

中国省级行政区生态环境可持续性评价

黄宝荣¹, 欧阳志云^{1,*}, 张慧智², 郑 华¹, 徐卫华¹, 王效科¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院南京土壤研究所资源与遥感应用研究室, 南京 210008)

摘要:从自然条件、人类胁迫、生态环境效应和社会响应 4 个主题出发, 构建了包含 28 个指标的中国省级行政区生态环境可持续性评价指标体系, 并通过专家调查和层次分析法为各主题层中的指标赋权。分别用各主题层中的指标和对应的权重, 采用加权平均法构建自然条件 (NSI)、人类胁迫 (HPI)、生态环境效应 (EEI) 和社会响应 (SRI) 4 个分指数, 然后用这 4 个分指数通过灰色关联法构建综合生态环境可持续性指数 (CEI), 对我国各省级行政区生态环境可持续性进行评价。同时论文通过主成分分析法和相关分析法分析造成各指数地域差异的主导因素和评价中指标赋权的合理性。最后以 4 个分指数作为变量, 采用快速样本聚类法对我国 31 个省级行政区进行聚类分析。评价结果表明, 2003 年我国各生态环境指数存在显著的地域差异。自然条件从东南到西北呈明显的由优到劣的过渡趋势, 降雨量、年均气温、森林覆盖率和水网密度 4 个指标是导致地域差异的主导因素; 人类胁迫东部发达地区明显高于西部和中部地区, 同一个地区经济发展水平存在显著的正相关; 生态环境效应西北地区最为显著, 同各地区自然条件存在显著的负相关, 在人类活动干扰下, 自然条件差的地区更容易发生生态损害与退化; 社会响应无明显的地域分析规律, 各地区经济发展水平对其有一定影响, 但并非决定性因素。区域综合生态环境可持续性由区域 NSI、HPI、EEI 和 SRI 共同决定, 综合评价得到 2003 年我国各省级行政区生态环境可持续性排序情况, 其中生态环境可持续性最强的几个地区为海南、云南、广西、江西等地, 最弱的几个地区为内蒙古、宁夏、上海、西藏、新疆等地。最后, 聚类分析把我国 31 个省级行政区聚为生态环境特点各异的六大类, 可以促进我国生态环境的分类管理。

关键词:行政区; 生态环境质量; 指标; 指数; 评价; 主成分分析; 聚类分析

文章编号: 1000-0933(2008)01-0327-11 中图分类号: Q146, Q149, X32 文献标识码: A

Eco-environmental sustainability assessment of each province in China

HUANG Bao-Rong¹, OUYANG Zhi-Yun^{1,*}, ZHANG Hui-Zhi², ZHENG Hua¹, XU Wei-Hua¹, WANG Xiao-Ke¹

¹ Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

² Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0327 ~ 0337.

Abstract: Agenda 21 emphasizes the role of local authorities as an important resource in pursuit of sustainability. Key aspects in this process are the collection of information about the state of the environment and the integration of this information at the various levels of local governance to highlight useful patterns for policy planning. As it is very difficult to evaluate the environmental performance on the grounds because of too many environmental indicators, i. e. too much information, we should reduce the number of indicators by aggregating them to one or several composite environmental indexes to make the environmental information more accessible.

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-422); 国家“十一五”科技攻关资助项目 (2006BAC01A01)

收稿日期:2007-05-15; **修订日期:**2007-10-30

作者简介:黄宝荣 (1977 ~), 男, 江西九江人, 博士生, 主要从事生态评价与规划研究. E-mail: huangbaro@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@mail.reees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-422) and National Key Technology R&D Programme, China (No. 2006BAC01A01)

Received date: 2007-05-15; **Accepted date:** 2007-10-30

Biography: HUANG Bao-Rong, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecological assessment and planning. E-mail: huangbaro@yahoo.com.cn

Based on “naturally occurring state; human pressures; environmental effects; and social responses” four environmental sustainability themes, this paper developed an indicator system including ten contributing factors and twenty-eight indicators for assessing the environmental sustainability of each province in China. In this categorical system, indicator weight was determined through analytic hierarchy processes and expert survey methods. Four sub-indices — including natural state index (NSI), human pressure index (HPI), environmental effect index (EEI), and social response index (SRI) — were aggregated through additive weighting method. Then, the composite environmental sustainability index (CEI) of each province was calculated by averaging the grey relation performance correlations between the four sub-indices and their hypothetical ideal point. Higher values of CEI demonstrated that the environment of a local province is more sustainable. At the same time, indicators in each theme were analyzed by correlation and principal component analysis (PCA) in search of meaningful underlying variables which derive regional differentiation of each sub-index. Finally, the paper conducted a cluster analysis, which identifies statistically related groups of provinces based on the similarity of sub-indices, a step that would likely prove very helpful in identifying appropriate provinces against which local environmental sustainability and policies can be benchmarked and compared.

The results demonstrated that in each province there were obvious regional differentiations of natural conditions, human pressures, environmental effects, and social responses. The NSI in each province of East and South China was greater than West and North China, a result that was mainly determined by rainfall, air temperature, water-resource index and rate of forest cover in each province. The HPI in each developed province of Eastern China was greater than in poor provinces of Central and Western China, which demonstrated significant positive correlations with economic level, namely the GDP per capita in each province. The EEI in Northwest China was greater than for other regions, and it is negatively correlated with NSI; in regions with a poor natural state, little human pressure would lead to significant ecological effects. The SRI did not show any obvious special differentiation rules — that is, economic growth would promote social response, but wasn't decisive factor; and social response also influenced by national policy and local development strategy. Eco-environmental sustainability in each province was determined by NSI, HPI, EEI and SRI. Through grey correlation analysis of the four sub-indices, this paper developed the CEI of each province. According to 2003 data, Hainan Province, Yunnan Province, Guangxi Autonomous Region, and Jiangxi Province rate at the top ranks of CEI. These four regions are endowed with good natural states, less human pressure, unapparent eco-environmental effects, and high social responses. At the bottom ranks of CEI are four Autonomous Regions — Neimengu, Ningxia, Tibet and Sinkiang — with poor natural states and serious eco-environmental effects, along with Shanghai Municipality which exhibits high human pressure and serious eco-environmental effects. The cluster analysis classed thirty-one provinces into six groupings which could be seen as having observable similarities and thus representing a useful point of departure for policy comparisons.

Key Words: administrative divisions; eco-environmental quality; indicator; index; assessment; principal component analysis, cluster analysis

联合国可持续发展 21 世纪议程强调了地方政府在促进国家和全球可持续发展中所发挥的重要作用。地方政府首先需要解决的问题是对当地生态环境可持续性状况进行评价,用各种相关指标,构建综合生态环境指数(Composite environmental index, CEI),为生态环境管理数字化决策和公众提供更直观、清晰的信息^[1]。自 20 世纪 70 年代以后,对于如何选择评价指标并构建综合生态环境指数(CEI),国内外研究者开展了广泛的研究^[2]。在早期的研究中,由于缺乏基础生态环境信息数据以及系统合理的综合评价方法,CEI 实际运用存在困难^[1]。20 世纪末,随着生态环境综合管理中信息需求的增大和各种监测技术的发展以及分析方法的完善,CEI 研究逐渐成为热点,在不同尺度上都有相关研究。在国家尺度上,Hope 等^[3]、Butter 和 Eyden^[4]、Kang 等^[5]分别构建了针对于英国、荷兰和韩国的 CEI,用来评价各国生态环境质量的多年动态变化;在区域

尺度上,Bergh 和 Veen-groot 构建了针对 12 个 OECD 国家的 CEI,用于评价比较 12 个国家生态环境质量的区域差异^[6];在全球尺度上,2005 年,耶鲁大学环境法与政策研究中心(YCELP)与哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心(CIESIN)^[7]构建了全球环境可持续性指数(Environmental sustainability index, ESI),并对 146 个国家生态环境可持续性进行评价排序;2006 年,YCELP 和 CIESIN 对 ESI 进行了改进,使评价更具有针对性^[8,9]。在国内,万太本、刘全友、郝永红、吴开亚、李崧、王军^[10~16]也分别从不同的角度构建了针对我国不同地区的指标体系和 CEI,促进了我国相关研究领域的发展。

尽管一些研究进行了不同的探索,但是对包含多种不同类型生态系统的区域生态环境进行评价时,需要综合考虑生态环境的多维性、复杂性和不确定性,评价工作非常困难。中国同发达国家所处的发展阶段和所面临的需要优先解决的生态环境问题不同,发达国家所建立的一些 CEI 并不符合我国国情,而国内的一些研究往往侧重于复合生态系统的评价,评价中引入大量的社会、经济指标,弱化了生态环境指标,不能为生态环境管理提供简洁明了的信息。中国不同的气候、地理特征造就了各地区自然条件的多样性,在不同的自然条件、历史和文化等因素的共同作用下,各地区社会经济发展阶段和模式各异,给自然生态系统造成的胁迫类型和大小存在差异,生态环境管理的侧重点也不相同,生态环境效应和演变规律存在很大的空间异质性,所表现综合生态环境可持续性程度不一。通过综合评价分辨出各地区生态环境各方面特征的差异有利于我国区域生态环境的综合与分类管理。

1 研究方法

1.1 指标体系

在仔细研究国内外关于区域生态环境评价领域文献^[1,3~16]、征求多位生态学、环境科学方和其它领域的专家的意见后,根据中国实际情况以及相关的指标选择标准和数据的可获取性,建立中国省级行政区生态环境评价指标体系(表 1)。指标体系包括 4 个主题:自然条件是人类社会和其它生物赖以生存的生命支撑系统,决定一个地区的生态承载力和生态服务功能的大小;人类胁迫是指人类的生产、生活活动对生态环境产生的干扰和胁迫,是各地区生态环境退化的重要驱动因素之一;生态环境效应是区域生态环境质量最直接的表征,是区域自然条件、人类胁迫、社会响应交互和多年累积作用结果的外在反映;社会响应是全社会为了保护生态环境、缓解生态环境压力、修复损害与退化生态系统而做的各种努力。本文认为当一个地区同时具备良好的自然条件、较小的人类胁迫、较小的生态环境效应和较大的社会响应时,其生态环境具有可持续性。

各指标相对于目标层的权重由专家调查判断矩阵结合层级分析法获取,专家调查中共发放 40 份调查表,收回 21 份,其中有效调查表 17 份(涵盖了多领域专家),用层次分析法分析 17 份调查表获得各指标相对于各目标层的权重,取各专家调查表的所得权重的平均值作为各指标相对于目标层的权重(表 1)。

1.2 数据来源

指标原始数据来主要来源于中国统计年鉴 2004^[17]、中国环境年鉴 2004^[18],和 2003 年各地区环境状况公报。部分指标数据由原始数据经转换运算或者加权运算得到。

1.3 评价模型

分两步构建综合生态环境可持续性指数:(1)针对 4 个主题层采用加权平均法构建 4 个分指数;(2)用 4 个分指数值通过灰色关联法构建 CEI。

1.3.1 加权平均

用式(1)对表 1 中各指标的原始数据值(P_{ij})进行标准化处理,得到标准化数值 E_{ij} ,再用表 1 中各主题层指标相对权重(w_j)及式(2)计算各地区自然条件指数(NSI)、人类胁迫指数(HPI)、生态环境效应指数(EEI)和社会响应指数(SRI):

$$E_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 28) \quad (1)$$

$$S_{ki} = \sum_{j=1}^n w_{kj} E_{kij} \quad (k = 1, 2, 3, 4, \text{代表 4 个主题层}) \quad (2)$$

表 1 中国各省级行政区生态环境可持续性评价指标体系

Table 1 Indicator for assessing regional environmental sustainability of each province in China

主题 Themes	贡献因素 Contributing factors	指标及相对权重 Indicators and relative weights
自然条件 Natural State	气候适宜性 Climate suitability	I1 年降雨量 Annual rainfall (mm) (0.2285); I2 年均气温 Mean annual air temperature (°C) (0.1644)
	水资源供给 Water supply	I3 水网密度 Water resource index (km/km ²) (0.1742)
	植被覆盖 Vegetation cover	I4 森林覆盖率 % forested area (0.2000); I5 草地覆盖率 % grass area (0.1310); I6 耕地面积占国土面积的比例 % agricultural land (0.1020)
人类胁迫 Human pressure	人类栖息胁迫 Human habitation	I7 人口密度 Population size (inhabitants per km ²) (0.0709); I8 建设用地占国土面积比 Percentage of land area served as construction land (%) (0.0769)
	资源利用胁迫 Resource use	I9 人均能耗 Energy consumption per inhabitant (tec/inhabitant) (0.1029); I10 人均水耗 Water consumption per inhabitant (ton/inhabitant) (0.1071)
	污染胁迫 Pollutants emission	I11 工业污水排放强度 Discharge intensity of industrial wastewater (ton/km ²) (0.1410); I12 工业废气排放强度 Emission intensity of industrial waste gas (ton/km ²) (0.1308); I13 工业固体废弃物排放强度 Discharge intensity of industrial solid waste (ton/km ²) (0.1130); I14 农药使用强度 Use of pesticides per hm ² of farmland (ton/hm ²) (0.1355); I15 化肥施用强度 Use of fertilizer per km ² of farmland (ton/hm ²) (0.1218)
生态环境效应 Eco-environment effect	环境污染 Environmental pollution	I16 主要河流水质劣于 3 类比例 Percentage of river with water quality worse than class III of the environmental quality standards for surface water (%) (0.2049); I17 大气污染指数 Air pollution index (0.1733); I18 酸雨频率 Acid rain frequency (%) (0.1212)
	生态退化 Ecological degradation	I19 濒危陆生脊椎物种比例 Percentage of endangered vertebrate species (%) (0.1436); I20 水土流失指数 Soil erosion index (0.1641); I21 荒漠化土地面积占国土面积比 Percentage of land area desertification (%) (0.1929)
社会响应 Social response	污染治理 Pollution control	I22 环境保护投资占 GDP 比例 Environmental expenditure as a share of GDP (%) (0.1684); I23 工业废水排放达标率 Proportion of industrial effluent that meet the local discharge standards (%) (0.1663); I24 城市生活垃圾无害化处置率 Percentage of disposal harmlessness of city-garbage (%) (0.1143); I25 工业过程产生的 SO ₂ 去除率 Proportion of SO ₂ eliminated from waste gases (%) (0.1433);
	生态保护 Ecological protection	I26 自然保护区占国土面积比例 Percent of land area legally set aside as reserves (%) (0.1684); I27 节水灌溉耕地面积比 Proportion of farmland applied water saving technology (%) (0.1146); I28 人均沼气占有量 Volume of methane fuel gas serving as alternative energy average per inhabitant (m ³ /inhabitant) (0.1248)

1.3.2 灰色关联分析

NSI、HPI、EEI 和 SRI 是综合生态环境多维空间中不同方向上的向量,如果不经向量投影直接把它们线性加和构建 CEI,会使部分信息的贡献作用被夸大或者缩小。为了克服这一影响,本文用这 4 个分指数采用灰色关联法构建 CEI。灰色关联分析的基本思想是根据样本向量和最优化向量曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之就越小^[19]。

取自然条件指数和社会响应指数的最大值、人类胁迫和生态环境效应指数的最小值作为综合生态环境可持续性的最优化向量 $\vec{S}(S_{1,0}, S_{2,0}, S_{3,0}, S_{4,0})$,采用灰色关联法计算各地区各分指数同最优化向量之间的关联度(式 3),求 4 个关联度的平均值作为综合生态环境可持续性值 CEI(式 4)。

$$\xi_{ki} = \frac{\min_k \min_i |S_{k0} - S_{ki}| + p \max_k \max_i |S_{k0} - S_{ki}|}{|S_{k0} - S_{ki}| + p \max_k \max_i |S_{k0} - S_{ki}|} \quad (p \text{ 为分辨系数,取 } 0.5) \quad (3)$$

$$CEI = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \xi_{ki} \quad (4)$$

1.4 多元统计分析

采用主成分分析法^[20]分析各主题层,通过提取的主成分分析各主题层中起主导作用和存在协同作用的指标,结合各分指数间或者分指数同人均 GDP 间的相关性分析,找出导致各分指数地域差异性的主导因素。

把上面所得到 4 个分指数值作为变量,通过 SPSS11.5 软件包对全国 31 个地区进行快速样本聚类^[8],聚类的个数主要取决于各聚类有没有显著的现实意义(各聚类生态环境特点分明)和统计学(F 检验)意义。

2 结果与讨论

通过评价模型,得到 2003 年各地区 NSI、HPI、EEI、SRI 和 CEI 值及排序如表 2 所示。其中 NSI、SRI、CEI 值越大越好,而 HPI 和 EEI 值越小越好。

表 2 各地区生态环境可持续性评价结果

Table 2 Assessment results of eco-environmental sustainability of each province in China

地区 Region	NSI		HPI		EEI		SRI		CEI	
	指数值 Value	等级 Rank	指数值 Value	等级 Rank	指数值 Value	等级 Rank	指数值 Value	等级 Rank	指数值 Value	等级 Rank
北京 Beijing	0.4012	21	0.3698	2	0.2579	27	0.5092	1	0.6954	14
天津 Tianjin	0.4395	20	0.3209	5	0.3223	20	0.4712	4	0.6692	21
河北 Hebei	0.3705	23	0.1891	14	0.4125	7	0.3341	23	0.6176	26
山西 Shanxi	0.3347	26	0.1345	23	0.4480	5	0.3277	25	0.6246	25
内蒙古 Neimenggu	0.2814	28	0.0623	27	0.6594	1	0.2938	28	0.6135	27
辽宁 Liaoning	0.4576	19	0.1918	13	0.3667	14	0.4549	5	0.6878	17
吉林 Jilin	0.4703	18	0.0788	24	0.2485	29	0.3279	24	0.7255	8
黑龙江 Heilongjiang	0.3624	24	0.0655	26	0.2847	23	0.2975	27	0.6947	15
上海 Shanghai	0.6742	9	0.8285	1	0.3942	11	0.3782	17	0.6042	29
江苏 Jiangsu	0.5296	15	0.3263	4	0.3304	18	0.4413	9	0.6682	22
浙江 Zhejiang	0.7705	3	0.2887	7	0.3728	13	0.4515	6	0.7526	5
安徽 Anhui	0.6136	10	0.1839	15	0.2652	26	0.3916	16	0.7276	7
福建 Fujian	0.7770	2	0.3438	3	0.2398	30	0.3759	18	0.7524	6
江西 Jiangxi	0.7582	5	0.2060	12	0.2663	25	0.4427	8	0.7958	4
山东 Shandong	0.4957	17	0.2533	8	0.3235	19	0.4365	10	0.6787	20
河南 Henan	0.5137	16	0.2112	11	0.3514	15	0.3381	22	0.6503	24
湖北 Hubei	0.6057	11	0.2508	9	0.2841	24	0.3738	19	0.6918	16
湖南 Hunan	0.7199	6	0.2192	10	0.3454	16	0.3561	21	0.7163	10
广东 Guangdong	0.7683	4	0.2943	6	0.3153	21	0.2800	29	0.7049	11
广西 Guangxi	0.7092	8	0.1718	17	0.2502	28	0.4899	2	0.8158	3
海南 Hainan	0.8093	1	0.1583	19	0.1243	31	0.3999	12	0.8899	1
重庆 Chongqing	0.5337	13	0.1402	21	0.4061	9	0.3923	14	0.6861	18
四川 Sichuan	0.5317	14	0.1352	22	0.3068	22	0.4195	11	0.7238	9
贵州 Guizhou	0.5826	12	0.0535	28	0.3853	12	0.2421	30	0.7024	12
云南 Yunnan	0.7179	7	0.0512	30	0.3369	17	0.4815	3	0.8452	2
西藏 Tibet	0.3406	25	0.1432	20	0.4050	10	0.1684	31	0.5932	30
陕西 Shaanxi	0.4006	22	0.0770	25	0.4106	8	0.3056	26	0.6630	23
甘肃 Gansu	0.2911	27	0.0468	31	0.5371	4	0.4486	7	0.6955	13
青海 Qinghai	0.2586	30	0.0531	29	0.4173	6	0.3923	15	0.6852	19
宁夏 Ningxia	0.2813	29	0.1606	18	0.5918	3	0.3977	13	0.6084	28
新疆 Xinjiang	0.1638	31	0.1823	16	0.6090	2	0.3652	20	0.5742	31

2.1 各指数的地域差异主导与驱动因素分析

2.1.1 自然条件指数(NSI)

各地区自然条件从东南到西北有一个明显的由优到劣的逐步过渡趋势(表 2)。采用主成分分析法分析自然条件主题层得到第 1、2 主成分累计方差贡献率高达 84.939%(表 3),表明指标间有较强的协同作用。第 1 主成分方差贡献率高达 60.42%,旋转载荷向量中年降雨量、年均气温、森林覆盖率和电网密度 4 个指标占主导地位,它们的地域差异主导着我国自然条件的东西和南北差异,而专家调查也给这 4 个指标赋予了较高

的权重;随降雨和水网密度的增加,草地让位于森林或者被开垦为耕地,所以在两个主成分中负荷都为负值;而耕地面积受降雨、气温和水网密度影响较小,在第 1 主成分中负荷小,而独立于第 2 主成分。如果仅仅从指标数据所包含的客观信息来看,草原和耕地对一个地区自然条件的维持和贡献作用小,甚至存在负面影响。但实际上,在一些地区草地和耕地在生物多样性维持、二氧化碳固定和水土保持中发挥着巨大的作用,如果直接采用主成分赋权会忽略它们的作用。专家调查赋予了这两个指标一定的权重,使它们在各地区自然条件指数地域差异分辨中发挥作用。

表 3 自然条件主题层指标主成分分析

Table 3 Principal components analysis for the theme of natural state

成份 Components	特征值 Eig.	方差贡献率 Prop. Var.	累计方差贡献率 Cumul. Prop.	旋转载荷向量 Rotated comp. matrix					
				I1	I2	I3	I4	I5	I6
主成分 1 Comp. 1	3.626	60.428	60.428	0.954	0.908	0.758	0.859	-0.328	-0.043
主成分 2 Comp. 2	1.471	24.511	84.939	0.156	0.184	0.486	-0.041	-0.860	0.952

2.1.2 人类胁迫指数(HPI)

2003 年,东南部沿海地区人类活动所造成的胁迫明显高于中部和西部地区。主成分分析法分析人类胁迫主题层得到第 1、2 主成分方差贡献率共为 79.984% (表 4),指标间存在很强的协同作用。第 1 主成分方差贡献率高达 61.675%,其中人口密度、建设用地面积比、工业三废排放强度通过协同作用,主要反映城市与工业给自然生态系统带来的胁迫,是人类胁迫中的主导因素;第 2 主成分中人均能耗、人均水耗、农药使用强度、化肥施用强度通过协同作用,主要反映资源利用和农业面源污染所带来的胁迫。人均水耗在第 1、2 主成分中负荷都为负值,同其它胁迫指标间存在负秩相关性;但是由于我国普遍受水资源短缺的影响,一些地区高的人均水耗所带来的生态胁迫(如生态用水短缺)不容忽视,所以大部分专家对其赋予一定权重。

相关分析发现,HPI 同人均 GDP 间它们间存在显著的正相关性(图 1),尽管指标体系中没有直接采用经济指标,但是经济发展水平高的地区,相应的 HPI 较大,表明目前我国经济的发展总体上是建立在加大对生态环境胁迫的基础上^[6]。

表 4 人类胁迫指标主成分分析

Table 4 Principal components analysis for indicators of natural base

成份 Components	特征值 Eig.	方差贡献率 Prop. Var.	累计方差贡献率 Cumul. Prop.	旋转主成分载荷向量 Rotated comp. matrix								
				I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15
主成分 1 Comp. 1	6.617	61.675	61.675	0.967	0.801	0.570	-0.017	0.955	0.984	0.961	0.211	0.461
主成分 2 Comp. 2	1.831	18.309	79.984	0.219	0.325	-0.571	-0.519	0.108	0.000	0.054	0.858	0.743

2.1.3 生态环境效应指数(EEI)

2003 年,西北部地区生态环境效应比东南部地区显著。主成分分析法分析生态环境效应主题层得到第 1 主成分方差贡献率仅 36.187%,指标间的协同作用小,其中主导指标为荒漠化土地面积占国土面积比和水土流失指数,反映地区生态退化状况;第 2 主成分中的主导指标为主要河流水质劣于Ⅲ类比例和酸雨频率,反映区域环境污染效应;第 3 主成分主导指标为大气污染指数,反映城市环境污染效应。河流水质劣于Ⅲ类比例在第 1、2 主成分中负荷为负值,而在第 3 主成分中为低负荷,濒危物种所占比例在 3 个主成分中负荷都比较低,如果直接采用主成分分析,这两个指标所反映的区域生态环境损害与退化会被弱化,造成评价误差;加权平均法构建生态环境效应指数时,考虑它们对区域生态环境可持续性的极大影响,大部分专家赋予了其较高的权重,更符合人类的价值判断与生态学基本原理。

相关性分析发现,EEI 同 NSI 间存在显著的负相关性,采用对数回归(图 2),回归效果显著,表明一个

地区的生态环境效应在一定程度上受其所处的自然条件的影响,在人类活动干扰下,自然条件差的地区生态环境敏感,更容易发生生态退化和损害,表现出更显著的生态环境效应。

表 5 生态环境效应指标主成分分析

Table 5 Principal components analysis for the theme of natural state

成份 Components	特征值 Eig.	方差贡献率 Prop. Var.	累计方差贡献率 Cumul. Prop.	旋转载荷向量 Rotated comp. matrix					
				I16	I17	I18	I19	I20	I21
主成分 1 Comp. 1	2.171	36.187	36.187	-0.078	0.182	-0.549	0.497	0.864	0.907
主成分 2 Comp. 2	1.706	28.430	64.617	-0.909	-0.027	0.629	0.516	-0.005	0.024
主成分 3 Comp. 3	1.015	16.923	81.539	0.160	0.914	0.222	-0.567	0.116	0.039

2.1.4 社会响应指数(SRI)

社会响应无明显的地理分异规律,2003 年一些自然条件恶劣,经济发展水平低的地区,如甘肃、宁夏,表现出了高的社会响应;而一些自然条件好,经济发达地区如广东社会响应偏低。相关分析发现社会响应主题层中 42 对指标仅 3 对指标间(I23 ~ I24、I23 ~ I26、I23 ~ I27)存在显著的相关性而且其中仅有 1 对指标间(I23 ~ I24)的相关性为真相关性,表明指标间的协同作用小,指标体系所反映的社会响应类型是多维的,不适合用

采用主成分分析法对其进行分析。针对目前我国所面临的需要优先解决的生态环境问题,专家普遍认为提高环保投资、加强自然保护区建设和工业水污染控制是目前我国需要优先执行的生态环境管理策略,固把 I22、I23 和 I26 作为主导指标,赋予了较高的权重。

相关分析发现,SRI 同人均 GDP 之间存在显著的正相关性,剔除上海市后,采用一元线性回归(图 1),回归方程显著,表明经济的发展有助于提高一个地区的社会响应。但是回归方程的回归系数较小,表明经济发展水平并非社会响应的唯一决定性因素,社会响应的大小还受地区国家宏观政策、地方发展定位与生态环境意识的影响。

2.1.5 生态环境可持续性指数(CEI)

区域生态环境可持续性由区域自然条件本底、人类胁迫和社会响应的交互累积作用以及生态环境效应表征共同决定。2003 年我国各地区生态环境可持续性由强到弱排序见表 2,海南、云南、广西、江西 4 地为生态环境可持续性最强的 4 个地区,自然条件优越,经济发展水平较低,人类胁迫小,生态环境损害与退化程度小,而且社会响应程度较高;新疆、西藏、上海、宁夏、内蒙古为生态环境可持续性最差的 5 个地区,除上海市人类胁迫过大外,其它地区人类胁迫较小,但是由于自然条件恶劣,生态环境效应十分显著。

分析 CEI 同其它分指数间的相关性发现,尽管在 CEI 构建过程中没有采用线性的方法,但 CEI 依然同 NSI 和 EEI 存在显著的线性回归关系(图 2),表明自然条件和生态环境效应是一个地区生态环境可持续性最

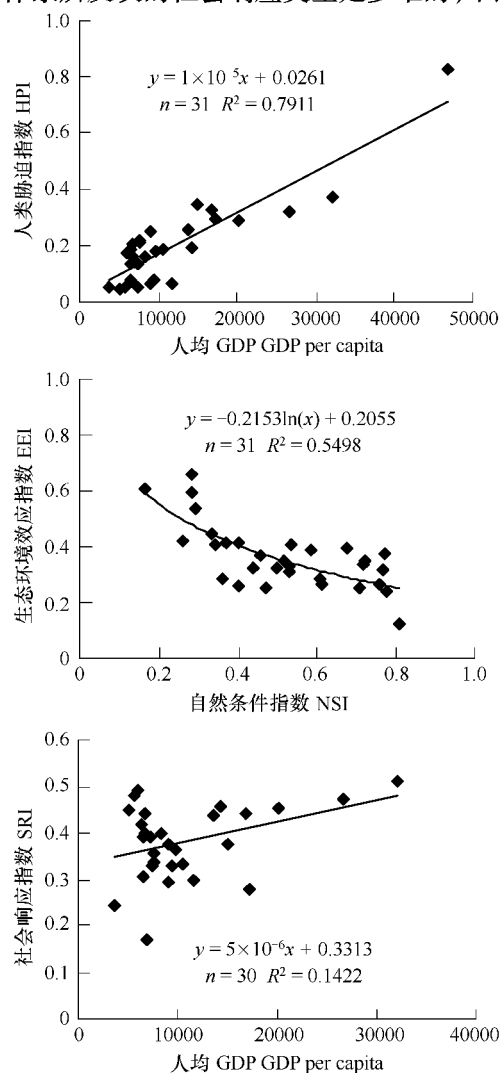


图 1 各分指数地域差异与驱动因素回归分析

Fig. 1 Linear regressions between sub-indices and driving factors

直接的影响因素;CEI 同 HPI 和 SRI 回归效果不显著,人类胁迫和社会响应通过间接的作用对一个地区的生态环境可持续性造成影响,由于人类胁迫和社会响应类型多样,它们对生态环境可持续性的影响大小具有不确定性,小的人类胁迫和大的社会响应对生态环境可持续性有利,但是在数值上并不一定存在对应的线性关系。

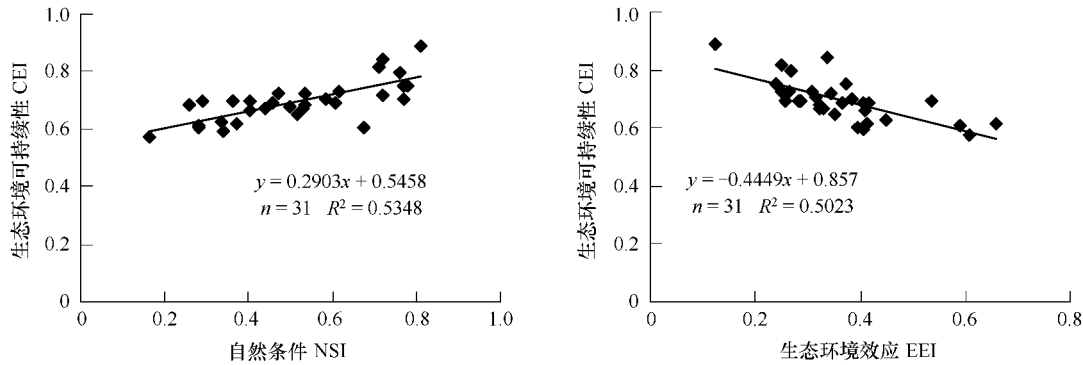


图2 CEI 同分指数间的相关关系
Fig. 2 The relationship between CEI and sub-indices

2.2 聚类分析

按照各地区 NBI、HPI、EEI 和 SRI,通过 SPSS11.5 的 *k-mean* 快速样本聚类功能,把我国 31 个地区聚为生态环境特点各异的六大类,得到中止聚类中心见表 6,类别间距离差异 *F* 检验效果显著($\alpha = 0.01$),表聚类效果较好。

表 6 各地区生态环境快速样本聚类中止聚类中心
Table 6 Final Cluster Centers classified by k-means cluster

变量 Variables	聚类 Cluster					
	1	2	3	4	5	6
自然条件指数 NBI	0.4647	0.3900	0.6742	0.7672	0.2544	0.6036
人类胁迫指数 HPI	0.2924	0.0994	0.8285	0.2517	0.1130	0.1635
生态环境效应指数 EEI	0.3202	0.3765	0.3942	0.2773	0.5993	0.3144
社会响应指数 SRI	0.4626	0.2994	0.3782	0.3844	0.3763	0.4124

表 7 各聚类的特点
Table 7 Characteristics of clusters

项目 Item	聚类 1 Cluster 1	聚类 2 Cluster 2	聚类 3 Cluster 3	聚类 4 Cluster 4	聚类 5 Cluster 5	聚类 6 Cluster 6
地区数(个)Number of regions	5	8	1	6	4	7
CEI 平均值 Average of CEI	0.6799	0.6633	0.6042	0.7687	0.6229	0.7344
总国土面积(万 km ²)Land area	43.39	331.17	0.63	81.56	336.31	169.06
人口密度(人/km ²)population density	535	75.35	2716	341	22	255
人均 GDP GDP per capita	16490	8370	46718	13247	7613	6973

根据各分指数中止聚类中心(表 6),可以简单概况各聚类主要的生态环境特征。从图 3 可以看出,各聚类在地理学上具有显著的集聚性,地理位置相近的地区常常有相类似的自然条件、经济活动方式和社会历史文化传统,造就相类似的生态环境特点^[7]。聚类 1 为我国东部、北部沿海 5 个地区(图 3),占国土面积的 4.51%,为我国半湿润和半干旱地区,森林覆盖率低,天然植被少,自然条件一般,但是人口密度大,建设用地所占比例大,经济发展水平较高,人类活动对生态环境的胁迫大,在人类胁迫作用下大气和水体污染严重,生态系统在一定程度上表现出退化,但总体生态环境效应较小,政府在应对生态退化和环境污染方面投入较大,

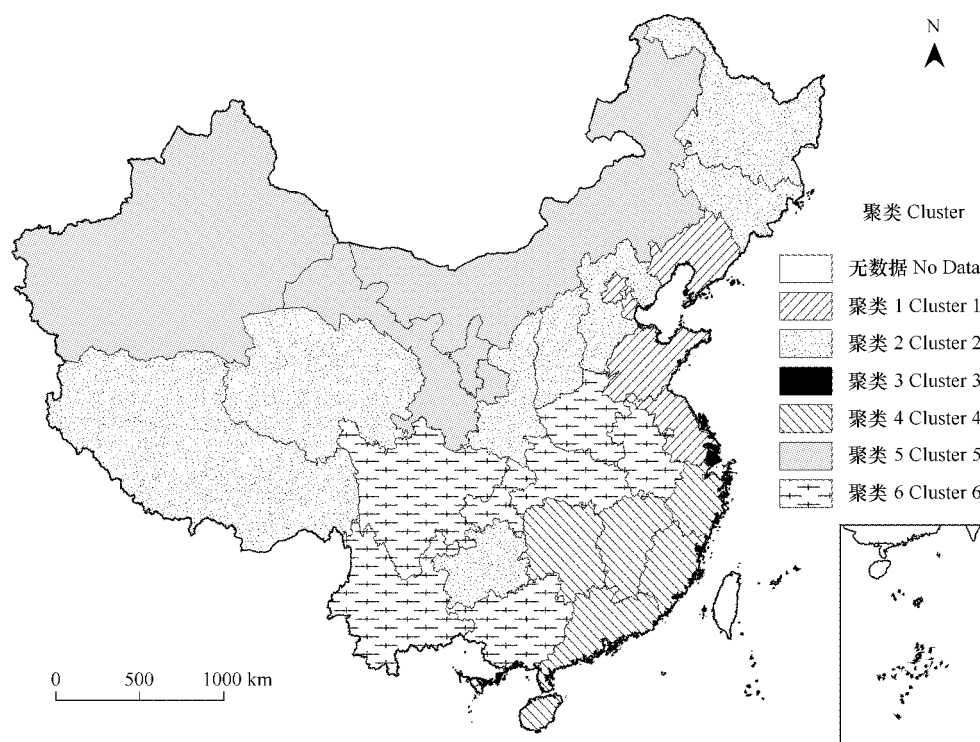


图3 各地区生态环境特点聚类

Fig. 3 Region clustered by eco-environmental characters

社会响应程度高,综合生态环境可持续性处于中等水平。聚类2分布在我国高原或多山地地区,包括青藏高原、黄土(陕西、山西)高原、贵州高原以及河北、吉林、黑龙江多山地8个地区,占国土面积的34.42%,自然条件较差,可利用水资源匮乏,生态环境脆弱敏感,人口密度较低,经济发展水平不高,建设用地所占比例低,工业污染物质排放强度低,人类对生态环境的胁迫作用较小,受区位分布影响,各地区表现出不同的生态环境效应,政府生态保护投入力度小,社会响应小,特别在节水灌溉和沼气建设方面的响应滞后,综合生态环境可持续性处于中等偏弱的水平。聚类3为上海市,尽管其自然条件优越,经济发展水平很高,但是受发展空间制约,自然涵养土地面积小,单位面积国土上人类胁迫过大,尽管社会响应力度较大,但是大气和水体污染依然严重,生态环境效应较为显著,综合生态环境可持续性弱。聚类4包括我国东南部6个地区,占国土面积的8.48%,是我国自然条件最好的几个地区,水资源充沛,森林覆盖率高,优越的自然条件给这些地区提供了较高的生态承载力,人口密度较高,人类栖息胁迫较大,资源利用中人均水耗较大,工业污染胁迫较小,但是农业面源污染胁迫较大,由于生态承载力高,能够承受较大的人类干扰胁迫,生态环境效应较小,在工业污染控制方面响应大,但是农业节水灌溉和农村沼气建设等方面响应滞后,为我国综合生态环境可持续性最强的地区。聚类5分布在我国西北4个地区,占国土面积的34.96%,是我国自然条件最恶劣的地区,水资源严重匮乏,天然植被覆盖极差,恶劣的自然条件导致这些地区生态承载力低,生态环境十分脆弱敏感,当地人口密度、经济发展水平较低,对自然的胁迫作用也较小,但由于缺乏自然涵养,生态环境效应极其显著,荒漠化、水土流失及生物多样性丧失都十分严重,尽管严重缺水,但节水灌溉措施不力,农村沼气建设也落后于我国其它地区,总体社会响应水平偏低,为我国综合生态环境可持续性最差的几个地区。聚类6包含我国中部和西南部一些地区,占国土面积的17.57%,自然条件好,水网密度高,人口密度和经济发展水平较低,人类活动对生态环境的胁迫较小,生态环境效应较小,主要受生物多样性丧失、酸雨和水环境污染的威胁,总体社会响应较大,但节水灌溉普及不力,综合生态环境可持续性较强。

3 结论

自然条件-人类胁迫-生态环境效应-社会响应指标体系从人同自然相互作用关系的角度来评价一个区域的生态环境各方面特点以及综合可持续性状况,能够给生态环境管理决策者提供一个区域生态环境地域分异的全局性认识,促进生态环境的数字化管理决策。

评价结果表明,2003 年各地区自然条件从东南到西北有一个明显的由优到劣的过渡趋势,造成地域差异的主导因素为年降雨量、年均气温、水网密度和森林覆盖率;东部发达地区人类胁迫明显高于西部和中部地区,同一个地区经济发展水平密切相关;西北地区是我国生态环境效应最为显著的地区,生态环境效应主要受自然条件的影响,自然条件恶劣地区更容易发生生态损害与退化,生态环境效应更为显著;社会响应无明显的地域差异,经济发展在一定程度上对其有促进作用,但并非决定因素。综合各地的自然条件、人类胁迫、生态环境效应和社会响应状况,采用灰色关联分析法得到 2003 年我国各地区生态环境可持续性排序情况,其中可持续性最强的几个地区为海南、云南、广西、江西等地;最弱的几个地区为新疆、西藏、上海、宁夏、内蒙古等地。

以 NBI、HPI、EEI 和 SRI 为变量,通过快速样本聚类分析,可以把我国 31 个省级行政区聚为生态环境特点各异的六大类。相同的聚类有相似生态环境特点,而且在地理位置上有聚集性,可以采取相类似的生态环境管理对策;不同的聚类生态环境特点存在较为显著的差异,需要根据其特点采取不同的管理对策。

References:

- [1] Kang S M. A sensitivity analysis of the Korean composite environmental index. *Ecological Economics*, 2002, 43(2-3): 159—174
- [2] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Comparing aggregating methods for constructing the composite environmental index: An objective measure. *Environmental Economics*, 2006, 59(3): 305—311.
- [3] Hope C, Parker J and Peake S. A pilot environmental index for the UK in the 1980s. *Energy Policy*, 1992, 20(4): 335—343
- [4] Butter F A G D and Eyden J A C V. A pilot index for environmental policy in The Netherlands. *Energy Policy*, 1998, 26(2): 95—101
- [5] Kang S M, Kim M S, Lee M. The trends of composite environmental indices in Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(2), 199—206
- [6] Jeroen C J M, Bergh V D, Veen-Groot D B V. Constructing aggregate environmental-economic indicators: a comparison of 12 OECD countries. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2001, 4, 1—16.
- [7] Esty D C, Levy M A, Srebotnjak T, *et al.* 2005 Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship. Yale Center for Environmental Law and Policy, New Haven, Conn, 2005.
- [8] Wackernagel M. Shortcomings of the Environmental Sustainability Index. <http://www.anti-lomborg.com/ESI%20critique.rtf>, 2001
- [9] Esty D C, Srebotnjak T, Kim C H, *et al.* Pilot 2006 Environmental Performance Index. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy. 2006
- [10] Wan B T. Research on assessment of eco-environmental quality in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [11] Liu Q Y, Zhang S Y. Assessment on the current status of the eco-environmental quality in the contiguous areas of Shanxi, Hebei, Shandong and Henan Provinces. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(6): 582—588.
- [12] Ye Y P, Liu L J. A preliminary study on assessment indicator system of provincial eco-environmental quality in China. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(3): 33—36.
- [13] Hao Y H, Zhou H C. A grey assessment model of regional eco-environment quality and its application. *Environmental Engineering*, 2002, 20(4): 66—68.
- [14] Wu K Y, Li R Z, Chen X J. Grey relation projection model for the evaluation of regional eco-environmental quality. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 473—478.
- [15] Li S, Qiu W, Zhao Q L, *et al.* Applying analytical hierarchy process to assess eco-environment quality of Heilongjiang Province. *Environmental Science*, 2006, 27(5): 1031—1034.
- [16] Wang J, Chen Z L, Xu S Y. Index system and model for evaluation of ecological and environmental quality in the Yangtze eatuary-coastal Zone. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5): 659—664.

- [17] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2004. Beijing: China Statistics Press, 2004.
- [18] China Environment Yearbook Editorial Committee. China Environment Yearbook 2004. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [19] Dun J L. Grey theory. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [20] Clerici N, Bodini A, Ferrarini A. Sustainability at the local scale: defining highly aggregated indices for assessing environmental performance. the province of Reggio Emilia (Italy) as a case study. Environmental Management, 2004, 34(4): 590—608.

参考文献:

- [10] 万本太. 中国生态环境质量评价研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [11] 刘全友, 张遂业. 晋冀鲁豫接壤区生态环境现状评价. 生态学报, 1998, 18(6): 582~588.
- [12] 叶亚平, 刘鲁军. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究. 环境科学研究, 2000, 13(3): 33~36.
- [13] 郝永红, 周海潮. 区域生态环境质量的灰色评价模型及其应用. 环境工程, 2002, 20(4): 66~68.
- [14] 吴开亚, 李如忠, 陈晓剑. 区域生态环境评价的灰色关联投影模型. 长江流域资源与环境, 2003, 12(5): 473~478.
- [15] 李崧, 邱微, 赵庆良, 等. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究. 环境科学, 2006, 27(5): 1031~1034.
- [16] 王军, 陈振楼, 许世远. 长江口滨岸带生态环境质量评价指标体系与评价模型. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 659~664.
- [17] 中华人民共和国国家统计局. 中国 2004 年统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [18] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴 2004. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [19] 邓聚龙. 灰理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.