

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220087

城市水环境治理效率时空演变及影响因素研究

袁宏川¹, 陈平菊¹, 晋良海^{1,2}, 张 玥¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要:以湖北省16个市州为例,从非期望产出角度出发,运用DEA-SBM模型对2014~2018年16个市州水环境治理效率进行测算,结合GIS空间分析法,探究城市水环境治理效率时空变化特征,采用多元线性回归模型分析城市水环境治理效率的影响因素。结果表明,湖北省城市水环境治理效率呈上升趋势,但不同城市之间水环境治理效率时序变化存在差异;湖北省城市水环境治理效率呈中部地区低,东部、西部地区高的空间分布态势;基础设施水平、环境规制对城市水环境治理效率呈显著正向影响,城镇化水平对水环境治理效率呈显著负向影响。

关键词:水环境治理; 时空演变; DEA-SBM模型; 多元线性回归

中图分类号: TV213.4; X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0050-05

1 引言

水环境与社会经济的发展和生态环境联系紧密,水环境治理是一个复杂的系统工程^[1]。目前,关于水环境治理的研究成果较丰富,从研究方法看,常用生命周期评估法、灰色关联分析法与数据包络分析法,其中数据包络分析法(DEA)的基本假设和参数估计更加客观, TONE K^[2]提出的非期望产出SBM模型,不仅规避传统DEA模型选择径向和角度造成的偏差,还克服了投入产出松弛问题且将非期望产出纳入指标体系。从研究内容看,主要围绕水环境基础理论、治理技术、水环境安全等方面,同时开展了水环境管理绩效评价^[3]、水环境承载力^[4]及水资源利用效率^[5]的研究,但针对城市水环境治理效率的研究较少。因此,本文以湖北省16个市州为例,构建水环境治理效率评价指标,采用非期望产出SBM模型测算2014~2018年湖北省城市水环境治理效率,借助ArcGIS技术软件,分析治理效率时空差异,通过回归模型分析水环境治理效率影响因素,以期在城市水环境治理提供参考。

2 研究方法 with 指标体系

2.1 研究方法

(1)非期望产出DEA-SBM模型。将湖北省每个市州看作一个决策单元DMU,假设决策单元数量为 N 个($D_{DMU_j}, j = 1, 2, \dots, N$),每个DMU有 n 种投入 \mathbf{X} , m_1 种期望产出 Y^a 和 m_2 种非期望产出 Y^b ,投入产出矩阵为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbf{R}^{N \times n}$, $\mathbf{Y}^a = [y_1^a, y_2^a, \dots, y_N^a] \in \mathbf{R}^{N \times m_1}$, $\mathbf{Y}^b = [y_1^b, y_2^b, \dots, y_N^b] \in \mathbf{R}^{N \times m_2}$,其中 $x_i > 0, y_i^a > 0, y_i^b > 0$,且 $x \in \mathbf{R}^n, y^a \in \mathbf{R}^{m_1}, y^b \in \mathbf{R}^{m_2}$ 。目标函数为城市水环境治理效率 ρ 最小,即:

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{m_1 + m_2} \left(\sum_{r=1}^{m_1} \frac{s_r^a}{y_{r0}^a} + \sum_{r=1}^{m_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (1)$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} x_{i0} = \mathbf{X}\boldsymbol{\lambda} + s_i^- \\ y_{r0}^a = \mathbf{Y}^a\boldsymbol{\lambda} - s_r^a \\ y_{r0}^b = \mathbf{Y}^b\boldsymbol{\lambda} + s_r^b \\ s_i^- \geq 0 \\ s_r^a \geq 0 \\ s_r^b \geq 0 \\ \boldsymbol{\lambda} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, s_i^- 、 s_r^a 、 s_r^b 、 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别为松弛变量、期望产出松弛变量、非期望产出松弛变量、权重向量。

收稿日期: 2022-01-15, 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 教育部人文社科规划基金项目(21YJA630038)

作者简介: 袁宏川(1968-),男,博士、教授、硕导,研究方向为水资源与环境, E-mail: 974279590@qq.com

(2)多元线性回归模型。多元线性回归分析方法是确定因变量和多个自变量之间相互依赖的定量关系的统计分析方法^[6],假设因变量 w 与自变量 z_1, z_2, \dots, z_h 之间存在线性相关关系,则回归模型可写成:

$$w = b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3 + \dots + b_h z_h + \epsilon \quad (3)$$

式中, b_0 为回归常数; b_1, b_2, \dots, b_h 均为回归系数; z_1, z_2, \dots, z_h 均为自变量; ϵ 为随机误差。

w 为测算所得城市水环境效率, z_1, z_2, \dots, z_h 均为影响因素指标。

2.2 指标选取及数据来源

2.2.1 指标选取

数据包络分析法中规定,决策单元数量至少两倍于投入产出指标之和,集合数据可获得性、真实性原则,从投入与产出角度出发,选择以下指标为湖北城市水环境治理效率测算指标体系,见表 1。

表 1 城市水环境治理效率投入与产出指标

Tab. 1 Input and output indicators of urban water environment governance efficiency

类别	项目	单位	具体指标
投入	人员	万人	水利、环境与公共设施管理业从业人员数
	条件	$10^8 m^3$	用水量
	设备	$10^4 m^3/d$	污水处理能力
产出	期望产出	亿元	生产总值
	非期望产出	$10^4 t$	COD 排放量
		$10^4 m^3$	污水排放量

2.2.2 数据来源

研究数据来源于《中国城市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》、《湖北统计年鉴》,湖北省各市州统计年鉴、水资源公报、环境状况公报。

3 湖北省城市水环境治理效率测算及时空演变分析

3.1 湖北省城市水环境治理效率测算

根据投入产出指标,借助 Matlab 软件基于 DEA-SBM 模型,计算城市水环境治理效率,将水环境治理效率分为四阶段: $\rho < 0.6$ 为效率无效阶段, $0.6 \leq \rho < 0.8$ 为效率中等阶段, $0.8 \leq \rho < 1$ 为效率良好阶段, $\rho = 1$ 为效率最优阶段。湖北省及 16 市州水环境治理效率时序变化曲线见图 1,由于 2014~2018 年武汉、黄石、宜昌及黄冈所测算的效率值均为 1,图 1(b)中仅见 13 条折线,另外 3 条折线被覆盖。

3.2 湖北省城市水环境治理效率时序演变特征

根据时序变化曲线,湖北省水环境治理效率

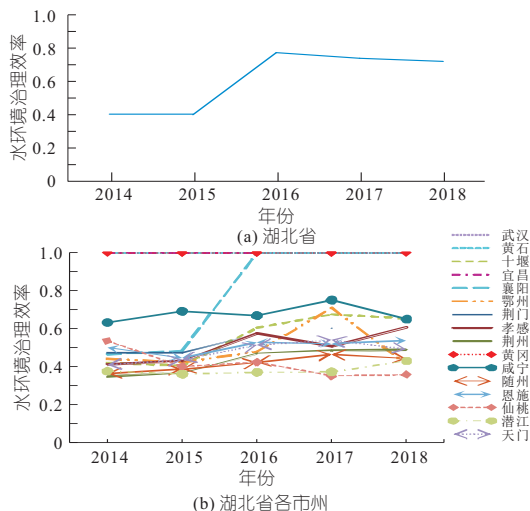


图 1 2014~2018 年湖北省及各市州水环境治理效率时序变化曲线

Fig. 1 Time series curve of water environment governance efficiency in Hubei Province and all cities and states

呈先增后降状态,效率值由 2014 年的 0.403 2 下降至 0.399 8,再上升至 0.720 2,总体上升 78.6%,年均增长 19.65%,2014~2015 年处于效率无效阶段;2015~2016 年增长率为 93.27%,呈快速上升趋势;2016~2018 年呈下降趋势,处于中等效率阶段。水环境治理效率时序变化可以分为稳定型、持续增长型和不稳定型三类,根据湖北省各市州水环境治理效率的变化类型,运用 ArcGIS 软件绘制湖北省城市水环境治理效率变化类型分布图(图 2)可知:①稳定型城市分布在鄂东地区的武汉、黄冈、黄石和鄂西地区的宜昌,始终处于效率最优阶段,稳定型城市应充分发挥带动作用,带动中部地区水环境治理效率,提升全省水环境治理效率。②持续增长型城市分布在鄂中地区和十堰。研究期内十堰、孝感从无效阶段上升至效率中等阶段;荆门从效率无效阶段上升至效率最优阶段;随州、天门、潜江、荆州 4 个城市虽呈上升趋势但增长速度缓慢,始终处于效率无效阶段,导致湖北省整体水平偏低,这些城市的水

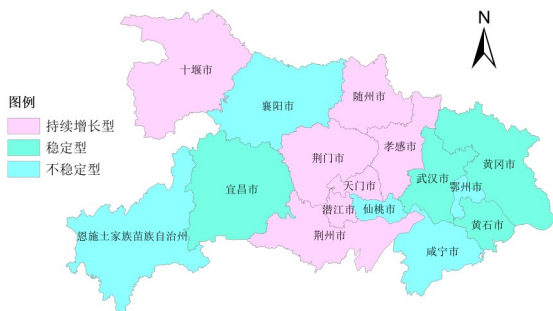


图 2 湖北省城市水环境治理效率变化类型分布图
Fig. 2 Distribution of types of urban water environment governance efficiency changes in Hubei Province

环境治理效率有待提升。③不稳定型城市为襄阳、恩施、仙桃、咸宁、鄂州,空间分布零散、无聚集性。襄阳市 2014~2015 年处于效率无效阶段,2016 年上升至效率最优阶段并维持至 2018 年;恩施、咸宁的城市水环境治理效率值呈先下降后上升再下降的波动趋势,恩施始终处于效率无效阶段,咸宁始终处于效率中等阶段;仙桃市水环境治理效率呈下降趋势,维持在效率无效阶段;鄂州 2014~2016 年处于效率无效阶段,2017 年上升至效率中等阶段,2018 年下降至效率无效阶段。

3.3 湖北省城市水环境治理效率空间演变特征

根据 2014~2018 年城市水环境治理效率值,运用 ArcGIS 软件绘制湖北省城市水环境治理效率空间演变图(图 3)。分析图 3 可知:①整体来看,湖北省城市水环境治理效率呈现中部低,东、西部高的状态,空间聚集性明显。始终处于效率最优阶段的的城市为武汉、黄石、宜昌、黄冈,位置处于鄂西、鄂东;始终处于效率中等阶段的的城市为咸宁,位置处于鄂东;始终处于效率无效阶段的的城市为鄂州、荆州、随州、恩施、仙桃、潜江、天门,位置

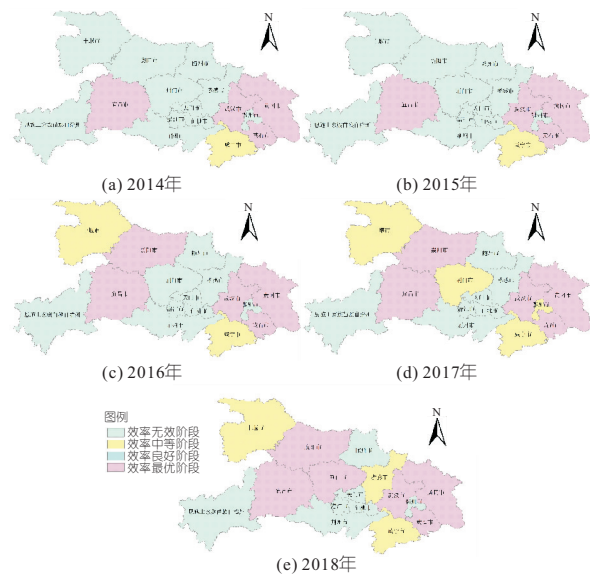


图 3 湖北省城市水环境治理效率空间演变图

Fig. 3 The spatial evolution of urban water environment governance efficiency in Hubei Province

主要处于鄂北、鄂中、鄂南;其余城市在效率无效、中等、最优阶段之间变化。②2014 年与 2015 年城市水环境治理效率空间演变图相同,水环境治理效率处于最优效率阶段的武汉、黄石、黄冈位于鄂东,宜昌位于鄂西;效率中等阶段的咸宁位于鄂东,空间分布较分散;2016 年处于效率最优阶段的的城市在 2015 年基础上增加了襄阳,效率中等阶段城市增加了十堰,效率中等及以上阶段的的城市处于鄂东、鄂西及鄂北,效率空间分布发生变化,

襄阳市从效率无效上升至效率最优,其余城市属于效率无效阶段;2017 年处于效率最优阶段的的城市与 2016 年相同,处于效率中等阶段的的城市在 2016 年基础上增加了荆门及鄂州,效率中等及以上阶段的的城市处于鄂中、鄂东、鄂西及鄂北,其余城市属于效率无效阶段,效率空间分布发生变化;2018 年处于效率最优阶段的的城市在 2017 年基础上增加了荆门,效率中等阶段的的城市增加了孝感,减少了鄂州,效率中等及以上阶段的的城市主要分布于鄂中、鄂东、鄂西,效率空间分布发生变化,鄂州市下降至效率无效阶段,荆门市上升至效率最优阶段,其余城市属于效率无效阶段。中等效率及以上阶段的的城市分布有向鄂西、鄂中、鄂东地区聚集的趋势。③湖北省城市水环境治理效率整体处于提升状态,研究期内效率最优阶段的的城市数量从 4 个增加至 6 个,效率中等阶段的的城市从 1 个增加至 3 个,效率无效阶段的的城市从 11 个减少至 7 个。处于效率无效阶段的的城市数量仍较大,湖北省城市水环境治理效率发展任务仍然艰巨。始终处于效率最优阶段的的城市为湖北省最具潜力和活力的地区,基础设施建设体系完善,注重资源利用、环境友好;始终处于效率无效阶段的的城市,产业结构发展中第二产业占比明显高于第三产业,依赖工业发展提升经济发展,但忽略生产对环境的负面影响,增加能源消耗及污染物排放量,节能减排技术滞后,污染水环境降低了水环境治理效率。

4 湖北省城市水环境治理效率影响因素

4.1 建立指标体系

结合湖北省各市州发展实际及数据可获得性,选取经济发展水平、城镇化水平、科技创新水平、环境规制、基础设施建设水平作为解释变量,用人均 GDP 表示经济发展水平;用城镇人口占总人口比重表示城镇化水平;用专利授权数量表示科技创新水平;用化学需氧量 COD 和氨氮总排放量与生产总值比值作为环境规制的逆指标,比值越大表示环境规制力度越小,反之则越高;用基础设施投资额表示基础设施建设水平,建立影响因素指标体系见表 2。

4.2 模型构建

运用多元线性回归模型分析城市水环境治理效率的影响因素,以 2014~2018 年湖北省 16 个市州水环境治理效率作为因变量 w ,以经济发展

表 2 城市水环境治理效率影响因素指标

Tab. 2 Influencing factors of urban water environment governance efficiency

因素名称	含义	变量符号	单位
经济发展水平	人均 GDP	z_1	元
城镇化水平	城镇人口占总人口比重	z_2	%
科技创新水平	专利授权数量	z_3	件
环境规制	COD 和氨氮总排放量与生产总值比值	z_4	10^4 t/亿元
基础设施建设水平	基础设施投资额	z_5	亿元

水平 z_1 、城镇化水平 z_2 、科技创新水平 z_3 、环境规制 z_4 、基础设施建设水平 z_5 为自变量,对经济发展水平及基础设施建设水平取对数,消除异方差问题,模型如下:

$$w = b_0 + b_1 \ln z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3 + b_4 z_4 + b_5 \ln z_5 + \epsilon \quad (3)$$

4.3 模型检验

对模型进行方程 F 显著性检验、参数显著性检验及共线性检验,结果见表 3、4。由表 3 可知,模型显著性 F 值为 17.843, Sig 值为 1.4468×10^{-11} ,远小于 0.05,置信水平高,多元线性回归模型显著。由表 4 可知,五个影响因素的置信水平 Sig 值分别为 0.389、0.097、0.137、0.003、0.000003,城镇化水平、环境规制、基础设施建设水平通过显著性检验,表明各城市水环境效率与这三个因素存在线性关系。影响因素之间方差膨胀因子(V_{VIF})在 1~6 之间,说明解释变量之间不存在明显共线性问题。

表 3 方差分析表

Tab. 3 Analysis of variance table

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	2.715	5	0.543	17.843	0.000 ^b
残差	2.252	74	0.030		
总计	4.967	79			

表 4 参数显著性检验系数表

Tab. 4 Parameter significance test coefficient table

模型	未标准化系数		标准化	t	显著性	共线性统计	
	B	标准错误	系数 β			容差	V_{VIF}
(常量)	-0.695	0.930		-0.747	0.457		
经济发展水平	0.081	0.093	0.145	0.866	0.389	0.220	4.542
城镇化水平	-0.009	0.005	-0.305	-1.681	0.097	0.186	5.368
科技创新水平	8.355×10^{-6}	0.000	0.191	1.505	0.137	0.380	2.632
环境规制	-3.532	1.155	-0.348	-3.059	0.003	0.473	2.112
基础设施建设水平	0.157	0.031	0.503	5.029	0.000	0.613	1.631

4.4 影响因素分析

运用 SPSS 软件进行多元线性回归分析,可知:①城镇化水平与城市水环境治理效率呈显著负相关,城镇化率升高,城市水环境治理效率下降。目前城镇化发展局限于数字化的城镇化率,造成人口密度增加,城市生活节奏加快及工业生

产消耗,忽略了对环境和自然资源的有效保护,产生大量污染物,对城市水体产生危害,阻碍了水环境治理发展。②环境规制的逆指标与城市水环境治理效率呈显著负相关,环境规制与城市水环境治理效率呈显著正相关,随着环境规制力度增大,城市水环境治理效率上升。合理实施环境规制政策,对加快技术创新、降低污染物排放浓度、提高水环境治理效率有积极引导作用,同时加强民众环保意识,提高污染物排放标准并限制污染物排放总量可有效提升水环境治理效率。③基础设施建设水平与城市水环境治理效率呈显著正相关,随着基础设施投资额的增加,城市水环境治理效率升高。基础设施建设影响人民生活和社会生产,城市基础设施投资力度的加大有效推进了污水处理、给排水及管网工程等环保水利项目的规划建设,完善的城市基础设施能有效避免环保水利项目功能性、结构性问题,提高污废水处理能力,对水环境治理效率有促进作用。

5 结论

a. 从时序变化看,湖北省 16 个市州水环境治理效率总体呈现上升趋势,武汉、黄石、宜昌、黄冈、咸宁属于稳定型;十堰、孝感、荆州、随州、恩施、潜江、天门属于持续增长型;襄阳、鄂州、荆门、仙桃属于不稳定型,湖北省城市水环境治理效率整体水平较低,仍有很大提升空间。

b. 从空间变化看,湖北省 16 个市州的水环境治理效率呈现中部低、东西部高的状态,具有明显的空间聚集性,效率中等及以上阶段的城市主要分布于鄂西、鄂东地区,效率无效阶段的城市主要分布于鄂中地区。

c. 分析影响因素得城镇化水平对城市水环境治理效率有显著阻碍作用;环境规制、基础设施建设水平对城市水环境治理效率有显著促进作用;经济发展水平、科技创新水平对城市水环境治理效率呈促进作用但显著性不强。

参考文献:

- [1] 袁宏川,彭勃,李新哲.基于 DPSIR 模型的长江流域中部地区水环境治理绩效评价[J].水电能源科学,2021,39(5):61-65.
- [2] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European journal of operational research, 2001, 130(3):498-509.
- [3] 王亚华,吴丹.淮河流域水环境管理绩效动态评价[J].中国人口·资源与环境,2012,22(12):32-38.
- [4] 万炳彤,赵建昌,鲍学英,等.基于 SVR 的长江经济

带水环境承载力评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2):896-905.

2020,40(20):7464-7478.

[5] 贺玉晓,苏小婉,任玉芬,等. 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征[J]. 生态学报,

[6] KABACOFF R I. R in action: Data analysis and graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications Co. LLC,2015.

Research on Spatio-temporal Evolution and Influencing Factors of Urban Water Environment Governance Efficiency

YUAN Hong-chuan¹,CHEN Ping-ju¹,JIN Liang-hai^{1,2},ZHANG Yue¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, Yichang 443002, China)

Abstract: Taking 16 cities and prefectures in Hubei Province as the research object, from the perspective of unexpected output, DEA-SBM model was used to calculate the water environment governance efficiency from 2014 to 2018. Combined with GIS spatial analysis method, the temporal and spatial variation characteristics of urban water environment governance efficiency were explored, and the influencing factors of urban water environment governance efficiency were analyzed by multiple linear regression model. The results show that the efficiency of urban water environmental governance in Hubei Province has rising trend, but there is a difference in time-order changes in water environmental governance between different cities; The efficiency of urban water environment treatment in Hubei Province shows a spatial distribution trend of low in the central region and high in the eastern and western regions; The level of infrastructure and environmental regulation have a significant positive impact on urban water environmental governance, and urbanization level has a significant negative impact on water environmental governance efficiency.

Key words: water environment governance; temporal and spatial evolution; DEA-SBM model; multiple linear regression

(上接第 62 页)

[5] 王昱,卢世国,冯起,等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10):4194-4204.

季节变化特征及源解析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7):1980-1988.

[6] 刘彦龙,郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. 环境科学, 2022, 43(3):1332-1345.

[10] 孙金华,曹晓峰,黄艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 2052-2057.

[7] 杨浩,李一平,蒲亚帅,等. 张家港市河道水质时空分布特征研究分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10):4064-4073.

[11] TONG S T Y, CHEN W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. Journal of environmental management, 2002, 66(4):377-393.

[8] 刘成建,夏军,宋进喜,等. 汉江中下游水质时空特征与土地利用类型响应识别研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4):910-919.

[12] 于松延,徐宗学,武玮,等. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(5):1309-1315.

[9] 方晓波,骆林平,李松,等. 钱塘江兰溪段地表水质

Spatiotemporal Characteristics of Water Quality and Its Correlation with Land Use Type in Middle and Lower Reaches of ChanBa River

LI Xiao-ke¹,LIAN Yan-qing²,XU Xin-han¹,FANG Yan¹,WANG Xuan¹

(1. Xi'an Institute of Earth Environment Innovative, Xi'an 710061, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the spatiotemporal characteristics of water quality and its correlation with land use type in the middle and lower reaches of the Chanba River, sampling and monitoring were conducted in April(wet period), August(flow period)and December(dry period)of 2019 based on seventeen sampling sites. The spatial-temporal characteristics of water quality and the identification of main pollution factors were analyzed by employing multivariate statistical, and the relationship between the land use type and water quality indexes was studied by the method of Spearman analysis. The results show that water quality had spatial and temporal characteristics in the middle and lower reaches of Chanba River in 2019. In terms of time, the concentration values of NH₃-N, TP and COD_{Mn} were maximum in flow period; The order of TP and COD_{Mn} was sorted as flow period > wet period > dry period. Spatially, the concentrations of NH₃-N, TP and COD_{Mn} basically increased from the middle reaches to the lower reaches. Influenced by human activities along the river, the water quality was mainly polluted by nutrient and organic matter in the middle and lower reaches of Chanba river. Construction land had a positive correlation with pollutants and played a "source" role, while forest had a negative correlation with pollutants and played a "sink" role. The results can provide reference for water environmental management in Chanba River Basin.

Key words: middle and lower reaches of Chanba River; water quality; land use type; relativity