

基于环境库兹涅茨曲线的乌江重庆段水质演变预测研究

徐浩¹, 钱宝^{2*}

¹长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆

²长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年1月25日; 录用日期: 2023年3月7日; 发布日期: 2023年4月25日

摘要

利用2011~2020年乌江重庆段共5个水质断面的监测数据, 结合区域内经济发展情况拟合出环境库兹涅茨曲线(EKC), 对乌江重庆段水质、人口与经济发展之间产生的关系进行分析研究。研究表明: 近10年来, NH₃-N、Zn、TP和F⁻等参数都与经济发展之间存在典型的“倒U”型曲线关系, 且位于曲线拐点的右侧, 而I_{Mn}、BOD₅和FC等参数则与经济发展之间的关系呈现为“N”型三次曲线关系, 总体尚处于EKC曲线拐点的左侧。结果表明, 随着经济增长, NH₃-N、Zn、TP和F⁻已经迎来了拐点, 得到了较好的控制; 而I_{Mn}、BOD₅和FC等参数则可能受到新技术或生产方式的影响, 尚未迎来拐点, 在未来一段时期内还有回升的可能。

关键词

水质预测, 环境库兹涅茨曲线, 乌江, 重庆段

Study on Water Quality Prediction of Wujiang River in Chongqing Based on Environmental Kuznets Curve

Hao Xu¹, Bao Qian^{2*}

¹Upper Yangtze River Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Changjiang Water Resources Commission, Chongqing

²Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: Jan. 25th, 2023; accepted: Mar. 7th, 2023; published: Apr. 25th, 2023

作者简介: 徐浩, 男, 工程硕士, 工程师, 主要从事水环境监测与水资源管理工作。Email: xuhao12315@qq.com

*通讯作者 Email: jacber@163.com

文章引用: 徐浩, 钱宝. 基于环境库兹涅茨曲线的乌江重庆段水质演变预测研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(2): 170-180.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.122020

Abstract

Based on the monitoring data of 5 water quality sections of Wujiang River in Chongqing from 2011 to 2020, combined with the economic development in the region, the environmental Kuznets curve (EKC) was fitted to analyze the relationship among water quality, population and economic development of Wujiang River in Chongqing. The results show that in the past 10 years, there is a typical inverted U-curve relationship between ammonia nitrogen, zinc, total phosphorus and fluoride and economic development, which is located on the right side of the inflection point of the curve, while the relationship between permanganate index, 5-days biochemical oxygen demand, fecal coliform bacteria and economic development is an N cubic curve, which is still on the left side of the inflection point of EKC. The results show that with the economic growth, ammonia nitrogen, zinc, total phosphorus and fluoride have reached an inflection point and have been well controlled, while the parameters such as permanganate index, 5-days biochemical oxygen demand and fecal coliform group may be affected by new technology or mode of production, and the inflection point has not yet been reached, and it is still possible to pick up in the coming period of time.

Keywords

Water Quality Prediction, Environmental Kuznets Curve, Wujiang River, Chongqing Section

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

伴随对美好生活的向往,人们对水体水质的关注度越来越高,从而使得对经济发展与水环境质量之间的定量关系研究也逐渐变得热门。大量的研究表明,经济增长会加大资源的消耗和污染物的排放水平,从而对当地的水环境质量造成明显影响,同时,水环境质量的降低又会对经济发展产生胁迫作用,从而对经济的良性循环发展造成阻碍[1] [2] [3]。已有研究表明,水体受污染程度与当地人均收入水平的关系如同一条“倒U”型的曲线,即环境库兹涅茨曲线(EKC),在经济发展初期会随着人均GDP的增长而趋于严重,但当人均收入超过一定水平后,污染程度反而又会随着人均GDP的增长而得到缓解[4]。

为了拟合环境与经济之间的关系,国内的研究人员进行了大量的研究,针对不同的环境对象构建出各种环境-经济模型[5] [6] [7] [8]。朱霞林(2021)基于EKC方法对整个淮河流域的经济-环境变化进行了量化分析[9],孙语泽(2019)研究了陕西省水环境与经济发展的耦合情况[10],徐浩等(2019)研究了三峡库区内的环境经济变化关系[11],宋颖等(2017)对鄱阳湖水域的环境质量变化与经济发展进行了研究[12]。这些研究结果表明,应用EKC理论对大型流域水系和湖泊水库以及省级等大区域范围内的研究确实可行,但针对单条河流的部分区段研究还鲜有报道。通过对河流部分区段的细化研究,构建小型流域内经济与水环境质量的拟合模型,再与标准的EKC曲线进行比对,从而研究流域内水体的演变趋势,对流域内各区段进行水资源科学管理和合理开发利用具有较大的参考作用。本文基于乌江重庆段5个水质断面的监测数据,结合河段涉及区域内的经济发展情况[13],判断该区域内水质-经济所处的发展阶段,并据此对区域内的水环境质量进行演变预测,从而提出应对措施,为区域和流域内的环境和经济可持续发展提供一定的决策参考。

2. 研究方法

2.1. 研究模型

参照大多数地区区域和河流湖泊研究[14][15][16][17][18], 拟构建三次多项式回归模型来评估乌江重庆段的 EKC 曲线, 其基本模型如下:

$$M_t = \alpha + \beta \times GDP_t + \gamma \times GDP_t^2 + \delta \times GDP_t^3 + \varepsilon \quad (1)$$

式中, M 为污染物含量; t 下标为对应的年份; GDP 为当年乌江重庆市涉及所有区(县)人均生产总值; α 、 β 、 γ 、 δ 和 ε 均为模型中的相关参数。

2.2. 参数选取

水质指标按照 GB 3838-2002《国家地表水环境质量标准》的环境质量评价基本项目, 去除掉常年未检出的化学需氧量(COD)、镉(Cd)、铅(Pb)、铜(Cu)、硒(Se)、汞(Hg)、砷(As)、六价铬(Cr(VI))、氰化物(CN⁻)、挥发酚(Ar-OH)、石油类(Oil)、阴离子表面活性剂(LAS)、硫化物(S²⁻)等参数, 选取高锰酸盐指数(I_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅)、氟化物(F⁻)、锌(Zn)、粪大肠菌群(FC)等 7 项参数作为衡量乌江重庆段水质的指标。

经济发展方面, 采用酉阳县、彭水县、武隆区和涪陵区等 4 个区(县)的人均生产总值来反映区域涉及的 4 个区(县)的经济总量状况。其中区域人均生产总值(E_{GDP})的计算公式为:

$$E_{GDP} = GDP_{Total} \times N^{-1} \quad (2)$$

式中, GDP_{Total} 为区域生产总值; N 为区域内人口总数。

2.3. 数据来源

水质数据来源于长江委水文局水环境监测数据, 将各断面经过加权处理后参与运算。本次所选取的水质断面从上游到下游依次为鹿角沱、彭水、武隆、三重堂、乌江口, 共 5 个断面。其断面位置示意图如图 1 所示。经济发展方面的数据则来源于重庆市及相关区(县) 2011~2020 年统计年鉴。

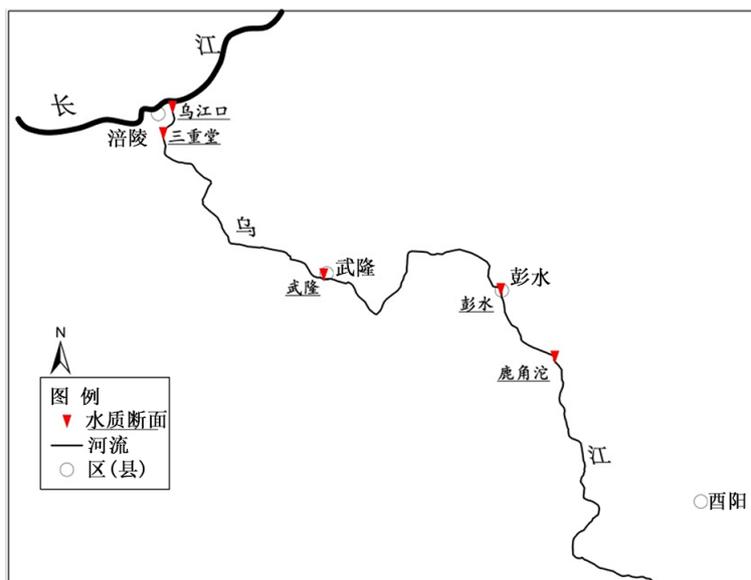


Figure 1. Sketch map of study area

图 1. 研究区域示意图

3. 结果与分析

3.1. 社会经济发展情况

根据相关资料,得到 2011~2020 年乌江重庆段涉及区县各产业生产总值的基本情况(见表 1),其示意图如图 2 所示。由图可见,2011 年至今,乌江重庆段区域经济高速增长。2020 年区域内生产总值达 1895.54 亿元,是 2011 年的 2.35 倍,人均国内生产总值是 2011 年的 2.36 倍。三类产业发展中,2020 年生产总值分别较 2011 年上涨 127%、83%、240%,可见,区域发展过程中,第三产业增长速度较快,第一产业次之。同时,2011~2020 年乌江重庆段区域内人口数量呈现出先增后降的趋势,但总体变幅不大,由 312.74 万人下降至 310.78 万人,如图 3 所示。

3.2. 水质综合状况

各污染物参数的综合值与研究区域内 E_{GDP} 的数据见表 2,其中水质数据按照各断面监测年度均值取算术平均值参与计算。

Table 1. Indicators of industrial and population development in study region from 2011 to 2020

表 1. 2011~2020 年研究区域内产业与人口发展指标

年份	GDP(亿元)	第一产业(亿元)	第二产业(亿元)	第三产业(亿元)	人口(万人)	人均收入(元/人)	人口年度增长率
2011	808.01	84.13	481.14	242.74	312.74	25,836	0.1
2012	897.19	92.15	526.09	278.95	312.98	28,666	0.1
2013	989.43	99.61	571.09	318.72	313.33	31,578	0.1
2014	1090.91	106.97	618.51	365.42	314.10	34,731	0.2
2015	1177.53	116.50	646.20	414.83	312.42	37,691	-0.5
2016	1355.18	136.07	720.97	498.14	313.50	43,227	0.3
2017	1495.80	141.40	807.23	547.17	312.38	47,884	-0.4
2018	1616.08	144.62	771.24	700.22	311.87	51,819	-0.2
2019	1797.32	164.72	843.39	789.21	311.85	57,634	0
2020	1895.54	191.32	879.75	824.47	310.78	60,993	-0.3

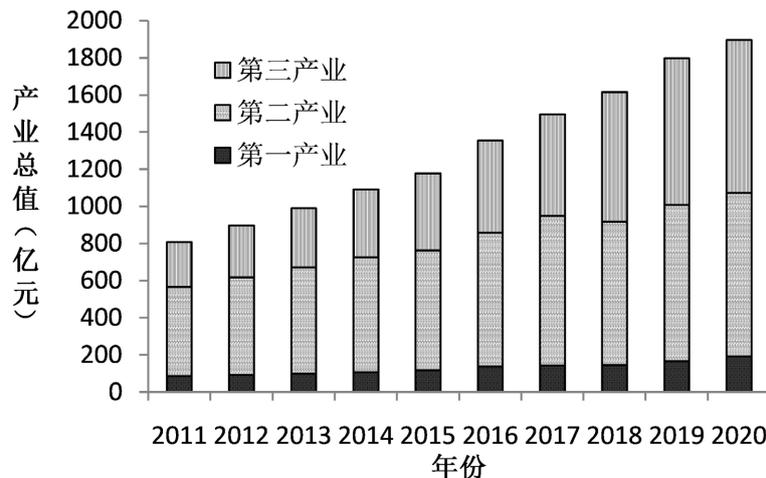


Figure 2. Total value of industries in study region from 2011 to 2020

图 2. 研究区域内 2011~2020 年各产业总值

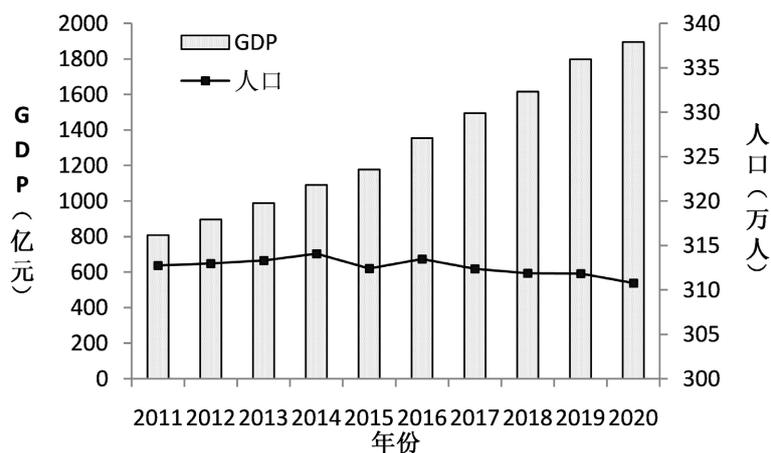


Figure 3. Changes of total industrial value and population in study region from 2011 to 2020
图 3. 研究区域内 2011~2020 年产业总值与人口变化情况

Table 2. Pollution index and per capita GDP
表 2. 污染指标与 E_{GDP}

年份	I_{Mn}	NH_3-N	TP	BOD_5	Zn	F^-	FC	E_{GDP}
			(mg·L ⁻¹)				(个·L ⁻¹)	(元)
2011	1.23	0.084	0.487	0.87	0.0090	0.577	5067	25,836
2012	1.30	0.078	0.427	0.93	0.0120	0.400	5896	28,666
2013	1.43	0.080	0.370	0.93	0.0094	0.413	6000	31,578
2014	1.47	0.049	0.180	0.93	0.0110	0.247	6367	34,731
2015	1.47	0.029	0.140	0.90	0.0030	0.207	5700	37,691
2016	1.40	0.024	0.120	0.87	0.0040	0.177	4771	43,227
2017	1.30	0.024	0.140	0.80	0.0030	0.200	1568	47,884
2018	1.40	0.033	0.095	0.61	0.0018	0.178	1374	51,819
2019	1.30	0.022	0.083	0.70	0.0022	0.163	2596	57,634
2020	1.68	0.031	0.064	0.97	0.0028	0.164	5236	60,993

如表 2 所示,以 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》基本项目标准限值,近 10a 来, I_{Mn} 、 NH_3-N 、 BOD_5 、Zn、 F^- 等项目能满足 I 类水限值要求, FC 能满足 II 类水限值要求, TP 由最初的劣 V 类逐渐上升至 II 类水平。

结合乌江重庆段的空间角度来看,河段内的城镇化水平和其经济的发展速度与其临近河流污染物关系较为密切,如流经城区的河段,其附近人口越密集,就会接纳越多的生活污水,如所流经的河段有较为发达的工业,则来自工业废水的污染物含量就会呈现出升高。根据 2011~2020 年重庆市水资源公报和重庆市生态环境公报,在近 10a 内,总体来说,如不将 FC 这一类生物性指标纳入评价,则各断面的各项污染物大部分处在 II~III 类水质以内,部分甚至常年处于 I 类水平,水质整体较好,总体变化也不大,很少出现监测值超标的情况;在地理空间位置视角中,各项监测值在汛期与非汛期以及年度均值的变化趋势基本呈现一致的状态[19]。

3.3. 河段各类污染物 EKC 曲线

以表 2 中研究区域内 E_{GDP} 作为自变量,各污染物浓度作为因变量,构建 2011~2020 年乌江重庆段 E_{GDP} 与 5 个断面的水质数据的三次回归模型。其变化趋势见图 4 至图 10,各 EKC 曲线的相关参数见表 3。

I_{Mn} 的 EKC 曲线:

$$Y = 9E - 14X^3 - 1E - 8X^2 + 0.0005X - 5.0626 \quad (3)$$

NH_3-N 的 EKC 曲线:

$$Y = -6E - 16X^3 + 2E - 10X^2 - 1E - 5X + 0.3388 \quad (4)$$

TP 的 EKC 曲线:

$$Y = -2E - 14X^3 + 4E - 9X^2 - 0.0002X + 3.4129 \quad (5)$$

BOD_5 的 EKC 曲线:

$$Y = 8E - 14X^3 - 1E - 8X^2 + 0.0004X - 4.0497 \quad (6)$$

Zn 的 EKC 曲线:

$$Y = 8E - 16X^3 - 9E - 11X^2 + 3E - 6X - 0.0245 \quad (7)$$

F^- 的 EKC 曲线:

$$Y = -3E - 14X^3 - 4E - 9X^2 - 0.0002X + 3.7196 \quad (8)$$

FC 的 EKC 曲线:

$$Y = 1E - 9X^3 - 0.0002X^2 + 6.2805X + 73904 \quad (9)$$

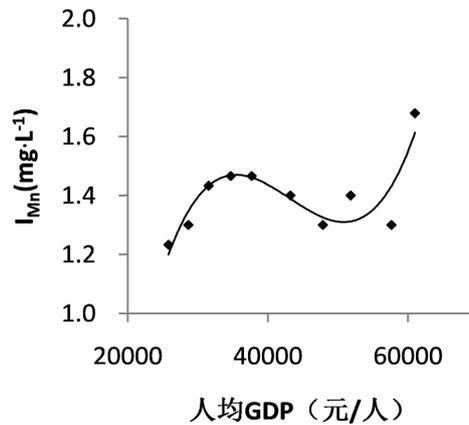


Figure 4. Permanganate index EKC curve

图 4. I_{Mn} 的 EKC 曲线

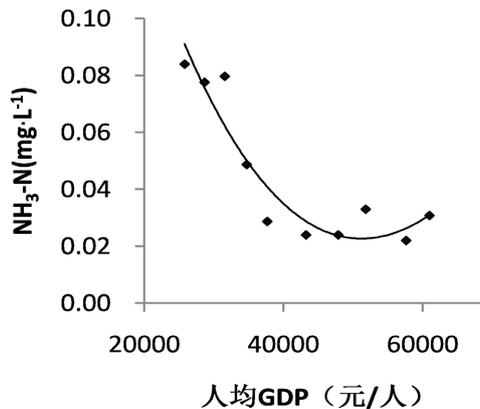


Figure 5. Ammonia nitrogen EKC curve

图 5. NH_3-N 的 EKC 曲线

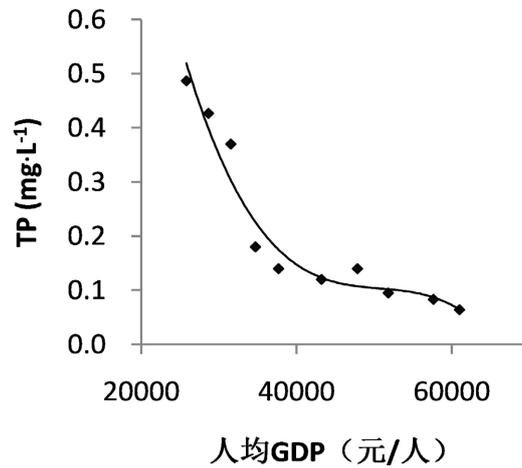


Figure 6. Total phosphorus EKC curve

图 6. TP 的 EKC 曲线

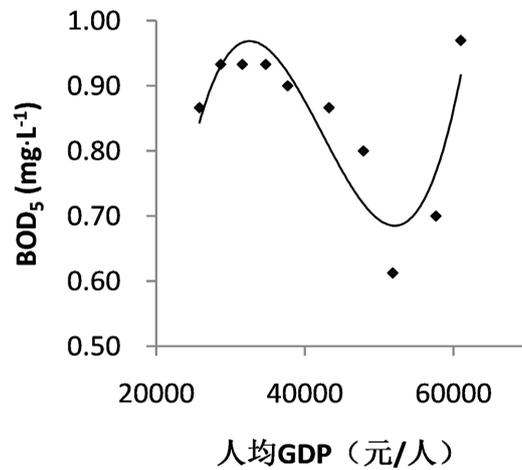


Figure 7. 5-days biochemical oxygen demand EKC curve

图 7. BOD₅ 的 EKC 曲线

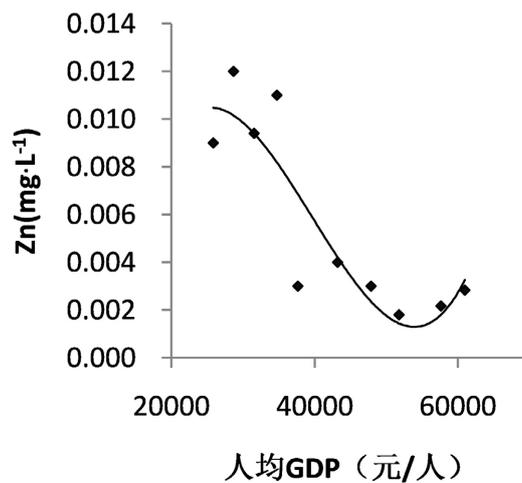


Figure 8. Zinc 的 EKC curve

图 8. Zn 的 EKC 曲线

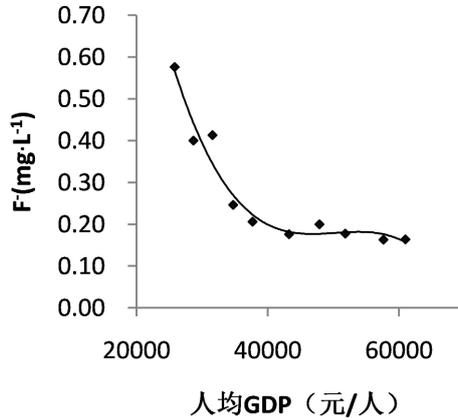


Figure 9. Fluoride compound EKC curve
图 9. F 的 EKC 曲线

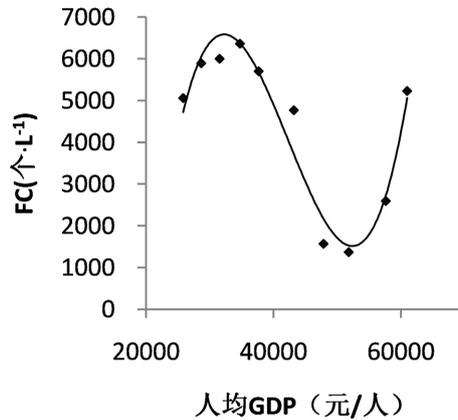


Figure 10. Fecal coliform group EKC curve
图 10. FC 的 EKC 曲线

Table 3. Parameters of EKC curve of each pollutant
表 3. 各污染物 EKC 曲线参数

变量	I_{Mn}	NH_3-N	TP	BOD_5	Zn	F^-	FC
常数项	-5.0626	0.3388	3.4129	-4.0497	-0.0245	3.7196	73904
GDP	0.0005	-1E-5	-0.0002	0.0004	3E-6	-0.0002	6.2805
GDP ²	-1E-8	2E-10	4E-9	-1E-8	-9E-11	4E-09	-0.0002
GDP ³	9E-14	-6E-16	-2E-14	8E-14	8E-16	-3E-14	1E-9

3.4. 曲线分析

1) NH_3-N 、TP、Zn 和 F^- 等污染物浓度随 E_{GDP} 增长呈现出较为明显的下降趋势，对所得的 EKC 曲线的三次函数求导可知其处于 EKC 曲线的右半段。这是因为在经济发展时，受政策因素和技术提升之所利，这些污染物已被大幅度削减排放，从而使得水体中污染物浓度降低，在 EKC 曲线上表现为越过了拐点，与“倒 U”型曲线右半部分的相似。但同时应注意到，在 2015 年后，这几项污染物的下降趋势开始变缓，而 NH_3-N 和 Zn 还有逐渐上升的趋势，表明水体中该类污染物浓度仍有可能反弹回升。

2) I_{Mn} 、 BOD_5 和 FC 等污染物的 EKC 曲线则呈现出较为明显的“N”型特征，这表明该类污染物会随着人

均收入水平的提升,先恶化后又得到改善,但最后仍又继续恶化回升。 I_{Mn} 和 BOD_5 均是表征水体中耗氧物质的含量的综合性参数,FC则是表征水体中耐热性大肠菌群含量的多少,这类污染物的浓度改变对应着水体耗氧性化学物质和微生物种群在水体中的繁殖、生长和消亡情况。这种“N”型曲线出现时,往往意味着有新技术或新的生产方式被应用在经济发展中,而新技术或新的生产方式的应用正逐渐对水体产生不可逆的影响。能够提高产率的新技术和生产方式可能产生新的环境隐患,衍生出新的污染物。只不过在新技术和生产方式出现的初期,人们很难觉察出这些隐患,只有在社会开始重视由此带来的新的环境问题,才会开始对其进行监管和治理。 I_{Mn} 、 BOD_5 和FC随 E_{GDP} 的变化规律符合该理论效应,推测水体可能正受到新技术或新的生产方式影响。

3.5. 水质演变预测

由图4-10可知,选取的7种污染物均与区域内 E_{GDP} 的相关性较为显著,拟合出的曲线效果较好,显示出了环境因子与经济因子相互作用的特性。但同时可以看到,并非所有参数的EKC曲线都会呈现完美的“倒U”型,而是出现多变的特征, NH_3-N 、Zn、TP和F这类污染物的曲线呈现为逐渐下降的特征,而 I_{Mn} 、 BOD_5 和FC则呈现出非常规的“N”型特征。根据各参数的EKC曲线的走势,对各参数在未来一段时间的浓度值进行预测。

NH_3-N 和Zn的拟合曲线也位于EKC“倒U”型曲线的右半段,时间拐点出现在2011年以前,故 NH_3-N 和Zn的污染物浓度将呈现下降趋势,但下降的速度将有所变缓。

TP和F拟合曲线也位于EKC“倒U”型曲线的右半段,TP和F的污染物浓度将呈现继续下降的趋势。

I_{Mn} 、 BOD_5 和FC的拟合曲线则比较特殊,并非传统的“倒U”型,而是呈现出“N”型,而曲线整体则位于曲线拐点的左半段,拐点尚未出现,其污染程度将会出现回升的趋势。

4. 结论与讨论

本文根据GB3838-2002《国家地表水环境质量标准》中的环境质量评价项目,选取了 I_{Mn} 、 NH_3-N 、TP、 BOD_5 、Zn、F和FC等7个项目,与乌江沿岸区域的人均收入水平进行拟合,建立乌江重庆段的EKC曲线,发现选取所有项目符合EKC曲线的相关特征。其中 NH_3-N 、Zn、F和TP等4项参数存在典型的“倒U”型曲线关系,并位于曲线的右侧,在经济增长和 E_{GDP} 提升的同时得到了较好的控制,已出现了变化拐点,且浓度将呈继续下降的趋势;而 I_{Mn} 、 BOD_5 和FC这类则呈现为“N”型三次曲线,其表征的水体污染程度还处于EKC曲线拐点的左侧,拐点尚未出现,其污染物浓度将有出现回升的可能。

近年来国家在资金上对乌江流域环境保护的投入逐步加大,在管理上出台了《重庆市水污染防治条例》和《重庆市河长制条例》等一系列法令条款,对COD、 NH_3-N 和重金属这一类传统型污染物实施了大量长效治理措施,从而促进了部分水质参数EKC曲线拐点的出现甚至提前。随着修复治理的持续推进,大部分污染物都可以被控制在水域可容纳区间内。但同时也应该注意,EKC曲线体现出的拐点仅表示在对应水体中各污染物的参数随着人均收入的提升出现了一定转机,却不意味着其污染程度处于历史最低水平。如果相应控制修复治理措施一旦中断,这些污染物依然有再次恶化的可能。而对于 I_{Mn} 、 BOD_5 和FC这一类尚未得到足够的关注和管控措施的污染物,依然还有进一步恶化的可能,拐点还未出现,后期仍需按照相关要求对其进行科学的处置。

参考文献

- [1] ANDREONI, J., LEVINSON, A. The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of Public Economics*, 2001, 80(2): 269-286. [https://doi.org/10.1016/S0047-2727\(00\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0047-2727(00)00110-9)
- [2] 李鹏涛. 中国环境库兹涅茨曲线的实证分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S1): 22-24.
LI Pengtao. Empirical analysis of environmental Kuznets curve in China. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(S1): 22-24. (in Chinese)

- [3] 张丽华, 叶炜, 林善浪. 我国环境污染治理中的规模经济性研究[J]. 经济问题探索, 2018(9): 140-149.
ZHANG Lihua, YE Wei and LIN Shanlang. Study on scale economy of environmental pollution treatment. Economic Problem Exploration, 2018(9): 140-149. (in Chinese)
- [4] 陈向阳. 环境库兹涅茨曲线的理论与实证研究[J]. 中国经济问题, 2015(3): 51-62.
CHEN Xiangyang. Theoretical and empirical study on environmental Kuznets curve. Economic Problems of China, 2015(3): 51-62. (in Chinese)
- [5] 王迎春, 李梅芳, 王玉宝. 经济增长与生态环境协调发展的实证研究——以山东省为例[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(4): 55-57.
WANG Yingchun, LI Meifang and WANG Yubao. An empirical study on the coordinated development of economic growth and ecological environment—Taking Shandong Province as an example. Environmental Protection and Circular Economy, 2018, 38(4): 55-57. (in Chinese)
- [6] 杨钟贤. 九龙江流域经济发展与水环境质量变化关系研究[J]. 海峡科学, 2017(10): 16-19.
YANG Zhongxian. Study on the relationship between economic development and water environment quality change in Jiulong River basin. Strait Science, 2017(10): 16-19. (in Chinese)
- [7] 王佳, 薛景洁. 河北省经济发展与环境污染关系量化研究——基于 EKC 曲线[J]. 现代商贸工业, 2015, 36(16): 26-28.
WANG Jia, XUE Jingjie. Quantitative study on the relationship between economic development and environmental pollution in Hebei Province. Modern Trade and Industry, 2015, 36(16): 26-28. (in Chinese)
- [8] 郑惠龄. 经济增长与环境污染关系实证研究——以吉林省为例[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(24): 139-141.
ZHENG Huiling. Empirical study on the relationship between economic growth and environmental pollution—A case study of Jilin Province. Modern Trade Industry, 2018, 39(24): 139-141. (in Chinese)
- [9] 朱霞林. 淮河流域水环境污染与经济增长的关系研究[J]. 蚌埠学院学报, 2021, 10(1): 122-128.
ZHU Xialin. Study on the relationship between water environment pollution and economic growth in Huaihe River basin. Journal of Bengbu University, 2021, 10(1): 122-128. (in Chinese)
- [10] 孙语泽. 陕西水环境与经济耦合协调发展研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
SUN Yuze. Study on the coupling and coordinated development of water environment and economy in Shaanxi Province. Master's Thesis, Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 徐浩, 左新宇, 兰峰. 基于环境库兹涅茨曲线方法的三峡库区重庆段水质演变预测[J]. 水利水电快报, 2019, 40(8): 40-44+56.
XU Hao, ZUO Xinyu and LAN Feng. Prediction of water quality evolution in Chongqing section of Three Gorges Reservoir area based on environmental Kuznets curve method. Water Resources and Hydropower Express, 2019, 40(8): 40-44+56. (in Chinese)
- [12] 宋颖, 刘满凤. 基于 EKC 的鄱阳湖生态经济区环境与经济发展关系研究[J]. 科技广场, 2017(7): 159-168.
SONG Ying, LIU Manfeng. Research on the relationship between environment and economic development in Poyang Lake ecological economic zone based on EKC. Science and Technology Square, 2017(7): 159-168. (in Chinese)
- [13] 重庆市人民政府办公厅关于加快实施重庆市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要重大项目的通知[J]. 重庆市人民政府公报, 2021(14): 10-42.
Notice of the general office of Chongqing municipal people's government on accelerating the implementation of the 14th five-year plan for national economic and social development of Chongqing and the major projects of the outline of the long-term goals for 2035. Bulletin of Chongqing Municipal People's Government, 2021(14): 10-42. (in Chinese)
- [14] 刘艺. 南四湖流域水环境质量与社会经济协调发展研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2020.
LIU Yi. Research on the coordinated development of water environment quality and social economy in Nansi Lake basin. Master's Thesis, Jinan: Jinan University, 2020. (in Chinese)
- [15] 李亚婷. 浙江省经济增长与水环境污染的关系研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(7): 136-140.
LI Yating. Study on the relationship between economic growth and water environmental pollution in Zhejiang Province. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(7): 136-140. (in Chinese)
- [16] 张燕, 汪徐. 山东省水环境污染与经济发展的关系研究——基于 EKC 模型的回归分析[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(6): 44-47.
ZHANG Yan, WANG Xu. Study on the relationship between water environmental pollution and economic development in Shandong Province—Regression analysis based on EKC model. Environmental Sanitation Engineering, 2017, 25(6): 44-47. (in Chinese)
- [17] 郭宏. 太子河流域水环境质量与社会经济发展关系研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
GUO Hong. Study on the relationship between water environment quality and socio-economic development in Taizi River basin. Master's Thesis, Shenyang: Liaoning University, 2019. (in Chinese)
- [18] 冯琳, 张婉婷, 张钧珂, 等. 三峡库区面源污染的时空特征及 EKC 分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3325-3333.

FENG Lin, ZHANG Wanting, ZHANG Junke, et al. Temporal and spatial characteristics and EKC analysis of non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area. *Chinese Environmental Science*, 2022, 42(7): 3325-3333. (in Chinese)

- [19] 2020 年重庆市生态环境状况公报[R]. 重庆: 重庆市生态环境局, 2021.
Communique of Chongqing eco-environment status 2020. Chongqing: Chongqing Municipal Bureau of Ecology and Environment, 2021. (in Chinese)