

流域范围内县域生态系统服务

价值库兹涅茨效应研究

——以钱塘江流域为例

王迪 谢慧明¹

(宁波大学 商学院, 浙江 宁波 315211)

【摘要】: 以钱塘江流域范围内的 38 个县域作为研究对象, 检验了生态系统服务价值和经济发展水平之间的库兹涅茨效应, 发现单位面积生态系统服务价值和单位面积 GDP 之间存在倒“N”型的曲线关系, 大部分县域处于生态系统服务价值和 GDP 呈负相关的第一阶段。上城区 1995 年开始进入库兹涅茨曲线的第二阶段, 2000 年、2005 年、2010 年一直处在第二阶段的水平, 滨江区在 2018 年进入生态系统服务价值和 GDP 呈正相关的第二阶段, 上城区在经过第二个拐点之后, 于 2015 年和 2018 年进入库兹涅茨曲线的第三阶段。最后, 引入人口密度、二产占比、建成区面积三个协变量扩展库兹涅茨效应模型, 发现库兹涅茨曲线没有发生明显变化, 仍呈倒“N”型分布, 但是达到拐点需要在更高的 GDP 水平上才能实现。

【关键词】: 库兹涅茨效应 生态系统服务价值 当量因子表

【中图分类号】: F062.2; X171.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)06-147-06

库兹涅茨效应原指收入分配不平等程度和经济发展水平之间的倒“U”型关系。1991 年, Grossman & Krueger^[1] 首先把库兹涅茨曲线应用于生态环境领域, 提出环境库兹涅茨曲线, 指出人们收入水平与生态环境质量之间存在倒“U”型的关系, 即随着人类经济发展水平的提高, 对生态环境会带来负向影响, 当经济发展经历转折点即拐点之后, 生态环境会得到改善, 环境质量有所提升。Grossman & Krueger^[2] 后来指出经济发展对环境质量的影响存在规模效应、结构效应和技术效应。国内很多学者运用不同的指标验证库兹涅茨曲线效应在环境领域的存在性。在研究对象上, 多以可代表环境质量的污染物排放量等指标和可代表经济发展水平的 GDP 等指标对 EKC 理论进行实证分析, 污染物指标包括二氧化碳排放量、大气污染物排放量^[3]、水源污染物排放量^[4]等, 经济发展水平包括人均 GDP、人均收入、外商直接投资水平等。

针对流域范围的 EKC 研究文献相对较少, 刘明辉和刘灿^[5] 在空间视角下研究了 2000—2014 年长江经济带各省份城镇化与环境质量之间的关系; 王惠等^[6] 研究了淮河流域各地级市人均工业三废排放量与人均 GDP 之间的关系; 鲁晓东等^[7] 在地级市尺度上, 以中国八大流域为例, 研究了人均 GDP 与横断面水质之间的关系, 不同的流域呈现出不同的曲线形状。从土地利用类型来看, 仅有文献从单一土地利用类型出发研究资源环境与经济发展之间的协同关系, 如巩芳^[8] 选取草原退化率研究了草原生态环境和人均 GDP 之间的关系; 侯孟阳和姚顺波^[9] 基于省际面板数据研究出我国林业资源与经济发展之间呈倒“N”型关系。

作者简介: 王迪, 硕士研究生, 研究方向为生态经济学。

谢慧明, 博士, 教授, 研究方向为生态经济学。E-mail: xhmdyx@163.com

基金项目: 国家社会科学基金重点项目“跨界流域生态补偿的一般均衡分析及横向转移支付研究”(19AJY007)

从研究尺度来讲，大多文章是在省域和地级市的研究尺度上研究环境和发展之间的关系，县域尺度研究文章较少。从研究对象来讲，已有研究多以污染排放物、生态足迹^[10]或单一的土地利用类型面积^[9]为被解释变量，尚没有文献以综合性的土地利用类型指标为被解释变量。从研究区域来讲，虽然已有文献研究了流域范围内的库兹涅茨效应，但是囿于统计数据皆是根据行政区划统计的，已有研究的研究范围局限于流域流经的行政区划范围，而并非自然地理意义上的流域范围，而流域作为一种自然生成的生态系统，有必要从自然划分的流域范围出发，探讨人类活动对自然流域生态产生的影响。

本文以地理意义上划分的钱塘江流域为研究范围，以反映经济发展水平的 GDP 为解释变量，以反映生态环境质量的生态服务价值为被解释变量，探究库兹涅茨效应在钱塘江流域的存在性。本文借助当量因子表，赋予每一种土地利用类型不同的当量值以衡量各种土地利用类型为生态环境做出的贡献大小，把不具有直接可比性的各种土地利用类型通过当量因子表这个桥梁进行统一，再结合当量因子价格把不同的土地利用类型面积统一成生态系统服务价值，以生态系统服务价值量的变化来表征钱塘江流域生态系统环境质量的变化情况。同时，鉴于本文以自然流域为研究范围，打破了行政规划的限制，应用社会经济统计数据具有一定的局限性，因此文章借助夜间灯光遥感数据调节行政区划范围的统计数据，使之可适用于自然流域范围的研究。最后，本文拟从县域尺度考察库兹涅茨效应，钱塘江流域范围内市辖区的行政范围有较大的变动，统计数据缺失，本文拟借助夜间灯光遥感数据进行补齐。

文章首先采用面板回归模型考察单位面积 GDP 与单位面积生态系统服务价值之间的关系，再以单位面积灯光调整后的 GDP 代替单位面积 GDP 作为解释变量检验模型的稳健性，最后，引入二产占比、人口密度和建成区面积来考察生态环境库兹涅茨曲线的形状及拐点的变化情况。

1 数据来源及说明

钱塘江流域横跨浙江、安徽两个省，流经 38 个县域。不仅风景秀美独绝，更是江两岸人民重要的水源地和航运载体，兼具审美与实用价值。近年来为了保护钱塘江的生态环境，两省人民均付出了巨大的努力，率先实施了跨界流域的生态转移支付制度。本文以钱塘江流域为研究对象，研究钱塘江流域生态环境和经济发展之间的关系，具有重要的现实意义。

如图 1 所示，钱塘江流域范围与钱塘江流经县的行政区划范围有所不同，钱塘江流域流经整个淳安县、建德市、柯城区、兰溪市、龙游县、浦江县、衢江区、义乌市，流经其他县域的部分行政区划范围，具体面积差异情况如表 1 所示。文章对按自然地理标准划分的钱塘江流域进行研究，根据行政区划范围进行统计的社会经济统计数据不适用于自然流域范围内的研究区域。在使用数据时，本文主要采用土地利用遥感监测数据以测算生态系统服务价值，以及经过夜间灯光遥感数据调整过的经济发展统计数据。考虑到土地利用遥感监测数据的可获得性，研究区间为 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年。



图 1 钱塘江流域及流经县范围

1.1 生态系统服务价值数据

生态系统服务价值是典型的衡量地区生态环境质量的指标。Constanza 等^[11]于 1997 年运用当量因子表测算出全球自然资源的生态系统服务价值，国内学者谢高地等^[12]在 Constanza 研究的基础上提出了适合中国资源环境、社会经济发展水平的当量因子表，并在 2015 年进行了改进^[13]。生态系统服务价值通过统计各县域土地利用类型，结合当量因子表计算得出。esv_{it} 为县域 i 第 t 年的单位面积生态服务价值，计算公式为：

$$esv_{it} = ESV_{it} / A_i = \sum_{k=1}^{k=5} A_{itk} \times E_k \times D / A_i \quad (1)$$

式中：ESV_{it} 为县域 i 第 t 年的生态服务价值，A_i 为县域 i 在钱塘江流域范围内的总面积，A_{itk} 为县域 i 第 t 年第 k 种土地利用类型的面积，E_k 表示第 k 种土地利用类型的当量因子，当量因子值借鉴谢高地等提出的当量因子表^[12]，如表 1 所示。D 为谢高地提出的 1 个标准的当量因子的生态系统服务价值量^[13]，为 3406.5 元/hm²。

表 1 中国生态系统单位面积生态服务价值当量表^[12]

一级类型	二级类型	森林	草地	农田	湿地	河流/湖泊	荒漠
供给服务	食物生产	0.33	0.43	1.00	0.36	0.53	0.02
	原材料生产	2.98	0.36	0.39	0.24	0.35	0.04
调节服务	气体调节	4.32	1.50	0.72	2.41	0.51	0.06
	气候调节	4.07	1.56	0.97	13.55	2.06	0.13
	水文调节	4.09	1.52	0.77	13.44	18.77	0.07
	废物处理	1.72	1.32	1.39	14.40	14.85	0.26
支持服务	保持土壤	4.02	2.24	1.47	1.99	0.41	0.17
	维持生物多样性	4.51	1.87	1.02	3.69	3.43	0.40
文化服务	提供美学景观	2.08	0.87	0.17	4.69	4.44	0.24
合计		28.12	11.67	7.9	54.77	45.35	1.39

本文所用 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年的中国土地利用遥感监测 1km 栅格数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心，以 Landsat8、LandsatTM/ETM 遥感影像为主要数据源，通过人工目视解译生成^[14]。将土地利用数据在 Arcgis10.2 中重分类为农田、森林、草地、河流、湿地、建成区 6 种，其中，建成区不具有生态系统服务价值。以 2018 年为例，钱塘江流域范围内 38 个县域的单位面积生态系统服务价值如图 2 所示。

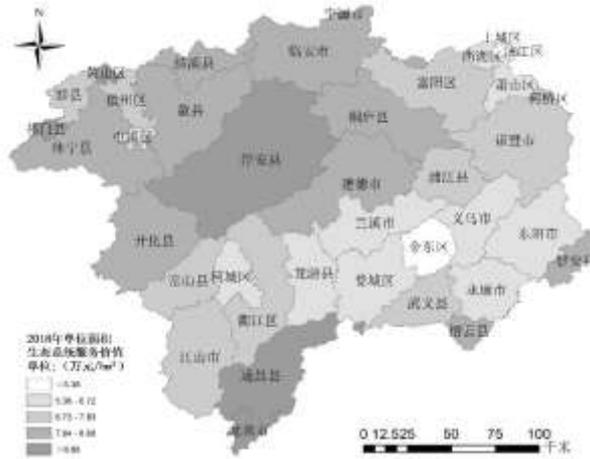


图 2 2018 年钱塘江流域各县域单位面积生态系统服务价值示意图

1.2 夜间灯光遥感数据

本文所使用的 DMS/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光遥感数据在美国国家地球物理数据中心(NGDC)网站(<https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/dmsp.html>)下载得到。

首先, 由于 DMS/OLS 夜间灯光影像没有经过辐射定标处理, 存在像元饱和、数据不连续等问题, 文章借鉴曹子阳等^[15]的不变目标区域法选取鹤岗市为不变目标区域对夜间灯光影像进行校正。选取经过辐射定标的 F16 卫星传感器获取的 2006 年夜间灯光影像作为参考影像, 选取 F121995、F142000、F152000、F152005、F162005、F182010、F182013 年数据为待校正影像, 在 Arcgis10.2 中按矢量数据裁剪, 进行兰伯特投影转换, 并把像元重采样为 1km² 大小, 提取各像元的 DN 值后, 将待校正影像与参考影像做回归分析, 将得到的校正方程和校正参数应用到钱塘江流域, 得到钱塘江流域校正好的夜间灯光遥感数据, 对于 2000 年、2005 年有两种夜间灯光遥感数据的年份, 选择拟合程度较好的年份进行校正。

其次, 是 DMS/OLS 夜间灯光影像和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像之间的相互校正, 本文借鉴梁丽等^[16]的方法, 选取研究区范围内较为发达的杭州市为不变目标区域, 选取 DMS/OLS2013 年数据和 NPP/VIIRS2013 年数据进行回归得到回归方程和回归参数。将得到的回归方程和回归参数代入 NPP/VIIRS 夜间影像中, 按掩膜提取出钱塘江流域范围内 2015 年、2018 年的夜间灯光遥感数据。

1.3 经济社会统计数据

本文选取 GDP、人口数量、第二产业产值占总产值的比重作为经济社会数据指标, 数据来源于各个县市的统计年鉴。GDP 作为主要的解释变量, 以 1995 年为不变价通过 GDP 平减指数进行处理。其中, 滨江区、上城区、金东区、婺城区、黄山区、徽州区、屯溪区 2000 年和 1995 年的 GDP 统计数据缺失, 西湖区、祁门县、歙县、休宁县、黟县 1995 年的 GDP 统计数据缺失, 采用夜间灯光遥感数据进行补齐。徐康宁等^[17]指出夜间灯光遥感监测数据与 GDP 之间存在很强的线性相关关系, 可作为 GDP 的代理变量使用。

$$GDP_{it} = GDP_{i,t+1} \times \frac{TDN_{it}}{TDN_{i,t+1}} \quad (2)$$

式中： GDP_{it} 为第 i 个县域第 t 年的国民生产总值， $GDP_{i,t+1}$ 为第 i 个县域第 $t+1$ 年的国民生产总值。夜间灯光数据采用像元 DN 值衡量灯光强度，DN 值越大代表像元越亮，经济发展水平越高。 TDN_{it} 为第 i 个县域第 t 年的夜间灯光总 DN 值， $TDN_{i,t+1}$ 为第 i 个县域第 $t+1$ 年的夜间灯光总 DN 值。

由于部分县域如宁国市、临安市等只有部分区域处在钱塘江流域范围内，而 GDP 代表的是完整行政区划的经济发展水平，若只是简单地通过面积平均 GDP，难免存在误差，因此，通过夜间灯光遥感数据对流域范围内的 GDP 进行调整。调整公式为：

$$TGDP_{it} = GDP_{it} \times \frac{BDN_{it}}{TDN_{it}} \quad (3)$$

式中： $TGDP_{it}$ 为经过夜间灯光数据调整后的流域范围内县域 i 第 t 年的 GDP， GDP_{it} 为县域 i 第 t 年的 GDP， BDN_{it} 为流域范围内县域 i 第 t 年的夜间灯光总 DN 值， TDN_{it} 为县域 i 第 t 年的夜间灯光总 DN 值。

以 2018 年为例，用夜间灯光遥感数据调整后的 GDP 数据如表 2 所示。

表 2 GDP 数据调整前后对比

序号	名称	流域内实际 GDP/亿元	流域内灯光调整 GDP/亿元	流经县实际 GDP/亿元	序号	名称	流域内实际 GDP/亿元	流域内灯光调整 GDP/亿元	流经县实际 GDP/亿元
1	滨江区	738.77	710.27	854.85	20	上城区	440.28	505.66	697.91
2	淳安县	153.91	153.48	153.91	21	遂昌县	53.71	37.18	73.75
3	常山县	83.20	84.50	88.87	22	桐庐县	248.09	247.92	248.09
4	东阳市	325.37	353.79	370.26	23	武义县	88.49	133.50	156.07
5	富阳区	483.02	491.13	483.93	24	婺城区	359.14	370.24	359.32
6	建德市	232.85	230.74	232.85	25	西湖区	431.23	373.82	760.93
7	江山市	170.38	177.54	190.17	26	萧山区	397.52	273.05	1333.14
8	金东区	127.51	122.74	127.51	27	义乌市	789.94	795.76	789.94
9	缙云县	29.74	41.17	150.03	28	永康市	346.03	348.37	352.98
10	开化县	73.71	76.19	83.54	29	诸暨市	774.58	773.43	775.47
11	柯城区	121.89	120.96	121.89	30	黄山区	3.20	3.41	59.87
12	柯桥区	13.84	11.63	888.96	31	徽州区	45.52	45.34	45.63
13	兰溪市	237.42	230.04	237.42	32	绩溪县	30.53	36.39	48.00
14	临安市	247.91	161.29	341.54	33	宁国市	1.59	0.63	211.13
15	龙泉市	8.59	4.39	84.51	34	祁门县	2.69	2.54	44.67

16	龙游县	153.15	152.90	153.15	35	屯溪区	97.06	93.99	97.06
17	磐安县	19.78	25.76	61.15	36	歙县	110.26	112.29	110.27
18	浦江县	140.43	141.47	140.43	37	休宁县	57.24	58.15	59.01
19	衢江区	110.52	110.72	110.52	38	黟县	10.80	12.97	21.01

陈晴等^[18]的研究结果表明，夜间灯光亮度值与人口数量之间具有很强的线性相关关系，因此采用夜间灯光数据调节人口数据，调节公式如下：

$$TP_{it} = P_{it} \times \frac{BDN_{it}}{TDN_{it}} \quad (4)$$

式中： TP_{it} 为经过夜间灯光数据调整后的流域范围内县域 i 第 t 年的人口数量， P_{it} 为县域 i 第 t 年的人口数量， BDN_{it} 为流域范围内县域 i 第 t 年的夜间灯光总 DN 值， TDN_{it} 为县域 i 第 t 年的夜间灯光总 DN 值。

第二产业产值占国内生产总值比重的数据根据各县市统计年鉴整理得出，比值数据不再进行调整。由于部分市辖区等县域在 1995—2018 年间行政区划发生过变动等原因，统计年鉴数据缺失，单位面积人口、二产占比统计数据不可得，因此单位面积人口、二产占比、建成区面积的样本量只有 201 个，各变量的描述性统计见表 3。

表 3 数据描述性统计

变量名称	单位	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
单位面积生态系统服务价值 (esv)	万元/hm ²	228	7.587	1.191	3.854	10.495
单位面积实际 GDP (gdp)	亿元/hm ²	228	0.007	0.030	0	0.286
单位面积灯光调整 GDP (tgdp)	亿元/hm ²	228	0.007	0.033	0	0.329
单位面积人口	万人/hm ²	201	34.760	25.281	0	108.251
二产占比	—	201	0.606	0.175	0.145	0.929
建成区面积	公顷	201	3615.92	3978.058	0	18600

2 库兹涅茨效应模型设定及回归结果

考虑到经济统计区划与自然分割流域界限存在研究范围上的差异性，分别选取流域范围内单位面积实际 GDP 与经过灯光数据调整的流域范围内单位面积 GDP 作为解释变量，与生态系统服务价值进行面板回归。

2.1 生态系统服务价值库兹涅茨效应模型设定

根据库兹涅茨效应的基本假设，经济发展水平与生态系统服务价值之间存在曲线关系，考虑到二次函数模型是三次函数模型三次项为零时的特殊情况，本文将模型设定为三次函数模型，将回归模型设定如下：

$$esv_{it} = \alpha_1 gdp_{it} + \alpha_2 gdp_{it}^2 + \alpha_3 gdp_{it}^3 + \gamma_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中： gdp_{it} 为县域*i*第*t*年的单位面积国内生产总值。 γ_{it} 是常数项， ε 是随机扰动项， α_1 、 α_2 、 α_3 反映出生态系统服务价值和经济发展水平之间的关系，当 $\alpha_3 > 0$ 时，曲线呈正“N”型分布，若 $\Delta = 4\alpha_2^2 - 12\alpha_3\alpha_1 > 0$ ，曲线存在两个拐点，否则呈单调递增趋势；当 $\alpha_3 < 0$ 时，曲线呈倒“N”型分布，若 $\Delta = 4\alpha_2^2 - 12\alpha_3\alpha_1 < 0$ ，曲线存在两个拐点，否则呈单调递减趋势。

考虑到按照行政区划统计的GDP数据不能准确反映钱塘江流域范围内的县域经济发展水平，因此，采用经过夜间灯光数据调整后的GDP数据作为解释变量进行面板回归，调整方法如公式(3)所示，用经过夜间灯光数据调整后的单位面积GDP对公式(5)重新进行回归，以此作为对公式(5)回归结果的再检验。设定回归模型为：

$$esv_{it} = \beta_1 tgd_{it} + \beta_2 tgd_{it}^2 + \beta_3 tgd_{it}^3 + \delta_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

2.2 生态系统服务价值库兹涅茨效应模型回归结果

为了保证回归的稳健性，分别选用实际GDP和灯光数据调整后的GDP两种数据作为经济发展水平的指标检验库兹涅茨效应的存在性、曲线形状及拐点情况。本文用stata15.0采用面板回归的方式对数据进行回归，通过Hausman检验结果可知采用固定效应模型，结果如表4所示。

表4 库兹涅茨效应模型面板回归结果

esv		esv	
gdp	-37.89***	tgdp	-34.83***
	(-10.16)		(-10.78)
gdp ²	379.9***	tgdp ²	313.5***
	(10.95)		(11.93)
gdp ³	-1057.2***	tgdp ³	-758.1***
	(-12.40)		(-13.33)
常数项	7.690***	常数项	7.682***
	(556.87)		(584.63)
N	228	N	228
adj. R ²	0.685	adj. R ²	0.700
P	0.0000	P	0.0000

F	177.65	F	189.64
Hausman	0.0001	Hausman	0.0000
估计方法	固定效应	估计方法	固定效应
曲线形状	倒“N”型	曲线形状	倒“N”型

GDP 指标选为单位面积实际 GDP 进行面板回归得到回归方程为：

$$esv_{it} = -37.89gdp_{it} + 379.9gdp_{it}^2 - 1057.2gdp_{it}^3 + 7.690 \quad (6)$$

式中： esv_{it} 为县域 i 第 t 年的单位面积生态服务价值， gdp_{it} 为县域 i 第 t 年的单位面积国民生产总值。

回归方程求一阶导数并令其等于 0 可计算得到回归方程的两个拐点，拐点把倒“N”型曲线分成了三个阶段。由表 5 可知，解释变量为单位面积 GDP 时，在库兹涅茨曲线的第一阶段，单位面积 GDP 在 (0, 0.071] 区间上时，生态系统服务价值随着经济发展水平的提高而减少，人们在发展经济时侵占了可以提供生态系统服务价值的土地，大幅扩张建设用地，目前，钱塘江流域范围内的大多数县域都处在这一阶段。在库兹涅茨效应的第二阶段，单位面积 GDP 在 (0.071, 0.169] 区间上时，生态系统服务价值随着经济发展水平的提高而增加，跨越过第一个拐点的县域在发展经济的同时，注重区域范围生态环境的改善和土地覆被的修复，经济发展不以牺牲生态环境为代价，追求经济和环境的协同发展，单位面积生态系统服务价值在这一阶段内达到峰值，钱塘江流域范围内上城区在 1995 年进入这一阶段、滨江区在 2018 年进入这一阶段，开始植树种草，注重生态环境质量的提升，上城区和滨江区属于杭州市市辖区，在钱塘江流域下游，经济的发展没有导致生态环境的恶化，下游人们已经开始注重生态环境的保护和修复。在库兹涅茨效应的第三阶段，单位面积 GDP 在 (0.169, 0.286] 区间上时，已达到饱和的生态系统服务价值随着经济发展水平的提高而再度减少，上城区在 2015 年跨过第二个拐点出现生态系统服务价值下降的趋势。

表 5 库兹涅茨效应模型拐点及各县域分布情况

	拐点		区间	趋势	县域
	拐点 1	拐点 2			
单位面积实际 GDP	0.071	0.169	(0, 0.071]	↓	其他县域
			(0.071, 0.169]	↑	上城区(1995 年)、上城区(2000 年) 上城区(2005 年)、上城区(2010 年)、滨江区(2018 年)
			(0.169, 0.286]	↓	上城区(2015 年)、上城区(2018 年)

GDP 指标选为灯光调整后的单位面积 GDP 时，库兹涅茨曲线形状仍旧为倒“N”型，经计算得两个拐点为 0.077、0.199，与式(5)回归的两个拐点 0.071、0.169 相差不大。大部分县域分布在库兹涅茨效应的第一阶段即 (0, 0.077]，上城区在 1995 年进入库兹涅茨效应的第二阶段，上城区在 2015 年、滨江区在 2018 年进入库兹涅茨效应的第三个阶段。拐点出现的单位面积 GDP 水平与式(5)回归结果不完全一致，但是差距较小，且 6 个年份中各个县域所处的库兹涅茨效应阶段与式(5)结果完全一致，表

明表 4 中的面板回归结果具有一定的稳健性。

3 库兹涅茨效应模型稳健性再检验

为了进一步检验经济发展水平与生态环境质量之间的库兹涅茨效应，引入单位面积人口数量、二产占比和建成区面积作为协变量进行面板回归。Grossman 和 Kruger^[2]提出经济发展对环境的影响可分为规模效应、结构效应和技术效应，单位面积 GDP、单位面积人口数量和建成区面积可以解释规模效应，二产占比可以解释结构效应。囿于统计数据缺失，剔除掉数据不全的研究样本，使用 201 个样本参与回归。设定回归模型如下：

$$esv_{it} = \gamma_1 gdp_{it} + \gamma_2 gdp_{it}^2 + \gamma_3 gdp_{it}^3 + E_{it} + \gamma_5 p_{it} + \gamma_6 C_{it} + \delta_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中： E_{it} 为方程中加入的协变量：单位面积人口数量、第二产业占国民生产总值的比重、建成区面积。 δ_{it} 是常数项， ε 是随机扰动项， γ_1 、 γ_2 、 γ_3 反映出在考虑了二产占比、人口密度和建成区面积的情况下，生态系统服务价值和经济发展水平之间的曲线关系。基于稳健性的考虑，采用灯光调整后的单位面积 GDP 作为解释变量代替式(7)中单位面积 GDP 再做面板回归。

在加了二产占比、人口密度、建成区面积三个协变量后，单位面积 GDP 与单位面积生态系统服务价值仍然是显著的三次函数关系，库兹涅茨曲线呈倒“N”型，与表 4 中得到的曲线形状相同，表明表 4 中的回归结果具备稳健性。

加入协变量后的库兹涅茨效应模型三次函数的各个系数与库兹涅茨效应模型的系数稍有不同，导致“N”型曲线拐点出现的单位面积 GDP 水平发生了变化。加入了协变量后，用单位面积实际 GDP 作为解释变量时，拐点由 0.071 和 0.169 变成 0.098 和 0.171，即两个拐点在更高的经济发展水平上才能实现。考虑用灯光数据调整后的 GDP 为解释变量的情况，拐点由 0.077 和 0.199 变成 0.099 和 0.212。表明考虑到人口密度、二产占比和建成区面积后，拐点需要在更高的 GDP 水平上才能实现。进一步考察各个县域所处的库兹涅茨曲线的阶段，扩展库兹涅茨效应模型与库兹涅茨效应模型大部分结果都吻合，但是以单位面积实际 GDP 为解释变量时，2005 年上城区的单位面积 GDP 为 0.087，处在库兹涅茨曲线的下降阶段，而非库兹涅茨效应模型中的上升阶段，结果如表 6 所示。以单位面积调整灯光 GDP 为解释变量时，钱塘江流域各县域在库兹涅茨曲线上所处的阶段完全一致，选用单位面积调整灯光 GDP 来代表流域范围内的经济发展水平时，结果更具稳健性。

表 6 库兹涅茨效应模型拐点及各县域分布情况再检验

解释变量	拐点		区间	趋势	县域
	拐点 1	拐点 2			
单位面积实际 GDP	0.098	0.171	(0, 0.098]	↓	其他县域
			(0.098, 0.171]	↑	上城区(1995 年)、上城区(2000 年)、 上城区(2010 年)、滨江区(2018 年)
			(0.171, 0.286]	↓	上城区(2015 年)、上城区(2018 年)
单位面积灯光调整 GDP	0.099	0.212	(0, 0.099]	↓	其他县域
			(0.099, 0.212]	↑	上城区(1995 年)、上城区(2000 年)、 上城区(2005 年)、上城区(2010 年)、滨江区(2018 年)

			(0.212, 0.329]	↓	上城区(2015年)、上城区(2018年)
--	--	--	----------------	---	-----------------------

4 结论与建议

第一，总体来看，单位面积实际 GDP 和单位面积生态系统服务价值之间具有显著的库兹涅茨效应，库兹涅茨曲线呈倒“N”型。单位面积实际 GDP 和单位面积生态系统服务价值之间的曲线呈现出先负相关、后正相关、再负相关的关系。对于尚处在第一阶段的县域，政府应通过提供专项资金、实施生态补偿、将生态质量纳入政绩考核制度等方式鼓励各地提高当地的生态环境质量，缩短到达拐点的时间，提高到拐点时的生态服务水平。对于跨过第二阶段、处于第三阶段的县域来说，政府应维持住生态环境与经济平衡，避免再次陷入生态环境与经济发展两难全的困境。

第二，不论是以单位面积实际 GDP 还是以单位面积灯光调整 GDP 作为解释变量，库兹涅茨曲线都是显著的倒“N”型，且钱塘江流域范围内 38 个县域在库兹涅茨曲线中所处的位置是一致的。在加入二产占比、人口密度、建成区面积作为方程协变量时，曲线形状及各县域大体分布情况没有发生大的变化，即单位面积 GDP 与单位面积生态系统服务价值之间的函数关系具有稳健性。

第三，经夜间灯光遥感监测数据调整后的 GDP 做解释变量时，调整 R^2 更高，方程拟合效果更好。且在扩展库兹涅茨效应模型进行面板回归时，与未经调整过的 GDP 相比，使用灯光数据调整过的 GDP 做解释变量时，结果更具稳定性。表明根据行政区划划分的界限和根据自然地理条件划分的流域界限会导致数据不一致，而采用夜间灯光遥感监测数据对经济统计数据进行调整具有有效性。

第四，在考虑到人口密度数据、二产占比数据和建成区面积因素后，要达到库兹涅茨曲线的拐点需要更高的经济发展水平，即达到拐点的难度增加。各县域可以从降低经济结构中二产占比、减少建成区面积的角度出发，提高当地的生态系统服务水平。一方面，可以通过大力发展以旅游、文创、会展等为主的第三产业，引进高效率的战略性新兴产业，提高现有产业的技术水平，让绿水青山带来金山银山，实现由绿水青山到金山银山的转化。另一方面，在满足社会经济发展基本需要的基础上，应合理规划建成区的分布，避免因城市的扩张而侵占了可以提供生态系统服务的土地利用类型面积。

参考文献:

[1]Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement[R]. Cambridge:National Bureau of Economic Research, 1991.

[2]Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2):353-377.

[3]曾翔, 沈继红. 江浙沪三地城市大气污染物排放的环境库兹涅茨曲线再检验[J]. 宏观经济研究, 2017(6): 121-131.

[4]Mythili G, Mukherjee S. Examining environmental Kuznets curve for river effluents in India[J]. Environment, Development and Sustainability, 2011, 13(3):627-640.

[5]刘明辉, 刘灿. 长江流域城镇化外溢与环境库兹涅茨曲线[J]. 现代经济探讨, 2017(6): 104-115.

[6]王惠, 王树乔, 李小聪. 淮河流域的工业环境库兹涅茨曲线再检验——来自 2005—2014 年安徽省地级市面板数据[J]. 水

利经济, 2017(2): 22-25.

[7]鲁晓东, 许罗丹, 熊莹. 水资源环境与经济增长: EKC 假说在中国八大流域的表现[J]. 经济管理, 2016(1): 20-29.

[8]巩芳. 生态补偿机制对草原生态环境库兹尼茨曲线的优化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016(3): 38-42.

[9]侯孟阳, 姚顺波. 森林资源与经济增长的 EKC 关系检验——基于省际面板数据的实证研究[J]. 林业科学, 2019(12): 113-122.

[10]李昌峰, 刘焕, 黄晔. 基于水足迹理论的 EKC 分析及生态补偿核算——以太湖流域为例[J]. 南京晓庄学院学报, 2014(6): 76-81.

[11]Constanza R, D' Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.

[12]谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008(5): 911-919.

[13]谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015(8): 1243-1254.

[14]徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC) [DB/OL]. [2018-07-02]. <http://www.resdc.cn/doi/doi.aspx?doiid=54>.

[15]曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015(9): 1092-1102.

[16]梁丽, 边金虎, 李爱农, 等. 中巴经济走廊 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜光数据辐射一致性校正[J]. 遥感学报, 2020(2): 149-160.

[17]徐康宁, 陈丰龙, 刘修岩. 中国经济增长的真实性的检验: 基于全球夜间灯光数据的检验[J]. 经济研究, 2015(9): 17-29.

[18]陈晴, 侯西勇, 吴莉. 基于土地利用数据和夜间灯光数据的人口空间化模型对比分析——以黄河三角洲高效生态经济区为例[J]. 人文地理, 2014(5): 94-100.