

基于加权主成分距离聚类的江苏省环境质量评价

陈军飞^{a, b} 陈琳^{b1}

(河海大学 a. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室;

b. 商学院, 江苏 南京 211100)

【摘要】: 基于污染物排放和环境保护视角, 构建包含水、空气、固体废物、声环境的环境质量评价指标体系, 采用因子分析对指标进行降维, 再采用加权主成分距离聚类分析方法对江苏省 2012—2016 年的环境质量进行分类评价。结果表明: 2012—2016 年徐州、苏州的环境质量状况最差, 环境污染最严重, 南京、盐城其次, 其他城市环境质量较乐观稳定; 江苏省环境质量整体不均衡, 呈现区域性特征。根据因子分析和加权主成分距离聚类分析结果, 分析了江苏环境质量存在的问题, 认为该省环境质量与经济发展方式关系密切。根据江苏经济发展特点, 对该省的环境治理提出了改进建议。

【关键词】: 环境质量评价 因子分析 加权主成分距离 聚类分析

【中图分类号】: F821 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1005—8141 (2018) 10—1383—06

人口快速增长、城市化进程加快使环境问题日益显现, 大气污染、水体污染等各种环境问题频发, 引起了社会的广泛关注。2016 年我国“十三五”规划指出, 当前工业化、城镇化、农业现代化的任务尚未完成, 生态环境保护仍面临着巨大的压力, 需发展资源节约循环利用关键技术和生态治理技术, 加快节能环保产业发展^[1]。2017 年我国发布的《关于推进环保设施和城市污水垃圾处理设施向公众开放的指导意见》, 主要用于指导各地环境监测、城市污水处理、城市生活垃圾处理、危险废物处理。国家越来越重视经济发展方式的转变和生态环境的保护, 以促进可持续发展。

关于环境状况的研究, 学者们从不同角度进行了研究: 一是从经济与环境研究角度, 研究经济增长与环境污染之间的关系^[2-5]; 二是建立环境状况指标体系, 对区域环境质量进行了分类与评价^[6-9]。还有学者对环境状况进行了细分, 研究影响环境质量的大气、水、工业污染等^[10]。从研究方法看, 环境质量评价方法主要包括指数法、主成分法、不确定等方法。Liu 等通过构造相关指数研究了经济增长与环境状况之间的关系^[11]; Tran 等采用主成分法对环境进行了总体评价^[12]; 刘志国等采用灰色系统评价方法、空气污染综合指数等方法评价了我国西部河谷型城市的环境质量, 并分析了其环境变化的趋势^[13]。已有研究发现, 关于环境质量的研究取得了较好的成果, 环境质量与城市的经济发展存在密不可分的关系。随着经济发展, 环境污染将会先上升后下降; 当经济发展到一定程度时, 环境污染会逐渐改善, 环境污染与经济增长呈现倒“U”型关系, 即环境库兹涅茨曲线。中国社会科学院指出, 我国仍处在环境库兹涅茨曲线上升时期, 但有望在 2030 年甚至更早接近曲线峰值。不少学者采用综合评价方法对区域环境质量进行了评价, 但已有研究在指标选取上选择的指标不全面。近年大气污染、PM_{2.5}、酸雨、农业面源对环境的影响越来越大, 引起了社会的广泛关注。符璐等认为环境空气质量评价需依据空气中的 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫等影响因子的含量进行评价^[14]; 耶鲁发布的《2016 年全球环境绩效指数报告》显示, 我国仍然是 PM_{2.5} 超标重灾区, 因此本文把 PM_{2.5}、酸雨、臭氧等指标纳入考虑范围。

作者简介: 陈军飞 (1973—), 男, 浙江省武义人, 教授, 博士生导师, 主要从事管理科学和资源环境管理研究。陈琳 (1992—), 女, 江苏省盐城人, 硕士研究生, 主要从事管理科学和资源环境管理研究。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (编号: 2017YFC0404600); 国家自然科学基金重点项目 (编号: 71433003); 江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人培养计划项目 (编号: 2014)。

此外,声环境越来越受到重视,本文把声环境也纳入指标体系,使指标体系更加全面^[16]。在需要考虑的指标体系中,不同因子对环境的影响程度不同,且因子之间存在相关性。

江苏省作为我国的经济大省,战略地位突出,是长江经济带的重要组成部分。近年来江苏省的城市化水平快速增长,同时也产生了一些环境问题,经济发展、人口集聚、资源环境约束之间的矛盾越来越突出。2017年江苏省把“生态环境高质量”作为“六个高质量”之一,提出要大力补齐生态环境突出短板,如何实现生态环境的协调发展是该省可持续发展研究中亟待解决的问题。2017年江苏省环境状况公报显示,2017年该省共发生了《7次重污染天气过程》,且13个省辖市环境空气质量均未达到国家二级标准要求,经济与环境质量发展不平衡、治污力度不够、公众环保意识薄弱。鉴于环境质量和污染排放与污染治理具有密切的相关关系,本文通过建立反映环境质量的指标体系,运用因子分析和加权主成分距离聚类分析法,对2012—2016年江苏省13个省辖市的环境质量进行了评价研究,得出其环境状况分类与环境质量的影响因素,由此为城市环境污染治理与可持续发展提供科学依据。

1 江苏环境质量评价指标体系构建

由于指标体系的建立对评价结果具有较大的影响,为了严谨和客观,本文以江苏省13个省辖市作为研究对象,根据科学性、可操作性和综合性原则,采用专家咨询法,并根据江苏省环境状况公报对环境状况的总结,充分考虑水环境、空气环境、固体废物和声环境,综合考虑工业、农业、居民生活方面的环境状况,综合环境相关研究成果^[16-20],选取了与环境质量密切相关的16项指标,见表1。其中,化学需氧量排放来源于包括工业源、农业源、城镇生活源、集中治理设施;氨氮排放量来源于包括工业源、农业源、城镇生活源、集中治理设施;二氧化硫排放来源包括工业源、城镇生活源、集中式治理设施;氮氧化物、烟(粉)尘排放来源于包括工业源、城镇生活源、机动车、集中式治理设施。由于PM2.5数据是从2012年开始统计,所以本文选取江苏省2012—2016年5年的数据进行分析。

表 1 环境污染程度评价指标体系

指标	指标内容	符号	单位
水环境	工业废水排放量	X1	万 t
	城镇生活污水排放量	X2	万 t
	集中式治理设施污水排放量	X3	万 t
	化学需氧量排放量	X4	万 t
	氨氮排放量	X5	万 t
空气环境	PM2.5 排放年均值	X6	mg / m ³
	PM10 排放年均值	X7	mg / m ³
	二氧化硫排放量	X8	万 t
	一氧化碳排放年均值	X9	mg / m ³
	臭氧排放年均值	X10	mg / m ³
	酸雨平均发生率	X11	%
	氮氧化物排放量	X12	万 t
	烟(粉)尘排放量	X13	万 t
固体废物	一般工业固体废弃物产生量	X14	万 t
	一般工业固体废弃物利用量	X15	万 t
声环境	区域环境噪声均值	X16	分贝

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文原始指标数据来源于 2013—2017 年的《江苏省统计年鉴》和各省辖市统计年鉴、环境状况公报。由于各个指标之间在量纲上的不统一,且各指标属于不同类型,有些指标的属性值越大越好(如一般工业固体废弃物利用量),而有些指标的属性值越小越好(如工业废水排放量、城镇生活污水排放量等),所以将原始数据采用极大值标准化方法进行指标属性值的标准化,以消除变量间在量纲和类型上的不同以及对聚类结果的影响。

对正向指标:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \dots\dots\dots (1)$$

对负向指标:

$$X_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \dots\dots\dots (2)$$

式中, X_i 为标准化后的指标值; x_i 为指标的实际值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为指标实际值的最大值和最小值。

2.2 研究方法

关于环境质量的评价方法主要包括综合指数法、灰色系统评价方法、层次分析法、模糊数学法等,各类方法各有优缺点。综合指数法具有不可比性,灰色系统评价方法分辨率较低,模糊数学法具有不准确性^[21, 22],本文采用改进的聚类分析方法对环境质量进行评价。聚类分析是依据研究对象的个体特征,对其进行分类的方法,其基本思想为:先将 n 个样品各自作为一类,然后规定样品之间的距离和类与类之间的距离,再进行逐级合并,直至所有样品都成为一类为止^[23]。指标之间高度相关性导致了传统聚类分析方法无法获得良好的分类效果,已有研究采用聚类分析进行评价多采用一般主成分聚类分析方法进行评价^[24]。一般主成分聚类分析方法克服了指标之间高度相关性对分类结果的影响,能较好地解决多指标评价的要求,但却忽略了不同主成分因子对分类重要性的客观差异,进而影响到分类的准确性^[25];而加权主成分距离聚类克服了一般主成分聚类的缺点,具有良好的实用性。本文采用加权主成分距离聚类分析法对江苏省各省辖市的环境质量状况进行分类评价。

设 $F_1, F_2, \dots, F_s$ ($s \leq p$) 为由 p 维的指标向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ 提取的主成分因子列向量, $I_1, I_2, \dots, I_n$ 为提取主成分因子后对应的样本行向量,表示第 i 个样本的第 j 个主成分因子 ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, s$)。 n 个样本在 s 维空间构成的数据矩阵为:

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_s) = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1s} \\ F_{21} & F_{22} & \dots & F_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n1} & F_{n2} & \dots & F_{ns} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

假设所提取主成分因子 $F_1, F_2, \dots, F_s$ 对应的特征值分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$, 且, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_s$, β_k 为主成分因子 F_k 所对应的特征权重。

$$\beta_k = \lambda_k / \sum_{k=1}^s \lambda_k \quad (k = 1, 2, \dots, s) \dots\dots\dots (4)$$

$\beta_1 \geq \beta_2 \geq \dots \geq \beta_s$, 且 $\sum_{k=1}^s \beta_k = 1$ 。则加权主成分距离的聚类分析方法所定义的 I_i 与 I_j 间的距离为:

$$d_{ij}(q) = [\sum_{k=1}^s \beta_k |F_{ik} - F_{jk}|^q]^{1/q} \dots\dots\dots (5)$$

3 江苏省环境质量评价

3.1 基于因子分析的指标提取

本文对反映 2012—2016 年江苏省 13 个省辖市环境质量状况的 16 个指标数据采用 SPSS20.0 进行因子分析, 得到相应系数的特征值、贡献率、累计贡献率, 以 2012 年为例, 具体见表 2。从表 2 可知, 前 4 个公共因子的累计贡献率为 84.123%, 且特征值大于 1, 因此认为原来的 16 个指标可综合合成 4 个主成分; 并截至第 12 个因子的累计贡献率已达到 100%, 说明第 12 个因子往后的 4 个因子对环境质量状况影响不大。提取的 4 个主成分的因子载荷矩阵见表 3。

表 2 相关系数的特征值、贡献率、累计贡献率

成分	特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
1	7.840	48.998	48.998
2	2.242	14.009	63.008
3	2.036	12.725	75.733
4	1.342	8.390	84.123
5	0.875	5.468	89.592
6	0.799	4.944	94.586
7	0.391	2.444	97.029
8	0.266	1.664	98.694
9	0.111	0.695	99.389
10	0.049	0.305	99.694
11	0.036	0.225	99.919
12	0.013	0.081	100.00
13	3.879E-016	2.424E-015	100.00
14	2.785E-016	1.741E-015	100.00
15	5.795E-019	3.622E-018	100.00
16	-2.890E-016	-1.806E-015	100.00

表 3 因子载荷矩阵

指标名称	主成分			
	F1	F2	F3	F4
工业废水排放量	0.098	0.079	0.044	-0.081
城镇生活污水排放量	0.082	0.128	0.040	-0.056
集中式治理设施污水排放量	0.087	0.127	-0.125	-0.075
化学需氧量排放量	-0.022	-0.036	0.460	0.052
氨氮排放量	-0.038	0.140	0.459	-0.068
PM2.5 排放年均值	0.048	-0.216	-0.042	-0.303
PM10 排放年均值	0.127	-0.454	-0.145	-0.023
二氧化硫排放量	0.171	-0.121	0.029	0.027
一氧化碳排放年均值	-0.076	0.149	-0.011	0.428
臭氧排放年均值	0.043	-0.178	-0.012	0.380
酸雨平均发生率	0.070	0.159	-0.107	-0.178
氮氧化物排放量	0.211	-0.212	-0.065	-0.005
烟（粉）尘排放量	0.079	0.061	0.085	0.047
一般工业固体废弃物产生量	0.178	-0.140	-0.026	0.069
一般工业固体废弃物利用量	-0.190	0.171	0.036	-0.068
区域环境噪声均值	-0.077	0.326	-0.088	0.075

从表 3 可知,主成分 F₁在氮氧化物、一般工业固体废弃物产生量、一般工业固体废弃物利用量、二氧化硫的载荷值相对较大,主要反映了固体废弃物对环境质量状况的影响;主成分 F₂在 PM2.5 排放年均值、PM10 排放年均值、区域环境噪声均值的载荷值相对较大,主要反映了颗粒物、噪音污染对环境质量状况的影响;F₃在化学需氧量排放量、氨氮排放量上的载荷值相对较大,主要反映了水污染对环境质量状况的影响;主成分 F₄在一氧化碳排放年均值、臭氧排放年均值上的载荷值相对较大,主要反映了空气污染对环境质量状况的影响。根据因子载荷矩阵,可计算出公共因子的因子值,因子值的计算结果见表 4。

表 4 因子得分

城市	F1	F2	F3	F4
南京	0.384	-0.268	0.078	0.044
无锡	0.523	-0.469	0.658	-0.062
徐州	0.294	0.430	-0.168	-0.432
常州	0.693	0.024	0.607	-0.073
苏州	-0.089	-0.329	0.007	0.127
南通	0.759	-0.468	-0.211	0.180
连云港	0.927	-0.137	0.035	-0.437
淮安	0.809	-0.003	0.279	-0.216
盐城	0.941	-0.318	-0.333	0.048
扬州	0.726	0.164	0.500	0.300
镇江	0.721	0.038	0.531	-0.115

泰州	0.691	0.480	0.117	0.591
宿迁	0.903	-0.054	0.032	0.200

从表4可见,江苏省13个省辖市中,主成分 F_1 苏州的得分最低,依次是徐州和南京,其他10个省辖市得分相对较高,说明苏州、徐州、南京的固体废弃物污染严重,其他省辖市的固体废弃物污染相对较轻;主成分 F_2 中13个省辖市得分都相对偏低,说明江苏省13个省辖市的颗粒物、噪音污染都较为严重;主成分 F_3 中南京、徐州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、泰州、宿迁得分较低,说明这些省辖市的水污染较严重;主成分 F_4 除泰州外,其他省辖市得分偏低,说明江苏省除泰州以外的12个省辖市的空气污染较严重。整体上,江苏省颗粒物污染、空气污染严重,需要加强颗粒物、空气污染的治理。

表5 江苏省各城市环境质量状况聚类结果

类别	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
第一聚类	徐州	苏州	苏州	徐州	徐州
第二聚类	苏州	南京	徐州	盐城	苏州
第三聚类	泰州	徐州	南京	苏州	盐城、南京
第四聚类	南京、无锡、宿迁、盐城、南通、连云港、扬州、淮安、镇江、常州	无锡、盐城、泰州、南通、宿迁、镇江、淮安、连云港、扬州、常州	盐城、淮安、连云港、常州、无锡、宿迁、泰州、南通、镇江、扬州	泰州、南通、南京、连云港、南通、镇江、扬州、镇江、常州、无锡、连云港、宿迁、淮安	连云港、南通、镇江、泰州、扬州、常州、无锡、宿迁、淮安

3.2 基于聚类分析的环境质量评价

由因子分析得到代表江苏省2012—2016年13个省辖市的环境质量状况的主成分因子。本文采用加权主成分距离公式对分类统计量进行计算,对江苏省的13个省辖市的环境质量状况进行了聚类分析。各省辖市分类结果见表5,通过Matlab进行计算,所得聚类结果见图1—5。

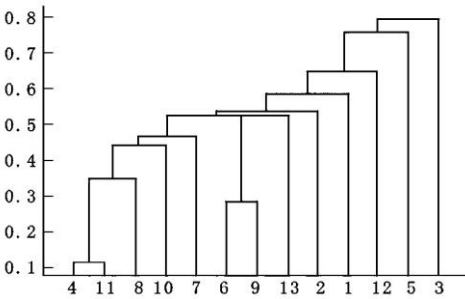


图1 2012年江苏省环境质量聚类结果

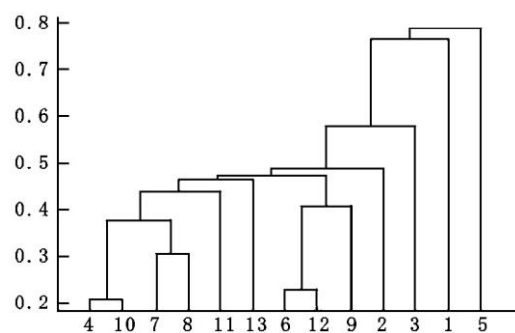


图 2 2013 年江苏省环境质量聚类结果

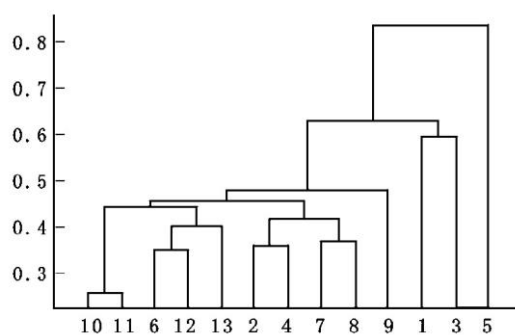


图 3 2014 年江苏省环境质量聚类结果

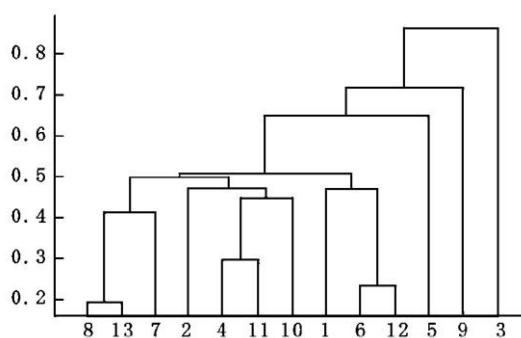


图 4 2015 年江苏省环境质量聚类结果

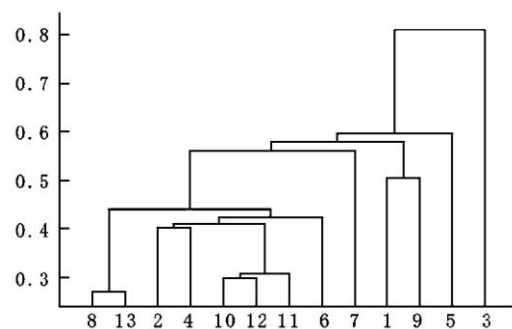


图 5 2016 年江苏省环境质量聚类结果

3.3 聚类结果分析

从第一聚类到第四聚类环境质量呈递增关系,第一聚类的城市环境质量最差,第四聚类的城市环境质量最好。从表 5 可见,2012—2016 年江苏省 13 个省辖市环境质量每年均在变化,存在一定规律。整体看,徐州、苏州的环境质量状况最差,南京、盐城其次,其他 9 个城市的环境质量状况较好且较稳定。江苏省 13 个省辖市经济发展水平差异化明显。总体上,苏南经济发展程度最高,苏中其次,苏北最低。在江苏省环境质量分类中,苏州、南京属于苏南城市,经济发展水平较高,环境质量状况较差;苏中、苏北城市中除徐州、盐城外,环境质量状况较好,经济发展水平较落后,江苏省经济发展水平与环境污染程度符合环境库兹涅茨曲线。

江苏省环境质量状况存在的问题:(1)徐州市 2012—2016 年环境质量状况聚类波动较大,2012 年处于第一聚类,2013 年处于第三聚类,2014 年处于第二聚类,2015—2016 年处于第一聚类,说明徐州的环境质量状况总体由差变好变差,变化趋势不稳定。从各省辖市因子得分表可知,徐州的水污染严重,且工业结构以重工业为主,现代服务业落后。因此,要提高徐州的环境质量,需大力发展高新技术,对重工业进行节能减排,保证工业企业的良性发展和生态环境的改善。(2)苏州市在 2012—2016 年中有两年处于第一聚类,其他三个年份分别处在第二、三聚类,说明苏州的环境质量状况问题严重。从各省辖市因子得分表可见,苏州地区固体废物污染、水污染及空气污染十分严重。2017 年江苏省环境保护督查组反馈督察情况显示,苏州市印染、电镀、喷水制造等行业排污量大,环境整治成效不明显,“散乱污”问题严重,暗黑式小作坊屡禁不止,沿江化工仓储、污水处理环境安全隐患较大。因此,苏州在追求 GDP 的同时,要健全环境保护考核评价和责任追究体系。(3)南京市 2012—2016 年除 2013 年外始终在第三、四聚类徘徊,说明南京市环境质量状况存在波动性,环境质量整体较好。从各省辖市因子得分表可知,南京地区水污染及空气污染较严重,应加强对石化、钢铁、电力企业的整改,减少污染物排放总量,从而提高环境质量。(4)盐城市 2012—2014 年处于第四聚类,2015 年处于第二聚类,2016 年处于第三聚类,说明盐城市的环境质量状况总体呈下降趋势,需要引起重视。截至 2016 年,盐城市纺织、化学原料和化学制品等产业占全部产业的 38%,而这些产业排放大量污染物,对环境造成了极大危害。盐城地处东部沿海地区,海洋资源丰富,因此盐城应大力发展海洋生物、海工装备等海洋经济产业,实现产业转型升级。(5)泰州市 2012 年处于第三聚类,2014—2016 年处于第四聚类,说明泰州市环境质量状况逐渐变好;无锡、宿迁、南通、连云港、扬州、淮安、镇江、常州 2012—2016 年始终处于第四聚类,说明这 8 个城市环境质量状况较稳定且较好。

4 结论与对策建议

本文在因子分析的基础上,考虑指标之间的相关性和重要性差异,运用加权主成分距离聚类分析方法对 2012—2016 年江苏省 13 个省辖市的环境质量状况进行了分类评价。结果发现,2012—2016 年徐州、苏州的环境质量状况最差,南京、盐城的环境质量状况其次,其他 9 个城市的环境质量状况较好且较为稳定。

根据因子分析及加权主成分聚类分析的结果,结合江苏省实际情况,本文提出以下对策建议:(1)推进环保制度改革。严格实施生态文明建设目标评价考核、生态环境检测网络建设、排污权有偿使用和交易管理;开展生态环境损害赔偿制度改革试点,落实与污染物排放总量挂钩的财政政策,深化水环境“双向”补偿制度;加快建立环保信用体系,对污染企业开展环保信用评价,对污染性企业实行分类监管。(2)加强实施环境监测预警与信息化。推进生态环境监测网络建设,充分应用卫星和无人机遥感等先进信息技术,加强生态地面监测,推动“天空地”一体化生态环境监测网络建设;加强环境监测数据质量管理,联合环保和质监部门对社会环境监测机构进行管理;实施“互联网+”绿色生态工程,建设完善“一企一档”污染源信息管理系统,完善江苏省企业环保信用评估系统。(3)强化污染源环境调查和风险调控。完善污染源信息管理系统,制定污染治理与修复计划;加强环境监察,建立省级环境保护督察机制,加大环境执法监管力度;完善环境应急体系建设,推进重点环境风险企业环境安全达标建设和区域突发环境事件风险评估。(4)加大环保科技创新力度,加快产业结构转变。大力发展新能源、信息等产业,以新能源、信息产业带动相关新兴产业发展,使之成为新的经济增长点,并以信息化推动冶金、机械等传统行业的改造与换代;通过发展高新技术对重工

业进行节能减排,促进重工业企业的良性发展和生态环境的改善。(5)加强环境宣传教育力度,引导公众有序参与环境公共事务管理,提高公众的环境保护意识。

江苏省 13 个省辖市的经济发展水平差异明显,环境质量呈区域性特征。对江苏省 13 个省辖市的环境治理,要结合社会经济发展特点,依靠科技引领,加快产业结构的转型升级,促进产业结构向节能型、环保型发展,提升和改造传统产业,降低能耗,减少污染物排放,从而促进该省的排污减排和生态文明城市建设。

参考文献:

- [1]新华社. 国务院常务会议通过《“十三五”生态环境保护规划》[J]. 绿色包装, 2016, 36(10): 9-11.
- [2]李小胜, 宋马林, 安庆贤. 中国经济增长对环境污染影响的异质性研究[J]. 南开经济研究, 2013, (5): 96-114.
- [3]周茜. 中国区域经济增长对环境质量的影响——基于东、中、西部地区环境库兹涅茨曲线的实证研究[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(10): 45-51.
- [4]Cheng Z H. The Spatial Correlation Interaction and Manufacturing Agglomeration and Environmental Pollution[J]. Ecological Indicators, 2016, 61(2): 1024-1032.
- [5]徐文成, 薛建宏. 经济增长、环境治理与环境质量改善——基于动态面板数据模型的实证分析[J]. 华东经济管理, 2015, (2): 35-40.
- [6]许丛, 操勤, 袁媛. 基于主成分分析法的安徽省生态环境质量研究[J]. 资源开发与市场, 2008, 24(2): 118-119.
- [7]杜雯翠, 张平淡. 新常态下经济增长与环境污染的作用机理研究[J]. 软科学, 2017, 31(4): 1-4.
- [8]王飞成, 郭其友. 经济增长对环境污染的影响及区域性差异——基于省际动态面板数据模型的研究[J]. 山西财经大学学报, 2014, 36(4): 14-26.
- [9]孙宁. 基于因子分析和聚类分析的各地区环境污染程度评价[J]. 旅游纵览, 2012, (10): 123-124.
- [10]李政大, 袁晓玲, 杨万平. 环境质量评价研究现状、困惑和展望[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 175-181.
- [11]Khanna N. Measuring Environmental Quality: An Index of Pollution[J]. Ecological Economics, 2000, 35(2): 191-202.
- [12]Liu X Z, Heiling G K, Chen J, et al. Interactions Between Economic Growth and Environmental Quality in Shenzhen, China's the First Special Economic Zone[J]. Ecological Economics, 2007, 62(3): 559-570.
- [13]Tran L T, Knight C G, O'Neill R V, et al. Integrated Environmental Assessment of the Mid-atlantic Region With Analytical Network Process[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004, 94(1-3): 263-277.
- [14]刘志国, 杨永春. 中国西部河谷型城市环境质量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 10-15.

-
- [15]张瑞环,张军,陈文清.四川省城市声环境质量状况与分析[J].资源开发与市场,2011,27(5):464-466.
- [16]卢泉,衡若男,王哲,等.阿拉尔经济技术开发区环境可持续能力研究[J].资源开发与市场,2015,31(12):1462-1467.
- [17]孙勤芳,赵克强,朱琳,等.农村环境质量综合评估指标体系研究[J].生态与农村环境学报,2015,(1):39-43.
- [18]杨吉,苏维词.基于系统聚类分析的天河潭区域环境污染程度评价[J].环境工程,2016,34(8):154-157.
- [19]屈小娥.1990—2009年中国省际环境污染综合评价[J].中国人口·资源与环境,2012,22(5):158-163.
- [20]陆佩华.城市发展水平与生态环境质量耦合协调度研究——以南通市为例[J].资源开发与市场,2015,31(5):563-566.
- [21]王梦.水环境质量评价中几种方法的比较[J].渤海大学学报(自然科学版),2008,29(1):34-37.
- [22]张小君,徐中民,宋晓谕,等.几种水环境质量评价方法在青海湖入湖河流中的应用[J].环境工程,2013,31(1):117-121.
- [23]陈军飞,吴铭峰.主成分分析在城市复合系统发展评价中的应用[J].软科学,2006,20(1):9-11.
- [24]王德青,朱建平,谢邦昌,等.主成分聚类分析有效性的思考[J].统计研究,2012,29(11):84-87.
- [25]吕岩威,李平.一种加权主成分距离的聚类分析方法[J].统计研究,2016,33(11):102-108.