

# 基于PSR模型的颍河流域阜阳段 水质改善绩效评估方法

叶圆圆<sup>1</sup>, 高良敏<sup>1</sup>, 胡志逵<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 阜阳市环境监测站, 安徽 阜阳 236000)

**摘要:** 通过调查和收集阜阳市颍河流域2007-2011年的社会、经济、人口、环境资料和数据,运用PSR模型分析颍河流域阜阳段内的主要污染源,采用环境综合评价指数法确定农业面源污染为研究区域主要污染源,工业污染和城市生活污染源次之;通过对压力、状态、响应和环境综合评价指数进行了分析。结果表明:2007-2011年研究区域内重点实施工业污染源治理和污染减排示范工程对颍河流域阜阳段内水环境改善有一定的成效。

**关键词:** PSR模型; 层次分析法; 综合评价指数; 水质绩效评估

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)02-0144-05

## Assessment method of improve performance of water quality in Fuyang segment of Yinghe river valley based on PSR model

YE Yuanyuan<sup>1</sup>, GAO Liangmin<sup>1</sup>, HU Zhikui<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Environmental, Anhui University for Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Environmental Monitoring Station of Fuyang, Fuyang 236000, China)

**Abstract:** Through the investigation and collection of information and data of society, economy, population, environment in Yinghe River valley of Fuyang from 2007 to 2011, the thesis used the PSR model to analyze the main pollution sources in Fuyang segment of Yinghe River valley, took environmental evaluation index method to determine the main pollution source which is agricultural nonpoint source pollution in study area, the pollution of industry and city life followed; The analysis of pressure, state, response, and environmental evaluation index shows that the implementation of industrial pollution control and pollution abatement demonstration project on in study area from 2007 to 2011 have certain effect for water environment improvement in Fuyang section of the Ying River basin.

**Key words:** PSR model; analytic hierarchy process; comprehensive evaluation index method; improve performance of water quality

阜阳市地处安徽省西北部,黄淮海平原南端,淮北平原西部,淮河中游,东西长160 km,南北宽142 km,总面积9 775 km<sup>2</sup>。颍河是淮河的最大支流,上游以沙河为主,故又称沙颍河,至界首市城关镇附近进入安徽省,往下经太和、阜阳,于颍上县沫河口入淮河。全长619 km,流域面积为39 890 km<sup>2</sup>。研究区范围、颍河流域阜阳段内的主要河流以及各监测点信息。

本文运用PSR模型对沙颍河下游水质实施数值模拟,对各污染源的污染减排排放污染物实施定量

化评价,集合工业点源、城镇点源、农村面源等污染源、集中排放等入河路径,利用层次分析法分析主要污染源与主要入河污染路径,评价“十一五”期间工业污染治理和污染物减排等示范工程实施后的水质改善绩效,为“十二五”治理颍河流域生态环境和水质提供依据。

## 1 评价指标体系的框架选择与建立

合理的框架体系的前提是先要选择合适的评价模型。理想的指标体系应具有可比性,形式简单且

收稿日期:2013-11-05; 修回日期:2013-11-25

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07210-003-04)

作者简介:叶圆圆(1988-),女,安徽休宁人,在读研究生,主要从事水污染治理和环境遥感方面研究。

通讯作者:高良敏(1963-),男,安徽寿县人,理学博士,教授,主要从事水污染控制、环境规划管理与评价、水文与水资源的的教学与科研工作。

指标之间具有一定的相关性,这就需要对指标产生机理进行研究,使得指标统一在一个综合的框架内。目前国内外对于环境主要污染源确定的指标体系不是很成熟,常用的指标评价体系有压力—状态—响应模型(PSR 模型)法,生态足迹法等等,常用的评价方法有综合指数法、层次分析法、模糊数学评价法和灰色理论评价法等<sup>[1]</sup>。

### 1.1 PSR 模型评价指标体系

PSR(Pressure - State - Response model)模型最初由加拿大统计学家提出,后由经济合作发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)共同发展来的<sup>[2-3]</sup>。P指人类活动引起的资源环境及社会的压力因素;S指资源环境及社会经济所处的状态或趋势;R指人类在环境、社会经济活动中的主观能动性的反映,人类在促进资源环境保护活动中所采取的一系列的有效措施等<sup>[4]</sup>。

PSR 模型具有非常清晰的因果关系,人类活动对环境施加了一定的压力,环境状态发生了一定的变化,而社会活动对环境的变化作出响应,以恢复环境质量或防止环境恶化。PSR 模型框架强调了环境压力的来源,因此能够比较直观地表示出主要环境问题的产生原因,它的缺点则是在指标选择的时候难以判断是属于压力指标还是状态指标<sup>[5]</sup>。但是 PSR 模型具有可操作性强、灵活性大、系统性强等优点,因此,在本文中采用 PSR 模型作为框架构建的指标体系<sup>[6]</sup>。

### 1.2 PSR 指标体系的构建

(1) 指标体系构建原则。影响流域水质的原因很多,污染源构成也比较复杂,因此在选择指标的时候即需要考虑多方面因素,还要遵守系统性、可操作性、特殊性的原则<sup>[7-9]</sup>。

(2) 指标体系的初步建立。依据上述体系构建原则,充分考虑阜阳市颍河流域的基本情况,按照 PSR 模型建立阜阳市颍河流域水环境污染源评价的指标体系。①压力层:包括对环境变化起着驱动作用的间接压力和直接压力。这类指标主要描述了自然过程和人类活动对环境所带来的影响和压迫,反映了研究区域资源的利用情况和利用强度以及资源的变化趋势。这些指标有:常住人口密度、化肥施用量、工业产业增加值、人口自然增长率、耕地面积。②状态层:主要包括水环境指数,有地表水劣于Ⅲ类断面比例、工业污水排放量、工业 COD 排放量、农业 COD 排放量、城市生活污水 COD 排放量、农业 TP 排放量、城市生活污水 TP 排放量、农业 TN 排放量、

城市生活污水 TN 排放量、工业氨氮排放量、农业氨氮排放量、城市生活污水氨氮排放量、生活污水排放量。③响应层:这些指标反映社会或者个人为了停止、减轻、预防或者恢复不利于人类生存与发展的环境变化而采取的措施。其指标有城市污水处理率、工业污水处理率、环境水利公共设施投资比例、城市污水处理能力、第三产业比重。

## 2 研究区域环境质量评价

根据指标的建立和筛选原则,综合比较了相关分析法、层次分析法和主成分分析法对选择的指标体系,最终采用了层次分析法对选择的指标进行筛选,它不仅能够简化系统的分析与计算,还能有助于决策者保持思维过程的一致性,从指标权重角度删除那些对指标影响不大的弱权重体系<sup>[10]</sup>。运用层次分析法解决问题的包括以下几个步骤<sup>[11-13]</sup>:

(1) 数据预处理。因为初始数据一般都有自己的量纲,所以不能进行直接的运算和比较,因此在运用综合评价之前必须对数据进行数据量纲和数量级进行处理,即对原始数据进行标准化预处理<sup>[14]</sup>。本次研究中的数据来自于阜阳市环保局从 2007 年至 2011 年的监测数据和阜阳市国民经济和社会发展统计公报。

对于成本型指标,指标值越小越好,按照公式(1)计算:

$$X'_i = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

对于效益型指标,指标值越大越好,按照公式(2)计算:

$$X'_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

采用公式(2)对数据进行预处理时,经过变换最差指标的值为 0,最佳指标的值为 1。

(2) 建立递阶层次结构。把指标元素按照不同属性分成若干组形成不同层次,上一层次对下一层次依次起支配作用<sup>[15-16]</sup>。在 PSR 模型确定的指标体系框架下,将评价体系分为压力层——压力指标,这些指标主要是指造成发展不可持续的人类活动、消费模式或者经济系统中的一些因素;状态层——状态指标,这些指标主要反映资源环境中系统的状态,包括反映经济的状态,还有反映资源环境的状况;响应层——响应指标,是指人类在促进资源环境保护进程中所采取的有效措施。

(3) 构造判断矩阵。层次结构构建后,上下层之间的关系即被确定。计算后确定准则对于元素的相应权重。设某层有  $n$  个因素,构建  $X = \{C_1, C_2, C_3,$

...,  $C_n$ }, 比较他们对上一层的影响程度, 确定在该层中相对于某一准则的比重。在这里采用 1~9 比例标度两两比较法, 每个标度的含义如下表 1 所示。

表 1 1~9 比例标度含义

标度值	表示意义
1	表示两个元素相比, 具有同样重要性
3	表示两个元素相比, 一个元素比另一个元素稍微重要
5	表示两个元素相比, 一个元素比另一个元素明显重要
7	表示两个元素相比, 一个元素比另一个元素强烈重要
9	表示两个元素相比, 一个元素比另一个元素极端重要
2, 4, 6, 8	为上述相邻判断的中值

对于  $n$  个元素来说, 得到判断矩阵  $A$ :

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

若因素  $i$  与  $j$  比较得到  $a_{ij}$ , 则因素  $j$  与  $i$  比较的判断为  $1/a_{ij}$ 。

表 2 至表 4 为其中几个层次元素间的判断矩阵和权重值。

表 2 压力-状态-响应判断矩阵与权重

	压力因素	状态因素	响应因素	权重
压力因素	1	1/2	1	0.250 0
状态因素	2	1	2	0.500 0
响应因素	1	1/2	1	0.250 0

表 3 压力-压力判断矩阵与权重

P-P	常住人口密度	耕地面积	人口自然增长率	工业企业增加量	化肥施用量	权重
常住人口密度	1	1	1	1/3	1/5	0.1037
耕地面积	1	1	3	1	1	0.2221
人口自然增长率	1	1/3	1	1/2	1/3	0.1000
工业企业增加量	3	1	2	1	1/2	0.2221
化肥施用量	5	1	3	2	1	0.3520

表 4 状态-状态判断矩阵与权重

S-S	地表水劣于Ⅲ类水比重	工业状态	农业状态	生活状态	权重
地表水劣于Ⅲ类水比重	1	1/3	1/3	1/3	0.1000
工业状态	3	1	1	1	0.3000
农业状态	3	1	1	1	0.3000
生活状态	3	1	1	1	0.3000

(4) 层次单排序列及一致性检验。对每个成对比较矩阵计算最大特征值、及其对应的特征向量, 利用一致性指标、随机性指标比率做一致性检验。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

当  $CR < 0.1$  即通过一致性检验, 若检验通过特征向量归一化后即为权向量; 若不通过, 则需要重新构造成对比较矩阵。表 5 为随机一致性指标表。

表 5 随机一致性指标值

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(5) 计算总排序权向量并做一致性检验。利用总排序一致性比率:

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \dots + a_m CI_m}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \dots + a_m RI_m} \quad (4)$$

$CR < 0.1$  通过, 即可按照总排序权向量表示的结果进行决策, 否则要重新考虑模型或重新构造那些一致性比率比较大的成对比较矩阵。

通过一致性检验以后得到最终的权重作为最后决策依据, 按照这个方案的权重从大到小排序, 确定最终哪个污染源为颍河流域的主要污染途径。

(6) 指标权重确定。检验后各指标的分配结果如表 6 所示。

表 6 指标权重分布表

人/km<sup>2</sup>, t/hm<sup>2</sup>, 亿元, %, %, 万 t, t/d

目标及权重	指标子类	权重
压力层 0.25	常住人口密度	0.1037
	化肥施用量	0.3520
	工业企业增加值	0.2221
	人口自然增长率	0.1000
	耕地面积(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	0.2221
状态层 0.50	地表水体劣于Ⅲ类断面比例	0.1
	工业 工业污水排放量	0.5000
	工业氨氮排放量	0.2500
	工业 COD 排放量	0.2500
	生活 TN 排放量	0.1667
生活 0.3	生活 TP 排放量	0.1667
	生活 COD 排放量	0.1667
	生活氨氮排放量	0.1667
	生活污水排放量	0.3333
	农业 COD 排放量	0.2500
农业 0.3	农业氨氮排放量	0.2500
	农业 TP 排放量	0.2500
	农业 TN 排放量	0.2500
	城市污水处理率	0.2723
	工业污水处理率	0.2723
响应层 0.25	环境、水利公共设施投资比例	0.1042
	城市污水日处理能力	0.2723
	第三产业比重	0.0790

(7)综合评价指数的确定。综合评价通过一定形式的价值函数对评价对象的各个方面的数据特征进行高度的抽象和综合,转化为综合价值,进而确定研究对象的优劣、类型,并对结果进行排序。

在这里采用线性加权评价模型对污染因子对于研究区域环境的优劣进行评价。综合评价指数将压力因素  $P$ 、状态因素  $S$  和响应因素  $R$  综合在一起,用来表示研究区域环境的抗压能力、水环境质量和环境治理效果的综合指数,计算公式为公式(5),式中  $E$  表示环境质量综合评价指数; $W_i$  表示评价体系中各指标的权重<sup>[16]</sup>。

$$E = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i' \quad (5)$$

### 3 研究区域水环境质量评价及结果分析

图 1 为各个指标的污染权重比较图,图中显示,化肥施用量的指标权重最大,工业污水排放量、工业污水处理率、城市污水处理率和城市污水日处理能力四者之间权重相当,次于化肥施用量权重,因为在研究区域,农业用地面积很大,化肥的使用成为不可忽视的污染源。

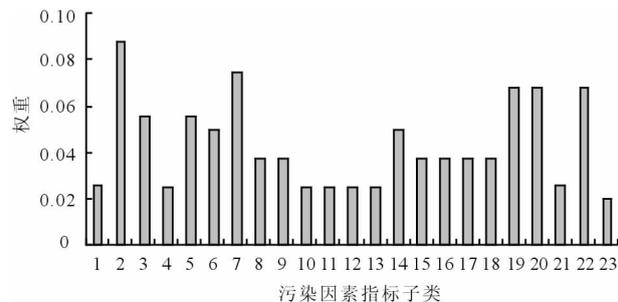


图 1 污染因素权重图

表 6 为应用 PSR 模型利用层次分析法对阜阳市颍河流域 2007 - 2011 年主要污染源分析的权重结果。从表 6 中可以看出状态层所占的权重值最大,即状态层中因素对污染源的判定的影响最大,达到 50%,起决定性作用。

从图 2 工业污染、城市生活污染源和农业面源污染综合指数分布图发现,农业污染综合指数有一定的波动,2008 年相比于 2007 年有所降低,在 2009 年有所增大,2010 年有较大幅度降低后又在 2011 年有小程度回升,这说明农业生产对水环境的影响程度波动较大,2007 - 2010 年期间的影响总体上呈现加剧趋势,从 2011 年开始影响有所降低;城市生活污染综合指数从 2007 - 2009 年逐年增大,2010 年后开始降低,这说明颍河流域城市生活污染源对

水环境的影响在 2007 - 2009 年逐年减小,2009 年后开始逐渐增强;工业污染综合指数在 2007 - 2009 年逐年增大,从 2010 年开始下降,这表明颍河流域工业生产对水环境的影响在 2007 - 2009 年逐年减轻,从 2010 年以后影响加剧,也在一定程度上说明了工业污染对沙颍河流域的水质环境的影响加大,有可能成为以后水环境污染的主要影响因素,2011 年综合指数小程度增大的原因是工业污染治理投入的增大,使得综合污染指数有一定程度的增大。

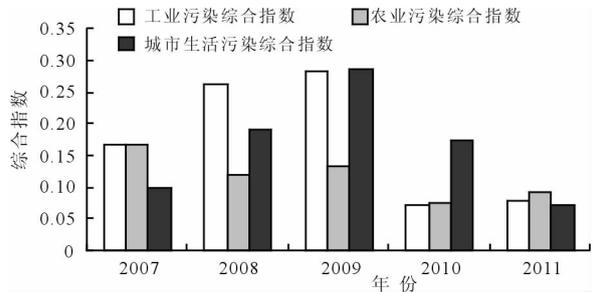


图 2 2007 - 2011 年工业污染、生活污染和农业污染综合指数分布图

图 3 为压力因素  $P$ 、状态因素  $S$ 、响应因素  $R$  和综合评价的评价指数。图中显示:在 2007 - 2008 年,  $P$  评价指数减小,  $S$  评价指数增大,  $R$  和综合评价指数有微小的降低,表明在这段时间,环境的抗压能力变低,环境污染有所降低,污染治理没有明显效果;2008 - 2009 年,压力因素  $P$ 、状态因素  $S$ 、响应因素  $R$  和综合评价指数呈现一致的上升趋势,研究区域抗压能力增强,环境污染降低,污染治理措施有一定成效,环境综合质量有所提高;2009 - 2010 年,状态因素  $P$ 、压力因素  $S$ 、响应因素  $R$  和综合评价指数呈现相同的降低趋势,在该段时间内,研究区域的抗压能力、环境质量和环境的治理效果都有所下降,研究流域的综合环境质量降低;2010 - 2011 年,响应因素指数发生急速上升,状态因素指数和压力因素指数呈缓慢下降趋势,远远小于 2009 到 2010 年的降低趋势,环境综合指数呈现增大趋势,环境抗压能力降低,环境污染加剧,但在这段时间水污染治理收到很好的效果,研究区域的环境综合质量得到提高。

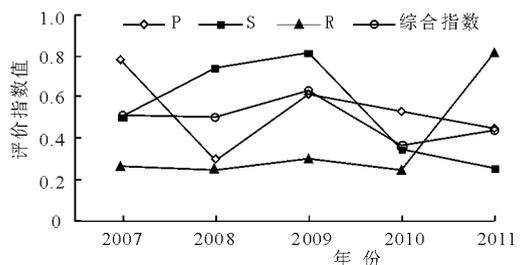


图 3 2007 - 2011 年水环境评价指数

## 4 结 语

(1)在收集 2007 - 2011 年颍河流域的水质监测数据、污染物统计数据和社会经济统计数据的基础上,共选择了 23 个指标,利用 PSR 模型建立了阜阳市颍河流域水环境评价体系。

(2)通过 PSR 模型和层次分析法分析可得,阜阳市颍河流域的污城镇生活污染源、工业污染源和农业面源污染对颍河流域的影响作用比较平均,农业面源污染最大,工业污染源和城市生活污染源次之,工业污染的影响在逐渐增大。

(3)“十一五”期间重点工业污染源治理和污染减排项目的实施取得了一定的成效,研究区域水环境得到改善。这为“十二五”治理颍河流域水环境提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 吴开亚,金菊良,魏一鸣,等. 基于指标体系的流域水安全诊断评价模型[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008,47(4):105 - 113.
- [2] Ministry for the Environment of New Zealand. The pressure - state - response framework [EB/OL]. [2004 - 05 - 19]. <http://www.qualityplanning.org.nz/monitoring>.
- [3] Myriam linster. Organization for economic cooperation and developmental indicators: development measurement and use [EB/OL]. [2004 - 05 - 20]. <http://www.oecd.org/dataoecd/7/47/24993546.pdf>.
- [4] 陈甲球. PSR 模型在资源环境保护中的应用分析[J]. 石材,2006(7):28 - 30.
- [5] 聂艳. 耕地质量评价的模型方法与信息系统集成及应用研究[D]. 武汉:华中农业大学,2005.

- [6] 左伟,周慧珍,王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤,2003,35(1):2 - 7.
- [7] 陈绍金. 水安全系统评价、预警与调控研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [8] 逯元堂. 国家环境安全评估体系研究[D]. 北京:中国环境科学研究院,2004.
- [9] 崔 婧. 金华市水安全评价[D]. 杭州:浙江师范大学,2007.
- [10] Kamiyama N. Designing data center networks using analytic hierarchy process[C]//. Computer Communications and Networks (ICCCN), Proceedings of 19th International Conference, Zurich, Switzerland, 2010.
- [11] 李琳. 基于 PSR 模型的镇江市水环境安全评价研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
- [12] Ren Shaoyun. Evaluation of ship traffic control safety based on analytic hierarchy process[C]//. International Conference Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference Changsha, China, 2010.
- [13] Wang Y M, Chin K S, Leung J P F. A note on the application of the data envelopment analytic hierarchy process for supplier selection[J]. International Journal of Production Research,2009,47(11):3121 - 3138.
- [14] Constantin Bratianu, Ivona Orzea. Knowledge strategies analysis by using the analytic hierarchy process[J]. IUP Journal of Knowledge Management, 2012,10(2):7 - 21.
- [15] Mukherjee Bani, Das Pitamber. The use of the analytic hierarchy process as a tool for selection of important factors for the multi-disciplinary evaluation of medical devices[J]. International Journal of Academic Research, 2010,2(1):37 - 42.
- [16] 郭鑫,赵林,刘年磊,等. 基于 PSR - AHP 的衡水市生态环境质量评价及预测[J]. 环境科技,2011,24(2):53 - 56 + 59.

(上接第 143 页)

- [8] 徐宗学,孟翠玲,赵芳芳. 山东省近 40a 来的气温和降水变化趋势分析[J]. 气象科学,2007,27(4):387 - 393.
- [9] 文聘,沈冰,黄领梅. 西安及附近地区降水量时空变化规律分析[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(1):42 - 46 + 50.
- [10] 池建,等. 精通 ArcGIS 地理信息系统[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [11] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:262 - 263.
- [12] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2):238 - 244.
- [13] 严登华,袁喆,杨志勇,等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 水科学进展,2013,24(1):34 - 41.
- [14] 魏智敏. 海河流域干旱缺水状况与解决对策探讨[J]. 海河水利,2003(6):5 - 8.
- [15] 王金霞,李到浩,夏军,等. 气候变化条件下水资源短缺的状况及适应性措施:海河流域的模拟分析[J]. 气候变化研究进展,2008,4(6):336 - 341.