

南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析

姜世英^{1,2}, 韩 鹏¹, 贾振邦³, 毛小玲¹, 司 今¹, 叶芳芳¹

(1.北京大学环境工程系, 北京 100871; 2.北京盖雅技术中心有限公司, 北京 100080; 3.北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要:丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,其水体污染状况将直接影响调水水质,农业面源污染作为水源区主要污染之一,对其进行防治是调水安全的重要保障。采用等标污染负荷法在压力-状态-响应(PSR)概念模型下对水源区五市县禽畜养殖、土壤侵蚀、化肥流失、人粪尿、农村生活污水、水产养殖、生活垃圾进行了面污染源评价,并分析了其空间分布特征及重点区域污染特点。结果表明,水源区主要农业面污染源是畜禽养殖、土壤侵蚀和化肥流失;面源污染区域为淅川县>郧县>丹江口市>郧西县>西峡县;GIS 空间分析能直观有效地反映各地区的污染情况,为有针对性地对污染治理提供依据。

关键词:南水北调;丹江口库区;面源污染;污染源评价;GIS 空间分析

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2153-10

Evaluation with PSR Model and GIS Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution in Danjiangkou Reservoir of the Mid-Route of the South-to-North Water Transfer Project

JIANG Shi-ying^{1,2}, HAN Peng¹, JIA Zhen-bang³, MAO Xiao-ling¹, SI Jin¹, YE Fang-fang¹

(1.Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2.Beijing Gaia Technology Center Co., Ltd. Beijing 100080, China; 3.Department of Urban & Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Danjiangkou Reservoir is the water source area of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project. Thus the water pollution there will directly affect the water quality of the Water Transferred. And Agricultural Non-point Source Pollution (ANPS) had found to be one of major pollute source in the reservoir area, controlling this kind of pollution, therefore is of great importance for ensuring the successful water diversion. Based on the conceptual Model of Pressure-State-Response (PSR), the ANPS including pollutions by poultry and livestock breeding, soil erosion, chemical fertilizers loss, human excrements, domestic waste, straw wastes, aquaculture and rural domestic sewage was evaluated using Equivalent Pollution Loading Method with the data covering five counties in water source area in 2007. Spatial distribution characteristics and pollution characteristics of key regions was identified. The results showed that the primary pollution sources were poultry and livestock breeding, soil erosion and chemical fertilizers loss. According to PSR Model, Xichuan County, Yun County, Danjiangkou City, Yunxi County and Xixia County were suffered non-point pollution in a descending order. Through GIS mapping, the spatial distribution of ANPS in these counties were illustrated which would be conducive to constituting pertinent pollution control measures.

Keywords: the South-to-North Water Diversion; Danjiangkou Reservoir; non-point source pollution; pollution source evaluation; GIS spatial analysis

南水北调工程是我国一项重大战略性基础工程。国务院 2006 年 2 月批准的《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划(2004—2010)》的规划目标是丹江口水库的水质长期稳定达到国家地表水环境质

量标准(GB3838—2002)Ⅱ类要求。多年水质监测资料表明:丹江口水库总氮浓度指标在 1.2~1.6 mg·L⁻¹ 之间,低于地表水Ⅱ类标准,只达到Ⅳ类标准;总磷在 0.01~0.03 mg·L⁻¹ 之间^[1-2],低于或接近Ⅱ类水质标准,严重影响南水北调水质安全。水源区面源污染在点源污染得到有效控制之后,其危害日益显露,目前已成为影响库区水质的主要原因之一。据文献资料报道,面源污染对多数湖库的贡献率已超过 50%^[3-6]。因此,

收稿日期:2010-03-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2007CB714105)

作者简介:姜世英(1982—),女,硕士,辽宁大连人,主要从事环境科学研究、环境咨询。E-mail:jiangshiyi1982@163.com

通讯作者:韩 鹏 E-mail:hanpeng@iee.pku.edu.cn

正确认识丹江口库区水源区面源污染特征与存在的问题,对控制整个库区水污染举足轻重。

面源污染具有形成过程随机性大、影响因子多、分布范围广、潜伏周期长、危害大等特点,且具有潜在性、复杂性和隐蔽性,因此,面源污染研究和评价具有较大的难度^[7]。本文以南水北调中线水源区五市县为研究对象,采用等标污染负荷法,在乡镇尺度上,核算了水源区面源污染中各种污染源、各种污染物负荷,探讨了“压力-状态-响应”(PRS)态势下的市县污染差异,并利用 GIS 探讨了水源区面源污染空间分布,为控制水源区面源污染提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

南水北调中线水源区五市县包括:河南省的西峡县、淅川县,湖北省的丹江口市、郧县、郧西县,如图 1 所示。根据《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划》,五市县同时属于水源地安全保障区、丹江口库区周边水土流失严重的市县和重点治理区。

1.2 数据收集

以乡镇为尺度,以 2007 年为基准年,分类收集各项农事活动与人居活动涉及到的原始数据。数据来源于污染源普查、文献资料和实地调研,具体包括:全国第一次污染源普查数据(十堰市、南阳市)、《2008 十

堰统计年鉴》、《2008 南阳统计年鉴》、《2008 湖北农村统计年鉴》、《2008 河南农村统计年鉴》以及实地调研、问卷调查和各相关部门统计数据资料,同时收集用于负荷核算的必需参数。

1.3 排放负荷核算

《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划》对 2000 年库区各控制单元点源、面源污染物入河进行分析,指出:丹江口水库可能接纳的年污染负荷现状最大值为 COD 11.34 万 t,氨氮 0.88 万 t,其中面源 COD 入河约占 25%,面源氨氮入河约占 50%,表明控制丹江口水库的氮指标重点在于农村面源。

采用清单分析法,核算禽畜养殖、土壤侵蚀、化肥流失、人粪尿、农村生活污水、水产养殖、生活垃圾 7 个面源污染来源的 TN、TP 的排放负荷^[9]。主要核算指标有实物排放量、等标排放量、排放强度(以国土面积、人口数量为基数)、水质浓度和水质指数。

对于丹江口库区而言,没有直接可供使用的当地污染物排放系数,主要依赖于类比分析法,对库区面源进行分析,各污染物污染参数汇集表 1。

化肥污染物排放量来源于污染普查数据。

水产养殖污染物排放量来源于污染普查数据。

$$\text{畜禽污染物排放量 } Q_{\text{畜禽}} = \sum_{i=1}^n W_i \times M_i \times C_i \times K_{\text{畜禽}}$$

式中: $Q_{\text{畜禽}}$ 为畜禽污染物排放量; W_i 为某畜禽养殖



图 1 南水北调中线水源区重点研究区域图

Figure 1 Key study areas in Waterhead Area of the Mid-Route of the South-to-North Water

量; $M_{i\text{ 畜禽}}$ 为某畜禽粪便排泄系数; $C_{i\text{ 畜禽}}$ 为某畜禽粪便中污染物平均含量; $K_{\text{畜禽}}$ 为畜禽粪便污染物入河系数。

生活污水污染物排放量 $Q_{\text{生活污水}}=N\times C_{i\text{ 生活污水}}\times K_{\text{生活污水}}$

生活垃圾污染物排放量 $Q_{\text{生活垃圾}}=N\times C_{\text{生活垃圾}}\times M_{i\text{生活垃圾}}\times K_{\text{生活垃圾}}$

人粪尿污染物排放量 $Q_{\text{人粪尿}}=N\times C_{i\text{ 人粪尿}}\times K_{\text{人粪尿}}$
式中: N 为农村人口数量; $C_{i\text{ 生活污水}}$ 为生活污水中某污染物人均排放量; $K_{\text{生活污水}}$ 为生活污水入河系数; $C_{\text{生活垃圾}}$ 为人均垃圾产生量; $M_{i\text{ 生活垃圾}}$ 为垃圾中某污染物所占百分比; $K_{\text{生活垃圾}}$ 为生活垃圾入河系数; $C_{i\text{ 人粪尿}}$ 为人粪尿中某污染物人均排放量; $K_{\text{人粪尿}}$ 为人粪尿入河系数。

土壤侵蚀养分流失量^[10] $N=0.001\times C\times Er\times A\times SDR$
式中: N 为侵蚀土壤携带养分含量, $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;0.001为单位转换系数; C 为表层土壤养分平均含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; Er 为泥沙对表土的养分富集度; A 为坡面土壤侵蚀量, $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; SDR 为泥沙输移比。

1.3.1 面源污染等标排放量的核算

按照规划要求丹江口水库水质不低于地表水环境质量标准(GB3838—2002)Ⅱ类水质标准,直接汇入丹江口水库的各主要支流达到不低于Ⅲ类标准,即TN为 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,计算各项活动中TN、TP的等标污染负荷。

$$P_i=\frac{Q_i}{C_{\alpha i}}$$

式中, P_i 为第*i*种污染物的等标污染负荷; Q_i 为第*i*种污染物的排放量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; $C_{\alpha i}$ 为第*i*种污染物的环境质量标准限值, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3.2 其他指标的核算

地均污染物排放量 $\bar{Q}_{ij\text{ 地}}=\frac{Q_{ij}}{S_j}\times 10^3$

人均污染物排放量 $\bar{Q}_{ij\text{ 人}}=\frac{Q_{ij}}{N_j}\times 10^4$

水质浓度 $C_{ij}=\frac{Q_{ij}}{R_j}\times 10^{-2}$

水质指数 $W_{ij}=\frac{C_{ij}}{C_{\alpha i}}$

式中: $\bar{Q}_{ij\text{ 地}}$ 为第*j*个市县的第*i*个污染物地均排放量, $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$; Q_{ij} 为第*j*个市县的第*i*个污染物排放量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$;

表 1 各污染物污染参数表
Table 1 Parameter list of various pollutants

污染源	污染物	编号	影响参数	TN	TP
养殖业	畜禽养殖	1	畜禽粪尿年排污系数/ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$ (只 ⁻¹) ^[11-14]	猪粪	2.34
				猪尿	1.36
				牛粪	0.34
				牛尿	8.61
				羊粪	1.46
				家禽	0.45
			畜禽粪尿进入水体率/% ^[11-14]	牛粪	0.275
				牛尿	0.115
				猪粪	1.085
				猪尿	0.17
				羊粪	25
				家禽粪	5.68
					5.5
生活废弃物	生活污水	3	农村生活污水污染物含量/ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{人}^{-1}$ ^[13-16]	85	0.146
			农村生活污水进入水体系数/% ^[14-15,17]	0.27	
			水源区调查得生活垃圾人均产生量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	0.21	0.22
	生活垃圾	4	排放系数/% ^[16,18]	7	
			生活垃圾入河系数/% ^[16,18]	3.06	0.524
	人粪尿	5	人均粪尿含氮磷量/ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[13-16]	10	
			人类尿入河系数/% ^[15-16]		
水土流失	土壤侵蚀	6	根据土种志计算得表层土养分含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.0	0.4
			泥沙对表土的养分富集度 Er ^[10]	1.72	1.46
			泥沙输移比 SDR ^[10,19,22]		0.046

S_j 为第 j 个市县的面积, km^2 ; $\bar{Q}_{ij}$ 为人均污染物排放量, $\text{t} \cdot \text{万人}^{-1}$; N_j 为第 j 个市县的农村人口数量, 人; C_{ij} 为第 j 个市县的第 i 个污染物水质浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; R_j 为第 j 个市县的的地表水资源量, 亿 m^3 ; W_{ij} 为第 j 个市县的第 i 个污染物的水质指数; C_{0i} 为第 i 个污染物的水质标准, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (GB3838—2002 III 类标准)。

1.4 Natural Breaks(Jenks)分析方法

以美国环境系统研究所 (environment system research institute, ESRI) 研制的 arcGIS9.2 为空间特征数据管理与分析平台。

研究中, 污染物排放量空间分布梯度的划分采用自然分等法 Natural Breaks(Jenks)分为 4 级。Natural Breaks(Jenks)方法基于数据内部的内在联系进行自然分组, 旨在最大化组间差距并最优化组内相似值, 污染物排放量空间分布梯度的分组点选取在数据变量值出现相对最大变化处。

2 结果与分析

2.1 主要农业面源污染源的确定

在确定等标排放量的基础上, 分别计算 7 个污染源、2 个污染物的等标污染负荷比及累计百分比, 将累计百分比大于 80% 的污染源列为主要污染源。

从污染物 TN、TP 在各污染源中的负荷比 (表 2) 可知, TN 污染的主要贡献源是畜禽养殖、化肥流失、土壤侵蚀; TP 污染的主要贡献源是畜禽养殖、土壤侵蚀、化肥流失。根据“80%”原则, 水源区 2007 年面源污染的主要污染源是畜禽养殖、土壤侵蚀和化肥流失, 其等标污染负荷比分别是 51.01%、20.65%和 12.96%。

2.2 基于 PSR 框架下的面源污染分析

PSR (Pressure-State-Response) 概念框架, 我们称之为“压力-状态-响应”, 为加拿大 IJC (International Joint Commission) 最先提出, 被广泛地使用在 Musko-

ka 流域的评价体系建立中。其中“压力”包括直接或间接的人类活动对环境的改变; “状态”主要指流域物理、化学和生物条件, 或自然系统的状态; “响应”包括政府行为或政策、部门、个人对环境改变的应对和治理^[20-21]。

根据 PSR 系统原理, 面源污染的压力指标为各种活动的污染物排放强度 (如人均污染物排放量、地均污染物排放量等), 反映的是潜在污染态势, 属于“源”; 状态指标为各种活动的污染物排放之后测算出来的水质浓度以及由此衍生的水质指数, 反映的是已经显露出来的污染态势, 属于“汇”; 响应指标为各部门应该采取的措施。所以污染区域的严重程度可以根据压力态势和状态态势两方面予以综合确定^[22]。

各污染物的排放标准与危害程度不一, 使得无法在同一尺度上对各种污染物的量进行比较, 为此在解析污染源时引入等标排放量 (表 3), 从中可以看出: TN 污染区域为淅川县>郧县>丹江口市>郧西县>西峡县; TP 污染区域为淅川县>郧县>郧西县>丹江口市>西峡县。

基于人口数量的污染物排放量 (表 4), 可以得出, 各区域 TN 人均排放强度为淅川县>丹江口市>西峡县>郧县>郧西县; TP 人均排放强度为丹江口市>淅川县>西峡县>郧西县>郧县。

基于国土面积的污染物排放量 (表 4) 可以得出, 单位国土面积的 TN 排放强度为淅川县>丹江口市>西峡县>郧县>郧西县; TP 排放强度为淅川县>西峡县>丹江口市>郧西县>郧县。

作为压力指标的状态, 水质浓度和水质指数实际上表征的是面源污染已经显露出来的污染态势, 水源区因面源污染排放的 TN、TP 的水质浓度分别是 4.29 、 $0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 两种污染物均超过地面水质量 III 类标准 (表 4)。TN、TP 水质指数均显示淅川县污染最严

表 2 农业面源污染等标污染负荷比

Table 2 Pollutant loading of ANPS in equivalent standard

污染源	序号	污染物实物排放量/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$		等标污染负荷/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$		等标污染负荷比/%			
		TN	TP	TN	TP	TN	TP	合计负荷比	累计负荷比
畜禽养殖	1	10 757	1 061	10 757	5 307	34.16	16.85	51.01	51.01
土壤侵蚀	2	2 368	827	2 368	4 135	7.52	13.13	20.65	71.66
化肥流失	3	2 886	239	2 886	1 197	9.16	3.80	12.96	84.63
人粪尿	4	1 140	285	1 140	1 425	3.62	4.52	8.14	92.77
生活污水	5	703	120	703	602	2.23	1.91	4.14	96.91
水产养殖	6	91	95	91	477	0.29	1.52	1.81	98.71
生活垃圾	7	207	40	207	198	0.66	0.63	1.29	100
合计		18 152	2 668	18 152	13 341	57.64	42.36	100	

表 3 农业面源污染等标排放量(负荷比)

Table 3 Discharge amount(or propitiation) of ANPS in equivalent standard

区域	污染物实物排放量/t·a ⁻¹		等标污染负荷/t·a ⁻¹		等标污染负荷比/%		合计负荷比
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	
淅川县	6 317	693	6 317	3 463	21.17	11.61	32.78
郧县	3 276	530	3 276	2 652	10.98	8.89	19.87
丹江口市	2 890	409	2 890	2 043	9.69	6.85	16.53
郧西县	2 556	463	2 556	2 313	8.57	7.75	16.32
西峡县	2 376	390	2 376	1 949	7.96	6.53	14.50
合计	17 415	2 484	17 415	12 419	58.37	41.63	100

表 4 水源区农业面源污染的 PSR 分析

Table 4 The PSR analysis of ANPS in waterhead area

区域	人均污染物排放量/t·万人 ⁻¹		地均污染物排放量/kg·km ⁻²		水质浓度/mg·L ⁻¹		水质指数		
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	平均指数
淅川县	100.13	54.88	2 361	1 294	7.91	0.87	7.91	4.33	6.12
郧县	60.49	48.97	872	706	4.83	0.78	4.83	3.91	4.37
丹江口市	84.68	59.85	1 025	724	3.82	0.54	3.82	2.70	3.26
郧西县	59.95	54.25	788	713	2.87	0.44	2.87	2.19	2.53
西峡县	66.76	54.77	1 012	830	2.54	0.49	2.54	2.47	2.50
合计均值	75.85	54.09	1 173	837	4.29	0.61	4.29	3.06	3.67

重,郧县、丹江口市次之。2007 年水源区 TN、TP 水质指数分别为 4.29、3.06,均已达到严重污染。水源区面源污染按 PSR 态势确定的污染程度是淅川县>郧县>丹江口市>郧西县>西峡县。

作为污染压力及状态的响应,各治理主体在已知污染“压力-状态”的情况下可以有针对性地对各污染区域进行治理。

2.3 水源区面源污染 GIS 空间特征

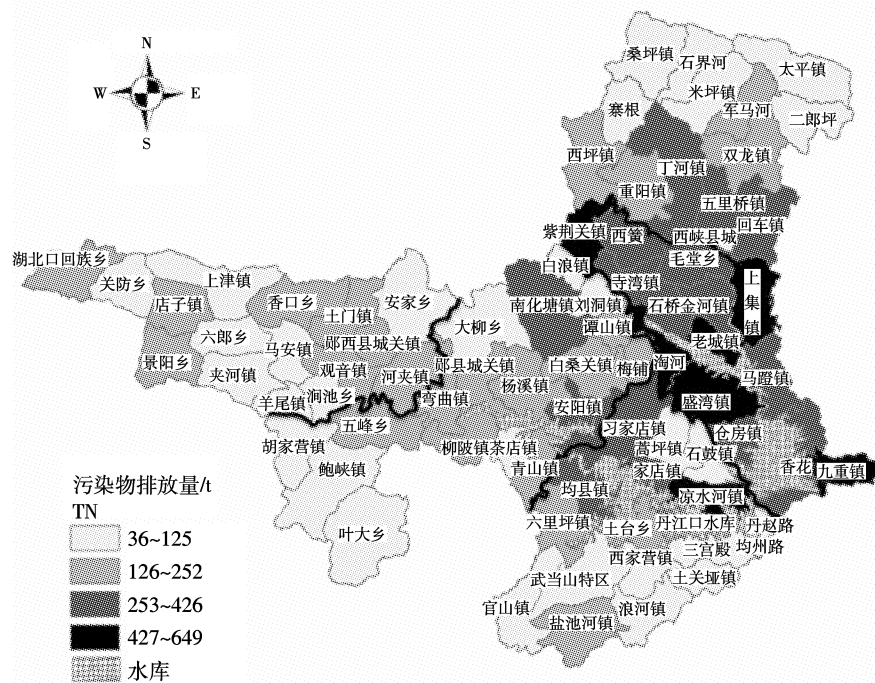
为了直观地反映水源区各市县的污染物排放情况,并为有针对性地进行治理提供依据,在 GIS 支持下(ESRI 2006),将水源区五市县行政区划图与污染物排放量、排放强度(不包括土壤侵蚀部分)进行关联。采用 Natural Breaks(Jenks)分类方法对水源区 80 个乡镇的计算结果进行分级,最后做出水源区面源污染水平分布图^[23-25],如图 2、图 3。

GIS 空间特征分析是 PSR 框架中“压力”和“状态”的表现形式,GIS 有效地将面源污染的强度及分布形式以聚类分析和分布图的方式表现出来,为各部门对农业面源污染的“响应”提供了直观的依据。

对重点研究五市县统计分析,可得到水源区各污染物的实物排放量、人均排放量、地均排放量及其统计频率分布,进行了 4 级分区,记为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。由图 2、图 3 可知,污染物排放量和排放强度分布均呈

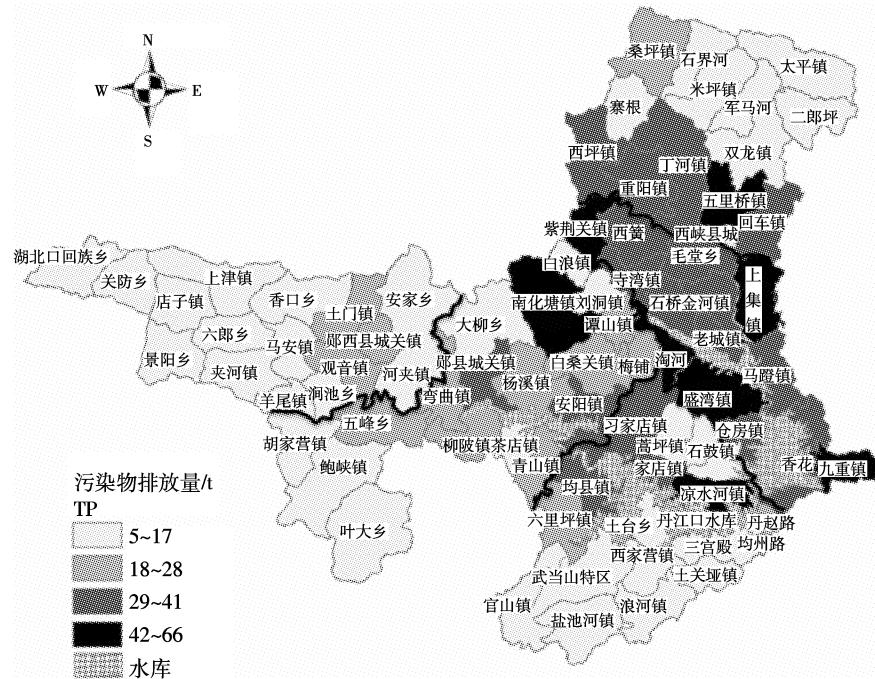
现较强的区域性。

农业面源污染排放量是各地农业生产规模和生产方式的直接反映。为进一步找出污染物产生的原因,以便有针对性的治理,对污染物的排放量进行了基于 GIS 的空间特征分析。污染物排放量的Ⅳ级区主要为种植业和养殖业发达的地区,包括淅川县的九重、盛湾、上集、荆紫关、滔河、老城,以畜禽养殖和种植业污染严重;丹江口市的凉水河镇,以畜禽养殖和水产养殖污染严重。Ⅲ、Ⅳ级区主要集中在紧邻水库的水量充沛地区,种植业、养殖业比较发达,Ⅲ类区包括郧县东部的南化塘镇和安阳镇,淅川县的香花、毛堂、西簧、金河、马蹬、大石桥、寺湾、仓房,丹江口市北部的习家店镇和均县镇,西峡县南部老灌河流域内的回村镇、五里桥镇和丁河镇。Ⅰ级区包括两类地区,一类是人均收入较低,农业产业化发展相对落后、规模养殖业不发达的郧西县西部和郧县西南部地区;一类是人均收入较高,农业产业化发展较好,生态农业、旅游业发达的地区,包括西峡县北部的太平镇、军马河、双龙镇等以及丹江口市南部的武当山特区、土关垭镇等。各地区的农业支柱产业由于侧重经济的快速发展,忽视了环境的保护,环境治理相对滞后,建议在发展经济的同时注重环境的保护,达到经济、环境双赢。污染物实物排放量的 GIS 空间特征分析直观地反映



(a) 污染物 TN 排放量

(a) The pollutant emission amount of TN



(b) 污染物 TP 排放量

(b) The pollutant emission amount of TP

图 2 2007 年农业面源污染物 TN 和 TP 排放量

Figure 2 The pollutant emission amount of TN and TP from ANPS in 2007

了各地区的污染情况,为有针对性的污染治理提供了依据。

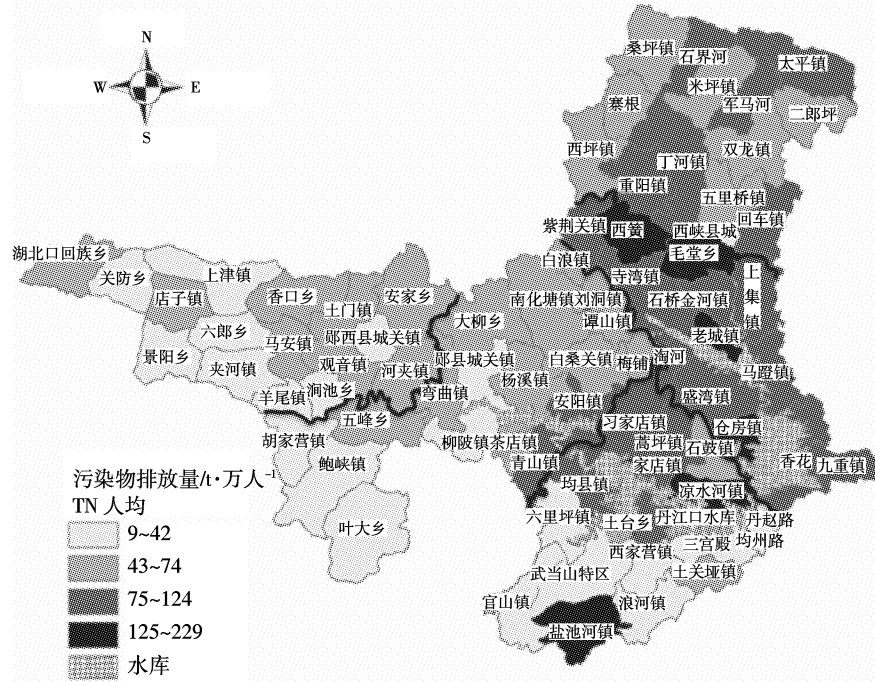
人均、地均污染物排放量是各地区污染排放强度

的具体表现,即 PSR 框架下的“压力”和“状态”,而这种“压力”和“状态”更能体现出人类活动对环境影响的大小。为深入探讨人类活动与面源污染之间的关

系,本文利用 GIS 对人均、地均污染物排放量进行了空间特征分析。得出结果与农业生产总值分布情况相似,表明高强度的农业生产导致了高强度的农业面源污染。面源污染的排放强度反映了一个区域的农业集约化程度和单位面积上的载畜量对环境的影响,其空

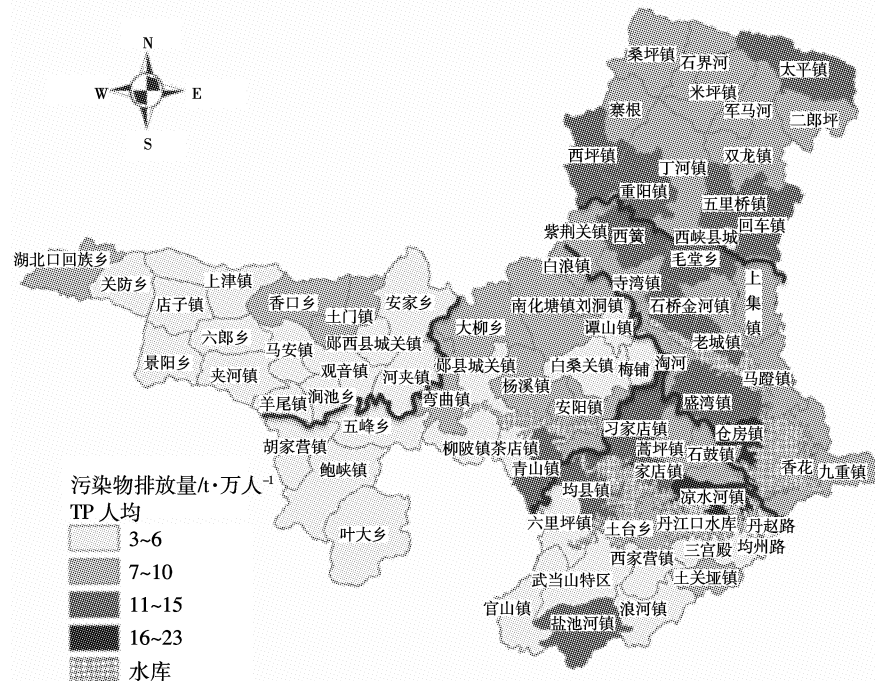
间特征与各地区总排放量存在较大差异。

淅川县、西峡县南部和西部地区、丹江口市和郧县邻近水库的区域属于高排放强度Ⅲ、Ⅳ级区,这部分地区人口密度较大,农民收入水平和农业集约化程度较高,单位国土面积上的污染产生量很大。郧西县



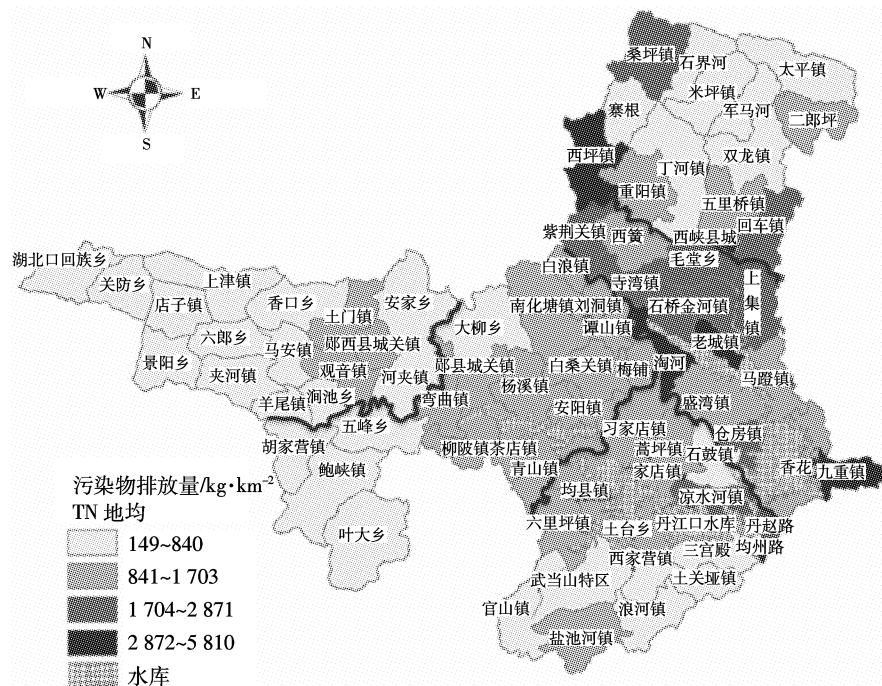
(a) 人均污染物 TN 排放量

(a) The per capita pollutant emission amount of TN



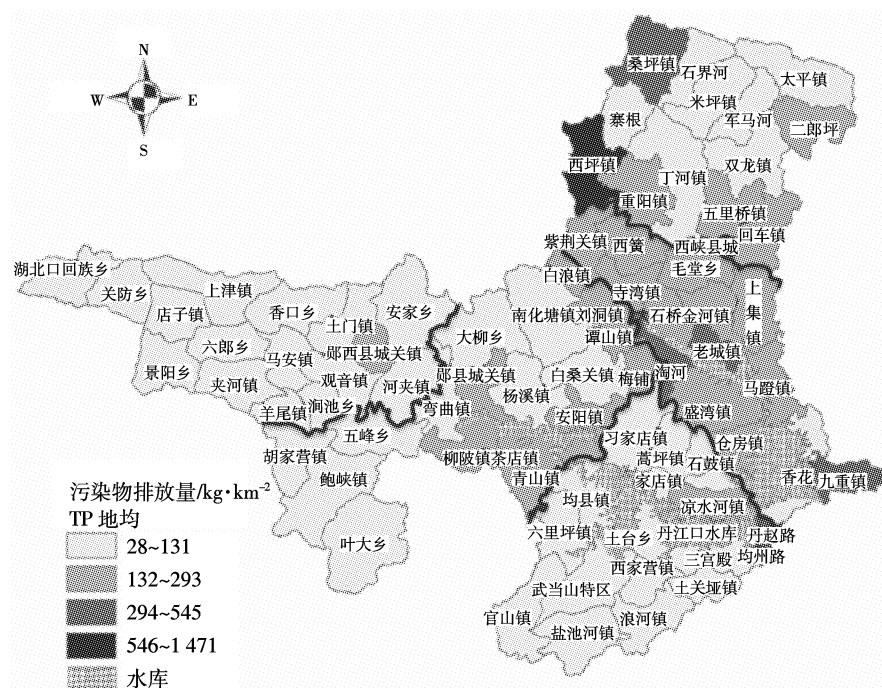
(b) 人均污染物 TP 排放量

(b) The per capita pollutant emission amount of TP



(c)地均污染物 TN 排放量

(c) The average land pollutant emission amount of TN



(d)地均污染物 TP 排放量

(d) The average land pollutant emission amount of TP

图 3 2007 年农业面源污染物 TN 和 TP 排放量和排放强度

Figure 3 The pollutant emission amount and intensity of TN and TP from ANPS in 2007

大部分地区、郧县西南部等地区属于污染排放量 I 级区,这些地区农业集约化程度低,养殖业以放养为主,

农业面源污染排放强度较小,但因水土流失较为严重,这些地区仍面临严峻的生态问题。西峡县东北部

和丹江口市除盐池河外的西南部地区属于污染物排放量Ⅰ、Ⅱ级区,这类地区农民收入水平较高,有机农业、生态农业、生态旅游业比较发达,农业产业化发展较好,面源污染相对较轻。针对人口密度大和单位农业集约化程度高的地区应加强环境保护基础设施的建设,加快生态农业、环境友好型农业的发展,减小环境压力。污染物人均、地均排放量的GIS空间特征分析有效地反映了各地区的污染强度,为污染治理工作提供参考。

3 讨论

水源区重点研究五市县农业面源污染的主要污染源为畜禽养殖、土壤侵蚀和化肥流失,该结果与三峡库区农业非点源污染研究结果大致吻合^[14],说明评价方法可行,同时也说明水源区农业面源污染属于农业生产型污染,即畜牧业生产与种植业生产。因此,农业面源污染防治的首要任务是提高粪便的资源化利用率,加大养殖污染的治理力度,按照土地消纳容量确定养殖容量;大力发展生态农业,推广测土配方施肥,与此同时做好水土保持工作,减少TN、TP等污染物对水质的影响。

根据面源污染的PSR评价确定了主要污染区域,并分析了污染的“源”与“汇”,从根本上分析了污染的途径。由各区域人均、地均污染物排放强度、各区域水质浓度、水质指数结果所确定的污染区域有所差异,说明防治农业面源污染,要预防污染的“压力”,以不同“状态”为指示,针对性地对污染做出“响应”,达到标本兼治的效果。

根据面源污染GIS空间特征分析,可以看出紧邻丹江口水库的淅川县、郧县和丹江口市为严重污染区域,它们有相同的问题又有各自的特点,污染严重的乡镇主要集中在这3个市县,但又不仅限于此,若要有效地治理水源区面源污染,必须因地制宜地针对污染特点采取相应的治理措施。

本文在核算分析水源区农业面源污染时,只考虑了禽畜养殖、土壤侵蚀、化肥流失、人粪尿、农村生活污水、水产养殖、生活垃圾7个面源污染来源,由于资料不足,作物秸秆、农药流失等没有包括在内,在以后的研究中应该考虑更加全面。本文大部分数据来源于污染源普查、统计年鉴、收集相关部门资料和实地抽样调研,今后应对有关计算所得的数据进行实际样品抽样验证,以及运用释放动力学来优化污染物的“入河系数”等。

4 结论

(1)2007年南水北调中线水源区五市县面源污染TN、TP的实物排放总量分别为1.82、0.27万 $t \cdot a^{-1}$,相应的等标排放量为1.822、1.33万 $t \cdot a^{-1}$ 。

(2)水源区主要面源污染为畜禽养殖、化肥流失、土壤侵蚀。等标污染负荷比分别是51.01%、20.65%和12.96%。

(3)污染物TN、TP的水质浓度分别为4.29、0.61 $mg \cdot L^{-1}$,均超过地面水环境质量Ⅲ类标准,TN、TP均已达到严重污染。

(4)水源区面源污染按PSR态势确定的污染程度是淅川县>郧县>丹江口市>郧西县>西峡县。

水源区农业面源污染高强度区主要集中在淅川县、西峡县南部和西部地区、丹江口市和郧县邻近水库的区域。这些地区农业集约化程度高,人地矛盾突出,需提高畜禽粪便、化肥等资源的处理和利用效率,对面源污染进行重点控制。

参考文献:

- [1] 赵文耀,胡家庆.丹江口水库流域面源污染现状分析[J].南水北调与水利科技,2007,5(2):50-52.
ZHAO Wen-yao, HU Jia-qing. Present status analysis to non-point source pollution in Danjiangkou Reservoir[J]. *South-to-North Water Transfers & Water Sci & Technol*, 2007, 5(2):50-52.
- [2] 陈静,丁卫东,焦飞,等.丹江口水库总氮含量较高的调查分析[J].中国环境监测,2005,21(3):54-57.
CHEN Jing, DING Wei-dong, JIAO Fei, et al. Analyse of high content of total-nitrogen in Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(3):54-57.
- [3] Isermann K. Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26(1-3):253-269.
- [4] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands, causes and remedies[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(4-5):183-189.
- [5] Ongley E D. Control of water pollution from agriculture [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.
- [6] LIU Zhen-ying, LI Ya-wei. Agricultural non-point source pollution in Wuliangshuai Valley[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2007, 1:41-44.
- [7] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ.中国农业面源污染控制中存在问题分析[J].中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
ZHANG Wei-li, XU Ai-guo, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies Ⅲ. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2004. 37

- (7):1026-1033.
- [8] Ming-Cheng Tsou, Chin-Hong Sun, Mining association pattern from spatial database[J]. *Journal of Taiwan Geographic Information Science*, 2005, (3):27-41.
- [9] 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.
- [10] 杨 磊. 基于 GIS 的丹江口库区黑庙沟流域养分流失量的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2007.
YANG Lei. Research of nutrient loss from Heimiao-gou Watershed in Danjiangkou Reservoir Area Based on GIS [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.
- [11] 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.
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.
- [12] 丁 伟, 额尔和花, 王天新. 宁夏黄灌区畜禽粪便排放量估算及对环境影响判断[J]. 宁夏农林科技, 2009, 2:54-56.
DING Wei, ER Erhehua, WANG Tian-xin. Estimation of the amount of livestock manure and its environmental influence of the Yellow River in Ningxia[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2009, 2:54-56.
- [13] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量[J]. 湖泊科学, 2006, 12(2):147-153.
LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi, et al. Pollutants sources and their discharging amount in Taihu Lake Area of Jiangsu Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 12(2):147-153.
- [14] 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.
CHEN Hong-bo. Assessment and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Three Gorges Reservoir Area[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2006.
- [15] 佟文会. 基于 AnnAGNPS 模型的丹江口库区黑庙沟流域非点源研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.
TONG Wen-hui. Research on non-point source pollution of heimiao-gou watershed in Danjiangkou Reservoir Area Based on annAGNPS Model[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [16] 黄东风, 李卫华, 等. 水口库区流域农业面源污染评价及其防治对策[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4):1031-1036.
HUANG Dong-feng, LI Wei-hua, et al. Evaluation of agricultural non-point source pollution and countermeasures in Shuikou Reservoir Drainage Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4):1031-1036.
- [17] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 1997.
Changjiang Water Resources Commission. The ecological environmental impact of the Three Gorges Project[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997.
- [18] 今春久, 李 环, 蔡 宇. 松花江流域面源污染调查方法初探[J]. 东北水利水电, 2004, 22(6):54-56.
JIN Chun-jiu, LI Huan, CAI Yu. Discussion on investigation method of surface source pollution in Songhuajiang River basin[J]. *Water Resource & Hydropower of Northeast*, 2004, 22(6):54-56.
- [19] 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.
LI Jie-xia, YANG Zhi-min, CHEN Qing-hua, et al. Spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, 30(7):145-151.
- [20] 唐 涛, 蔡庆华, 刘健康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9):1192-1194.
TANG Tao, CAI Qing-hua, LIU Jian-kang. River ecosystem health and its assessment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9):1192-1194.
- [21] 张 翔, 夏 军, 王富永. 基于压力-状态-响应概念框架的可持续水资源管理指标体系研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(5):23-25.
ZHANG Xiang, XIA Jun, WANG Fu-yong. Indicator system of sustainable management of water resources based on the conceptual frame of Pressure-State-Response[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1999, 12(5):23-25.
- [22] 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源解析[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8):2362-2369.
CHEN Yu-cheng, YANG Zhi-min, CHEN Qing-hua. Source apportionment of agricultural non-point source pollution in Chongqing Based on Pressure-Response System[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8):2362-2369.
- [23] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: W. H. Freeman & Co., 1982.
- [24] Applying R S. Technique to analyze the development trend of urban construction land in Beijing[J]. *City Planning Review*, 1986(2):9-14.
- [25] ZONG Yue-guang, TANG Yan-bing. The corridor effect of metropolitan spatial extension and optimization of landscape structure the case of Beijing[J]. *The Journal of Chinese Geography*, 1999(4):319-325.

致谢:感谢南阳市南水北调办、十堰市南水北调办及各县南水北调办和农业、水利、环保等部门的大力支持与配合。