

DOI: 10.5846/stxb201802050300

王振波, 梁龙武, 方创琳, 庄汝龙. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及影响因素研究. 生态学报, 2018, 38(12): - .
Wang Z B, Liang L W, Fang C L, Zhuang R L. Study of the evolution and factors influencing ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及影响因素研究

王振波^{1,2}, 梁龙武^{1,2}, 方创琳^{1,2,*}, 庄汝龙³

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 华东师范大学 中国现代城市研究中心, 上海 200333

摘要: 京津冀特大城市群的快速发展显著提升了地区生活水平, 但也对生态环境造成了负面影响。以 2000—2015 年京津冀城市群面板数据为研究样本, 建立“压力-状态-响应(PSR)”城市群生态安全协同会诊指标体系, 采用 TOPSIS 和灰色关联组合法计量其生态安全综合指数(Comprehensive Index of Ecological Security, CIES), 运用因子分析法提取关键因素, 并通过多元线性回归方法计算上述因素对生态安全的影响程度。结果表明: (1) 京津冀城市群生态安全指数已经达到了预警状态, 呈现“北高南低, 西高东低”的空间格局, 亟需建立三地协同联防联控的生态安全防治机制; (2) 2000—2015 年京津冀城市群的生态安全指数呈小幅波动状态, 规划与政策对城市群生态安全指数具有显著影响效应; (3) 13 地市生态安全指数的演变趋势存在显著的差异, 承德、廊坊仍呈下降趋势; (4) 城镇化、社会发展以及技术进步对京津冀城市群生态安全具有显著的正相关性, 开发水平、经济发展以及生态病理度则呈负相关性。由此, 需要划定并严守城市群生态保护红线, 控制空间开发强度与速度, 以遏制生态恶化; 完善并落实京津冀城市群协同发展的规划体系与相应的配套政策支撑体系, 以保障城市群生态安全稳定提升; 控制经济发展速度, 提升社会发展水平, 构建城市群一体化社会服务保障体系; 提升生态技术研发水平, 加大生态空间保护与修复, 以降低生态安全风险, 保障城市群生态安全格局。

关键词: 京津冀城市群; 生态安全; 时空格局; PSR 指标体系; 影响因素

Study of the evolution and factors influencing ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

WANG Zhenbo^{1,2}, LIANG longwu^{1,2}, FANG Chuanglin^{1,2,*}, ZHUANG Rulong³

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 The Center for Modern Chinese City Studies, East China Normal University, Shanghai 200333, China

Abstract: The rapid development of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration (BTHUA) has significantly raised the quality of life in the region. However, but it also has a negative impact on the ecological environment. Using the panel data of BTHUA from 2000 to 2015 as the research sample, the stress-state-response (PSR) index system of collaborative consultations on ecological security was constructed. The TOPSIS and gray correlation methods were used to measure the Comprehensive Index of Ecological Security (CIES), and then the key factors were extracted by factor analysis. The influence of these factors on ecological security was calculated by Multiple Linear Regression. The results reveal that the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503000); 国家自然科学基金重大项目(41590842); 国家自然科学基金重点项目(71433008)

收稿日期: 2018-02-05; **修订日期:** 2018-05-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangcl@igsrr.ac.cn

eco-security index (ESI) of BTHUA has reached the early warning state, showing the "North High South, West High East low" spatial pattern. Therefore, there is an urgent need to establish an ecological security mechanism. The ESI of BTHUA fluctuated slightly, which was attributed to the planning and policy implementation of urban agglomeration. There were significant differences in the evolution trends of the ESI of the 13 cities, with Chengde and Langfang showing a downward trend. The factors urbanization, social development, and technological progress have significant positive correlation with ecological security in BTHUA, while the level of development, economic development, and ecological pathology have negative correlation. Therefore, it is necessary to delineate and strictly adhere to the red line of ecological protection of urban agglomerations and control the magnitude and speed of physical space development in order to curb ecological deterioration. Improving the coordinated development planning system of BTHUA and its policies is important to ensure steady improvement of ecological security in urban agglomerations. At the same time, urban agglomerations should control the pace of economic development, upgrade the level of social development, and establish an integrated social service guarantee system. Furthermore, urban agglomeration should enhance the level of ecological technology research and development, and increase the protection and restoration of ecological spaces to reduce the risks to ecological security.

Key Words: Beijing-Tianjing-Heibei Urban Agglomeration; ecological security; spatial and temporal pattern; PSR; influencing factors

快速的城镇化和工业化进程是 20 世纪以来中国社会发展的最显著特征,但是在这个过程中所伴随的粗放式发展模式进一步恶化了中国原本脆弱的生态环境^[1],也对我国经济全球化竞争、区域生态格局、可持续发展以及国家安全产生较大影响^[2-4]。随着生态环境问题越来越受到政府的广泛关注,20 世纪 80 年代初期“生态安全”逐步成为国际生态环境研究领域的热点,以及人类经济社会可持续发展的新主题^[5];90 年代后期,生态安全主题开始受到国内学者的高度重视,有关研究成果迅速涌现^[6]。生态安全反映出人类在生活、生产以及健康等方面受到生态破损和环境污染影响的保障程度,而生态安全评价是对各类风险下生态系统完整性和可持续能力的识别和研判^[7]。

作为学术界的热点问题之一,生态安全已经取得了丰富的研究成果^[8-13],研究内容涉及土地^[14]、湿地^[15]、绿心区^[16]、生态屏障^[17]以及生态承载力^[18]等;研究方法主要有遥感与 GIS 高新技术^[19]、熵值与模糊数学组合方法^[20]、生态足迹^[21]、微粒群-马尔科夫复合模型^[22]等;研究区域主要以大区域和城市为主,城市群生态安全的研究较少。陈利顶^[23]等构建了京津冀城市群的生态安全格局;王祥荣等^[24]探讨了长三角城市群的生态安全调控机理,并构建出决策支持体系;黄国和等^[25]研发了珠三角城市群的生态安全保障技术;杨天荣等^[26]总结了关中城市群的生态空间优化布局模式。整体来看,当前城市群生态安全理论研究较多,定量研究相对较少。生态安全是新型城镇化的核心目标。城市群作为推进新型城镇化的主体形态,其生态安全的科学诊断具有重大意义,而指标体系是保障评估结果科学性的根本依据。在现有文献中,有关生态安全的评价指标体系主要有驱动力-压力-状态-暴露-响应^[27]、驱动力-压力-状态-影响-响应^[28]、状态-压力-响应(Pressure-State-Response,PSR)^[29]等。PSR 指标体系由联合国经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development,OECD)和环境规划署(United Nations Environment Programme,UNEP)提出,用于描述区域可持续发展中人类活动与生态环境相互作用过程的 3 个基本问题:“原因”、“现状”及政府等行为,优势在于可以有效诊断生态系统的持续性和剖析系统内部的因果关系,还可以实现京津冀城市群生态安全评价结果与国内外其他区域的有效对比。

京津冀城市群是中国 5 个特大城市群之一^[30],已经成为中国经济发展格局中最具活力和潜力的前沿阵地^[31]。改革开放以来,京津冀城市群社会经济快速发展,GDP 从 1978 年的 374.55 亿元提升至 2015 年的 64034.99 亿元,但是高耗能、高污染、高排放、低收益的产业发展模式仍然未得到根本改变,社会经济发展对资源的高需求和高投入促使区域生态破坏和环境污染等问题更加凸出。该区域的雾霾污染已经成为人民日常

生活中的一个严重的环境问题^[32],区域“污染同受”等不良现象频繁发生,各类环境问题已经成为制约京津冀城市群健康发展的重要因素^[33]。在党和国家提出将生态文明理念全面融入城市发展的背景下,定量评价京津冀城市群生态安全问题,是面向国家战略需求,对推动区域社会、经济、生态的高效与可持续发展具有至关重要的作用。

基于此,本文以空间尺度为基础构建“压力-状态-响应(PSR)”城市群生态安全协同会诊指标体系,采用层次分析和熵值法对指标进行主客观赋权,运用 TOPSIS 和灰色关联组合方法测度生态安全综合指数(Comprehensive Index of Ecological Security, CIES),结合 ArcGIS 空间分析模型对京津冀城市群生态安全综合指数的时空格局与变化规律进行空间可视化分析,基于因子分析方法提取主要因素,并通过多元线性回归方法计算上述因素对生态安全的影响程度,最后基于研究结论提出有关政策建议。以期优化区域生态空间布局 and 安全管理提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域、数据来源及评价指标体系

1.1.1 研究区域及数据来源

京津冀城市群(Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration, BTHUA) 是中国的“首都经济圈”,五大国家级城市群之一,包括北京、天津和河北省石家庄、保定、沧州、承德、邯郸、衡水、廊坊、秦皇岛、唐山、邢台、张家口等 13 个地级以上城市,总面积 21.72 万 km²,占全国总面积的 2.26%(图 1)。京津冀是中国经济增长极之一,但是快速城镇化和工业化进程也给该区域带来了严重的生态破坏和环境污染问题。为此,本文选择京津冀城市群 13 个地级以上行政单元为研究对象,研究时段为 2000—2015 年。

研究数据来源于 2001—2016 年《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《北京市水资源公报》、《天津市水资源公报》、《河北省水资源公报》、《中国科技统计年鉴》及地方统计年鉴、中国环境监测官方网站及地区官方网站。碳排放量数据参考《各种能源折标准煤及碳排放参考系数》求解得到。人均研发投入和专利授权量两个指标的部分年份缺失数据,采用综合增长率估算法,以多年历史平均增长率或分段平均增长率为基础,补充缺失数据。

1.1.2 评价指标体系

区域生态安全评价涉及自然、环境、经济、社会等多个方面,学术界迄今还没有形成统一的标准评价体系。本文依据京津冀特大城市群实际情况、数据可得性和类似研究中使用频度较高的指标初步建立评价指标体系,并采用共线性检验及条件指数和方差膨胀因子检验,对初选评价指标进行筛选,最终构建“压力-状态-响应(PSR)”城市群生态安全协同会诊指标体系(表 1)。

在上述评价指标体系中,“压力”表示人类活动给生态安全带来的负荷,包含人口承载、人口增长、城镇扩张、经济结构、社会发展、水资源保护、生态环境保护、经济强度、能源消费等“九大”生态安全压力;“状态”表示研究区域狭义的生态安全状态,包含能源消费、水资源、碳排放、生态破坏、城镇绿化、湿地水域、工业环境、



图 1 京津冀城市群范围

Fig. 1 Spatial schematic diagram of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

大气环境等“八大”生态安全状态;“响应”表示人类面临生态安全问题时所采取的对策^[34],包含产业、经济、生活、工业、社会、水资源、科技等“七大”生态安全响应,即形成“9+8+7”的“三层、三维”评价体系。生态安全压力加重生态危机(状态)、生态安全状态集聚生态安全压力;生态安全压力促进生态安全响应,生态安全响应削弱生态安全压力;生态安全状态引发生态安全响应,生态安全响应消减生态安全危机(状态),三大因素层通过指标之间的相互影响,形成整个生态安全系统“牵一发而动全身”的动态影响机制(图2)。

表1 京津冀城市群生态安全协同会诊指标体系

Table 1 The index system of eco-security cooperative consultation in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

因素层 Factor layer	指标层 Index layer	序号 Serial number	指标解释 Index interpretation	属性 Attribute	客观权重 Objective weight	主观权重 Subjective weight	综合权重 Comprehensive weight
压力 Pressure	人口密度/万人	1	人口承载压力	逆向	0.082	0.293	0.188
	人口自然增长率/%	2	人口增长压力	逆向	0.048	0.113	0.081
	城镇化水平	3	城镇扩张压力	逆向	0.168	0.072	0.120
	工业总产值/亿元	4	经济结构压力	逆向	0.053	0.047	0.050
	区域开发指数	5	社会发展压力	逆向	0.079	0.031	0.055
	人均综合用水量/(m ³ 人 ⁻¹ a ⁻¹)	6	水资源保护压力	逆向	0.110	0.019	0.065
	人均生态用地面积/(km ² /万人)	7	生态环境保护压力	正向	0.307	0.207	0.257
	GDP 增长率(比上年)/%	8	经济强度压力	逆向	0.111	0.015	0.063
	能源消费弹性系数	9	能源消费压力	逆向	0.042	0.203	0.122
状态 State	人均能耗(千克标准煤)	10	能源消费状态	逆向	0.069	0.069	0.069
	水资源总量/(亿 m ³)	11	水资源状态	正向	0.130	0.042	0.086
	碳排放总量/(万 t 碳)	12	碳排放状态	逆向	0.115	0.113	0.114
	生态系统风险病理程度	13	生态破坏状态	逆向	0.105	0.314	0.209
	建成区绿化覆盖率/%	14	城镇绿化状态	正向	0.083	0.027	0.055
	湿地(水域)覆盖度/%	15	湿地水域状态	正向	0.207	0.017	0.112
	工业 SO ₂ 排放量/t	16	工业环境状态	逆向	0.113	0.170	0.141
	PM _{2.5} 浓度/(μg/m ³)	17	大气环境状态	逆向	0.178	0.249	0.213
响应 Response	第三产业比重/%	18	产业响应	正向	0.211	0.034	0.123
	人均研发投入/亿元	19	经济响应	正向	0.222	0.089	0.156
	生活垃圾无害化处理率/%	20	生活响应	正向	0.093	0.148	0.121
	工业废弃物综合利用率/%	21	工业响应	正向	0.079	0.410	0.245
	就业率/%	22	社会响应	正向	0.051	0.022	0.036
	专利授权量/个	23	科技响应	正向	0.206	0.241	0.224
	污水处理厂集中处理率/%	24	水资源响应	正向	0.137	0.055	0.096

1.2 研究方法

在综合评价分析中,评价指标的目的和含义的差异导致各指标具有不同的量纲和数量级。通常采用标准化处理方法消除不同量纲和数量级对评价指标的影响,以此降低随机因素的干扰。

1.2.1 层次分析法和熵值法计算权重

常用的指标赋权方法通常可以归纳为三类:第一类是主观赋权法,即根据专家的专业知识和人生经验主观研判指标权重,决策结果存在一定的主观随意性,如层次分析法(AHP),专家调查法(Delphi)等;第二类是客观赋权法,即依据原始数据之间的关系和数理特性计算权重,具有较强的客观性与数理依据,但是缺乏对指标本身的概念分析,如变异系数、熵值法等;第三类是组合主观和客观两类方法综合计算指标权重,该类方法主客观结合,结果更为科学。本文综合 AHP 法和熵值法进行评价指标的组合赋权,具体步骤如下:

(1) AHP 法计算主观权重

采用 1—9 标度方法,依据中国科学院、北京大学、清华大学、北京师范大学等科研单位 35 位本领域内专

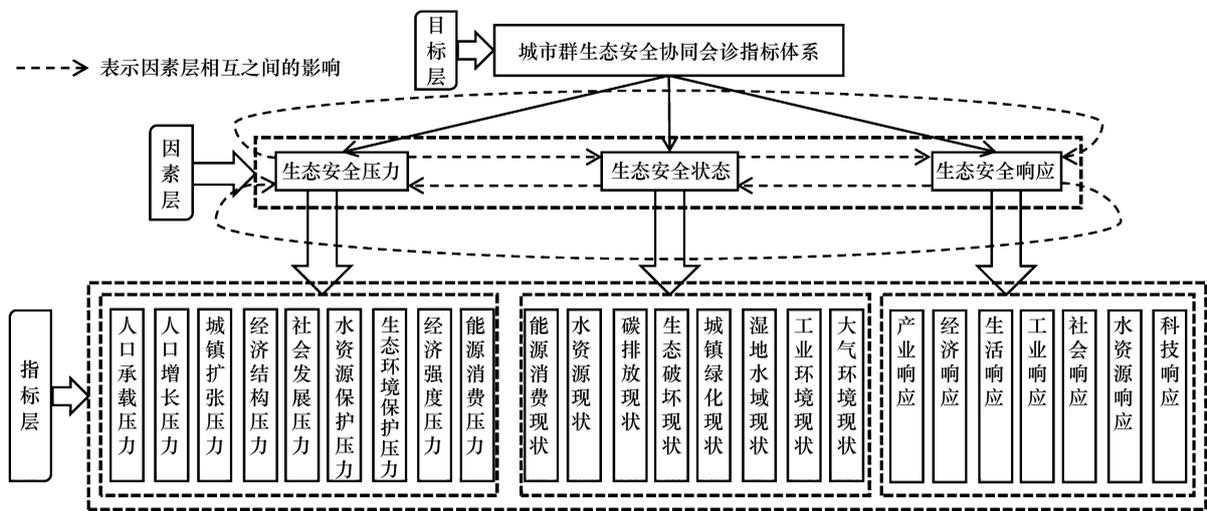


图 2 京津冀城市群生态安全评价 PSR 模型框架

Fig.2 Framework of PSR ecological security evaluation model in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

家的主观赋权意见来构造判断矩阵,获得第 s 个系统层相对目标层的权重 $a_s (s = 1, 2, \dots, 5)$,第 s 个系统层下第 k 个指标对第 s 个系统层的权重 $b_k (k = 1, 2, \dots, m)$,则第 s 个系统层下第 k 个指标相对总目标的权重为:

$$c_k = a_s \times b_k \tag{1}$$

式中,指标权重向量为 $c = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。

获得判断矩阵后,需要对其进行一致性检验。若检验通过,则权重分配合理;否则,需要重新构造判断矩阵计算权重,所得主观权重详见表 1。同理,计算因素层权重,压力、状态和响应三个因素层的权重比值为 3:4:3。由于 AHP 方法在文献中应用较多,具体计算过程不再赘述。

(2) 熵值法计算客观权重

熵值法 (Entropy Method) 是一种基于数据内部的离散程度客观计算指标权重的客观赋权方法。通常,信息熵值越大,系统结构越均衡,差异系数越小,指标的权重就越小;反之则指标的权重越大。计算步骤如下^[35]:

第一步:数据标准化处理。

第二步:确定比重

$$Y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \tag{2}$$

第三步:求解熵值

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m Y_{ij} \ln Y_{ij} \tag{3}$$

第四步:求解变异系数

$$\gamma_j = 1 - e_j \tag{4}$$

第五步:求解权重,权重向量 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

$$v_j = \frac{\gamma_j}{\sum \gamma_j} \tag{5}$$

(3) 组合权重的确定

考虑到主客观赋权具有同等效益,本文采用算术平均值方法^[36],综合主客观权重,得到组合权重向量 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。组合权重表达为公式(8),权重结果见表 1。

$$w_j = (c_j + v_j) / 2 \quad (6)$$

1.2.2 TOPSIS 与灰色关联方法解析

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 由 Hwang 和 Yoon 于 1981 年首次提出^[37], 是一种逼近于理想解的多目标决策分析方法。TOPSIS 方法对研究数据的要求较低, 较于理解, 而且计算简便, 已经在诸多研究领域广泛应用。该方法是通过比较系统现实状态和理想状态之间的欧氏距离来研判系统的发展水平, 但是其只能反映数据曲线之间的位置关系, 而无法体现数据序列的动态变化情况。

灰色关联分析方法 (Grey Relation Analysis) 在被邓聚龙教授提出后就获得了迅速发展和广泛应用^[38]。其基本思想是依据综合评价序列组成的曲线族和参照序列组成的曲线对之间的几何相似度来确定数据序列的关联度^[39-40], 几何形状越相近, 数据序列的关联度就越大, 反之越小。该方法可以用于计算系统要素间紧密程度, 从而很好地体现系统的变化态势^[41]。

鉴于此, 本文综合 TOPSIS 思想与灰色关联理论, 构建主体功能区生态安全协同会诊模型, 通过欧氏距离与灰色关联度来反映不同主体功能区生态状态与该类区域理想状态的相近程度。

(1) 求解加权标准化矩阵

$$U = (u_{ij})_{m \times n} = (w_j \times x'_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix}$$

(2) 确定不同主体功能区的正负理想解

正理想解: $U^+ = \{u_{01}^+, u_{02}^+, \dots, u_{0n}^+\}$;

负理想解: $U^- = \{u_{01}^-, u_{02}^-, \dots, u_{0n}^-\}$ 。

式中, 正理想解为同一主体功能区各指标的理想最优值的集合, 负理想解为同一主体功能区各指标的最劣值的集合。

(3) 求解灰色关联相对贴近度

设 ρ_{ij}^+ 为第 i 个评价单元第 j 个指标与正理想解的灰色关联系数, u_{0j}^+ 为第 j 个指标的正理想值, ξ 为分辨系数, 可以提升关联系数之间差异的显著性, $\xi \in [0, 1]$, ξ 通常取为 0.5。第 i 个评价单元第 j 个指标与正理想解的灰色关联系数为^[42]:

$$\rho_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq i \leq m} (|u_{0j}^+ - x'_{ij}|) + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} (|u_{0j}^+ - x'_{ij}|)}{|u_{0j}^+ - x'_{ij}| + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} (|u_{0j}^+ - x'_{ij}|)} \quad (7)$$

则各评价单元与正理想解的灰色关联系数矩阵为:

$$p^+ = \begin{bmatrix} \rho_{11}^+ & \rho_{12}^+ & \cdots & \rho_{1n}^+ \\ \rho_{21}^+ & \rho_{22}^+ & \cdots & \rho_{2n}^+ \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{m1}^+ & \rho_{m2}^+ & \cdots & \rho_{mn}^+ \end{bmatrix}$$

第 i 个评价单元与正理想解的灰色关联为:

$$p_i^+ = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{ij}^+}{n}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

同理, 第 i 个评价单元与负理想解的灰色关联度为:

$$p_i^- = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{ij}^-}{n}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

灰色关联相对贴进度:

$$C_i = \frac{P_i^+}{P_i^- + P_i^+} \quad (10)$$

贴进度的数值越大,说明该功能区当期生态协调发展,系统状况越好;反之,贴进度数值越小,说明该功能区当期生态发展拮抗,系统状况越劣。

作为生态安全综合评价的等级研判尺度,城市群生态安全评价分级标准在现有研究框架内还尚未统一,本文在参考相关研究成果^[43-44],将京津冀城市群生态安全的分级标准划分为七个等级(表2)。

表2 京津冀城市群生态安全综合指数(Comprehensive Index of Eco-security, CIES)分级标准

Table 2 Grading criteria for the comprehensive index of eco-security in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

安全指数 Safety index	$0 < C \leq 0.25$	$0.25 < C \leq 0.35$	$0.35 < C \leq 0.45$	$0.45 < C \leq 0.55$	$0.55 < C \leq 0.65$	$0.65 < C \leq 0.75$	$0.75 < C \leq 1$
安全等级 Safety Grade	I	II	III	IV	V	VI	VII
安全状态 Safety State	恶化级	风险级	敏感级	临界安全级	一般安全级	比较安全级	非常安全级

灰色关联相对贴进度 C 表征京津冀城市群生态安全综合指数值

2 结果分析

2.1 京津冀城市群生态安全时空演变特征分析

根据上述相关数据和公式(7)—(10),计算得到2000—2015年京津冀城市群13个地级以上城市的生态安全综合指数,值越大,表示生态安全越高,反之越低。京津冀城市群生态安全演变特征如下:

(1)2000—2015年京津冀城市群生态安全呈波动状态,波动幅度整体较小(图3)。2000—2003年生态安全指数呈下降趋势。2004年国家发改委协同京津冀达成加强区域合作的“廊坊共识”,并组织编制《京津冀都市圈区域规划》,推动区域合作实现第一次跨越,生态安全指数出现第一个高值,之后呈缓慢下降趋势。2012年,国家发改委再次组织新一轮《首都经济圈区域规划》,实现了上一轮规划的升级与扩展,推动京津冀区域合作实现第二次跨越,生态安全指数也随之出现第二个高值,但2013年再次下降。2014年,京津冀协同发展重大国家战略正式拉开帷幕,生态环境保护成为该战略的核心内容之一,京津冀城市群生态安全指数整体呈现上升趋势。由此可见,城市群的总体规划、国家与区域政策支撑对城市群生态安全指数具有显著影响效应。

(2)不同城市生态安全指数的演变趋势差异显著。2000—2015年京津冀城市群13个城市生态安全的演变趋势同样具有波动性,其中8个城市呈上升趋势,5个城市呈下降趋势(图4)。生态安全指数上升的8个城市中,首都北京在国家的宏观政策支撑下,呈持续上升趋势;秦皇岛、张家口和保定生态环境质量相对较好,呈现先提升再降低再提升的“N”型趋势,表明2005年之后工业化进程导致生态环境受损,而2010年之后的生态文明和国家产业转型战略实施又促进了生态环境质量的恢复与提升;石家庄、沧州、天津和邯郸呈“V”型趋势,其中沧州和石家庄拐点在2005年,而天津和邯郸拐点在2010年,表明前者生态安全更早地实现了转型。生态安全指数下降的5个城市中,承德生态安全系数全区最高,但呈持续下降状态;廊坊为倒“V”型趋势,拐

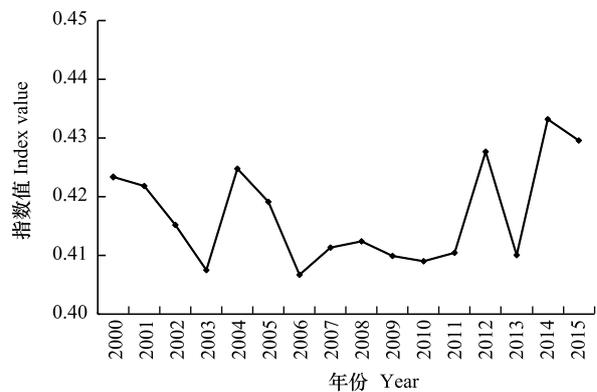


图3 2000—2015年京津冀城市群生态安全综合指数均值变化趋势

Fig.3 The trend of eco-security comprehensive index average in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2015

点在 2005 年,生态安全系数仍在下降;衡水、唐山和邢台均为“V”型趋势,拐点在 2010 年,表明 3 个城市生态安全在 2010 年之后已经步入恢复状态。总体来看,承德和廊坊应该立即采取措施遏制生态安全下降的趋势,衡水、唐山和邢台则需要加大生态恢复的扶持力度;其他城市仍需要不断完善生态环境保障体系,以实现生态安全状态持续提升。

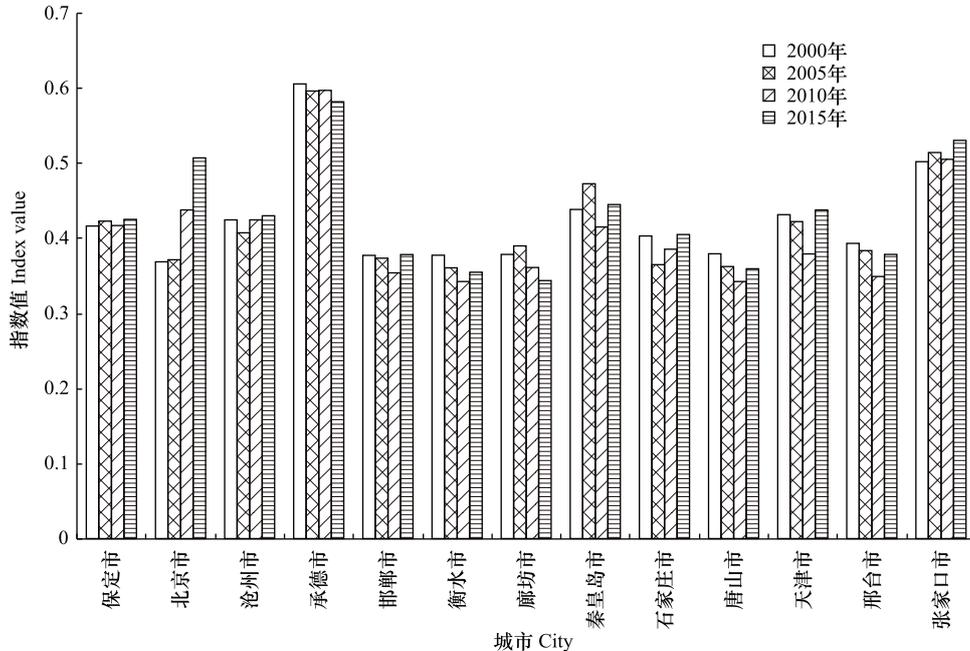


图 4 2000—2015 年京津冀城市群生态安全综合指数变化趋势

Fig.4 The trend of eco-security comprehensive index in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2015

(3) 京津冀城市群生态安全整体等级不高,呈现“北高南低,西高东低”的空间格局(图 5)。2000—2005 年期间,秦皇岛生态安全转优,由敏感级升为临界安全级,但 2005—2015 年又降为敏感级,二产比重增加导致区域碳排放量和生态病理程度的上升;同样,唐山、衡水生态安全由敏感级转为风险级也受制于过大的二产比重。2017 年,唐山二产比重为 57.4%,以钢铁和装备制造业等高耗高排重工业为主;衡水二产比重为 46.2%,主导产业为食品加工、纺织毛皮、化学肥料、塑料制品、玻璃钢、钢材等传统低端高耗高排的工业类型,均具有较大的生态胁迫效应。2010—2015 年,北京由敏感级转变为临界安全级,表明近年来污染企业的整顿和外迁优化了北京产业结构,劳动生产率和地均生产率大幅提高,2017 年服务业占 GDP 的比重已经高于 80%,明显地改善了首都的生态环境状况。承德和张家口生态安全一直保持在安全级。作为首都的生态环境支撑区和水源涵养功能区,两市一直将生态安全战略置于区域发展的重要地位。总体来看,京津冀城市群生态安全等级不高,最高等级仅为一般安全级,表明其生态安全问题已经比较严峻,需要国家和地区政府多部门合作,建立协同联防联控的治理机制,以实现区域“同城化,一体化”的绿色可持续发展目标。

2.2 京津冀城市群生态安全的影响因素分析

利用 SPSS 20.0 对数据进行 KMO 统计检验和 Bartlett 球形检验,得到 KMO 检验值为 0.771,大于阈值 0.5, Bartlett 检验值为 0.0037,小于阈值 0.01,结果显著水平较高,反映适合对指标进行因子分析。对 24 个指标进行主要因子提取,得出 6 个特征根大于 1 的因子,且 6 个新因子的方差累计贡献水平达到 79.36%,即 6 个新因子的原始变量所丢失的信息较少,因子分析效果良好^[45],可以充分表征 24 个变量信息。基于方差极大法对影响因素进行降维处理,对因子载荷矩阵进行正交旋转,得到旋转成份矩阵(表 3):

其中因子 1 对城镇化水平、工业废弃物综合利用率、建成区绿化覆盖率具有较高荷载,因子 2 对工业总产值、区域开发指数具有较高荷载,因子 3 对 GDP 增长率、第三产业比重具有较高荷载,因子 4 对人均生态用地

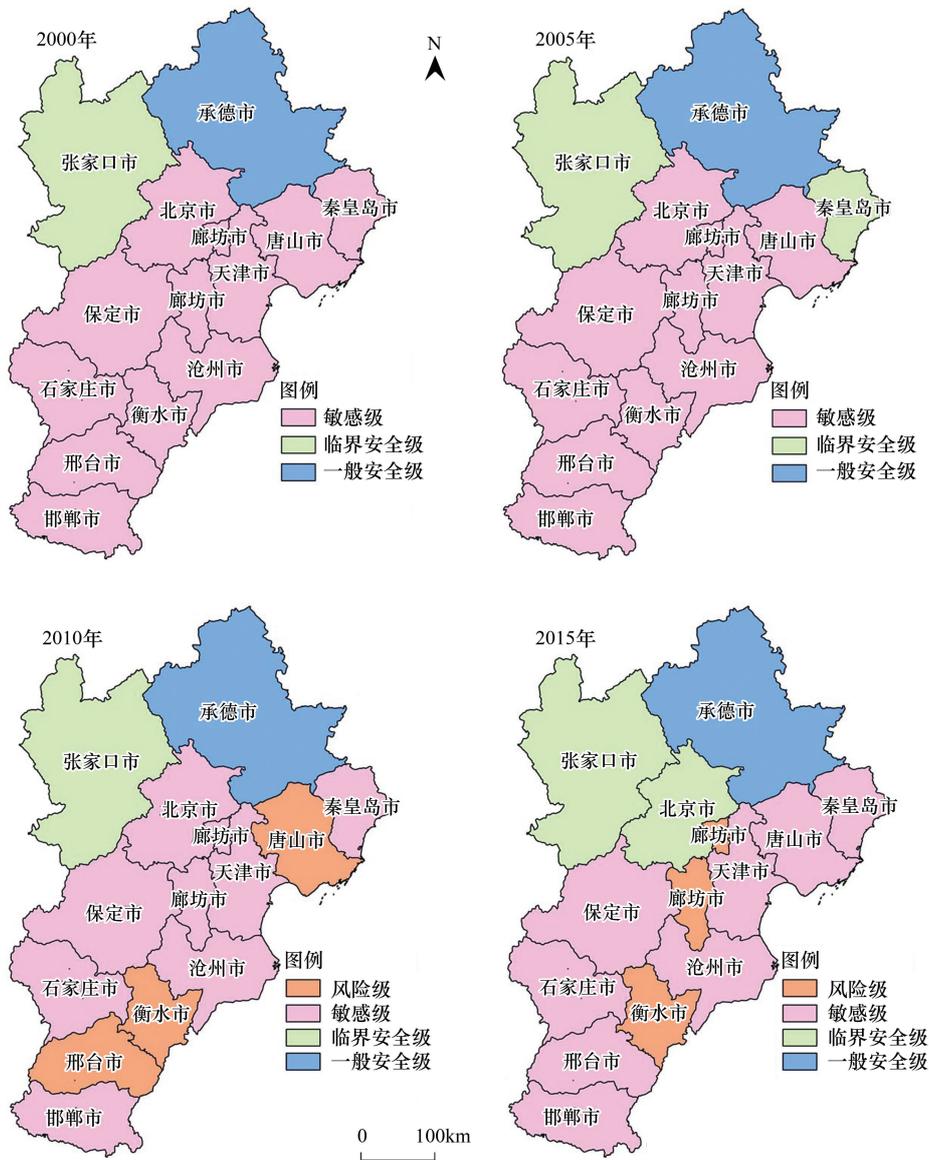


图 5 2000—2015 年京津冀城市群生态安全等级空间分布格局

Fig.5 The spatial distribution pattern of eco-security in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2015

面积、碳排放总量生态系统风险病理程度、湿地覆盖度、PM_{2.5}浓度具有较高荷载,因子 5 对生活垃圾无害化处理率、就业率具有较高荷载,因子 6 对人均研发投入、专利授权量具有较高荷载。基于上述结果,参考专家意见,将 6 个因子重新命名为城镇化(Z1)、开发水平(Z2)、经济发展(Z3)、生态病理度(Z4)、社会发展(Z5)、技术进步(Z6)。

表 3 旋转成份矩阵

Table 3 Rotational component matrix

因素层 Factor layer	指标层 Index layer	序号 Serial number	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5	因子 6 Factor 6
压力 Pressure	人口密度/万人	1	0.187	-0.022	0.197	0.118	0.341	0.138
	人口自然增长率/%	2	0.232	0.327	0.210	0.217	0.228	0.165
	城镇化水平	3	0.836	0.182	0.185	0.243	0.190	0.210

续表

因素层 Factor layer	指标层 Index layer	序号 Serial number	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5	因子 6 Factor 6
	工业总产值/亿元	4	0.310	-0.673	0.121	0.119	0.198	0.187
	区域开发指数	5	0.168	0.794	0.320	0.163	0.213	0.113
	人均综合用水量/(m ³ 人 ⁻¹ a ⁻¹)	6	0.132	0.161	0.178	0.174	0.220	0.245
	人均生态用地面积/(km ² /万人)	7	0.180	0.172	0.199	0.771	0.206	0.195
	GDP 增长率(比上年)/%	8	0.135	0.219	0.817	0.119	0.218	0.224
	能源消费弹性系数	9	0.147	0.243	0.201	0.230	0.223	0.251
状态 State	人均能耗(kg 标准煤)	10	0.158	0.229	0.184	0.194	0.312	0.205
	水资源总量/(亿 m ³)	11	0.119	0.215	0.173	0.112	0.278	0.198
	碳排放总量/(万 t 碳)	12	0.173	0.192	0.180	0.730	0.217	0.223
	生态系统风险病理程度	13	0.271	0.186	0.169	0.821	0.198	0.208
	建成区绿化覆盖率/%	14	0.625	0.173	0.220	0.191	0.117	0.179
	湿地(水域)覆盖度/%	15	0.109	0.162	0.214	0.781	0.124	0.148
	工业 SO ₂ 排放量/t	16	0.126	0.119	0.225	0.164	0.153	0.192
	PM _{2.5} 浓度/(μg/m ³)	17	0.223	0.183	0.306	0.783	0.118	0.118
响应 Response	第三产业比重/%	18	0.311	0.119	0.673	0.152	0.119	0.104
	人均研发投入/亿元	19	0.213	0.205	0.158	0.217	0.190	0.819
	生活垃圾无害化处理率/%	20	0.239	0.158	0.114	0.220	0.669	0.214
	工业废弃物综合利用率/%	21	-0.605	0.329	0.152	0.193	0.183	0.307
	就业率/%	22	0.271	0.190	0.117	0.182	-0.776	0.277
	污水处理厂集中处理率/%	23	-0.617	0.237	0.190	0.147	0.228	0.246
	专利授权量/个	24	0.182	0.165	0.111	0.169	0.310	-0.857

以京津冀城市群 2000—2015 年面板数据作为研究样本,选取生态安全值(Y)为因变量,采用 SPSS 20.0 软件对因子分析所提取的 6 个因子进行多元线性回归分析, F 检验值为 30.494, P 显著性检验值为 0,在 0.01 显著性水平下显著,说明该方程合理度较高。计算结果如表 5 所示,线性函数关系式为:

$$Y = 0.641 + 0.023Z_1 - 0.582Z_2 - 0.017Z_3 - 0.446Z_4 + 0.304Z_5 + 0.045Z_6$$

表 4 各提取因子的偏回归方程系数矩阵

Table 4 Coefficient matrix of partial regression equation of all extraction factor

变量 Variable	系数 Coefficient	标准差 Std.Error	T 值检验 T -Statistic	P 值检验 Prob.
常量 Constant C	0.641 ***	0.089	7.241	0.000
城镇化 Urbanization	0.022 ***	0.032	6.883	0.000
开发水平 Development level	-0.582 ***	0.063	-9.237	0.000
经济发展 Economic development	-0.017 ***	0.011	-5.424	0.000
生态病理度 Ecologic pathology	-0.446 ***	0.101	-4.449	0.000
社会发展 social development	0.304 ***	0.059	5.184	0.000
技术进步 technical progress	0.045 ***	0.062	8.509	0.000

*** 表示在 0.01 水平下具有显著意义

城镇化、社会发展以及技术进步均在 0.01 水平下对生态安全具有显著正相关性,三者每提升 1 个单位,生态安全系数分别上升 0.022、0.304 和 0.045(表 4)。城镇化是世界各国在实现工业化和现代化过程中城乡人口、空间与社会变迁的状态响应。中国的城镇化发展经历了传统城镇化阶段和新型城镇化阶段。传统的城镇化过程提升了城市综合服务能力,改善了人居环境,但也造成了农业人口市民化进程滞后、城镇用地粗放、

城镇规模不合理等城市病的发生。2003年党的十六大提出的“走中国特色城镇化道路”理念开启了中国的新城镇化历程。社会发展可以有效促进经济结构优化、科学技术进步和人口素质提升。尤其是2007年十七大提出生态文明战略,将可持续发展理念提升到绿色发展的高度,社会发展对城市群生态安全的促进作用更加显著。新型城镇化着力提升城镇化质量,以生态文明理念为指导的集约、智能、绿色、低碳的城镇化路径。京津冀城市群是中国新型城镇化的前沿阵地,生态安全也是其核心任务之一。2000年以来,新型城镇化的理念与进程有效促进了京津冀城市群的生态安全^[46]。技术进步可以从源头上降低工业及生活污染物的产生与排放量,削减自然资源与能源的消耗,减少地区防污治污的人力与物力投入,从而保护和改善生态环境。

开发水平、经济发展以及生态病理度均在0.01水平下对生态安全具有显著负相关性,三者每提升1个单位,生态安全系数分别下降0.582、0.017和0.446个单位(表4)。城市群是新型城镇化的主体形态,也是城镇开发活动最为集中、最为剧烈的区域。随着京津冀城市群开发程度的不断提升,其建设用地面积不断扩展,同时也消耗了大量的资源与能源,并对地区生态环境造成损伤。虽然近年来京津冀城市群响应国家绿色可持续发展发展的要求,积极探索地区发展新模式,但是高耗能、高污染、高排放的产业模式依旧突出,生态环境为此付出了沉重的代价,生态破损和环境污染问题非常严峻。京津冀地区存在不少国家级贫困县,当地农民缺乏资金、技术等,思想观念也落后,这导致区域土地过垦、草原过牧现象比较普遍,水土流失及荒漠化现象日益严重,生态病理程度较高。

3 结论与建议

第一,京津冀城市群生态安全的最高等级仅为一般安全级,生态安全已经达到了预警状态,需要京津冀三地多部门联合,建立协同联防联控的生态安全防治机制,以实现区域“同城化,一体化”的绿色可持续发展目标。

从时间演变来看,2000—2015年期间,京津冀城市群生态安全状况在小幅波动中呈现改善趋势。整个过程中,城市群的总体规划、国家与区域政策支撑对城市群生态安全指数的拉动效应具有阶段性特征,表明政策的实施保障机制并不健全,难以推动生态安全格局持续稳定提升。由此,京津冀城市群在出台相关规划与政策的同时,应该建立更加完善的专项规划、配套政策及其实施评估机制,尤其需要出台相关法律法规支撑协同联防联控的生态安全防治机制,建立确保形成稳固的生态安全格局。

在空间来看,京津冀城市群13地市生态安全指数的演变趋势差异性显著。北京、秦皇岛、张家口、保定、石家庄、沧州、天津和邯郸等8个城市生态安全指数呈上升趋势,得益于国家生态文明战略和产业转型战略实施过程中对生态环境建设的高度重视。承德、廊坊、衡水、唐山和邢台等5个城市生态安全指数呈下降趋势,一方面大力加强京津冀北部张承地区的生态环境支撑和水源涵养的功能建设;同时积极推进衡水、唐山和邢台的产业结构转型升级,不断完善生态环境保障体系,遏制并扭转其生态安全状态的下降趋势。

第二,京津冀城市群生态安全影响因素分析结果显示,城镇化、社会发展以及技术进步对京津冀城市群生态安全具有显著的正相关性,其中生活垃圾无害化处理率、就业率因子为表征的社会发展水平对生态安全促进作用最大。由此,京津冀城市群应该在深化经济结构改革和产业结构转型升级的基础上,加强建设城市群生态环境治理力度,构建一体化、公平化社会服务体系,保障基层劳动者的基本生活条件,提升全民素质与环保意识,完善就业、养老、医疗、保险等社会制度,以保障城市群生态安全格局。同时,城市群各级政府应该持续增加生态技术研发投入,扶持科研院所及相关企业开展生态技术等方面的研发活动,全面提升生态技术水平。另外,建立健全城市群部门间协调机制,加快城市群生态空间的一体化、系统化保护与修复,在保持生态产品和服务供给的条件下,基于生态资源优势促进生态工业、旅游业及农业的发展,在获得“金山银山”的同时保持“绿水青山”,降低区域生态安全风险。

第三,开发水平、经济发展以及生态病理度对京津冀城市群生态安全具有显著的负相关性,以工业总产值、区域开发指数为表征的开发水平和病理程度对生态安全阻碍作用更大。所以,应深入调整产业结构,扭转

京津冀城市群生态胁迫的源头。河北省在承接京津产业疏解转移的同时,要严格限制在生态脆弱地区建设高耗能和高污染的行业项目,制定并适时调整京津冀限制、禁止、淘汰类项目目录,淘汰落后产能和压缩过剩产能。提高环保、能耗、安全、质量等标准,倒闭区域产业转型升级。同时,包括从严排放标准,发展清洁能源,防治机动车污染等多项措施并举。同时,划定并严守城市群生态保护红线,控制空间开发强度与速度,遏制生态恶化,保障生态安全。2017年2月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》。目前,京津冀生态保护红线的划定工作已经完成,应加快出台严守红线的具体保障措施。更重要的是,京津冀城市群生态保护红线内部空间尚存在的城镇化用地效率低、开发速度过快、功能结构不合理等问题,均会导致城市群生态环境恶化。所以,有效限制京津冀城市群城乡空间开发速度,优化国土空间开发格局,规范空间开发秩序,科学构建生态安全格局,是保障生态空间安全的必由之路。

参考文献 (References):

- [1] Naveh Z. From biodiversity to ecodiversity: a landscape - ecology approach to conservation and restoration. *Restoration Ecology*, 1994, 2(3): 180-189.
- [2] Li Y F, Sun X, Zhu X D, Cao H H. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [3] Su S L, Li D, Yu X, Zhang Z H, Zhang Q, Xiao R, Zhi J J, Wu J P. Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(6): 737-746.
- [4] Hodson M, Marvin S. 'Urban ecological security': a new urban paradigm? *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(1): 193-215.
- [5] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [6] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述. *地理科学进展*, 2005, 24(6): 8-20.
- [7] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551-1556.
- [8] Lin T, Xue X Z, Huang J, Cui S H. Assessing egret ecological safety in the urban environment: a case study in Xiamen, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2008, 15(4): 383-388.
- [9] Strong D R, Pemberton R W. Biological control of invading species-risk and reform. *Science*, 2000, 288(5473): 1969-1970.
- [10] Amoros C, Borrette G, Henry C P. A vegetation-based method for ecological diagnosis of riverine wetlands. *Environmental Management*, 2000, 25(2): 211-227.
- [11] Wang S R, Meng W, Jin X C, Zheng B H, Zhang L, Xi H Y. Ecological security problems of the major key lakes in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3825-3837.
- [12] 左伟, 周慧珍, 王桥, 李硕, 张桂兰. 区域生态安全综合评价与制图--以重庆市忠县为例. *土壤学报*, 2004, 41(2): 203-209.
- [13] Yu G M, Zhang S, Yu Q W, Fan Y, Zeng Q, Wu L, Zhou R R, Nan N, Zhao P J. Assessing ecological security at the watershed scale based on RS/GIS: a case study from the Hanjiang River Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(2): 307-318.
- [14] 刘庆, 陈利根, 黄天旭, 徐蓉, 张坤. 基于生态足迹的长株潭城市群土地生态安全分析. *资源开发与市场*, 2010, 26(11): 1022-1025.
- [15] 廖柳文, 秦建新. 环长株潭城市群湿地生态安全研究. *地球信息科学学报*, 2016, 18(9): 1217-1226.
- [16] 顾朝林, 马婷, 袁晓辉, 张晓明, 王旭. 长株潭城市群绿心生态保护与发展探讨. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1124-1131.
- [17] 夏本安, 王福生, 侯方舟. 长株潭城市群生态屏障研究. *生态学报*, 2011, 31(20): 6231-6241.
- [18] 朱玉林, 李明杰, 顾荣华. 基于压力-状态-响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(12): 2057-2064.
- [19] 彭佳捷, 周国华, 唐承丽, 贺艳华. 基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度——以长株潭城市群为例. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1507-1519.
- [20] 刘庆, 陈利根, 舒帮荣, 胡雁娟. 长株潭城市群土地生态安全动态评价研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1192-1197.
- [21] 杨立国. 基于生态足迹的城市群生态系统安全评价——以长株潭城市群为例. *世界地理研究*, 2009, 18(1): 74-82.
- [22] 陈永林, 谢炳庚, 钟典, 吴亮清, 张爱明. 基于微粒群-马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2018, 38(1): 55-64.
- [23] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. *生态学报*, 2016, 36(22): 7125-7129.

- [24] 王祥荣, 樊正球, 谢玉静, 李昆, 曾刚, 苏德, 关庆伟, 任引, 高峻. 城市群生态安全保障关键技术与集成示范——以长三角城市群为例. 生态学报, 2016, 36(22): 7114-7118.
- [25] 黄国和, 安春江, 范玉瑞, 徐琳瑜, 李永平, 蔡宴朋, 李延峰, 李锋. 珠江三角洲城市群生态安全保障技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7119-7124.
- [26] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(3): 441-452.
- [27] Wang H, Long H L, Li X B, Yu F. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(2): 341-354.
- [28] 张继权, 伊坤朋, Hiroshi Tani, 王秀峰, 佟志军, 刘兴朋. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价. 应用生态学报, 2011, 22(1): 189-195.
- [29] Liang P, Du L M, Yue G J. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 832-841.
- [30] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.
- [31] 陆大道. 京津冀城市群功能定位及协同发展. 地理科学进展, 2015, 34(3): 265-270.
- [32] Fang C L, Wang Z B, Xu G. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in China: a city-level perspective analysis. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(11): 1519-1532.
- [33] 任宇飞, 方创琳. 京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析. 地理科学进展, 2017, 36(1): 87-98.
- [34] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警. 地理学报, 2012, 67(10): 1411-1422.
- [35] 郭玲玲, 武春友, 于惊涛. 中国能源安全系统的仿真模拟. 科研管理, 2015, 36(1): 112-120.
- [36] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 赵萌. 主客观权重的组合方式及其合理性研究. 管理评论, 2017(12): 17-26.
- [37] Hwang C L, Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. Berlin; Springer, 1981.
- [38] 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [39] 李海东, 王帅, 刘阳. 基于灰色关联理论和距离协同模型的区域协同发展评价方法及实证. 系统工程理论与实践, 2014, 34(7): 1749-1755.
- [40] 贾国柱, 刘圣国, 王剑磊, 宋晓东, 王天歌. 基于支持向量机的建筑企业循环经济评价研究. 管理评论, 2013, 25(5): 11-18.
- [41] Jia X L, An H Z, Fang W, Sun X Q, Huang X. How do correlations of crude oil prices co-move? A grey correlation-based wavelet perspective. *Energy Economics*, 2015, 49: 588-598.
- [42] 张玉玲, 迟国泰, 祝志川. 基于变异系数-AHP 的经济评价模型及中国十五期间实证研究. 管理评论, 2011, 23(1): 3-13.
- [43] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析. 地理学报, 2005, 60(4): 597-606.
- [44] 李细归, 吴清, 周勇. 中国省域旅游生态安全时空格局与空间效应. 经济地理, 2017, 37(3): 210-217.
- [45] 林海明. 因子分析模型的改进与应用. 数理统计与管理, 2009, 28(6): 998-1012.
- [46] 董晓峰, 杨春志, 刘星光. 中国新型城镇化理论探讨. 城市发展研究, 2017, 24(1): 26-34.