- [31] 国家环境保护总局. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 77—78.
- [32] 黄 欢, 汪小泉, 韦肖杭, 等. 杭嘉湖地区淡水水产养殖污染物排放总量的研究 [J]. 中国环境监测, 2007, 23(2): 94—96.
- [33] 牟树森, 青长乐. 环境土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.
- [34] 罗怀良, 朱 波, 陈国阶. 川中丘陵区耕地变化及其驱动力研究——以四川省盐亭县为例 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(4): 476—480.
- [35] 杨丽娜, 何多兴, 杨庆媛. 土地整治后期管护影响因素及保障体系分析——以三峡库区云阳县为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(5): 134—141.
- [36] 杨晓霞, 田盛圭, 向 旭, 等. 基于主成分分析法的重庆市旅游业发展潜力评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 111—117.
- [37] CLIFF A D, ORD J K. Spatial Autocorrelation [M]. London: Pion, 1973.
- [38] 霍霄妮, 李 红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 78—82.
- [39] 王劲峰, 廖一兰, 刘 鑫. 空间数据分析教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [40] 郭 龙. 基于空间回归模型的多尺度耕地空间分布特征及其预测研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [41] 冯利华. 环境质量的主成分分析 [J]. 数学实践与认识, 2003, 33(8): 32—35.

- [42] 李月臣, 刘春霞, 熊德芳. 重庆都市区土地利用/覆盖变化驱动机制分析 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2010, 27(1): 36—46.
- [43] 陈洪波. 三峡库区水环境农业非点源污染综合评价与控制对策研究 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2006.
- [44] 白宝伟, 王海洋, 李先源, 等. 三峡库区淹没区与自然消落区现存植被的比较 [J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(5): 684—691.

Analysis of Driving Factors Affecting Agricultural Non-Point Source Pollution in Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

PENG Tao¹, SHAO Jing-an¹, WANG Jin-liang¹,
NI Jiu-pai², XIE De-ti²

1. College of Geographical Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: This paper aims to analyze the relationship between the discharge amounts of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), COD (chemical oxygen demand) and BOD₅ (biochemical oxygen demand) from the sources of agricultural non-point source pollution (NPSP) and their driving factors in the the Three Gorges Reservoir (TGR) area (Chongqing section), with 21 districts (counties) involved. On the basis of extracting 4 principal components (intensity of agricultural production and living, type of land use and soil erosion, fertilizer and breeding, and rural environment) from the original 19 indicators with principal component analysis, the conventional linear regression model, the spatial autocorrelation model and the spatial regression model were applied to analyze the spatial autocorrelation between pollutants and the driving factors. The results indicated that the driving factors of intensity of agricultural production and living, and type of land use and soil erosion had comparatively great influences on agricultural NPSP on the periphery of the hinderland and along the Yangtze River region of the hinderland in Chongqing section of the TGR area; the other two driving factors, namely, fertilizer and breeding, and rural environment had relatively great influences on agricultural NPSP in the middle of the TGR area of Chongqing section; and all the four principal components had but slight impact on the urban core area, which is at the rear of the TGR area. The important driving factors for COD and BOD₅ were shown to be intensity of agricultural production and living, fertilizer and breeding, and type of land use and soil erosion. The driving factors in the local region had greater impact on the discharge amounts of COD and BOD₅ than those of the adjacent regions. The main driving factors for TN and TP were intensity of agricultural production and living, and fertilizer and breeding, while the driving factors for TN were type of land use and soil erosion. The diffusion factors in the adjacent regions had highly significant impact on the discharge amounts of TN and TP.

Key words: agricultural non-point source pollution; driving force; principal component analysis; spatial autoregression model

