

2019 数维杯大学生数学建模竞赛论文

论文题目：我国省际生态环境与经济交互状况的综合评价

队伍编号：20195819

我国省际生态环境与经济交互状况的综合评价

摘 要:

随着经济的快速发展,生态环境与经济交互状况日益明显。经济发展与生态环境协调发展的目的是在经济的适度发展中,尽可能采用污染少、对生态环境破坏较轻的生产和生活方式,使经济发展对生态环境的影响控制在生态环境的承载力之内,以使经济发展能够持续,同时又不能因保护生态环境而限制经济的发展。本文在理论与实际相结合、规范分析和实证分析相结合、横向比较和纵向比较相结合的研究方法的基础上,建立探究经济发展与生态环境交互状况的数学模型。结合因子分析法,分析影响各省经济发展与生态环境交互情况的主要影响因素,从而提出合理开展各省之间生态环境协作治理的具体方式。

对于问题 1:为对 2017 年各省生态环境与经济交互状况进行合理的评价与排序,需建立生态环境与经济协调发展的综合评价模型,利用指标体系的构建、量纲化数据处理以及耦合度模型对数据进行处理分析,从而得到对各省生态环境与经济交互状况的合理评价与排序。

对于问题 2:为提供各省之间对生态环境协作治理的具体方式,利用因子分析选择出贡献各省经济发展的最为关键的指标以及造成负面影响的指标,进行合理有效的选择。后对各省的经济增长异同进行比较后,制定各省之间对生态环境协作治理的具体方式。

对于问题 3:通过收集 2013~2017 年各省经济发展与生态环境的有关数据,构建了经济发展与生态环境协调发展的指标体系,利用该指标体系,我们综合评价了各省经济发展与生态环境的交互状况。

关键词: 生态环境; 经济发展; 指标体系; 因子分析; 耦合; 熵值法; 协调度

1 简介

1.1 研究背景

1987年,世界环境与发展委员会定义可持续发展为一种满足当代需要而不影响下一代需求的发展模式。这种模式要求两点:一是经济的发展,二是环境的持续性。即经济的发展对系统的影响不能超过环境的可承受能力。随着经济社会的不断发展,寻求生态环境与经济的协调发展已成为亟待解决的课题。对生态环境-经济系统的协调发展水平进行科学、客观地评价,能够发现经济社会发展过程中生态环境与经济发展之间的协调状况,有利于调整我国经济增长的方式,以期为实现经济与环境的可持续发展提供科学依据。

随着我国对实施可持续发展战略的重视和推进,可持续发展的思想不断深入人心,可持续发展的实践不断付诸于行动。今天,国家已进入“十一五”建设时期,各省的经济发展状况处于一个上升的阶段,如何在继续促进经济快速增长的同时改善生态环境,促进生态环境与经济协调发展和可持续发展,成为各省亟需解决的课题。

1.2 研究目的

生态环境与经济的协调发展问题一直是很多学者和政府相关部门所重点研究的问题。所谓生态环境与经济协调发展,就是在保证经济蓬勃发展的情况下,使生态环境状况也日益改善。然而,只有在客观评定生态环境与经济协调状况的前提下,才能发现影响生态环境与经济协调发展的主要因素,才能以此对症下药。本文主要依托这个思想展开研究,希望在这个问题上能起到抛砖引玉的作用。

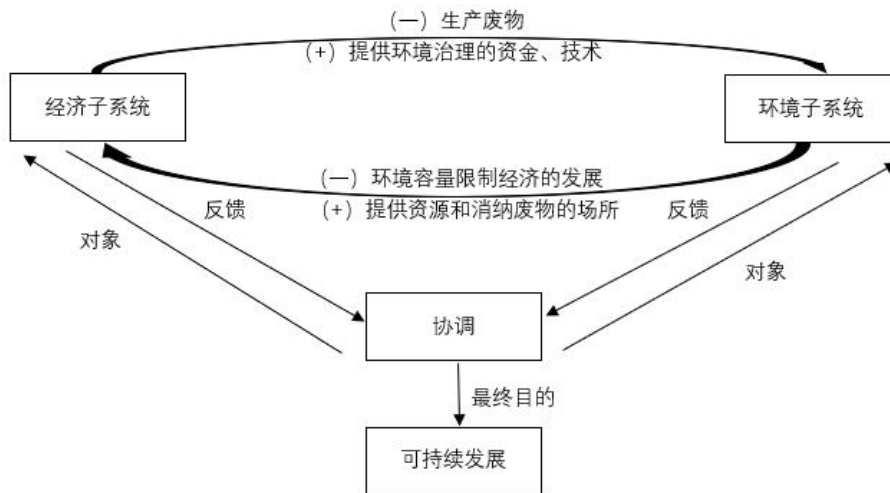


图1 经济子系统与环境子系统关系图

1.3 研究意义

(1) 科学评价全省历年来的协调发展水平,可以判断社会发展是否在进步。科学评价各省辖市的协调发展水平,可以考核各地方政府的工作业绩。

(2) 科学评价生态环境与经济综合发展水平的,可以为各省辖市确定发展方向。如果一个城市经济的发展超过了生态环境的所能承受的经济增长能力的阈值,即为环境滞后型的城市。这样,

这个城市在未来的建设发展中，必须加强绿色经济的发展或者加大环保力度，增加生态环境的容量。

(3) 缩小区域发展差距，促进全省均衡发展。通过实证评价，找出发展较好的地区，然后以这些地区作为学习对象，在本区域内全面推广，最终实现全省的协调发展。

(4) 促进各省走生态经济之路，为相关部门提高各省生态环境与经济的协调发展水平提供决策建议和实证依据。

2 问题一：生态环境与经济交互状况的综合评价分析

本章主要以 2017 年各省表征生态环境状况和经济状况的相关指标数据为依据，从科学发展观的角度出发，根据权威机构典型指标频率、易获取性、代表性与全面性结合的三个原则筛选出生态环境与经济各项指标，以此来构成生态环境——经济系统的协调发展评价指标体系，对经济综合发展水平和生态环境综合状况水平进行综合打分，在此基础上建立了基于协调发展度的生态环境——经济系统协调发展评价模型，通过计算生态环境——经济系统的协调发展度及协调发展趋势，科学客观评价各省生态环境与经济交互的状况，为因地制宜制定生态环境与经济的可持续发展提供科学依据。

2.1 生态环境与经济协调发展评价指标体系

2.1.1 指标体系构建原则

合理构建指标体系是进行生态环境与经济协调发展评价的基础，本文遵循以下原则：

(1) 系统性原则

对生态环境与经济协调发展状况进行评价，是以生态环境和经济两个复杂系统的综合发展实力指数为基础，本文据此将整个指标体系分为“生态环境综合实力评价指标”和“经济综合实力评价指标”两大部类完整性原则在于强调两部分指标的选择要能尽量全面综合地反映各自系统的综合发展实力。

(2) 简明性原则

完整性原则要求我们在选用指标时，要尽量选用那些能全面综合反映经济和环境综合发展实力的指标，尽量避免指标的片面性。但系统性原则决不意味着指标个数要越多越好，相反，指标体系应该尽可能简单明了，只要它能反映我们所需的信息。

(3) 客观性原则

尽量选用客观指标，对一些主观印象指标，例如政策法律的完善程度、政策法律投入对经济或环境产生的效益等，由于很难用客观尺度衡量，而凭主观印象评估，又难免产生偏差，所以不选用这些指标。

(4) 实用性原则

实用性原则反映到评价流程中，就是各指标的可操作性。前已述及，如果指标的构建太过理论化，使得根本收集不到相关资料和数据，则所有的工作都失去了意义。本着实用性和可操作性原则，我们将尽量选用定期公开发布、又具有权威性的统计指标以及数据。

2.1.2 生态环境与经济协调发展评价指标体系

遵循前述构建指标体系的原则，参考不同学者的相关研究成果^一，构建生态环境与经济协调发展评价指标体系。

整个指标体系由两部分组成，一是生态环境综合实力评价指标，二是经济综合实力评价指标。生态环境实力评价指标方面，考虑到经济快速发展的今天，随着工业化进程的加速和转型，工业三

废排在很大程度上成为导致环境污染的重要原因，而三废治理指标则是影响环境质量的重要因素，最终确定的生态环境综合实力评价指标由“三废排放指标”和“三废治理指标”。而经济综合实力通过经济效益、人民生活水平和经济水平指数三个方面进行综合表达。

1. 生态环境综合实力评价指标

(1) 三废排放指标

三废排放指标由“工业废水排放量”、“工业废气排放量”和“工业固体废物排放量”组成。

(2) 三废治理指标

三废治理指标主要由“生活垃圾无害化处理率”组成。

2. 经济综合实力评价指标

(1) 经济效益指标

经济实力指标由“人均地区生产总值”和“地区生产总值”指标组成。

(2) 人民生活水平指标

人民生活水平指标是由“城镇居民人均可支配收入”和“农村居民人均可支配收入”指标组成。

(3) 经济水平指数指标

经济水平指数指标是由“第三产业所占比重”和“批发和零售业增加值”指标组成。

表 1 生态环境与经济协调发展评价体系表

目标层	系统层	准则层	指标层	指标正负向
经济与生态环境协调发展	经济发展水平	经济效益	地区生产总值	正向
			人均地区生产总值	正向
		人民生活水平	城镇居民人均可支配收入	正向
			农村居民人均可支配收入	正向
		经济水平指数	第三产业所占比重	正向
			批发和零售业增加值	正向
	生态环境综合水平	环境污染	废弃排放量	负向
			废水排放量	负向
		环境治理	生活垃圾无害化处理率	正向

2.2 经济发展与生态环境协调发展的综合评价方法

经济发展与生态环境协调发展的指标体系设计出来后，要对经济发展与生态环境协调发展状况进行评价，就涉及到计算方法的问题。由于指标太多，指标间经常具有一定的相关性，给计算带来了难度。在这里我们试图采用因子分析法以达到降维、简化问题的目的。同时，利用该法消除指标

间的相互影响，减少指标选择的工作量。

2.2.1 数据的无量纲化

由于多个变量具有不同的属性和单位，既有定性指标又有定量指标，各指标间无统一的标准，难以进行比较，而直接用因子分析法进行处理，结果易出偏差。为此，对数据进行标准化处理，计算步骤如下：

1. 确定评价指标集

为了消除不同指标间量纲不同的影响，将原始数据 X_{ij} 标准化，标准化后的指标值为 Y_{ij} 。这里用极值标准化法对原始数据进行标准化。

$$\text{对正项指标: } y_{ij} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, i = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

$$\text{对负向指标: } y_{ij} = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}}, i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

2.3 各省生态环境与经济发 展的耦合协调分析

根据协同论原理，系统走向有序的关键在于系统内部各子系统间的协同作用，耦合度描述了系统发展过程中序参量之间协同作用的强弱程度。本文将生态环境与经济发展两个系统通过各自的要素产生相互作用、彼此影响的程度定义为系统耦合度，建立耦合度模型来分析生态环境与经济发 展的耦合一致性，反映两者之间相互作用程度的强弱。耦合度无法反映两个系统协调发展水平的高低，单纯依靠耦合度进行判别有可能会产生误导，从而得出与事实不符的结论，对实际问题的指导意义不明显，必须引入耦合协调度模型才能衡量两个系统交互耦合的协调程度。因此，进一步建立耦合协调度模型来分析生态环境与经济发 展的耦合协调情况。

2.3.1 耦合度模型

首先，建立功效函数。设立变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为系统序参量， x_{ij} 为第 i 个序参量的第 j 个指标，其值为 $x'_{ij} (j = 1, 2, \dots, n)$ 。 α_{ij} 、 β_{ij} 分别为系统稳定临界点上序参量相应指标的上、下限值，则 x'_{ij} 对系统有序的功效系数表示为：

$$x_{ij} = \begin{cases} (x'_{ij} - \beta_{ij}) / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) \\ \alpha_{ij} - x'_{ij} / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

式 (1) 中 x_{ij} 为变量 x'_{ij} 对系统的功效贡献大小，且 x_{ij} 的取值范围在 0 和 1 之间。系统内各序参量相应指标功效的“总贡献”则为：

$$x_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

式 (2) 中， x_i 为子系统 i 对总系统有序度的贡献， λ_{ij} 为第 i 个序参量相应指标的权重，且满足：

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1。$$

其次，建立耦合度模型。借鉴物理学中的容量耦合概念及容量耦合系数模型，得到两系统相互

作用的耦合度模型:

$$C=2 \times \{(x_1 \times x_2) / [(x_1 + x_2) \times (x_1 + x_2)]\}^{1/2} \quad (5)$$

式(5)中, C 为系统耦合度, 且值在 0 和 1 之间。最后, 建立耦合协调度模型:

$$D=(C \times T)^{1/2}, T=\alpha f(x) + \beta g(y) \quad (6)$$

式(6)中, D 为耦合协调度, C 为耦合度, T 为环境竞争力和经济发展子系统的综合评价指数; α 、 β 为待定系数, 考虑到本文主要分析环境与经济的协调发展, 环境与经济同等重要, 因此取: $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.5$ 。

2.3.2 模型实证分析

由前文所述, 将 2017 年各省生态环境与经济发展指标进行无量纲化后, 经上述耦合度模型计算后, 得到经济发展子系统和生态环境子系统的耦合交互情况如下表:

表 2 经济发展子系统和生态环境子系统的耦合交互情况

地区	经济指标	环境指标	交互性	地区	经济指标	环境指标	交互性
北京	0.7295171	0.9654822	0.4951312	河南省	0.22287500	0.7561635	0.4193134
天津	0.4680951	0.9240049	0.4724259	湖北省	0.2518815	0.6760884	0.4446988
河北省	0.2029758	0.6236877	0.4304046	湖南省	0.2460181	0.6588027	0.4449371
山西省	0.1391811	0.7758825	0.3591177	广东省	0.5929865	0.4775265	0.4970833
内蒙古	0.2282351	0.7730473	0.4195055	广西	0.1211639	0.7974500	0.3383805
辽宁省	0.2643914	0.7429974	0.4399671	海南省	0.1633058	0.9779697	0.3501652
吉林省	0.1503957	0.8050482	0.3641861	重庆市	0.2106747	0.8741803	0.3955806
黑龙江	0.1795052	0.8073779	0.3857547	四川省	0.2220436	0.6600714	0.4339996
上海市	0.7465619	0.8353446	0.4992119	贵州省	0.0776732	0.8030868	0.2835694
江苏省	0.63936075	0.4501067	0.4923982	云南省	0.1207252	0.6520382	0.3630688
浙江省	0.6149309	0.702477	0.4988947	西藏	0.0918959	0.9895325	0.2788466
安徽省	0.1683091	0.7495459	0.3869713	陕西省	0.1514875	0.8181738	0.3630706
福建省	0.3278230	0.8200127	0.4517001	甘肃省	0.0733352	0.9373614	0.2594114
江西省	0.1471727	0.5474295	0.4086406	青海省	0.0685094	0.9298520	0.2528100
山东省	0.5029647	0.5618346	0.4992352	宁夏	0.0940815	0.9285023	0.2890312
新疆	0.1131657	0.7917261	0.3307869				

从耦合度来看, 各省环境竞争力和经济发展子系统的耦合度最低为 0.2528100, 最高达到 0.4992352, 说明各省生态环境子系统与经济发展子系统具有内在的耦合一致性, 两个子系统相互影响、相互依存, 具有很强的相互协同作用。

从耦合度来看, 各省生态环境和经济发展子系统的耦合度都相近, 说明各省生态环境与经济发

展的耦合性具有一致性，环境竞争力子系统与经济发展子系统相互影响、相互依存，两者之间的相互作用程度较强。但从耦合协调度来看，各省环境与经济逐渐协调发展，但耦合协调水平仍然比较低，两者的协调性还不够，还有较大的提升空间。各省要推动相互之间协调发展，相互促进，协同进化，更好地实现环境与经济的协调发展。

经对 2017 年各省生态环境和经济发展情况综合评价分析后，得到 2017 年各省生态环境与经济交互状况的排序情况如下表所示：

表 3 2017 年各省生态环境与经济交互情况排序表

2017 年各省生态环境与经济交互情况排序							
1 山东省	0.4992352	9 湖南省	0.4449371	17 重庆市	0.3955806	25 广西	0.3383805
2 上海市	0.4992119	10 湖北省	0.4446988	18 安徽省	0.3869713	26 新疆	0.3307869
3 浙江省	0.4988947	11 辽宁省	0.4399671	19 黑龙江	0.3857547	27 宁夏	0.2890312
4 广东省	0.4970833	12 四川省	0.4339996	20 吉林省	0.3641861	28 贵州省	0.2835694
5 北京	0.4951312	13 河北省	0.4304046	21 陕西省	0.3630706	29 西藏	0.2788466
6 江苏省	0.4923982	14 内蒙古	0.4195055	22 云南省	0.3630688	30 甘肃省	0.2594114
7 天津	0.4724259	15 河南省	0.4193134	23 山西省	0.3591177	31 青海省	0.25281
8 福建省	0.4517001	16 江西省	0.4086406	24 海南省	0.3501652		

3 问题二：各省间生态环境协作治理的具体方式分析

要在保障 2017 年各省经济发展的同时展开分析各省之间生态环境协作治理的具体方式或策略。本章我们采用因子分析法对目的指标数据进行处理，以达到降维、简化问题的目的。同时，利用该法消除指标间的相互影响，减少指标选择的工作量。

3.1 因子分析

1. 求标准化后的指标数据的相关系数矩阵 R。

$$R = (r_{ij})_{n \times m}, r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ki} y_{kj}, \{i, j = 1, 2, \dots, p\} \quad (7)$$

2. 求相关系数矩阵 R 的特征值与特征向量

假设特征值按序排列为 $\lambda \geq \lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_m$ ，相应的特征向量为 u_1, u_2, \dots, u_m ，它们标准正交。m 个变量的因子载荷矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} \sqrt{\lambda_1} & u_{12} \sqrt{\lambda_2} & \dots & u_{1m} \sqrt{\lambda_m} \\ u_{21} \sqrt{\lambda_1} & u_{22} \sqrt{\lambda_2} & \dots & u_{2m} \sqrt{\lambda_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} \sqrt{\lambda_1} & u_{n2} \sqrt{\lambda_2} & \dots & u_{nm} \sqrt{\lambda_m} \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过因子分析，可用较少的几个主要因子来代替原有变量的大部分信息，用下面的数学表达式表示为：

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m + a_1\varepsilon_1 \\ y_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2m}F_m + a_2\varepsilon_2 \\ \dots \\ y_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots + a_{pm}F_m + a_p\varepsilon_p \end{cases} \quad (9)$$

其中 y_1 、 y_2 、... y_p 为 P 个原有的变量，是均值为 0、标准差为 1 的标准化变量， F_1 、 F_2 、... F_p 为 m 个因子变量，m 小于 p，表示成矩阵为：

$$X = AF + \alpha\varepsilon \quad (10)$$

其中 F 为因子变量或公共因子；A 为因子载荷矩阵； a_{ij} 为因子载荷，是第 i 个原有变量在第 j 个因子上的载荷； ε 为特殊因子，表示原有变量中不能被因子变量所解释的部分。

3. 按因子的累积贡献率选择 m 个主要因子

第一主因子的贡献率为 $\lambda_1 / \sum_{i=1}^m \lambda_i$ ，它是第一主因子的方差在全部方差中的比值，这个比值越大，表明第一主因子综合原指标 X_1, X_2, \dots, X_p 信息的能力越强。前 m 个主因子的累积贡献率为

$\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 。如果前 m 个主因子的累计贡献率 > 85%，表明前 m 个主因子基本包含了全部测量指标的大部分信息，这样既减少了指标的个数，又有利于对实际问题进行分析和研究。

4. 将 m 个主因子指标综合成单指标

将累积贡献率达到 85% 的前 m 个主因子 F_1, F_2, \dots, F_m 的因子得分乘以主因子 $F_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的方差贡献率 α_i ， $\alpha_i (\alpha_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i)$ 作为权数构造一个综合评价各指标的主因子函数：

$G = a_1F_1 + a_2F_2 + \dots + a_nF_n$ 通过因子分析法，可将原来的 p 个指标 X_1, X_2, \dots, X_p 减为现在的 m 个主因子，方便了研究。

3.2 经济发展的综合评价

$$U_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} W_{ij} (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

U_i 为所求的系统值； G_{ij} 为 i 系统提取的第 j 个因子与指标的相关系数； W_{ij} 为 i 系统提取第 j 个因子的贡献率；n 为 i 系统提取因子的个数。将各系统值进行加权求和，得到经济发展与生态环境协调发展系统的协调发展指数 U 为经济发展与生态环境协调发展的综合评价指数，指数越大，相对越协调；指数越小，相对越不协调。依据不同时期经济发展与生态环境的协调发展指数，可以判

断经济发展与生态环境协调发展的相对程度。

3.3 各省经济发展与生态环境协调发展的综合评价

下面用因子分析法对中国经济发展与生态环境协调发展状况进行实证分析。考虑数据的可获取性及指标的代表性，我们选取 20 个影响中国经济发展与生态环境协调发展的因素进行分析。

3.3.1. 指标选取及原始数据

选取影响中国经济发展与生态环境协调发展的 20 个指标，指标体系构建如下表。

表 4 经济与生态环境协调发展指标

经济发展与生态环境协调发展指数	经济发展指标	经济规模	①GDP 总值
		经济结构	①第三产业占 GDP 的比重
		经济竞争力	①利用外资占 GDP 的比重
		经济效率	①全员劳动生产率；②万元产值能耗
		经济体制	①财政收入占 GDP 的比重
		全体及城乡居民收支基本情况	①居民人均可支配收入；②城镇居民人均可支配收入；③农村居民人均可支配收入；④居民人均消费支出；⑤城镇居民人均消费支出；⑥农村居民人均消费支出
	生态环境指标	环境质量	①二氧化硫排放量；②氮氧化物排放量；③烟（粉）尘排放量
		环境治理	①环境治理投资总量；②工业废水排放达标率；③工业固体废物综合处理率
		资源利用	①能源消耗量；②能源加工转换率

从上表可以看出，该指标体系中指数层有一个，为经济发展与生态环境协调发展指数；系统层有 2 个，经济发展系统与生态环境系统；指标层有 9 个，其中经济指标层有 6 个，分别为经济规模指标层、经济结构指标层、经济竞争力指标层、经济效率指标层、经济体制指标层和全体及城乡居民收支基本情况指标层；生态环境指标层有 3 个，分别为环境质量指标层、环境治理指标层和资源利用指标层；变量层有变量 20 个，其中经济发展变量有 12 个，分别为 GDP 总值、第三产业占 GDP 的比重、利用外资占 GDP 的比重、全员劳动生产率、万元产值能耗、财政收入占 GDP 的比重、居民人均可支配收入、城镇居民人均可支配收入、农村居民人均可支配收入、居民人均消费支出、城镇居民人均消费支出、农村居民人均消费支出；生态环境变量有 8 个，分别为二氧化硫排放量、氮氧化物排放量、烟（粉）尘排放量、环境治理投资总量、工业废水排放达标率、工业固体废物综合处理率、能源消耗量、能源加工转换率等（见表 5）。

表5 原始数据表

指标	青海	甘肃	海南	安徽	河南	河北	湖北	天津	北京	上海	山东
1.GDP总量(亿元)	2684	7549	4462	27018	44552	34016	35478	18549	28014	30632	72634
2.人均GDP(元)	44047	28497	48430	43401	46674	45387	60199	118944	128994	126634	72807
3.利用外资/GDP	1162	256	996	12838	21105	15846	15441	17593	53260	69330	32942
4.第三产业/GDP	1224	4038	2563	11597	19308	15040	16507	10786	22567	21191	34858
5.全员劳动生产率	6354	7238	8076	8704	9346	9963	10655	11349	11604	12566	13222
6.万元产值消耗	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1	2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.4
7.居民人均可支配收入(元)	19001	16011	22553	21863	20170	21484	23757	37022	57229	58987	26929
8.城镇居民人均可支配收入(元)	29168	27763	30817	31640	29557	30547	31889	40277	62406	62595	36789
9.农村居民人均可支配收入	9462	8076	12906	12758	12719	12880	13812	21753	24240	27852	15117
10.居民人均消费(元)	15503	13120	15402	15751	13729	15436	16937	27841	37425	39791	17280
11.城镇居民人均消费(元)	21472	20659	20371	20740	19422	20600	21275	30283	40346	42304	23072
12.农村居民人均消费(元)	9902	8029	9959	11106	9211	10535	11632	16385	18810	18089	10342
13.环境治理投资总量(亿元)	60.9	102.2	35.7	198.6	241.6	353.5	139.7	110.2	458.4	224.7	236.8
14.工业废水排放达标率(%)	46	48.9	33.9	54.3	57.8	59.1	61.8	61.4	66.7	76.9	85.2
15.工业固体废物处理率(%)	37.9	41.3	40.2	43.3	44.2	59.1	61.8	61.4	66.7	76.9	85.2
16.二氧化硫排放量	92416	258811	14271	235419	286316	602365	220059	55643	20085	18052	739121
17.氮氧化物排放量	72284	212543	60132	490013	662892	1056049	376728	142264	144513	193940	115862
18.烟(粉)尘排放量	129531	177074	20927	280818	223404	803689	188022	65192	20423	47032	549556
19.能源消耗量	10.4	10.9	10.7	11.8	12.9	13.9	13.8	13.2	12.2	13.3	13.5
20.能源加工转换率(%)	65.9	66	67.2	65.2	71.05	71.05	69.23	69.44	70.45	70.96	70.41

表 6 因子载荷矩阵表

	分量		
	1	2	3
GDP 总量	.979	4.125E-02	.152
人均 GDP	.103	.811	-.186
外资比重	.431	-.519	-.368
财政比重	.194	-.323	.890
三产比重	.958	.103	-.220
全劳产率	.974	-5.79E-02	.191
万元能耗	.905	-1.74	.365
人均支配收入	.941	-9.38E-02	.316
城镇人均支配收入	-.943	9.212E-02	.146
农村人均支配收入	-.277	-4.19	-.735
居民人均消费	.959	.106	.170
城镇人均消费	.883	-5.58E-02	.433
农村人均消费	.906	-2.10	.347
环治理额	.860	-.207	.335
废水标率	-.842	-8.97E-03	-.401
固废处率	.892	6.077E-02	.436
SO2 量	-.322	.871	-7.41E-02
烟尘量	.424	.809	.182
能消耗量	-.853	-.406	.110
能加转率	.837	.223	-4.54E-02

3.3.2 数据处理及结论

通过上述方法对原始数据进行处理,可得到影响经济发展与生态环境协调发展的各因子累积贡献率表(如表 7)。由表 7 可以看出,在影响经济与生态环境协调发展的 20 个指标中,前三个因子的累积贡献率为 89.635%,大于 85%,基本包含了 20 个变量中的大部分信息,可用这三个因子来反映中国经济发展与生态环境协调发展的状况。

表 7 主因子得分及综合指数得分

省份	主因子 1	主因子 2	主因子 3	得分
青海	-1.85575	0.24747	1.45095	-1.01385
甘肃	-1.37392	-0.08951	0.48962	-0.85048
海南	-0.75486	-0.078826	-0.86675	-0.69289
安徽	-0.42677	-0.06369	-1.07576	-0.47941
河南	0.11722	-0.46822	-1.62645	-0.15837

河北	0.30589	2.44499	-0.56116	0.510197
湖北	0.40331	1.25446	-0.19931	0.429557
天津	0.4459	-0.63443	-0.10335	0.181397
北京	0.72729	-0.40812	0.41478	0.449067
上海	1.27911	-0.72459	0.58818	0.774576
山东	1.13258	-0.19687	1.48925	0.850217
权重	0.64495	0.15102	0.10038	0.89635

公因子 1 在 GDP 总量、第三产业占 GDP 的比重、全员劳动生产率、万元产值能耗、人均支配收入、居民人均消费、城镇人均消费、农村人均消费、环境治理额、工业固体废物处理率、能源消耗量、能源加工转换率等变量上都有大于 0.8 的载荷，其贡献率最大，为 64.495%，主要反映经济综合实力与环境治理的能力。公因子 2 与人均 GDP、废水达标率、工业固体废物处理率、城镇人均支配收入有较大的关系，其方差贡献率为 15.102%，主要反映工业化程度与大气污染状况。公因子 3 与财政收入占 GDP 的比重、财政比重有较大的关系，其贡献率为 10.038%，主要反映体制因素和公众参与度。

进行因子分析之后，通过回归法计算主因子得分，并以各因子的方差贡献率为权重进行加权求和，得出青海、甘肃、海南、安徽、河南、河北、湖北、天津、北京、上海、山东等各省经济发展与生态环境协调发展的综合得分，计算公式如下：

$$F = 0.64495 F_1 + 0.15102 F_2 + 0.10038 F_3 \quad (12)$$



图 2 经济发展与生态环境协调发展指数

从图中可以看出，青海、甘肃、海南、安徽、河南、河北经济发展与生态环境协调发展的指数呈上升趋势；湖北、天津经济发展与生态环境协调发展呈下降趋势；北京、上海、山东经济发展与生态环境协调发展指数呈上升趋势。随着中国经济实力的进一步增强，中国经济发展与生态环境的协调发展状况会越来越好，原因有以下几点：一是对经济发展与生态环境协调发展日益重视。1992 年联合国环境与发展大会后，我国政府组织制定了《中国 21 世纪议程—中国 21 世纪人口、环境与发

展白皮书》，作为指导我国国民经济和社会发展的纲领性文件，这显示出中国政府对经济发展与生态环境协调发展的重视程度，标志着中国开始了经济发展与生态环境协调发展的进程。二是全民生态环境保护意识明显提高。随经济发展水平的提高，政府及公众经济发展与生态环境协调发展的意识逐渐增强。如中国政府正在逐步制定和完善经济发展与生态环境协调发展的相关法律法规；各地区、各部门已将经济发展与生态环境协调发展纳入了各级各类规划和计划之中；全民经济发展与生态环境保护意识明显提高。

4 问题三：基于多数据的综合性处理分析

本章通过从国家统计年鉴整理获得了更多年份的生态与经济相关数据，基于获得的数据对各省生态环境和经济发展交互情况进行综合性的处理分析。科学客观评价各省生态环境与经济交互的状况，为因地制宜制定生态环境与经济的可持续发展提供科学依据。

4.1 生态环境与经济协调发展评价模型及判别标准

4.1.1 基于熵值法的综合评价模型

在信息论中，熵是对不确定性的一种度量。信息量越大，不确定性就越小，熵也就越小；反之，信息量越小，不确定性越大，熵也越大。根据熵的特性，我们可以用熵值来判断某个指标的离散程度，指标的离散程度越大，熵值也越大，该指标对综合评价的影响越大，所赋予的权重也就越大。熵值法赋权的特点是通过客观排序真实反映指标的实际情况，熵值大的指标赋给较大的权重。

1. 计算各指标的熵值

设 e_j 为第 j 个指标的熵值，根据熵值的计算公式得 e_j 为：

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (13)$$

其中， $f_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^n p_{ij}}$ 表示第 i 年份第 j 个指标的隶属度比重。

2. 计算各指标的权重

定义第 j 个指标的熵权为 w_j ，根据熵权的计算公式 w_j 为：

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^m (1-e_j)} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (14)$$

熵值法赋权的特点是在所评价的样本中，同一指标之间的数值差别越大、则权重越大。

3. 基于熵值法的综合评价模型

设 r_i 为第 i 个年份的综合评价得分，根据模糊隶属度打分计算公式，用上述所求得的指标权重线性加权来构造综合评价函数，则综合评价函数为：

$$r_i = \sum_{j=1}^m p_{ij} \times w_j \quad (15)$$

4.1.2 协调度模型及协调发展度模型

1. 协调度模型

协调度是刻画系统之间或系统内部各要素之间在系统发展过程中彼此和谐一致程度的定量指标。它体现了系统由无序走向有序的趋势，可以用来定量描述系统协调状况的好坏程度。依照协调度的概念，协调度可以度量区域在不同发展阶段中环境系统与经济系统之间协调状况好坏程度，可在一定程度上反映区域的可持续发展状况。本章通过变异系数对生态环境与经济协调度的计算模型进行

推导。

变异系数也称离散系数，是度量两组数据之间变异程度或离散程度的定量指标。要使生态环境与经济处于协调发展的状态，就必须使得生态环境系统和经济系统的综合评价指数 $F(EC)$ 与 $F(EV)$ 的变异系数 C 的取值越小越好。

变异系数的公式为：

$$C = \frac{S}{\bar{X}} \quad (S \text{ 是标准差, } \bar{X} \text{ 是均值}) \quad (16)$$

其中：

$$S = \sqrt{\frac{(F(EC) - \bar{X})^2 + (F(EV) - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (n=2) \quad (17)$$

$$\bar{X} = \frac{F(EC) + F(EV)}{2} \quad (18)$$

将其代入变异系数公式，转换得到：

$$C = \sqrt{2 \times \left[1 - \frac{F(EC) \times F(EV)}{\left(\frac{F(EC) + F(EV)}{2}\right)^2} \right]} \quad (19)$$

可以看出，使 C 取值越来越小的必要条件是： $C = \frac{F(EC) \times F(EV)}{\left(\frac{F(EC) + F(EV)}{2}\right)^2}$ 取值越大越好。为使计算出来的协调度取值能有一定的区分度，对 C 的计算公式取 K 次幂。这样，可得生态环境-经济系统的协调度计算为：

$$C_v = \left[\frac{F(EC) \times F(EV)}{\left(\frac{F(EC) + F(EV)}{2}\right)^2} \right]^K \quad (20)$$

其中， K 为调节系数， $K \geq 2$ ，取 $K = 2$ 。

从上面的公式中可知， $0 \leq C_v \leq 1$ 。当 C_v 越接近于 1，说明生态环境与经济的协调状况越佳，反之，当 C_v 越接近于 0，说明生态环境与经济的协调状况越差。

2. 协调发展度模型

协调度仅反映生态环境与经济系统的协调程度，却难以反映出生态环境与经济系统的整体发展水平，有可能出现这种情形：两个协调度取值相同的年份，一个年份是高水平的协调关系，另一个却是低水平的协调关系。为了更全面地反映生态环境与经济系统的协调发展水平高低，本文引入计算协调发展水平值的数学模型：

$$D = \sqrt{C_v \times F} \quad (21)$$

其中： D 为协调发展度， $F = \alpha F(EC) + \beta F(EV)$ 为“生态环境-经济”系统的综合评价指数， α 、 β 为权重： α 为经济子系统综合水平值在“生态环境-经济”系统中的权重； β 为生态环境综合水平值在“生态环境-经济”系统中的权重。考虑到生态环境状况水平与经济发展水平同等重要，因而权重一样，取 $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 0.5$ 。协调发展度不仅表征了生态环境子系统与经济子系统的协调状况，而且也体现了二者的整体发展水平，因而协调发展度更能反映区域生态环境与经济的协调发展状态。

3. 总体协调发展状态的趋势指数

为了反映各省生态环境与经济系统的总体协调发展状态的动态趋势，引入系统总体协调发展状态趋势指数：

$$\theta_t = \frac{D_t}{\frac{1}{t-T} \sum_{i=T}^{t-1} D_i} \quad (22)$$

其中： D_t 为时刻 t 生态环境与经济系统的协调发展度， $\frac{1}{t-T} \sum_{i=T}^{t-1} D_i$ 为时刻 T 到 $t-1$ 年生态环境与

经济系统的总体协调发展均值水平。

当 $\theta_t > 1$ 时,说明 T 到 t-1 年这段时间生态环境与经济的总体协调发展水平处于增长趋势;当 $\theta_t = 1$ 时,说明 T 到 t-1 年这段时间生态环境与经济的总体协调发展水平处于平稳趋势;当 $\theta_t < 1$ 时,说明 T 到 t-1 年这段时间生态环境与经济的总体协调发展水平处于衰减趋势。

4.2 模型实证分析

4.2.1 生态环境与经济交互状况的综合评价

由上述模型,将 2013 年-2017 年各省生态环境与经济发展指标进行无量纲化后,经上述协调度模型计算后,得到各省经济指标和生态环境指标的协调发展度,如下表(以北京为例):

表 8 北京市经济指标和生态环境指标的协调发展度

北京市	经济指标	环境指标	协调发展度 D
2017	1	0.893	0.968223552
2016	0.72598	0.812	0.872809165
2015	0.4398	0.4813	0.676573002
2014	0.2134	0.4243	0.474608068
2013	0.0178	0.1898	0.013561021
综合指标	0.47205745	0.56008	0.59844

表 9 各省经济与生态环境的交互情况

地区	经济指标	环境指标	交互性	地区	经济指标	环境指标	交互性
北 京	0.47205745	0.57091371	0.59844275	河南省	0.41476389	0.5360272	0.5788283
天 津	0.44201057	0.56400082	0.59210649	湖北省	0.417986835	0.5226814	0.5852747
河北省	0.41255286	0.51394795	0.58160116	湖南省	0.417335347	0.5198004	0.5852342
山西省	0.40546457	0.53931376	0.56377943	广东省	0.455887394	0.4895876	0.5982708
内蒙古	0.41535946	0.53884122	0.57887638	广 西	0.403462664	0.5429083	0.5585951
辽宁省	0.41937682	0.53383290	0.58399177	海南省	0.408145096	0.5729949	0.5615413
吉林省	0.40671063	0.54417470	0.56432654	重庆市	0.413408302	0.5556967	0.5728951
黑龙江	0.40994503	0.54456299	0.57043869	四川省	0.414671512	0.5200119	0.5824999
上海市	0.47295133	0.54922410	0.59880297	贵州省	0.398630363	0.5438478	0.5566967
江苏省	0.46104008	0.48501779	0.59709955	云南省	0.403413918	0.5186730	0.5647672
浙江省	0.45832566	0.52707965	0.59872368	西 藏	0.400210664	0.5749220	0.5437116

安徽省	0.40870101	0.53492431	0.57734284	陕西省	0.406831952	0.5463623	0.5647676
福建省	0.42642478	0.54666878	0.58692504	甘肃省	0.398148365	0.5662269	0.5388528
江西省	0.40635252	0.50123826	0.57616016	青海省	0.397612159	0.5649753	0.5372025
山东省	0.44588497	0.50363911	0.59880881	宁夏	0.400453503	0.5647503	0.5448923

表 10 各省生态环境与经济综合发展水平排名表

地区	生态环境综合发展水平排名	经济综合发展水平排名
北京	3	2
天津	7	7
河北省	27	16
山西省	17	23
内蒙古自治区	18	12
辽宁省	21	9
吉林省	13	21
黑龙江省	12	17
上海市	9	1
江苏省	31	3
浙江省	22	4
安徽省	20	18
福建省	10	8
江西省	29	22
山东省	28	6
河南省	19	13
湖北省	23	10
湖南省	25	11
广东省	30	5
广西壮族自治区	15	24
海南省	2	19
重庆市	8	15
四川省	24	14
贵州省	14	29
云南省	26	25
西藏自治区	1	28
陕西省	11	20
甘肃省	4	30
青海省	5	31
宁夏回族自治区	6	27
新疆维吾尔自治区	16	26

经上述模型分析，我们可以由各省的协调发展度将各省分为三类：失调衰退类、过渡协调发展、协调发展类。

(1) 失调衰退类

失调衰退类有广西、贵州省、新疆、宁夏、西藏、甘肃省、青海省、陕西省、云南省、吉林省、

山西省、海南省，尽管生态环境与经济的协调发展值一直趋于增大，但总体上处于失调衰退类。原因有两点：一是由于粗放式的经济增长方式，污染严重的钢铁、有色金属、纺织、电力、石化等夕阳产业仍然占据着区域的主导经济地位。二是环境保护意识薄弱，人口、资源矛盾突出，环境治理工作没有得到应有的重视。

(2) 过渡协调发展类

湖北省、湖南省、辽宁省、四川省、河北省、内蒙古、河南省、安徽省、江西省、重庆市、黑龙江生态环境与经济协调发展状况处于过渡协调发展类。一方面主要是由于粗放式经济增长方式开始得到转变，污染严重的传统工业比例降低，战略性新兴产业开始发展，高新技术产业产值占规模以上工业总产值的比例提升。另一方面是随着可持续发展意识的深入，国家开始出台相关政策，要求各地方政府完成一定的节能减排任务。

(3) 协调发展类

山东省、上海市、浙江省、北京、广东省、江苏省、天津、福建省生态环境与经济协调发展状况处于协调发展类，且协调发展度处于直线上升的趋势。主要是由于这期间战略性新兴产业开始蓬勃发展，服务业的发展得到了空前的重视，同时前期各省节能减排任务成效显著，环境治理工作得到了深入开展，生态省、生态市、生态县的建设也不断加强。

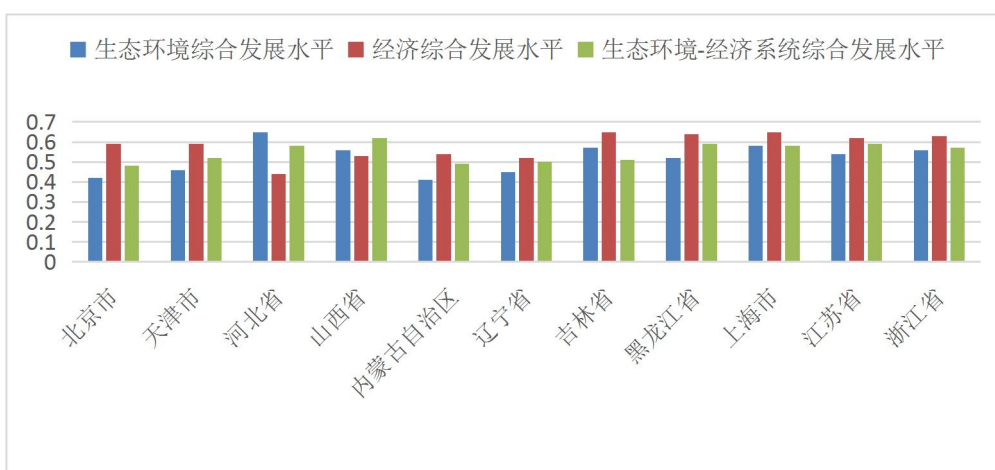


图3 各省生态环境与经济协调发展的评价结果图

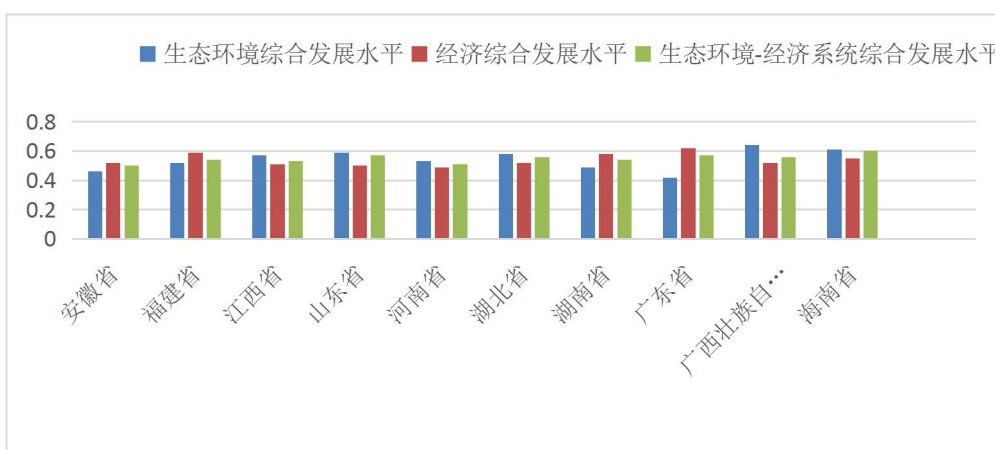


图4 各省生态环境与经济协调发展的评价结果图

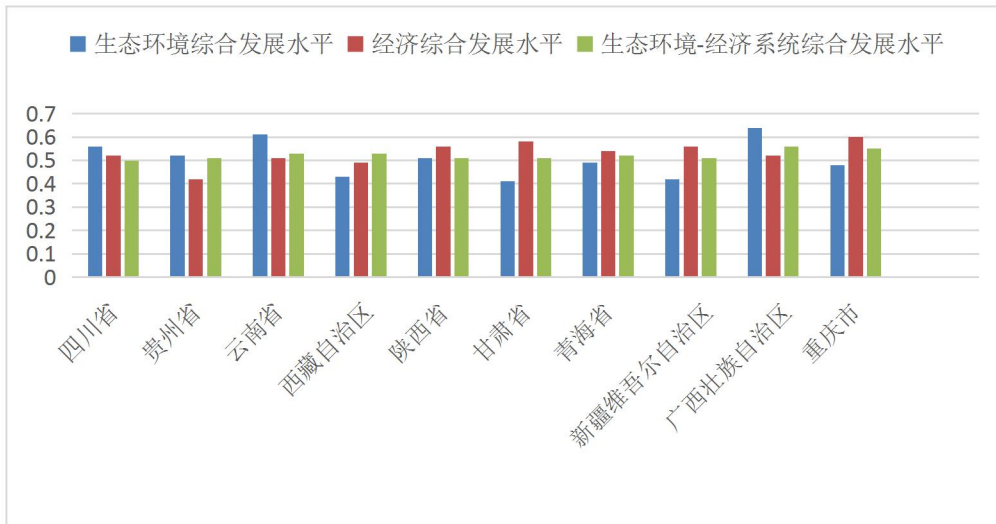


图 5 各省生态环境与经济协调发展的评价结果图

经对 2013 年至 2017 年各省生态环境和经济发展情况综合评价分析后，得到 2013 年至 2017 年各省生态环境与经济交互状况的排序情况如下表所示：

表 12 2013 年至 2017 年各省生态环境与经济交互状况排序表

01 山东省	0.5988088	09 湖北省	0.5852747	17 江西省	0.5761601	25 广西	0.5585951
02 上海市	0.5988029	10 湖南省	0.5852342	18 重庆市	0.5728951	26 贵州省	0.5566967
03 浙江省	0.5987236	11 辽宁省	0.5839917	19 黑龙江	0.5704386	27 新疆	0.5462578
04 北京	0.5984427	12 四川省	0.5824999	20 陕西省	0.5647676	28 宁夏	0.5448923
05 广东省	0.5982708	13 河北省	0.5816011	21 云南省	0.5647672	29 西藏	0.5437116
06 江苏省	0.5970995	14 内蒙古	0.5788763	22 吉林省	0.5643265	30 甘肃省	0.5388528
07 天津	0.5921064	15 河南省	0.5788283	23 山西省	0.5637794	31 青海省	0.5372025
08 福建省	0.5869250	16 安徽省	0.5773428	24 海南省	0.5615413		

4.2.2 各省间生态环境协作治理的具体方式分析

经由上述综合评价模型，对 2013 年至 2017 年生态环境与经济发展综合分析后，我们可以总结出各省建生态环境协作治理的具体方式。

1. 树立经济发展与生态环境协调发展的理念

各省应以人与环境相互协调为宗旨，以城市建设中经济发展、社会进步和环境保护的高度和谐为目标，利用环境建设与治理，调整城市产业结构与工业布局，改善人民居住的自然环境和社会环境，提升城市功能和价值，从而最大限度地发挥人类的创造力、生产力，并促使城市文明程度不断提高，人和自然达到充分融合，城市稳定、协调和永续发展。

2. 将环境因素纳入经济决策中，科学定位城市发展方向

治理改善环境不是单纯的为环境而环境，而是经济发展不可缺少的因子或载体。各省建设依据可持续发展战略，对城市规模、功能进行重新定位，以环境革命为突破口，以生态城市为建设目标进行规划。限制城市建设规模，提高建筑水准；限制人口规模，提高人口素质；重在质的提高，而不是量的扩张。在经济发展过程中，突出自己特有的地理环境、人文景观，使人文景观和自然山水浑然一体。城市功能由过去的工业中心重新定位为区域性国际航运、商贸、金融、旅游、信息中心。

通过环境优先、城建优先、创造良好的经济发展环境，从根本上解决城市发展的出路。

3. 注重长期利益

环境保护的前期投资具有投入大、资本回收期长的特点，但从收益与投入资金的比例来说，环境保护的收益却具有投入小、收益高的特点。

4. 坚持“四个统一”和“六个转变”的原则

各省在经济发展与生态环境协调发展过程中要始终坚持四个统一和六个转变的原则。“四个统一”，即一是环境保护与经济发展相统一。找准结合点，把环境保护融入经济发展全局，避免决策失误，增强经济发展后劲。二是环境保护与产业结构调整相统一。坚决淘汰污染严重、资源浪费的落后生产工艺，优化产业结构，重点支持高新技术产业发展。三是治标与治本相统一。在抓好“一控双达标”的同时，狠抓源头控制，严格执行环境影响评价和“三同时”制度，提高可持续发展水平。四是严格执法与优质服务相统一。既严厉打击各种破坏生态、污染环境的行为，又坚持“法德并行”，提高办事效率，为治理污染和保护生态提供优质服务。“六个转变”，即：一是由被动应付向主动出击、依法保护转变，改变先污染后治理的局面。二是由重点治理老污染源向从严格控制新污染源转变。通过抓源头，切实控制污染物排放总量。三是由点源治理向面源控制转变。把生活污染、农村面源污染和工艺过程的跑冒滴漏等分散型污染的整治摆上重要议程。四是由低水平的末端治理向应用高科技的全过程控制转变。对生产原料、工艺技术进行全过程控制和管理。五是由局部环境专项整治向流域性、区域性和行业性综合防治转变。通过经济结构战略性调整，使环境质量得到根本性改善。六是由单纯工业治理向生态环境综合治理转变。树立“大环保”观念，建设良好生态环境，实现污染防治与生态保护同步发展。

参考文献

- [1]潘慧玲. 江苏生态环境与经济协调发展研究[D].江南大学,2012.
- [2]王娟, 侯青, 欧阳玉秀. 关于经济增长与社会发展的关系研究[J]. 经济师, 2011, (05): 41-42.
- [3]蔡宁. 经济与环境协调发展理论与实证[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [4]胡国良. 新疆地区人口、资源、环境与经济协调发展综合评价[J]. 新疆大学学报(哲学、人文社会科学版), 2009, 37(4): 23-26.
- [5]柯健, 李超. 基于 DEA 聚类分析的中国各地区资源、环境与经济协调发展研究[J]. 中国软科学, 2005(2): 144-148.
- [6]廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系—以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177.
- [7] 钟水印, 简新华. 人口、资源与环境经济学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 张秀梅. 区域生态环境与经济协调发展评价研究—以镇江市为例[D]. 南京大学, 2011.
- [9]卢炎秋. 武陵山片区生态环境与社会经济协调发展研究[D]. 中国地质大学, 2015.
- [10]杨晶, 金晶, 吴泗宗. 珠三角地区城市化与生态环境协调发展的动态耦合分析—珠海市为例[J]. 地域研究与开发, 2013, 32: 105-108.
- [11]李琪珊. 广东环境质量对经济增长的影响实证研究—基于库兹涅茨曲线[J]. 科技管理研究, 2015, 35: 237-241.
- [12]张子龙, 陈兴鹏, 杨静, 等. 甘肃省经济增长与环境压力关系动态变化的结构分解分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21: 429-433.
- [13]江红莉, 何建敏. 区域经济与生态环境系统动态耦合协调发展研究—基于江苏省的数据[J]. 软科学, 2010, 24: 63-68.
- [14]任志远, 徐茜, 杨忍. 基于耦合模型的陕西省农业生态环境与经济协调发展研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25: 14-19.
- [15]刘兆顺, 尚金城, 许文良, 等. 吉林省东部资源型县域经济与生态环境协调发展分析—汪清县为例[J]. 师吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(02) 265-269.