

# 基于信息熵的长江下游地区人居生态系统发展演化

宋帆, 杨晓华, 武翡翡, 刘童

(北京师范大学 环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**基于对人居生态系统结构复杂性的分析,结合耗散结构理论以及熵变理论,构建了长江下游地区人居生态系统演化评价指标体系;运用年份信息熵和指标信息熵两个模型分别对人居生态系统的演化方向以及健康协调程度进行了评价;最后运用灰关联模型对评价指标和城市综合、协调发展度间的关联性进行了分析,结合熵权大小识别出研究区未来发展的制约性因子,并对今后人居生态系统的发展提出建议。结果显示:在2005—2015年,长江下游五省人居生态系统熵流、熵产生和总熵变均呈波动下降趋势,人居生态系统有序度不断提高,总体朝健康态势发展;系统综合发展度先下降再上升,向着健康有序的方向发展。而协调发展度则是先上升再下降,由环境滞后型向经济滞后型转化;研究区今后重点治理方向有增加地方财政收入、开发新能源、调整消费结构、治理城市污水以及工业废气、加大环保投资比例等。本研究能反映出研究区人居生态系统的演化方向及趋势,并能针对性地提出增强系统可持续发展能力的针对性措施。

**关键词:**人居生态系统; 信息熵; 灰色关联度; 发展演化; 长江下游地区

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0245-07

## Evaluation of Evolution and Development of the Human Habitat Ecosystem in the Lower Yangtze Region Based on Information Entropy

SONG Fan, YANG Xiaohua, WU Feifei, LIU Tong

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the analysis of human habitat ecosystem structure, the indicator system of evaluating sustainable development ability of human habitat ecosystem was set up through dissipative structure theory and entropy change theory. The year-based information entropy model and index-based information entropy model were applied to evaluate the evolution direction and health coordination of human habitat ecosystem. The correlation degree between index and aggregative indicator was analyzed by grey correlation degree. The results show that: from 2005 to 2015, the input-output entropy, metabolism entropy production and total entropy of the human habitat ecosystem in the lower Yangtze region presented the wavelike decrease change, the order degree kept improving. The comprehensive development degree of the lower Yangtze region went down at first and then went up, the whole state was getting better. The coordinated development degree went up at first, and then went down, and transformed from environmental lag type to economic lag type. In the future, the research area will focus on increasing local fiscal revenue, developing new energy sources, adjusting consumption structure, controlling urban sewage and industrial waste gas, and increasing the proportion of investment in environmental protection. This research method can reflect the evolution direction and trend of human habitat ecosystem and propose targeted measures to enhance the sustainable development ability of the system.

**Keywords:** human habitat ecosystem; information entropy; grey correlation degree; evolution and development; the lower Yangtze region

当今社会处在一个经济高速发展的进程中,人们在享受经济发展带来的巨大成果的同时也面临许多生态环境问题。诸如环境污染、能源匮乏、生物多样性丧失等问题都在冲击破坏着人居生态系统的健康<sup>[1]</sup>。与其他生态系统相比,人居生态系统具有高度的脆弱性和人为依赖性,如何正确评价人居生态系统的发展演化进程一直是生态系统可持续发展研究的一个热点<sup>[2]</sup>。人居生态系统是一个典型的社会—经济—自然复合生态系统,是一个以人为中心的生态系统,是一个不断发展的多层次的巨系统。大致上包括经济系统、社会系统、自然系统三部分,各系统单独作用,又联合对人居生态系统的健康产生影响,在进行健康评价时应充分考虑这 3 个方面的因素<sup>[3]</sup>。

一个健康的人居生态系统应该是稳定的、可持续的,是社会、经济、自然系统的完整与协调统一<sup>[4]</sup>。目前关于人居生态系统评价研究主要集中在以下几方面:生态系统健康评价、生态承载力评价、生态系统服务功能评估、生态风险评价、生态系统演化研究。常用的方法有能值分析、土地利用分析、综合指标评价、未确知测度模型评价、生态足迹分析等。近些年一些学者将热力学熵的概念引入到各类生态系统的评价研究中,从“信息熵”的视角对人居生态系统的演化及发展进行了研究。例如:吴宜进等<sup>[5]</sup>基于信息熵对武汉市人居生态系统演化进行了分析,并找出了变化的驱动因素。王龙等<sup>[6]</sup>利用信息熵理论对上海市 2003—2013 年生态系统演化做了分析,并用灰色模型对 2014—2020 年可持续发展能力做了预测。李婧昕等<sup>[7]</sup>对北京的城市生态系统服务熵变进行了计算,从而对北京市生态健康做了动态评价。这些研究丰富了人居生态环境评价的手段,证明了信息熵方法在人居生态系统演化分析中的可行性,但在空间对比以及寻找关键因子方面仍显薄弱。

长江下游地区作为我国经济中心,重要的战略定位以及独特的地理区位凸显了该地区生态系统可持续发展研究的迫切性和必要性。本研究以省为研究单位,以“信息熵”为研究手段,从 4 个方面构建了人居生态系统演化指标体系,对长江下游地区 2005—2015 年人居生态系统发展演化状况进行评价和分析。并利用灰色关联度模型对各类指标和综合、协调发展程度间的关联度进行测算,从而提出具有区域针对性的人居生态系统优化措施,为长江下游地区人居生态系统的健康协调发展提供参考意见。

## 1 研究方法

### 1.1 人居生态系统信息熵理论

人居生态系统是一个由自然、经济、社会组成的

多因素、多层次的复杂系统,是一个典型的耗散结构,可采用“信息熵”手段综合分析其演化过程以及演化方向<sup>[6]</sup>。“熵”最初是根据热力学第二定律引出的一个反映自发过程不可逆性的物质状态参量,用来表示系统的无序程度,熵值越大表示系统的混乱状态越严重。如果通过某些手段引入有序熵对系统熵值进行中和,就可能使系统重新形成新的有序结构<sup>[8]</sup>。人居生态系统中的熵变化主要分为两部分:一是自然生态环境与社会经济系统之间的物质交换时的“熵流”,反映了自然系统对人居系统的支持能力;二是人类生产生活时产生的熵变,简称“熵产生”,反映了人居生态系统的代谢以及恢复能力<sup>[9]</sup>。“熵流”和“熵产生”可进一步分成四部分,分别是体现城市生态系统中生产者组分及生产能力的支持型输入熵  $\Delta S_1$ ;体现人居生态系统中消费者组分及消费能力的压力型输出熵  $\Delta S_2$ ;体现人类生活、生产过程中产生的污染物及其造成的负面影响的氧化型代谢熵  $\Delta S_3$ ;体现人居生态系统中还原者组分及其代谢恢复能力的还原型代谢熵  $\Delta S_4$ 。其中前两者是“熵流”,后两者属于“熵产生”,根据“熵流”和“熵产生”可得到系统的“总熵变”以量化系统的有序性。每种熵具体指标体系见表 1。

### 1.2 信息熵量化模型

根据 Shannon CE 的信息熵理论,对于人居生态系统这样一个不确定性强的系统,我们可用随机变量  $X$  表示其状态特征。当变量为离散型随机变量时,假设  $X$  的值为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ( $n \geq 2$ ),每一个取值对应概率 ( $0 \leq p_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n$ ),并且有  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ ,那么该系统的信息熵可用下式计算<sup>[10]</sup>:

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln(p_i) \quad (1)$$

式中: $S$  为不确定性系统的信息熵; $p_i$  代表各离散随机变量  $X$  的概率。

基于以上理论以及评价的实际需要,本次评价模型分为两个部分:年份信息熵和指标信息熵。其中用年份信息熵来计算系统的支持型输入熵、压力型输出熵、氧化型代谢熵和还原型代谢熵,从而分析系统的演化方向以及复杂性。用指标信息熵结合层次分析法来确定指标权重,计算系统的综合发展度、协调发展度,从而对人居生态系统的健康、协调程度进行判断。

1.2.1 年份信息熵 对人居生态系统中第  $m$  个年份、第  $n$  个评价指标进行评价,系统年份信息熵  $\Delta S$  可表示为:

$$\Delta S = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \frac{q_{ij}}{q_j} \ln \frac{q_{ij}}{q_j} \quad (2)$$

$$q_j = \sum_{i=1}^n q_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: $\Delta S$  为人居生态系统年份信息熵, $q_{ij}$  为各指标的标准化值; $q_j$  为第  $j$  年评价指标标准化值的求和。

表 1 人居生态系统熵变评价指标体系

目标层	准则层	次准则层	要素层	单位
支持型输入熵(A)	支持型输入熵(A)		人均地区生产总值( $A_1$ )	元
			地方财政收入( $A_2$ )	元
			进出口总额( $A_3$ )	亿 US \$
			粮食总产量( $A_4$ )	万 t
			蔬菜总产量( $A_5$ )	万 t
			肉类总产量( $A_6$ )	万 t
			水果总产量( $A_7$ )	万 t
			水产总产量( $A_8$ )	万 t
			成品钢材产量( $A_9$ )	万 t
			水泥产量( $A_{10}$ )	万 t
熵流	熵流		发电量( $A_{11}$ )	亿 kW · h
			城镇居民教育文化娱乐支出( $A_{12}$ )	元/人
			人口密度( $B_1$ )	人/km <sup>2</sup>
			人口自然增长率( $B_2$ )	‰
			城乡居民生活用电量( $B_3$ )	亿 kW · h
			人均日生活用水量( $B_4$ )	L
			城市居民家庭人均消费支出( $B_5$ )	元
			农村居民家庭人均生活消费支出( $B_6$ )	元
			能源消费量( $B_7$ )	万 t 标准煤
			工业能源终端消耗量( $B_8$ )	万 t 标准煤
氧化型代谢熵(C)	氧化型代谢熵(C)		化肥施用量(折纯量)( $B_9$ )	万 t
			城镇每百户家用汽车拥有量( $B_{10}$ )	辆
			工业废水排放总量( $C_1$ )	亿 t
			城镇生活污水排放量( $C_2$ )	亿 t
			工业废气排放总量( $C_3$ )	亿 m <sup>3</sup>
			烟(粉)尘排放总量( $C_4$ )	万 t
			废气二氧化硫排放总量( $C_5$ )	万 t
			PM <sub>10</sub> 浓度( $C_6$ )	μg/m <sup>3</sup>
			SO <sub>2</sub> 浓度( $C_7$ )	μg/m <sup>3</sup>
			NO <sub>2</sub> 浓度( $C_8$ )	μg/m <sup>3</sup>
熵产生	熵产生		工业固体废物产生量( $C_9$ )	万 t
			生活垃圾清运量( $C_{10}$ )	万 t
			城镇污水处理率( $D_1$ )	%
			生活垃圾无害化处理率( $D_2$ )	%
			一般工业固体废物综合利用率( $D_3$ )	%
			水质高于Ⅲ类的比例( $D_4$ )	%
			建成区绿化覆盖率( $D_5$ )	%
			自然保护区面积占辖区面积( $D_6$ )	%
			人均公园绿地面积( $D_7$ )	m <sup>2</sup>
			节水灌溉面积( $D_8$ )	千 hm <sup>2</sup>
还原型代谢熵(D)	还原型代谢熵(D)		排水管道长度( $D_9$ )	km
			环保投资占 GDP 比重( $D_{10}$ )	%

1.2.2 指标信息熵 对人居生态系统进行健康、协调程度评价时采用“综合赋权”的加权指数模型:

$$G=\sum W_i \cdot X_{ij} \tag{4}$$

式中: $G$  为人居生态系统的某一类指标信息熵某一年的得分; $X_{ij}$  为各评价指标的标准化值; $W_i$  为各指标的综合权重,可由下列式子计算:

$$W_i=(w_{i1}+w_{i2})/2 \tag{5}$$

$$w_{i1}=\frac{(1-e_i)}{(n-\sum_{i=1}^n e_i)} \tag{6}$$

$$e_i=-\frac{1}{\ln m_j}\sum_{i=1}^m \frac{X_{ij}}{x_i} \ln \frac{X_{ij}}{x_i} \tag{7}$$

$$X_j=\sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \tag{8}$$

式中: $w_{i1}$  是熵权法计算所得指标权重; $w_{i2}$  是 AHP 法计算所得指标权重; $e_i$  是各指标的指标信息熵。得分越高,表明人居生态系统在这一方面的发展状况越好。

城市人居环境与社会经济发展之间的关系分析可引入“综合发展度”和“协调发展度”模型<sup>[11]</sup>。其中,生态环境与经济协调发展的整体效益评价采用“综合发展度  $T$ ”表示:

$$T=\alpha_1 G_1+\alpha_2 G_2+\alpha_3 G_3+\alpha_4 G_4 \tag{9}$$

式中: $\alpha_1$  为偏重系数, $\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+\alpha_4=1$ ;  $G_1, G_2, G_3, G_4$  分别为各类指标信息熵得分。 $T$  得分越高,人居生态系统综合发展程度越高。生态环境与经济协调发展水平高低采用“协调发展度  $D$ ”表示:

$$D=\sqrt{\left\{\frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4}{\left[\frac{G_1+G_2+G_3+G_4}{4}\right]^4}\right\}^k} \cdot T \tag{10}$$

式中: $T$  为综合发展度; $k \geq 2$  为常数,本研究中  $k$  取 8。同样, $D$  得分越高人居生态系统协调发展度越好。

1.3 灰色关联度分析

灰色关联度分析通常用来定量描述事物间的关联程度,关联度越大代表两类事物间的相似程度越高<sup>[12]</sup>。由于其对数据要求低,原理简单易于掌握的优点,而得到了广泛应用。其基本原理如下:一般设参考数列为  $X_0=\{x_0(k), k=1,2,\cdots,n\}$ ,比较数列为  $X_i=\{x_i(k), k=1,2,\cdots,n\} (i=1,2,\cdots,m)$ ,则两者间的关联度为:

$$r_{0i}=\frac{1}{n}W_k \sum_{i=1}^n \xi_{0i}(k) \tag{11}$$

$$\xi_{0i}(k)=\frac{\Delta_{\min}+\xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i(k)}+\xi \Delta_{\max}} \tag{12}$$

式中: $\xi$  为分辨系数,作用是削弱极大值对结果产生的影响,且  $\xi \in [0,1]$ ,本次研究中取 0.5;  $\Delta_{\max}$  和  $\Delta_{\min}$  分别为  $\Delta_{0i(\max)}$  和  $\Delta_{0i(\min)}$  中的最大值和最小值,由下式计算<sup>[13]</sup>:

$$\Delta_{\max}=\max_i \max_k |x_0(k)-x_i(k)|/\Delta_{\min}=\min_i \min_k |x_0(k)-x_i(k)| \tag{13}$$

2 研究区概况和数据来源

长江中、下游以江西省九江市湖口县为分界点,下游地区包括江西、安徽、江苏、浙江、上海 5 个省级行政区。该地区位于亚热带季风盛行地区,雨量充沛,光照充足;天气变化复杂,易出现灾害性气候;大部分处于长三角经济带,是我国经济最发达、城市化

水平最高、对外开放度最大的地区,在我国国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有举足轻重的战略地位<sup>[14]</sup>。2015年,江西、安徽、江苏、浙江、上海五省GDP总量为127 628.3亿元,占全国18.62%,同时能源消费量达到了82 005万t标准煤,占全国总量的19.07%。相对于五省5.37%的面积占比,可以看出该地区的经济产生和能源消耗均十分突出。近些年来,当地人口、经济发展过程中资源消耗和污染排放对城市生态系统形成的压力不断增大,生态系统承载力的局限性日益凸显,环保形势日益严峻,经济发展的机遇与环境恶化的挑战并存。因此,深入剖析长江下游地区人居生态系统演化趋势和发展状况并识别关键因子,对于保障该地区实现社会经济可持续发展以至对其他地区发展模式的选择都具有重要参考意义。

本次数据主要来自以下数据集:各省《统计年鉴》(2006—2016)、《环境状况公报》(2005—2015)以及《水资源公报》(2005—2015),还有少部分数据来自《中国城市建设统计年鉴》。

### 3 结果与分析

#### 3.1 人居生态系统演化熵变分析

由图1可知,2005—2015年,五省的支持型输入熵大致都呈现抛物线式上升状态。说明随着社会的快速发展,人居生态系统对自然资源系统的需求越来越大,但是增长状态正在减缓,系统趋于稳定。浙江省和上海市2015年支持型输入熵出现了小幅下滑,对自然资源的依赖出现了降低,在向好的趋势发展;五省的压力型输出熵全部呈现稳定下降趋势,说明人口、社会对于人居生态系统的压力正在变小,能源消耗速度在变缓。但上海市2015年压力型输出熵出现了小幅回升,应注意加强对人口压力的调控防止反弹。五省氧化型代谢熵呈现震荡下降状态。江西省和浙江省震荡较小,基本呈现稳定下降状态,说明人类生产生活过程中污染物的排放量有所下降,污染治理效果较显著。江苏、浙江、上海三省都震荡中出现了多年较明显上升,治理效果有所反复,还需加大治理力度防止恶化。五省还原型代谢熵总体都呈抛物线上升状态,且都在某一年超过了氧化型代谢熵值,表明人居环境的治污能力正在不断增强,市政工程也在初步完善。但近些年熵值已经趋近不变,治污进入了瓶颈期,市政工程建设也趋近饱和。今后应依靠科技突破瓶颈并提高工程质量,从而提高生态系统还原能力。

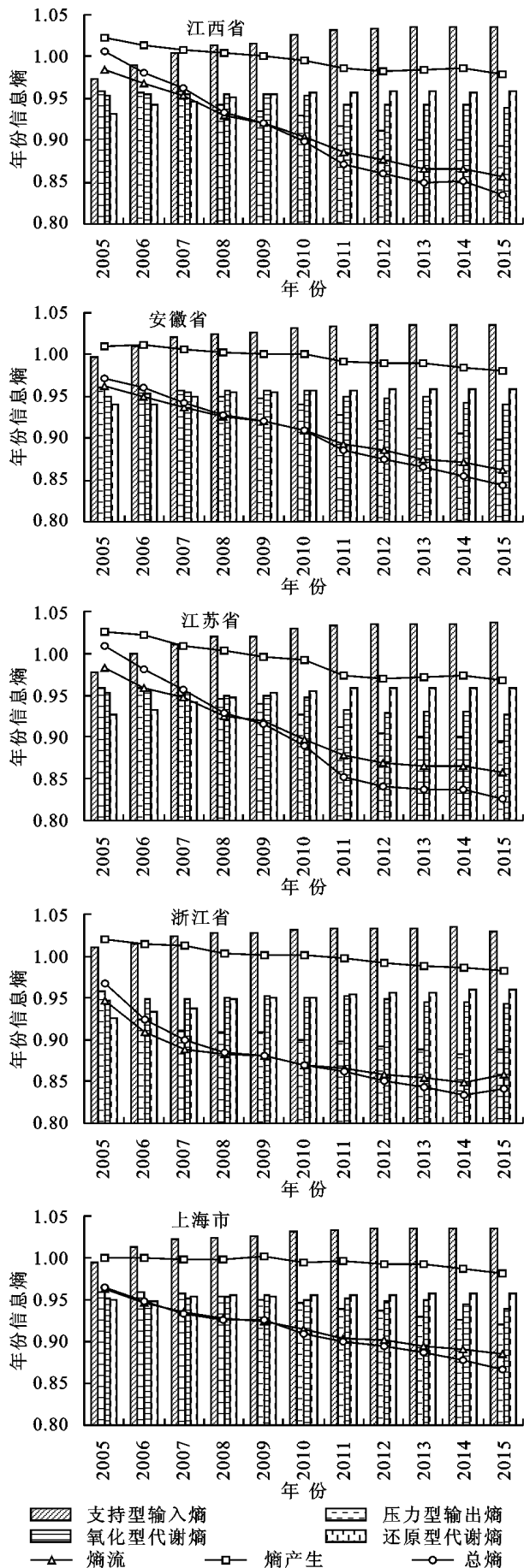


图1 人居生态系统演化熵变分析

从熵值变化来看,2005—2015 年五省人居生态系统熵流、熵产生、和总熵变三者变化趋势一致,均呈波动下降状态,虽然年份间略有波动但整体的下降趋势比较明显。熵流总体为负值,近年来下降趋势有所放缓,说明自然资源系统对人居生态系统的承载能力在不断增强;熵产生经历了从正到负的变化且整体趋势在不断下降,表明各省人居生态系统的代谢还原能力在不断增强,但熵产生是三者之中波动最大的,如何提高系统稳定性将是今后工作的重点;总熵值为负值且在不断减小,人居生态系统整体在向着健康、有序的方向转变,自身稳定性不断增强。值得注意的是,上海市 2015 年总熵值出现了上升,究其原因是在上文分析的压力型输出熵的上涨。

由图 2 可知,五省综合得分变化情况存在如下规律:综合发展度  $T$  存在一个明显的先下降再上升的过程。而协调发展度  $D$  则恰好相反,趋势是先上升再下降,且变化幅度较综合发展度  $T$  更大。以江西省为例,2005—2008 年协调发展度  $D$  在不断上升,这个阶段属于环境滞后型,此时人居生态系统的代谢还原能力还处于一个较低水平,对于人口、社会的承载能力还较弱。因此虽然协调发展度  $D$  在上升,但综合发展度  $T$  却出现了下降。2008—2015 年协调发展度  $D$  开始下降,此时属于经济滞后型,人居生态系统代谢达到了一个较高水平,此时应该将发展重点偏向经济,重新提高环境与经济的协调发展度。由于此时经济水平与环境治理水平都达到了一个较高效益水平层次,所以综合发展度  $T$  开始上升,向着良好的趋势发展。安徽省、江苏省、浙江省与江西省发展趋势相似,得分的拐点也在 2008—2009 年左右。上海市单独一类,拐点出现得较早(2006 年)。由于上海市较高的经济水平和重要的战略地位,环境保护理念以及治理措施得以尽早推广,因此拐点出现较早。在 2015 年上海市三者得分实现了同步增长,而综合发展度以及协调发展度的共同增长也将是未来人居生态系统发展的主基调。

3.2 驱动因子识别及改善建议

3.2.1 基于熵权的人居生态系统优化 经过统计,各类指标中熵权最大和最小的指标见表 2。

由表 2 分析可知,2005—2015 年,各省支持型输入熵指标( $A$ )中“人均地区生产总值( $A_1$ )、地方财政收入( $A_2$ )和进出口总额( $A_3$ )”3 项指标的熵权最大,分别出现了 5,4,4 次。并且这 3 个指标年际增幅较大,对于增强长江下游五省人居生态系统承载力做出了较大贡献。熵权较小的指标是粮食产量( $A_4$ )、蔬菜产量( $A_5$ )以及水产品产量( $A_8$ )。因此,长江下游地区各省未来需要进一步增加地方财政收入,加强经济建设。同时,积极扶持城市生态农业发展,丰富农产品市场结构,使其成为提高人居生态系统承载力的新的增长点。

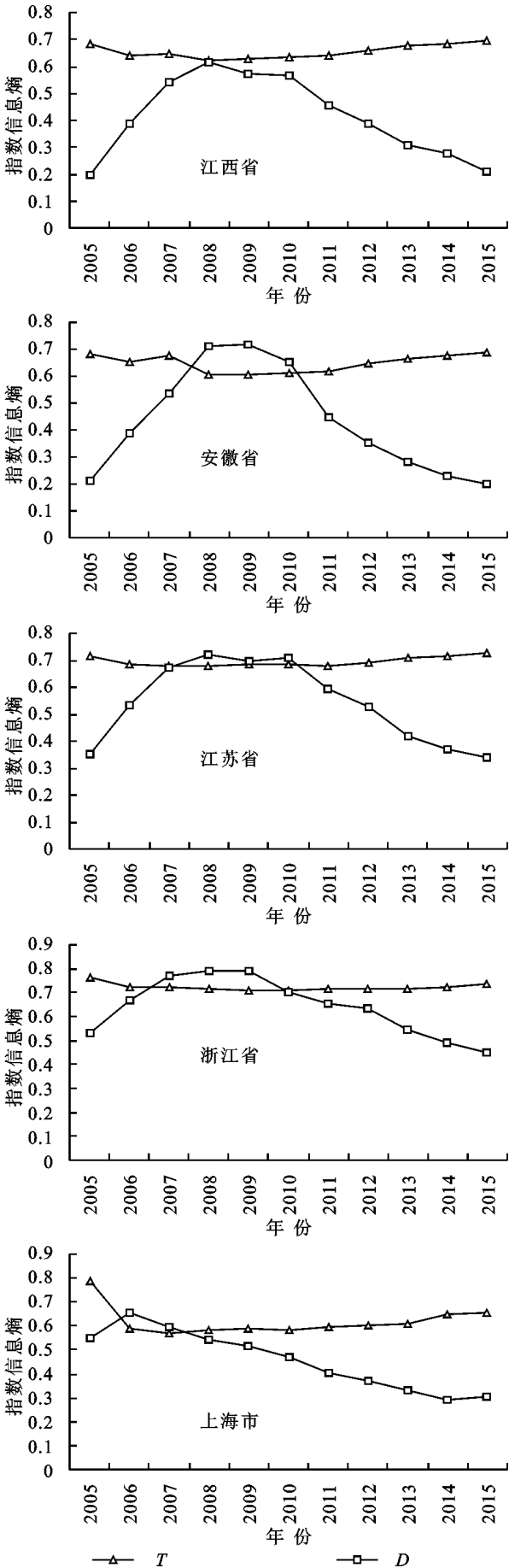


图 2 人居生态系统演化综合得分

表 2 熵权分析结果

指 标		支持型 输入熵	压力型 输出熵	氧化型 代谢熵	还原型 代谢熵
江西省	熵最大	$A_1, A_2, A_3$	$B_3, B_5, B_{10}$	$C_2, C_3, C_4$	$D_1, D_5, D_9$
	熵最小	$A_4, A_5, A_8$	$B_1, B_2, B_9$	$C_5, C_6, C_8$	$D_4, D_6, D_8$
安徽省	熵最大	$A_1, A_2, A_3$	$B_5, B_6, B_{10}$	$C_2, C_3, C_9$	$D_2, D_9, D_{10}$
	熵最小	$A_4, A_6, A_8$	$B_1, B_2, B_9$	$C_1, C_5, C_{10}$	$D_1, D_3, D_6$
江苏省	熵最大	$A_1, A_2, A_{10}$	$B_3, B_6, B_{10}$	$C_2, C_3, C_9$	$D_8, D_9, D_{10}$
	熵最小	$A_4, A_6, A_8$	$B_1, B_4, B_9$	$C_1, C_6, C_8$	$D_1, D_3, D_5$
浙江省	熵最大	$A_1, A_2, A_3$	$B_5, B_6, B_{10}$	$C_2, C_3, C_7$	$D_1, D_6, D_9$
	熵最小	$A_4, A_5, A_7$	$B_1, B_2, B_9$	$C_1, C_6, C_8$	$D_2, D_3, D_8$
上海市	熵最大	$A_2, A_3, A_{10}$	$B_2, B_5, B_{10}$	$C_4, C_5, C_7$	$D_2, D_4, D_9$
	熵最小	$A_4, A_5, A_9$	$B_1, B_4, B_8$	$C_2, C_6, C_{10}$	$D_3, D_5, D_6$

在压力型输出熵指标(B)中,“城镇每百户家用汽车拥有量( $B_{10}$ )、城市居民家庭人均消费支出( $B_5$ )、农村居民家庭人均生活消费支出( $B_6$ )”3 项指标的熵权最大,且 3 项指标在研究期内增长幅度均较大,表明上述指标的增长在较大程度上加重了研究区人居生态系统的压力。因此,该研究区未来需要创新技术并开发新能源,推广新能源交通工具。同时,引导理性消费,调整消费结构,提倡低碳生活,从而减缓城市生态系统的压力。此种熵中,人口密度( $B_1$ )和人口自然增长率( $B_2$ )数值较小,今后应注意控制城市人口规模,防止人口过快增长。

在氧化型代谢熵指标(C)中,“城镇生活污水排放量( $C_2$ )、工业废气排放总量( $C_3$ )”三者的熵权最大且排放量都是上升的,对研究区的氧化代谢功能影响显著。说明下一阶段城市环境治理的重点应放在提高污水回用比例以及工业废气减排上。

还原型代谢熵指标(D)中,排水管道长度( $D_9$ )、污水处理率( $D_1$ )、生活垃圾无害化处理率( $D_2$ )、环保投资占 GDP 比重( $D_{10}$ )几项指标的熵权相对来说比较大,前三者在研究期内增长幅度明显,表明这几个指标的增长对于提高研究区人居生态系统的还原代谢能力做出了突出贡献。环保投资占 GDP 比重虽然整体来说是上升的,但是年际变化较大,今后应加大环保投资比例,做到环保投资与经济同步增长。另一方面,研究期内“水质高于Ⅲ类比例( $D_4$ )、建成区绿化覆盖率( $D_5$ )”指标的熵权相对较小。今后为了提高人居生态系统的还原代谢能力需要进一步加强水质治理,提高水功能区的效用,并且多进行绿化覆盖建设,提高绿化覆盖比例。

3.2.2 基于灰色关联度的人居生态系统优化 经过灰色关联度计算,与  $D, T$  之间灰色关联度最高的指标如表 3 所示。

由表 3 可知,对于综合发展度  $D$  来说,关联度最

高的是压力型输出熵(B)和还原型代谢熵(D),说明人居生态系统的综合发展程度很大程度上取决于消费者对人居系统的压力以及人居系统的还原组分的代谢能力,或者表述为人类对生态系统活力的破坏以及修复。从指标上来看,出现次数较多的指标有:粮食总产量( $A_4$ )、人口密度( $B_1$ )、化肥施用量(折纯量)( $B_9$ )、一般工业固体废物综合利用率( $D_3$ )、节水灌溉面积( $D_8$ ),今后的发展政策可以重点关注这些指标。而且这几个指标全部都属于表 2 中熵权较小的指标,且都出现多次,说明在某种程度上只靠熵权较大的指标来增强人居生态系统的活力和承载力已经比较困难,而通过改善熵权小的指标将会事半功倍。

表 3 灰色关联度分析结果

地域	$D$	$T$
江西省	$D_8, B_9, B_1, D_4, A_4, C_8$	$D_{10}, B_2, C_1, C_7, D_5, D_6$
安徽省	$D_1, B_1, D_3, C_{10}, B_2, C_8$	$D_{10}, C_5, D_6, C_1, C_7, D_5$
江苏省	$D_5, B_1, D_3, B_4, A_4, D_1$	$C_7, B_2, C_1, C_5, B_9, B_4$
浙江省	$D_3, D_8, B_9, A_3, A_4, B_2$	$C_1, C_7, C_8, C_5, D_4, A_7$
上海市	$D_3, D_5, C_{10}, D_{10}, D_6, C_1$	$B_9, C_5, A_8, B_4, D_8, A_6$

对于协调发展度  $T$  来说,关联度最高的是氧化型代谢熵指标(C),说明人居生态系统的协调发展程度与人类生活、生产过程中产生的污染程度密切相关。从指标上来看,出现超过三次的指标有:工业废水排放总量( $C_1$ )、废气二氧化硫排放总量( $C_5$ )、 $\text{SO}_2$  浓度( $C_7$ ),全部都是氧化型代谢熵,进一步证明了协调发展度的大小主要取决于环境生态现状。但随着演化状态从环境滞后型向经济滞后型转化,协调发展度的大小与经济增长,资源供给等因素的关联度将会增大。

4 结 论

(1) 结合人居生态安全的内涵及机理,参考国内外人居生态熵变指标体系。从支持型输入熵、压力型输出熵、氧化型代谢熵、还原型代谢熵 4 个角度,结合指标可获取性,选取了 42 个指标因子构建了长江下游地区人居生态系统发展演化评价指标体系。

(2) 在 2005—2015 年,长江下游五省人居生态系统熵流、熵产生和总熵变变化趋势基本一致,均呈整体波动下降趋势,只是程度上略有差别。说明该地区人居生态系统有序度不断提高,生态系统结构和功能不断优化,总体朝健康态势发展。长江下游五省人居生态系统综合发展度  $T$  存在一个明显的先下降再上升的过程,而协调发展度  $D$  则恰好相反,趋势是先上升再下降。

(3) 基于熵权大小排序,长江下游五省人居生态系统应采取以下优化调控措施:进一步增加地方财政

收入,加强经济建设;积极扶持城市生态农业发展,丰富农产品市场结构;创新技术并开发新能源,推广新能源交通工具;引导理性消费,调整消费结构,提倡低碳生活;控制城市人口规模,防止人口过快增长;重点治理城市污水以及工业废气;加大环保投资比例,提高绿化覆盖比例。基于灰色关联度分析,综合发展度  $D$  与压力型输出熵、还原型代谢熵相关性更大,而协调发展度  $T$  则与氧化型代谢熵相关性更大。

(4) 研究结果初步揭示了过去十年(2005—2015)的长江下游五省人居生态系统演化发展趋势,针对人居生态系统发展过程存在的问题提出了优化措施。可以为该地区可持续发展提供一定科学参考。

#### 参考文献:

- [1] 石惠春,刘伟,何剑,等.一种城市生态系统现状评价方法及其应用[J].生态学报,2012,32(17):5542-5549.
- [2] 杨俊,李争,宋振江,等.长江经济带内陆节点城市生态系统状态评价研究:以长江中游城市带为例[J].人民长江,2016,47(2):11-14.
- [3] 尹晓波.城市生态系统可持续发展评价研究[J].工业技术经济,2006,25(1):58-60.
- [4] Wang P, Deng X Z, Zhou H M, et al. Responses of urban ecosystem health to precipitation extreme: A case study in Beijing and Tianjin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,177:124-133.
- [5] 吴宜进,廖乐,袁绪英.基于信息熵的武汉市城市生态系统演化分析研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(1):21-26.
- [6] 王龙,徐刚,刘敏.基于信息熵和 GM(1,1)的上海市城市生态系统演化分析与灰色预测[J].环境科学学报,2016,36(6):2262-2271.
- [7] 李婧昕,杨立,杨蕾,等.基于熵理论的城市生态系统服务流定量评估:以北京市为例[J].应用生态学报,2018,29(3):987-996.
- [8] 李涵,戴文婷.基于耗散结构理论的资源型城市转型发展分析:以徐州市为例[J].中国矿业,2017,26(2):27-32,50.
- [9] 王珞珈,董晓峰,刘星光,等.基于信息熵的兰州城市生态系统可持续发展能力演化分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2016,52(6):764-770.
- [10] Lin Z M, Xia B. Sustainability analysis of the urban ecosystem in Guangzhou City based on information entropy between 2004 and 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013,23(3):417-435.
- [11] 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.
- [12] 田兵,冉雪琴,薛红,等.贵州 42 种野生牧草营养价值灰色关联度分析[J].草业学报,2014,23(1):92-103.
- [13] 陈骥,邹树梁,唐德文,等.基于灰色关联度的集对分析方法在高层建筑火灾危险性评价中的应用[J].中国安全生产科学技术,2015,11(5):136-141.
- [14] 国务院.长江三角洲城市群发展规划[Z].国务院常务会议,2016-05-11.
- [15] 蔡晓慧,邹松兵,陈志翔,等. TRMM 降水数据在西北内陆河流域的适应性定量分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2013,49(3):291-298.
- [16] 穆振侠,姜卉芳.基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(7):115-119.
- [17] 白爱娟,刘长海,刘晓东. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化[J].地球物理学报,2008,51(3):704-714.
- [18] 李相虎,张奇,邵敏.基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J].地理科学进展,2012,31(9):1164-1170.
- [19] 曾红伟,李丽娟.澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J].地理学报,2011,66(7):994-1004.
- [20] 张月圆,李运刚,李旋,等.红河流域 TRMM 卫星降水数据精度评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):1-8.
- [21] 郭敬辉.川西滇北地区水文地理[M].北京:科学出版社,1985.
- [22] 樊辉,何大明.怒江流域气候特征及其变化趋势[J].地理学报,2012,67(5):621-631.
- [23] 刘小婵. TRMM 降雨数据的空间降尺度研究[D].吉林,长春:东北师范大学,2015.
- [24] 李燕,周游游,胡宝清,等.基于 TRMM 数据的广西西江流域降雨时空分布特征[J].亚热带资源与环境学报,2017,12(1):75-82.
- [25] 程珂,朱桢,李铭. TRMM 3B43 降水产品在西藏地区的精度检验和应用[J].水利水电技术,2014,45(1):44-46.
- [26] 朱国锋,蒲焘,张涛. TRMM 降水数据在横断山区的精度[J].亚热带资源与环境学报,2013,33(9):1125-1131.
- [27] 刘鹏,傅云飞,冯沙,等.中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析[J].气象学报,2010,68(6):822-835.
- [28] 吕洋,杨胜天,蔡明勇,等. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析[J].自然资源学报,2013,28(8):1414-1425.

(上接第 244 页)