

重庆市农业面源污染影响因子的系统分析

杨志敏^{1,2}, 陈玉成^{1,2}, 魏世强^{1,2}, 赵中金³, 王莉玮³

(1.西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2.重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400716; 3.重庆市农业环境监测站, 重庆 400020)

摘要:采用系统分析与数学分析方法,探讨了重庆市农业面源污染(NPSP)影响因子的作用大小、作用方向和作用方式,划分重庆市农业面源污染防治的类型。结果表明,主导因子是代表畜牧业的粪便承载系数、代表种植业的耕地面积和代表农民生活的人均收入,其中粪便承载系数显示抑制作用,而耕地面积和人均收入则促进面源污染的加重,且它们均以直接作用的形式影响农业面源污染。重庆市农业面源污染的防治可分为压力-响应较大型、压力大而响应小型、压力小而响应大型和压力-响应较小型等。

关键词:农业面源污染;影响因子;系统分析

中图分类号:X502 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)05-0999-06

Systems Analysis of Factors Affecting Agricultural Non-Point Source Pollution in Chongqing

YANG Zhi-min^{1,2}, CHEN Yu-cheng^{1,2}, WEI Shi-qiang^{1,2}, ZHAO Zhong-jin³, WANG Li-wei³

(1.College of Resources & Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Chongqing Key Lab of Agricultural Resources & Environment, Chongqing 400716, China; 3.Chongqing Station of Agricultural Environment Monitoring, Chongqing 400020, China)

Abstract: The discharge amounts of COD, BOD₅, total nitrogen(TN) and total phosphor(TP) was accounted by the list analysis from the 8 sources of agricultural non-point source pollution(NPSP) such as chemical inorganic fertilizers, organic fertilizers, crops straw, stockbreeding, aquiculture, domestic sewage, domestic wastes and soil erosion in 39 districts(counties) in Chongqing. Subsequently, the systems analysis and mathematical analysis were conducted to determine the magnitude, direction and mode of factors affecting NPSP, to classify the prevention and cure types of NPSP in Chongqing. The results showed that the dominant factors were the loading coefficient of dejection(LCD) referring to the influence of stockbreeding, the plantation area(PA) referring to the influence of crop production and the mean revenue of farmer(MRF) referring to the influence of farmers living level. Of which, LCD could restrain the NPSP while PA and MRF reversed. Furthermore, the manner of LCD, PA and MRF were direct function. The 39 districts(counties) in Chongqing were classified into 4 types such as severity both pressure and response, severity of pressure but lightness of response, lightness of pressure but severity of response, and lightness both pressure and response based on loading of NPSP, providing the scientific evidence to prevent and cure NPSP.

Keywords: agricultural non-point source pollution; influence factor; systems analysis

重庆市直辖10年来,农业生产有了飞速的发展,农民生活也有了很大的改善,但非持续发展、高消耗的农村生产与生活方式依然广泛存在,由此带来的农业资源与环境问题积重难返,其中农业面源污染在相当长的时期内已成为制约农业循环经济发展的重要因素之一。发达国家的经验表明,面源污染已成为水环境的首要污染源,特别是农村生产与生活引起的面

源污染,已经开始取代点源污染,逐渐成为了水体污染的重要因素^[1-2]。大多数关于农业面源污染的研究集中在化肥、农药、农膜等农用化学品使用水平、畜禽粪便排放量、水土流失等指标上^[3-7],而忽略其源解析,尤其是影响因素的系统分析。重庆市虽然已开展了农业面源污染的相关研究^[8-10],但由于起步较晚,特别是对负荷核算与因素分析缺乏一个全貌的认识。鉴于源解析内容已由作者另文发表,本文拟采用系统分析与数学分析方法,探讨重庆市农业面源污染的影响因子,找出因子的作用大小、作用方向和作用方式,划分重庆市农业面源污染防治的类型,为采取的相应防治管理策略提供科学依据。

收稿日期:2008-11-05

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAD17B09);国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10);重庆市自然科学基金项目(2007BB7340)

作者简介:杨志敏(1973—),女,四川巴中人,博士研究生,副教授,主要从事污染生态研究。E-mail:bear@swu.edu.cn

1 研究方法

1.1 农业面源污染负荷的核算

在区县级尺度上,采用清单分析法^[1],核算化学肥料施用、有机肥施用、农作物秸秆、畜禽养殖、水产养殖、农村生活污水、生活垃圾和地表自然径流等 8 个来源对农业面源污染物 COD、BOD₅、TN、TP 的排放负荷^[2]。主要核算指标有实物排放量、等标排放量、等标排放系数(国土基)、水质浓度和水质指数。

化肥施用排放量=耕地面积×单位耕地氮肥、磷肥的折纯施用量×污染物入河系数

有机肥施用排放量=耕地面积×单位耕地有机肥用量×(1-有机肥利用率)×有机肥养分含量^[3]×入河系数

秸秆遗弃排放量=某作物产量×某作物秸秆产出系数^[4]×(1-秸秆利用率)×秸秆养分含量×入河系数

畜禽养殖排放量=畜禽养殖总量×排泄系数^[5]×粪污中污染物平均含量^[4]×畜污中污染物入河系数^[4]

水产养殖排放量=淡水养殖产量×污染物排放系数^[6]

生活污水排放量=农村人口总数×人均排水系数×污水中污染物平均含量

生活垃圾排放量=农村人口总数×人均垃圾产生系数×垃圾渗滤液中污染物平均含量

地表径流排放量=水土流失面积×平均侵蚀模数×0.046×土壤中污染物背景值

等标排放量=实物排放量/相应的排放浓度标准

等标排放系数(国土基)=等标排放量/国土面积

水质浓度=污染物实物排放量/地表水资源量

水质指数=污染物排放浓度/相应的Ⅲ类标准值(GB 3838—2002)

1.2 农业面源污染影响因子库的建立

采用专家咨询法,从影响农业生产、农村生活等的自然、经济、资源、生态、环境等层面确定了 17 个影响因子,即国土面积、耕地面积、坡耕地比例、水土流失比例、土壤侵蚀模数、农业总人口、农民人均收入、农业总产值、畜牧业产值、畜禽粪便承载系数(畜禽粪便承载系数为实际供应消纳地面积与需要消纳面积的比值,其中需要消纳的面积按 15 个猪当量·hm⁻² 计算)、化肥使用水平、秸秆利用率、沼气利用率、复种指数、人均生态赤字、有效灌溉比例、森林覆盖率。

1.3 统计分析

多重共线性分析用来分析影响因子自身的相关

性,以剔除某些相关程度较高的自变量;

典型相关分析用来分析响应变量组与影响变量组之间的集中相关程度;

偏回归分析用来建立响应指标对影响因子的多元线性回归方程,确定因子的作用方向与预测模型;

标准回归分析用来建立响应指标对影响因子的标准回归方程,确定因子的作用大小;

通径分析用来分解响应指标对影响因子的相关系数,确定因子的作用方式;

对应分析用来确定污染源与污染物的对应关系;

聚类分析用来划分农业面源污染的空间异质性^[24]。

以上所有分析采用 SPSS11.5、DPS 等统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 影响因子的筛选

由于影响因子之间存在错综复杂的相互关系,因此有必要首先剔除存在共线性的因子。在此采用条件值法,对 17 个影响因子进行筛选。即首先建立 17 个自变量因子的相关系数矩阵,然后利用 Jacobi 迭代法计算该矩阵的特征根和特征向量,在此基础上计算条件值 k (最大特征根与最小特征根之比),根据 k 值判断变量之间多重共线性的严重程度。其判断规则为:

$$\begin{cases} k \leq 100, & \text{变量之间没有共线性} \\ 100 < k \leq 1\,000, & \text{变量之间有较强的共线性} \\ k > 1\,000, & \text{变量之间有严重的共线性} \end{cases}$$

当因子之间存在共线性关系时,则剔除最小特征根所对应的特征向量中系数绝对值最大的变量,然后重复上述步骤,直至变量之间不存在共线性关系。

依照上述方法,通过 3 次迭代,便剔除了畜牧业产值、复种指数 2 个影响因素。以下统计分析均按保留的 15 个影响因素进行,它们是国土面积(x_1)、耕地面积(x_2)、坡耕地比例(x_3)、水土流失比例(x_4)、土壤侵蚀模数(x_5)、农业总人口(x_6)、农民人均收入(x_7)、农业总产值(x_8)、畜禽粪便承载系数(x_9)、化肥使用水平(x_{10})、秸秆利用率(x_{11})、沼气利用率(x_{12})、人均生态赤字(x_{13})、有效灌溉比例(x_{14})、森林覆盖率(x_{15})。

2.2 典型相关分析

以 COD、BOD₅、TN、TP 的实物排放量为一组变量(分别记为 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{13} 、 y_{14}),上述 15 个因子为另一组变量,进行典型相关分析,发现这 2 组变量的第 1 对典型相关变量达到极显著水平($P=0.000\,1$),其相关系数为 0.980,其变量组成为:

$$\begin{cases} u_{11}=0.923y_{11}-0.352y_{12}+0.088y_{13}-0.127y_{14} \\ v_{11}=0.795x_1+0.162x_2-0.017x_3+0.026x_4+0.186x_5 \\ \quad +0.299x_6-0.230x_7+0.278x_8-0.153x_9+0.074x_{10} \\ \quad -0.061x_{11}+0.084x_{12}-0.197x_{13}-0.001x_{14}-0.196x_{15} \end{cases}$$

从中可以发现实物排放量中的主要因子是 COD, 其次是 BOD₅; 影响因子中的主要因子是国土面积, 其次是农业总人口、农民人均收入、农业总产值。说明国土面积主要影响 COD 和 BOD₅ 排放。

同理, 以 COD、BOD₅、TN、TP 的排放浓度为—组变量(分别记为 y_{21} 、 y_{22} 、 y_{23} 、 y_{24}), 仍以 15 个因子为另一组变量, 进行典型相关分析, 发现它们之间的第 1 对典型相关变量也达到极显著水平 ($P=0.000\ 5$), 其相关系数为 0.895, 其变量组成为:

$$\begin{cases} u_{21}=-0.608y_{21}+0.733y_{22}+0.301y_{23}+0.050\ 7y_{24} \\ v_{21}=-0.532x_1+0.163x_2+0.187x_3-0.088x_4-0.373x_5 \\ \quad -0.043x_6+0.291x_7+0.343x_8-0.449x_9+0.040x_{10} \\ \quad +0.092x_{11}-0.027x_{12}+0.258x_{13}-0.096x_{14}-0.124x_{15} \end{cases}$$

可以发现水质浓度中的主要因子是 BOD₅, 其次是 COD; 影响因子中的主要因子仍是国土面积, 其次是畜禽粪便承载系数、土壤侵蚀模数和农业总产值。说明国土面积也是 BOD₅、COD 排放浓度的主要影响因子。

2.3 影响因子作用的方向

为了分析农业面源污染影响因子的作用大小与作用方向, 建立预测模型, 在此以实物排放量、水质浓度、等标排放量、等标排放系数、水质指数等为因变量, 筛选出的 15 个影响因子为自变量, 进行多元线性的逐步回归分析, 得到的回归模型参数(偏回归系数、决定系数)见表 1。经过显著性检验, 各个回归方程均达到了显著性水平 ($P<0.05$)。由表 1 可知, 影响因变量的自变量因子不尽相同, 但实物排放量、水质浓度、等标排放量、等标排放系数、水质指数都与水土流失比例、农业总人口、化肥使用水平、秸秆利用率、有效灌溉比例 5 个因子关系不大, 而与畜禽粪便承载系数关系都非常密切。

COD、BOD₅ 的实物排放量均受到国土面积、耕地面积、坡耕地比例、农业总产值等因子的促进影响, 而受到畜禽粪便承载系数、森林覆盖率的抑制影响; TN 受到国土面积、土壤侵蚀模数、农业总产值、人均生态赤字的促进影响, 而受到畜禽粪便承载系数的抑制影响; TP 受到坡耕地比例、农业总产值、人均生态赤字的促进影响, 而受到畜禽粪便承载系数、沼气利用率的抑制影响。

表 1 多元线性回归模型参数

Table 1 The parameter of multianalysis linear regression model

影响因素	实物排放量/t·a ⁻¹				等标排放系数	水质指数
	COD	BOD ₅	TN	TP		
国土面积	3.219	0.854	0.547		-0.000	-0.001
耕地面积	0.068	0.051			0.000	0.000
坡耕地比例	48.530	39.677		7.358		
土壤侵蚀模数			0.509		-0.001	-0.000
农民人均收入				-0.130	0.001	0.001
农业总产值	0.035	0.021	0.010	0.003		
畜禽粪便承载系数	-180.999	-123.913	-36.017	-9.474	-0.098	-0.076
沼气利用率				-12.528		
人均生态赤字			0.136	0.033	0.000	0.000
森林覆盖率	-93.281	-41.951				
常数项	6 404.760	3 863.914	-462.221	793.931	4.793	1.582
决定系数	0.945	0.913	0.843	0.825	0.680	0.872

作为农业面源污染“压力”态势的等标排放系数与作为“响应”态势的水质指数均受到耕地面积、农民人均收入、人均生态赤字等因子的促进影响, 均受到国土面积、土壤侵蚀模数、畜禽粪便承载系数的抑制影响。由于国土面积、耕地面积、土壤侵蚀模数在短时期内不会改变, 因此要减少农业的面源污染的排放与危害, 就必须降低农民人均收入(减少人类干扰强度)、人均生态赤字(提高绿色覆盖率)、增加畜禽粪便承载系数(减少载畜量)等。

2.4 影响因子作用的大小

为了进一步定量表达各种影响因子的作用大小(即对面源污染的贡献率), 对上述偏回归方程进行标准化的基础上, 计算了各种因子对农业面源污染的贡献率(表 2)。影响 COD 排放的主要因子是国土面积, 其次是农业总产值; 影响 BOD₅ 排放的主要因子是农业总产值, 其次是耕地面积; 影响 TN 排放的主要因子是农业总产值, 其次是人均生态赤字、国土面积和土壤侵蚀模数; 影响 TP 排放的主要因子是农业总产值, 其次是人均生态赤字。

影响农业面源污染“压力”态势的主要因子是畜禽粪便承载系数、农民人均收入和耕地面积, 其贡献率分别为 21.29%、19.38%和 19.33%。影响农业面源污染“响应”态势的主要因子是农民人均收入、国土面积和畜禽粪便承载系数, 其贡献率分别为 25.81%、17.56%和 16.81%。两者综合来看, 主要因子可以确定为畜禽粪便承载系数、农民人均收入和耕地面积, 实际上这 3 个因子分别代表养殖业污染源、生活污染源

表 2 农业面源污染影响因子的贡献率

Table 2 The contribution coefficient of factors affecting NPSP

影响因素	实物排放量/t·a ⁻¹				等标排放系数	水质指数
	COD	BOD ₅	TN	TP		
国土面积	32.83	16.58	20.54		12.30	17.56
耕地面积	15.28	22.06			19.33	15.65
坡耕地比例	4.20	6.54		9.91		
土壤侵蚀模数			19.55		15.25	12.14
农民人均收入				13.25	19.38	25.81
农业总产值	25.82	29.32	27.29	31.84		
畜禽粪便承载系数	15.11	19.70	11.07	12.31	21.29	16.81
沼气利用率				10.67		
人均生态赤字			21.56	22.02	12.45	12.03
森林覆盖率	6.77	5.80				

和种植业污染源。

2.5 影响因子作用的方式

为了进一步判断主导因子的作用方式,对等标排放系数和水质指数进行了通径分析。对于等标排放系数,其国土面积(x_1)、耕地面积(x_2)、土壤侵蚀模数(x_5)、农民人均收入(x_7)、畜禽粪便承载系数(x_9)、人均生态赤字(x_{13})6个因子的直接通径系数分别为-0.271、0.423、-0.334、0.425、-0.466和0.273,而对于水质指数,它们分别变为-0.355、0.317、-0.246、0.522、-0.340和0.243。由此计算出等标排放系数与水质指数的通径贡献系数矩阵分别为:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 23.74 & 18.15 & 17.79 & 25.28 & 9.08 & 5.96 \\ 14.62 & 46.60 & 7.47 & 16.98 & 2.84 & 11.50 \\ 14.43 & 7.52 & 29.19 & 24.24 & 19.47 & 5.15 \\ 14.90 & 12.42 & 17.61 & 34.27 & 18.27 & 2.54 \\ 6.56 & 2.55 & 17.35 & 22.41 & 50.75 & 0.38 \\ 10.75 & 25.76 & 11.46 & 7.76 & 0.96 & 43.31 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 28.08 & 12.28 & 13.81 & 32.82 & 9.06 & 3.95 \\ 20.68 & 37.59 & 5.92 & 22.51 & 2.23 & 11.06 \\ 22.59 & 5.75 & 21.96 & 30.49 & 14.52 & 4.70 \\ 22.19 & 9.04 & 12.61 & 41.00 & 12.96 & 2.20 \\ 14.08 & 2.06 & 13.78 & 29.76 & 39.95 & 0.37 \\ 13.14 & 21.85 & 9.56 & 10.82 & 0.79 & 43.83 \end{pmatrix}$$

由前面分析可知,主导因子可以确定为畜禽粪便承载系数、农民人均收入和耕地面积。在影响等标排放系数的主导因子中,作用方式都是直接作用为主,其直接贡献率分别占该因子总贡献率的50.75%、34.27%和46.60%;在影响水质指数的主导因子中,作用方式也是直接作用为主,其直接贡献率分别占该因子总贡献率的39.95%、41.00%和37.59%。

2.6 污染物和污染源的对应关系

在确定等标排放量的基础上,分别计算8个污染

源、4个污染物的等标污染负荷比及其累计等标负荷比。根据“80%”原则,重庆市2006年农业面源污染的主要污染物是TP、TN,其等标污染负荷比分别为38.20%、37.58%,主要污染源是畜禽养殖和化肥施用,其等标污染负荷比分别为57.29%和26.98%。为了进一步确定这个结论,对污染源和污染物的实物排放量(表3)进行了对应分析。发现主要污染源畜禽养殖提供COD,而TN、TP主要由其他污染源提供(图1)。

表 3 污染源和污染物的实物排放量

Table 3 The discharge amount of pollution source and pollutants

污染源	污染物负荷/t·a ⁻¹			
	COD(A)	BOD ₅ (B)	TN(C)	TP(D)
化肥污染	0	0	54 645	12 518
有机肥污染	89 247	44 623	3 479	939
秸秆污染	38 747	19 373	729	96
径流污染	127 399	16 987	849	170
畜禽污染	274 438	187 605	93 844	18 242
水产污染	638	13	0	0
污水污染	55 127	26 054	8 314	846
垃圾污染	15 695	1 570	314	63
合计	601 291	296 225	162 174	32 874

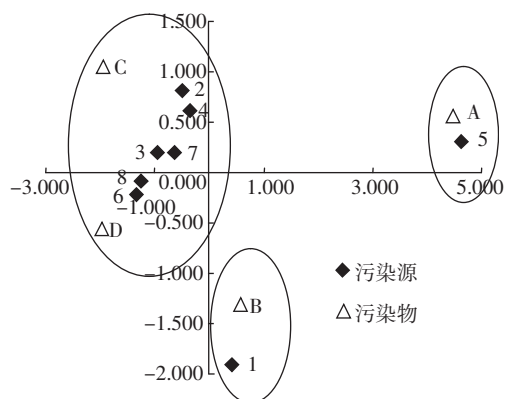


图 1 污染源与污染物的对应分析

Figure 1 Corresponding analysis of pollution source & pollutants

2.7 农业面源污染防治类型的划分

为了表示不同防治类型的农业面源污染,在此以作为“压力”态势的等标排放系数与作为“响应”态势的水质指数为指标,对全市39个区县进行离差平方和聚类分析,发现重庆市农业面源污染可以分为4类(图2、表4),I类为压力大、响应大型,包括沙坪坝区、合川区、永川区、荣昌县、铜梁县5个区县,其国土面积排放的等标污染量很大,水质污染非常严重,主要分布在1h经济圈,农业面源污染的“防”和“治”任

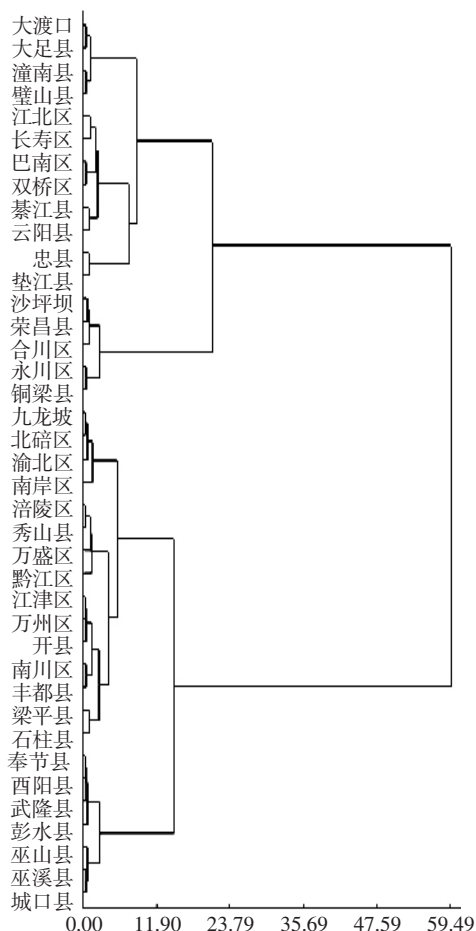


图 2 农业面源污染的聚类分析

Figure 2 Clustering analysis of NPSP

务很重。Ⅱ类为压力大、响应小型,包括九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、万盛区、江津区、涪陵区、南川区、万州区、开县、丰都县、梁平县、黔江区、秀山县、石柱县 15 个区县,其中 1 h 经济圈、东北翼、东南翼各有 8、4、3 个区县,农业面源污染的控制主要在“防”污染源。Ⅲ类为压力小、响应大型,包括大渡口区、江北区、巴南区、双桥区、长寿区、綦江县、潼南县、大足县、璧山县、忠县、云阳县、垫江县 12 个区县,其中 1 h 经济圈有 9 个,东北翼有 3 个区县,该类型水质污染比较严重,需要花大力气修复被污染的水体。Ⅳ类为压力小、响应小

型,包括奉节县、巫山县、巫溪县、城口县、武隆县、酉阳县、彭水县 7 个区县,均分布在两翼地区,其农业面源污染的防治任务相对较轻。

3 结论

重庆市农业面源污染的主要影响因子是代表畜牧业的粪便承载系数、代表种植业的耕地面积和代表农民生活的人均收入,其中粪便承载系数明显抑制面源污染,而耕地面积和人均收入则促进面源污染的加重,它们都是以直接作用的形式影响到农业面源污染。

重庆市农业面源污染的主要污染物是 TP、TN,主要污染源是畜禽养殖和化肥施用。其中污染物 COD 由畜禽养殖提供,而 TN、TP 则由其他污染源提供。

重庆市农业面源污染可以分为压力-响应较大型、压力大而响应小型、压力小而响应大型和压力-响应较小型 4 种,可以分类指导农业面源污染的防治实践。

参考文献:

- [1] Hassen M, Fekadu Y, Gete Ze. Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, South Wollo[J]. *Ethiopia International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 6:97-109.
- [2] Nigussie H, Fekadu Y. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 99:201-212.
- [3] 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 nonpoint source pollution[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(4):384-386.
- [4] 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]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(9):1184-1187.

表 4 重庆市农业面源污染的 4 种类型

Table 4 Four types of NPSP in Chongqing

类型	特点	等标排放系数/ $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	水质指数	区县单元数/个			
				1 h 经济圈	东北翼	东南翼	合计
I 类	压力大、响应大	9.88	8.23	5	0	0	5
Ⅱ类	压力大、响应小	4.84	2.75	8	4	3	15
Ⅲ类	压力小、响应大	7.06	5.15	9	3	0	12
Ⅳ类	压力小、响应小	3.09	1.13	0	4	3	7

- [5] 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 nonpoint source load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):397-400.
- [6] 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:浙江大学硕士学位论文, 2001.
- QIAN Xiu-hong. Evaluating and controlling countermeasures of agricultural non-point source pollution in the plain of Hang-jia Lake[D]. Hangzhou: Dissertation for Master's degree of Zhejiang University, 2001.
- [7] 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 1: 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.
- [8] 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(2):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(2):857-862.
- [9] 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:重庆大学硕士学位论文, 2006.
- CAO Yan-long. Analysis and numerical simulation of non-point source pollution in Chongqing Three Gorges Reservoir Region[D]. Chongqing: Dissertation for Master's Degree of Chongqing University, 2006.
- [10] 王莉玮. 重庆市农业面源污染的区域分异与控制[D]. 重庆:西南大学硕士学位论文, 2005.
- WANG Li-wei. Area distinguishing and controlling of non-point source pollution in Chongqing[D]. Chongqing: Dissertation for Master's Degree of Southwest University, 2005.
- [11] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 基于“压力-响应”的重庆市农业面源污染的源解析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8):2362-2369.
- CHEN Yu-cheng, YANG Zhi-min, CHEN Qing-hua, et al. Source apportionment of agricultural non-point source pollution in Chongqing based on pressure-response system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8):2362-2369.
- [12] 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.
- [13] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥养分数据集[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1999.
- Center of Agricultural Technology Extending and Servicing. Data collection of organic fertilizer nutrition in China[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1999.
- [14] 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[C]. 首届全国农业面源污染与综合防治学术研讨会论文集, 2004.
- LI Mao-song, WANG Ya-feng. The trends and actuality of the main crops straw resources in China in the new 20 years[C]//Collection of the Academic Seminar Theses on Agricultural Non-point Source Pollution and Integrated Prevention and Cure, 2004.
- [15] 国家环保总局. 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.
- Ministry of Environmental Protection of China. Investigation and prevention strategies of the pollution from large-scale domestic breeding in China[M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002:77-78.
- [16] 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):94-97.
- HUANG Huan, WANG Xiao-quan, WEI Xiao-hang, et al. A research on the quantity of discharged pollutant of freshwater breed aquatics in Hangjiahu area[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(2):94-97.
- [17] 张晟, 陈玉成, 杨志敏, 等. 环境试验优化设计与分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2008:112-118.
- ZHANG Sheng, CHEN Yu-cheng, YANG Zhi-min, et al. Optimized design and analysis of environmental experiments[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:112-118.