

武汉市城市化过程中资源环境压力测度与分析^{*1}

郝汉舟^{1, 2} 郑威^{3, 4} 钟学斌^{1, 2} 汤民¹ 陈薇伊¹

(1. 湖北科技学院资源环境科学与工程学院, 湖北咸宁 437100;

2. 湖北科技学院长江中游水土资源研究中心, 湖北咸宁 437100;

3. 湖北省农业科学院农业经济技术研究所, 湖北武汉 430064;

4. 主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北荆州 434025)

【摘要】:快速城市化对生态环境和资源的剥夺及资源环境对城市化的约束是国内外近年来研究的热点问题。测度城市化过程中对资源环境压力及判别两者间的动态耦合类型对指导健康城市化具有积极意义。首先构建了包含 16 个子指标的城市化综合指标体系和 9 个子指标的资源环境压力综合指标体系。采用突变级数法模型计算了城市化综合指数; 用熵权法计算了资源环境压力指数。采用灰色系统方法计算了城市化综合指标体系和资源环境压力综合指标体系的关联度。采用一般系统理论, 建立了城市化与资源环境耦合模型, 对 2004~2013 年武汉市城市化与生态环境的耦合度及类型进行分析判别。结果表明: (1) 武汉市的城市化综合指数逐年增高, 尤其是 2005~2007 年城市化水平的增速较快。资源环境压力综合指数最大值出现在 2006 年为 0.629, 最小值出现在 2013 年为 0.452; (2) 关联度值在 0.480~0.911 之间, 耦合度大部分都在中等和较强这两个范围中。烟尘排放量与工业总产值、建成区面积、人均用电量、人均 GDP 和城镇人口规模均表现极强的耦合性(大于 0.85)。各城市化子指标中, 城镇人口比重与资源环境的关联度最大; 在资源环境子指标中, 烟尘排放量与城市化水平的耦合作用最强; (3) 基于一般系统论 (General System Theory) 的动态耦合模型反映了城市化—资源环境复合系统的动态反馈过程。从 2004~2013 年, 武汉市经历了协调—冲突—协调—冲突 4 个阶段。结果显示, 武汉市城市化—资源环境复合系统随着城市化的推进, 城市化与资源环境的矛盾进一步显现。

【关键词】:武汉市; 城市化; 资源环境; 约束; 突变级数法; 熵权法

【中图分类号】:S153.6; F595 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)12-2040-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201712012

¹ 收稿日期:2017-09-16; 修回日期:2017-10-20

基金项目:国家社科基金项目“技术创新背景下城市化进程的资源环境效应实证研究”(15BGL139) [National Social Sciences Founding Project “Empirical Study on Resource Environmental Effect of Urbanization under Technological Innovation Background” (15BGL139)]

作者简介:郝汉舟(1970~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为生态修复及城市地理. E-mail:haohz110@163.com

城市化过程中与资源环境对立统一关系日益引起了学界广泛关注。国际全球环境变化人文因素计划 (IHDP) 的核心研究内容是城市化与全球环境变化 (UGEC) 相互关系^[1]。我国十三五规划提出, 到 2020 年内地常住人口城镇化率、户籍人口城镇化率分别要达到 60% 和 45% 左右。但在推进城镇化过程中也暴露出了诸多问题, 如城市化往往导致资源过度损耗、生态环境恶化, 另一方面, 资源环境对城市化过程的约束进一步加强。

从研究视野来看, 城市化过程中环境质量效应^[2]、快速城市化进程中的碳排放管理^[3]、城市扩张驱动机理与模拟预测^[4]、基于大数据的数字城市手段分析城市化格局动态^[5]、城市脆弱性评价方法^[6]等引起了学者的重点关注。

在理论探索上, 美国经济学家 Grossman 与 Krueger 证明了城市生态环境的质量随城市化的增长呈现倒“U”型的变化规律, 认为城市化水平与城市生态环境遵循环境库兹涅茨曲线 (Environmental Kuznets Curves, EKC)^[7]; 基于脱钩理论 (Decoupling Theory) 的脱钩指数, 将经济增长与资源环境之间分为耦合、相对脱钩、绝对脱钩 3 种状态^[8]; 方创琳^[9]认为城市化与环境的耦合度函数是 EKC 曲线和对数曲线的逻辑复合, 由此计算出城市化过程中水资源约束强度; 此外灰色关联分析建立的关联度模型和耦合度模型^[10]、结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM)^[11]、投入产出模型也被用来研究城市化与资源环境的互馈关系。

综上所述, 目前城市化与资源环境相互关系研究存在以下问题: (1) 研究快速城市化对资源环境的影响较多, 但研究资源环境对城市化的胁迫效应及制动效应较少。(2) 从研究方法上较多的注重指标的框架体系建立, 非线性的动态评估模型较少。基于主体建模的仿真系统分析城市化和资源环境交互作用文献报道较少。(3) 资源环境压力测度方面, 资源环境压力指标与城市化之间缺乏内在逻辑证据和因果链条, 指标设立随意性较大, 缺乏一致的、科学的、合理的综合测度指标体系。

武汉市是中部核心城市、湖北省经济发展的增长极, 也是我国中部崛起的重要战略支点。在资源环境对城市化约束进一步加大的背景下, 本研究的主要研究内容是: (1) 从人口、经济、土地、社会城市化 4 个方面构建指标体系, 运用突变级数法对武汉市城市化进行分析; (2) 从城市是资源—环境—经济—社会复合系统出发, 构建了武汉市资源环境评价体系。(3) 在上述基础上用灰色关联方法及动态耦合模型, 研究武汉市城市化与资源环境之间胁迫耦合关系。

1 研究方法和数据来源

1.1 城市化综合指标体系构建

城市化既包括城乡地域和人口比重的变化, 也包括社会关系、经济结构、生活方式、价值观念的变化^[12]。根据武汉市城市化的实际情况, 构建了武汉市城市化指标体系见表 1。

表 1 武汉市城市化综合指标体系

系统层 U		因素层 B	指标层 C	
城 市 化 水 平 综 合 指 标	市	人口城市化 B1	城镇人口比重 (%)	x1
	水		城镇人口规模 (万人)	x2
	综 指 标		二三产业就业人口 (万人)	x3

经济城市化 B2	建成区人口密度 (人/km ²)	x4
	人均 GDP (元)	x5
	二三产业 GDP 比重 (%)	x6
	二三产业增加值 (亿元)	x7
	工业总产值 (亿元)	x8
	建成区面积 (km ²)	x9
	人均建成区面积 (km ² /万人)	x10
	人均绿地面积 (m ²)	x11
	人均铺装道路面积 (m ²)	x12
	人均用电量 (kW · h/人)	x13
社会城市化 B4	每万人在校大学生 (人)	x14
	每万人口医生数 (人)	x15
	每万人口医院床位数 (张)	x16

陈明星等^[12]以人口、经济、社会、土地四个方面，构建中国城市化水平的综合评价指标体系；王洋等^[13]以人口城镇化、经济城镇化、社会城镇化为指标体系探索城镇化的综合发展水平。在本研究中，认为人口城市化是城市化的核心，体现了城市化的人口迁移和聚集；经济城市化是城市化的支撑，体现了城市化的动力；土地城市化是城市化的载体，体现了城市化空间效应；社会城市化是生活方式的转变，体现了城市化的高级属性。

1.2 突变级数法求城市化综合指数

突变级数法是在法国数学家雷内托姆(R. Thom)的突变论的基础上，对评价目标进行综合排序的一种综合评价的方法。该方法有状态变量和控制变量组成，一般控制变量不超过 4 个。在形成突变模糊隶属函数后进行综合评价^[14]。突变级数法的特点是

不对指标的权重主观赋权，按照内在的逻辑关系对各评价指标的相对重要性进行排序，从而减少了评价过程中的主观性^[15]。

为了消除指标的取值大小和量纲不一致的影响，在用突变级数法之前，采用百分比标准化方法对数据做标准化处理。对正向指标计算公式如下：

$$x' = \frac{x}{\max} \quad (1)$$

对负向指标计算公式如下：

$$x' = 1 - \frac{x}{\max} \quad (2)$$

式中: max 为指标的最大值; min 为指标的最小值。多目标决策所涉及突变类型一般有 7 种，常见的突变模型主要有 3 种: 尖点突变系统、燕尾突变系统、蝴蝶突变系统。因为本研究中城市化指标体系均有 4 个子指标，故评价系统为蝴蝶突变模型：

$$f(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ux^4 + \frac{1}{3}vx^3 + \frac{1}{2}wx^2 + tx \quad (3)$$

式中: f(x) 为势函数; x 为状态变量; u、v、w、t 为该状态变量 x 的控制变量。

对势函数先进行一阶求导，再进行二阶求导消去 x，即由 f(x)' = 0 和 f(x)'' = 0 联立方程消去 x，得到突变系统的分歧点集方程。蝴蝶突变分歧点集方程: u = -10x², v = 20x³, w = -15x⁴, t = 4x⁵，则归一方程为：

$$x_u = u^{1/2}, \quad x_v = v^{1/3}, \quad x_w = w^{1/4}, \quad x_t = w^{1/5} \quad (4)$$

1.3 资源环境指标体系构建

资源环境对城市化的约束主要集中在土地资源、水资源和生态环境质量方面。在资源环境指标体系构建上，付云鹏^[16]用资源供给、环境污染、环境治理构建资源环境指标体系；冯东海^[17]用大气环境、水环境、废弃物处理、绿化水平构建生态环境指标体系。借鉴《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》中的关键指标体系，结合武汉市资源环境压力的实际情况，构建资源环境指数 R，总共包括 5 个分指标，分别是土地资源指数、水资源指数、生态环境综合指数、医疗资源指数、教育资源指数、交通资源指数。

表 2 武汉市资源环境指标体系

资源环境压力指数	代码	对应评价指标
土地资源指数	LRI	人均拥有土地面积
水资源指数	WRI	人均水资源量
生态环境综合指数	ECI	反映工业、交通、生活污染排放（含4项指标）
医疗资源指数	MRI	万人医生数
教育资源指数	ERI	生师比
交通资源指数	TRI	万人拥有公交车

1.4 熵权法计算资源环境指数

熵权法是在香农(C. E. Shannon)信息熵理论上发展起来的确定指标权重的一种方法^[19]。其主要过程为:①指标数据[0, 1]标准化。对正向指标: $X_{ij}=(x_{ij}-\text{Min})/(\text{Max}-\text{Min})$, 对负向指标 $X_{ij}=(\text{Max}-x_{ij})/(\text{Max}-\text{Min})$ 。式中, X_{ij} 表示第 i 年第 j 项指标的标准化值; x_{ij} 表示第 i 年第 j 项指标的原始值。Max、Min 分别是第 j 项指标的最大值、最小值。②计算第 i 年第 j 项指标值的

比重: $p_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^m X_{ij}$ 。③计算第 j 个指标信息熵。 $e_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$ 。如 $p_{ij}=0$, 则令 $p_{ij} \ln p_{ij}=0$ 。④计算第

j 个指标的熵权重: $w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j)$ 。⑤计算综合得分: $S_{ij} = X_{ij} \times \sum_{i=1}^m w_j$ 。

1.5 数据来源和数据处理软件

本论文数据主要来源于武汉市统计年鉴(2004~2013 年)、湖北省统计年鉴(2004~2013 年)、武汉市国民经济和社会发展统计公报(2004~2013 年)、武汉市环境状况公报(2004~2013 年)。城市化综合指标 U 与资源环境指数 R 的关联度用 DPS 数据处理系统 v15.10 计算。

2 结果分析与讨论

2.1 武汉市城市化综合指数

武汉市城市化指标体系中 2004~2013 年的原始数据经过 [0, 1] 标准化后, 利用归一公式, 计算各层指标, 并进行综合计算。在进行综合计算评价时应注意“互补”和“非互补”原则, 如果在同一个对象的控制变量之间关联度较为明显, 就将这种控制变量叫做“互补”型, 否则就称之为“非互补”型。计算互补型指标, 则按平均值法取值; 在计算非互补型指标时, 应按照“大中取小”的原则。

以 2004 年为例, 详细计算过程如下: C_1, C_2, C_3, C_4 构成蝴蝶突变模型, 按照互补原则:

$$x_{B_1} = (x_{C_1}^{1/2} + x_{C_2}^{1/3} + x_{C_3}^{1/4} + x_{C_4}^{1/5}) / 4 = (0.876\ 0^{1/2} + 0.648\ 6^{1/3} + 0.829\ 4^{1/4} + 0.459\ 4^{1/5}) / 4 = 0.903\ 0。$$

按照蝴蝶突变模型及互补原则，同理可以计算出： $x_{B_2}=0.7205$ ， $x_{B_3}=0.7075$ ， $x_{B_4}=0.8601$ ， B_1 ， B_2 ， B_3 ， B_4 构成蝴蝶突变模型，继续按互补原则：

$$U = (x_{B_1}^{1/2} + x_{B_2}^{1/3} + x_{B_3}^{1/4} + x_{B_4}^{1/5}) / 4 = (0.903\ 0^{1/2} +$$

$0.720\ 5^{1/3} + 0.707\ 5^{1/4} + 0.860\ 1^{1/5}) / 4 = 0.933\ 5$ 同样的方法计算出其他年份的城市化综合指数 U ，最终结果见图 1。

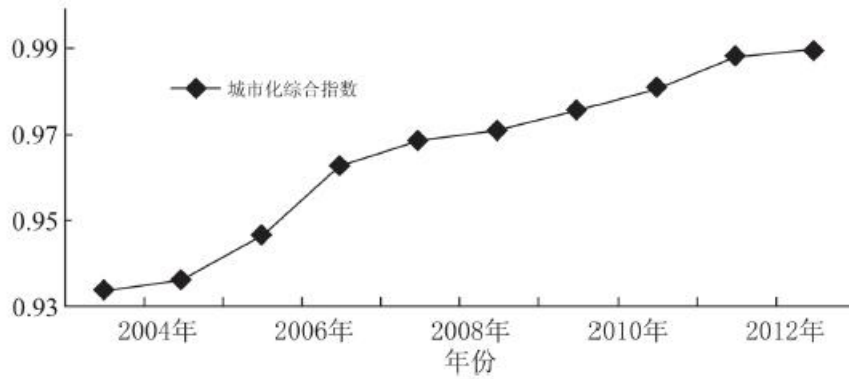


图 1 武汉市 2004~2013 年城市化综合指数

Fig.1 Wuhan City Urbanization Composite Index (2004–2013)

由图 1 可以看出，武汉市的城市化综合指数逐年增高，尤其是 2005~2007 年城市化水平的增速相对较快。在本研究中，采用突变级数法得到的是武汉市城市化综合指数，其值与统计标准的我国城镇化率有较大差别。突变级数法是按内在逻辑关系对评价体系中指标间的重要程度进行排序，并给出最下层指标的模糊隶属度值。而上一层的模糊隶属度值是由从底层逐级计算得出的。中，康江江对太原经济圈城镇化水平研究中，经济圈中娄烦县该值最小为 0.8093，太原市该值最大为 0.9868^[20]。范斐用该方法对辽宁沿海经济带城市化水平进行评价，其值范围在 0.134~0.822^[21]。李艳用突变级数法评价广东省生态系统健康时，尽管突变级数法得分均大于加权平均分得分，但是由突变级数法得出的健康排序与真实情况一致，说明了突变级数法评价的客观性^[22]。

2.2 武汉市资源环境指数

按照熵权法的计算公式，得到武汉市资源环境各指标的信息熵、冗余度及权重(表 3)。按照表 3 的权重及各对应评价指标归一化的值，得到可以得到 2004~2013 年武汉市不同年份的资源环境指数及土地、水资源、生态环境、医疗资源、教育资源、交通资源指数(表 4)。

表 3 权重计算

资源环境压力指数	代码	对应评价指标	信息熵	冗余度	权重
土地资源指数	LRI	人均拥有土地面积 y1	0.781	0.219	0.232
水资源指数	WRI	人均水资源量 y2	0.894	0.106	0.113
		废水排放总量 y3	0.925	0.075	0.080
生态环境指数	ECI	烟尘排放总量 y4 二氧化硫排放总量 y5	0.911 0.901	0.089 0.099	0.095 0.105
		生态环境指数组成 y6	0.924	0.076	0.080
医疗资源指数	MRI	万人医生数 y7	0.912	0.088	0.094
教育资源指数	ERI	基础教育师生比 y8	0.891	0.109	0.116
交通资源指数	TRI	万人拥有公交车 y9	0.921	0.079	0.084

表 4 2004 ~ 2013 年武汉市资源环境指数

年份	资源环境 综合指数	土地资源 指数	水资源 指数	生态环境 综合指数	医疗资源 指数	教育资源 指数	交通资源 指数
2004	0.813	0.224	0.10	0.187	0.141	0.078	0.083
2005	0.898	0.221	0.11	0.237	0.14	0.104	0.083
2006	0.76	0.218	0.056	0.192	0.128	0.075	0.063
2007	0.821	0.215	0.124	0.208	0.125	0.074	0.042
2008	0.878	0.214	0.128	0.309	0.108	0.072	0.08
2009	0.786	0.208	0.09	0.279	0.106	0.07	0.076
2010	0.853	0.204	0.169	0.356	0.076	0.062	0.074
2011	0.706	0.201	0.077	0.282	0.068	0.059	0.083
2012	0.624	0.200	0.056	0.213	0.057	0.058	0.116
2013	0.997	0.200	0.081	0.344	0.047	0.174	0.127

资源环境能否为城市化提供支撑，城市化对资源环境的胁迫，可以用资源环境压力指数来表示。一般可以用资源环境压力方程 IPAT 来进行分析。在本研究中从环境承载量的概念出发，用下式定义资源环境压力：

$$P = 1 - R$$

式中:P 为资源环境压力指数; R 为资源环境指数。

从表 3 可以看出, 人均拥有土地面积、基础教育生师比、人均水资源量对资源环境影响的权重较大, 分别为 0.232、0.116、0.113, 其权重共占到了 46.1%。从表 4 来看, 资源环境指数在研究期内呈现波动中上升的趋势。最小值出现在 2012 年、最大值出现在 2013 年。2006~2010 年资源环境指数上升较快, 2010~2012 年出现资源环境指数下降较快, 2012 年以后呈现上升的趋势。在分指标中, 环境指数、教育指数、交通指数得到改善。医疗资源指数呈现下降。土地资源指数与起始年份 2004 年保持不变。

分析 2010~2012 年资源环境指数下降的原因, 2013 年资源环境指数上升的原因, 主要是权重相对较大的分指标的变化引起的。各分指标的权重列在表 3, 可以看出人均拥有土地面积、基础教育生师比、人均水资源量对资源环境影响的权重较大。从表 4 中环境指数这一列可以看出, 2013 年环境质量得到改善。2013 年, 武汉市工业二氧化硫排放 $9.62 \times 10^4 \text{t}$, 较 2012 年下降 3.90%; 工业废水排放量 1.88 亿吨, 较上年下降 10.1%; 工业烟(粉)尘排放总量 $1.98 \times 10^4 \text{t}$, 较上年下降 2.46%; 一般工业固体废物产生量 1381.55 万吨, 较上年下降 0.1%; 武汉市工业废气排放总量 5632.42 亿标立方米, 较上年下降 6.48%, 体现污染物减排、环境治理的成效。

2.3 灰色关联度模型分析

设反映各要素变化特征的数据系列分别为 $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}$, 因素 x_i 对 x_j 在 t 时刻关联系数 $\xi_{ij}(t)$ 定义为:

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\min_i \min_j |x_i(t) - x_j(t)| + \rho \max_i \max_j |x_i(t) - x_j(t)|}{|x_i(t) - x_j(t)| + \rho \max_i \max_j |x_i(t) - x_j(t)|} \quad (5)$$

式中: ρ 为 $[0, 1]$ 区间上的分辨系数, 在本研究中该值为 0.5。

关联系数 ξ_{ij} 对样本总数 k 求平均值, 计算出来的是相关的关联度矩阵 μ , μ_{ij} 计算公式是:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k \xi_{ij}(t) \quad (6)$$

对关联度排序, 可以得到对某一对象的影响程度大小, 关联度越小, 指标间耦合度就越低。当 $0 < \mu_{ij} \leq 0.35$ 的时候关联性为弱, 两个体系指标间的耦合性弱; 当 $0.35 < \mu_{ij} \leq 0.65$ 的时候关联性为中, 两个体系指标间为中等的耦合性; 当 $0.65 < \mu_{ij} \leq 0.85$ 的时候是具有较强的关联性, 两个指标体系之间具有较强的耦合性; 当 $0.85 < \mu_{ij} < 1$ 的时候, 关联性极强, 耦合作用非常强^[23]。根据上述公式得出城市化水平和资源环境间的关联度矩阵如表 5。

表 5 关联度矩阵

资源环境综合指标体系											
		y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9	行均值
城 市 化 综 合 指 标 体 系	X1	0.568	0.61	0.788	0.842	0.769	0.676	0.561	0.767	0.818	0.711
	x2	0.525	0.614	0.787	0.887	0.844	0.684	0.571	0.694	0.743	0.705
	x3	0.685	0.739	0.612	0.539	0.48	0.606	0.809	0.74	0.613	0.647
	x4	0.552	0.629	0.747	0.819	0.737	0.675	0.543	0.697	0.689	0.676
	x5	0.553	0.611	0.793	0.868	0.819	0.639	0.545	0.734	0.781	0.705
	x6	0.547	0.619	0.781	0.716	0.824	0.662	0.544	0.719	0.738	0.7
	x7	0.558	0.612	0.79	0.661	0.808	0.638	0.542	0.74	0.784	0.704
	x8	0.539	0.607	0.784	0.902	0.826	0.662	0.564	0.719	0.771	0.708
	x9	0.551	0.651	0.819	0.911	0.816	0.671	0.567	0.694	0.712	0.71
	X10	0.592	0.65	0.783*	0.837	0.79	0.711	0.58	0.679	0.677	0.7
	X11	0.549	0.622	0.813	0.662	0.798	0.667	0.576	0.707	0.737	0.714
	x12	0.538	0.615	0.825	0.573	0.789	0.706	0.572	0.714	0.716	0.705
	x13	0.544	0.614	0.795	0.888	0.814	0.653	0.548	0.725	0.766	0.705
	x14	0.562	0.659	0.738	0.775	0.728	0.625	0.642	0.712	0.731	0.686
	x15	0.563	0.621	0.767	0.834	0.81	0.624	0.528	0.741	0.778	0.696
	x16	0.6	0.679	0.741	0.744	0.794	0.645	0.589	0.74	0.756	0.698
	列均值	0.564	0.634	0.772	0.779	0.778	0.659	0.58	0.72	0.738	

从表 5 可以看出: (1) 关联度值在 0.480~0.911 之间, 按上述分类标准, 耦合度大都为中等和较强这两个范围。资源环境指标体系中, 烟尘排放量(y4) 与城镇人口规模(x2)、人均 GDP(x5)、工业总产值(x8)、建成区面积(x9)、人均用电量(x13) 均表现极强的耦合性(大于 0.85)。 (2) 对关联度矩阵各行求平均值, 计算得出的是城市化水平各分指标同资源环境的关联度; 对关联度矩阵各列求平均值, 计算得出的是资源环境各分指标同城市化水平的关联度。从行均值来看, 城镇人口比重与资源环境的关联度最大为。 (3) 从列平均值来看, 烟尘排放量与城市化水平的耦合作用最强。

2.4 武汉市城市化与资源环境耦合协调度分析

目前测度协调度的方法有耦合协调度模型^[24]、灰色关联度模型^[25]、熵变方程模型^[26]。这些方法都存在一定的缺点。如耦合协调度模型数据标准化时所取的上下限值, 有的参考国家标准值, 有的取极大极小值, 有的取规划值。不同的取值导致相同的原始数据得到的结果不相同。此外对于耦合协调等级的划分, 缺乏统一标准及客观依据。

在本研究中由城市化与资源环境组成的复合系统 V, 根据贝达朗菲 (L. V. Bertalanffy) 的一般系统理论, 其系统的演化速度可以看成下列的函数^[27, 28], 通过分析 VU 和 VR 的变化来研究城市化与资源环境之间的协调关系:

$$V=f(V_U, V_R) \quad (7)$$

式中: V_U 是城市化的速率; V_R 是资源环境变化的速率。其中U、R分别是城市化和资源环境的函数,可以通过对曲线进行非线性拟合。系统V满足组合S型发展机制,根据 V_U 、 V_R 取值大小,可以建立二维平面 (V_U, V_R) 来反应他们的关系。

耦合度 α 可以根据 $\arctg(V_U/V_R)$ 来得到。 α 值可以反应城市化过程与资源环境协调发展的相互耦合关系。①当 $V_U < 0, V_R > 0$,此时当 $-90^\circ < \alpha \leq 0^\circ$, $\alpha = \arctg(V_U/V_R)$,系统处于低级协调共生阶;②当 $V_U > 0, V_R > 0$,此时 $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$, $\alpha = \arctg(V_U/V_R)$,系统处于协调发展阶。③当 $V_U > 0, V_R < 0$,此时 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$, $\alpha = 180^\circ + \arctg(V_U/V_R)$ 系统处于冲突阶段。④当 $V_U < 0, V_R < 0$,此时 $-180^\circ < \alpha \leq -90^\circ$ 。 $\alpha = -180^\circ + \arctg(V_U/V_R)$ 时,系统处于衰退阶段(见图2)。

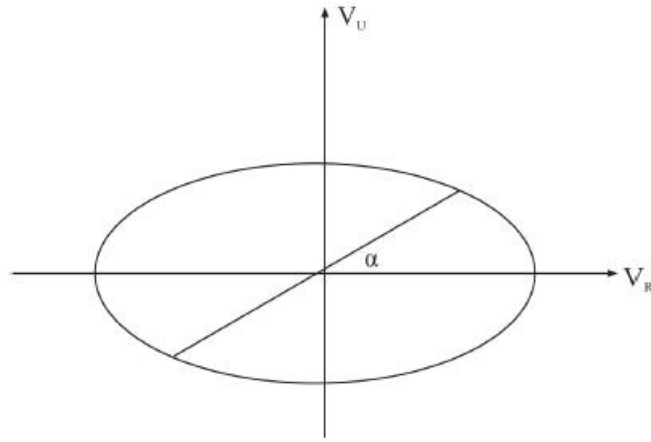


图2 城市化进程与资源环境变化的耦合发展过程

Fig. 2 Coupling Process of Urbanization and Changes in Resources and the Environment

城市化与资源环境与时间关系的曲线,经过非线性拟合,其方程如下:

$$\begin{aligned} U &= 4E-05 x^4 - 0.0008 x^3 + 0.0058 x^2 - \\ &\quad 0.0056 x + 0.9333 \quad R^2 = 0.984 \\ R &= 6E-06 x^6 + 0.0004 x^5 - 0.0128 x^4 + \\ &\quad 0.1248 x^3 - 0.5228 x^2 + 0.921 x + \\ &\quad 0.3014 \quad R^2 = 0.861 \end{aligned}$$

计算得到的2004~2013年的 V_U 、 V_R , $\tan \alpha$ 和 α 见表6。武汉市2004~2013年城市化与资源环境耦合曲线见图3。

表6 武汉市2004 ~ 2013年城市化与资源环境耦合度

年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
V_U	0.004	0.009	0.012	0.013	0.012	0.012	0.013	0.016	0.021	0.030
V_R	0.232	-0.123	-0.072	0.041	0.057	-0.053	-0.246	-0.465	-0.694	-1.020
$Tg(V_U/V_R)$	0.015	-0.158	-0.375	0.167	0.076	-0.226	-0.053	-0.034	-0.030	0.015
耦合度	0.9	171.0	159.4	9.5	4.3	167.2	177.0	178.0	178.3	0.9
耦合判断	I	II	II	I	I	II	II	II	II	II

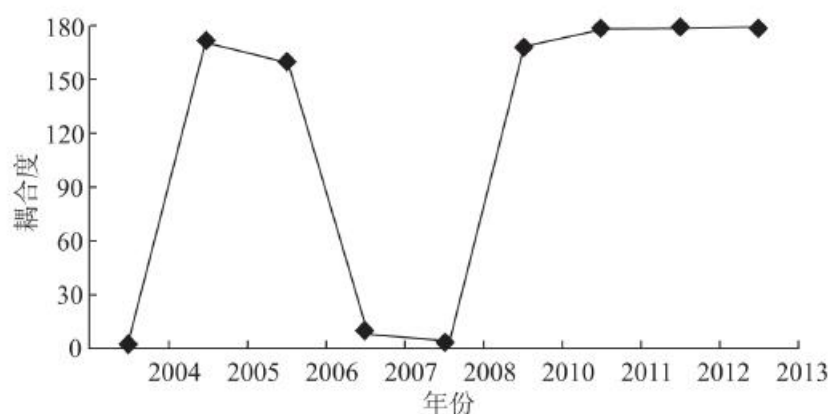


图3 武汉市2004~2013年城市化与资源环境耦合曲线
Fig. 3 Coupling Curve of Urbanization and Resources and Environment in Wuhan (2004-2013)

从表6和图3中可以看出,2004~2013年武汉市城市化与生态环境耦合可以划分为4个阶段:2004年为第一阶段即协调发展阶段,此时耦合度在第一象限。在这一时期城市化发展与资源环境向协调方向发展。在这一时期,城市化对生态环境的影响较小,资源环境对城市化约束也较小。2005~2006年为第二阶段即冲突阶段,此时耦合度在第二象限。在这一阶段城市化在提高的同时,资源环境质量在下降。表明在快速城市化过程中,对资源的索取及对环境的破坏加大。2007~2008年为第三阶段即协调发展阶段。2009~2013年为第四阶段即冲突阶段。从以上分析可以看出,从2004~2013年武汉市城市化—资源环境耦合总体呈现协调—冲突—协调—冲突的趋势。在此期间只有3a资源环境发展与城市化处于协调状态,其它年份表现为冲突状态,城市化发展的同时,与资源环境的矛盾在加剧。

分析武汉市2004~2013年城市化与资源环境的耦合曲线,总体上呈现先上升后下降,再上升下降的“M”型曲线特征,甘静^[29]在研究松花江流域产业系统与环境耦合时也呈现“M”型曲线特征。城市化与资源环境耦合的曲线体现了两者之间的“协同制动”关系。耦合系统阈值理论认为资源环境与城市化,在较长的时期来看,其是一个螺旋上升的S型曲线连接的形状,反映了资源环境对系统的负向调节作用及胁迫作用。在本研究中耦合曲线曲线为M型,没有表现为螺旋上升的S型,说明系统互馈中,耦合度没有得到提升,而对于系统的耦合度提升,需要系统施加的调节作用,如环境规制,绿色技术的推广等,显示在这方面武汉市还需进一步加大力度。武汉市2004年协调发展阶段,即城市化对生态环境的影响较小,认为是2003年“非典”疫情对城市化的滞后期影响。2005~2006年项目兴市,2005年武汉市GDP2238亿元,较上年增长14.7%、2006年GDP2590.00亿元,比上年增长14.8%,依靠项目及投资拉动的粗放型增长方式对资源环境压力增大;2007~2008年亚洲金融风暴的影响及

环境治理及生态城市的建设,城市化与资源环境的冲突有所协调。2009~2013年武汉市城市化率加快,武汉市城镇化率2011年、2012年和2013年分别达到78.71%、79.23%和79.28%,说明在快速城市化过程中,资源环境的承载能力亟待提升,也反映了城市化的发展,也可能出现系统耦合度下降的现象。

3 结论

本文在构建城市化与资源环境综合评价指标体系基础上,采用突变级数获得武汉市城市化综合指数,通过熵权法获得武汉市资源环境指数,并在环境承载量的概念上,得到武汉市城市化过程中的资源环境压力指数。通过灰色关联度模型和基于系统理论的动态耦合模型分析。研究认为,通过灰色关联度方法,可以识别对城市化约束的关键资源环境因子。工业烟尘排放量、万人大学生数、工业废水排放量等资源环境因子与城市化耦合度较强。对城市化与资源环境耦合分析,结果显示武汉市2009~2013年分别经历了耦合的协调—冲突—协调—冲突四个阶段。武汉市在城市化发展的同时,城市化与资源环境的矛盾在加大。

参考文献:

- [1] 史培军,王静爱,陈婧,等. 当代地理学之人地相互作用研究的趋向——全球变化人类行为计划(IHDP)第六届开放会议透视[J]. 地理学报,2006,61(2):115—126.
- 【SHI P J, WANG J A, CHEN J, et al. The future of humanenvironment interaction research in geography: lessons from the 6th Open Meeting of IHDP [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(2):115—126.】
- [2] 段丽瑶,赵玉洁,王彦,等. 气候变化和人类活动对天津海岸带影响综述[J]. 灾害学,2012,27(2):119—123.
- 【DUAN L Y, ZHAO Y J, WANG Y, et al. Review on the impacts of climate changes and human activities on the costal zone of tianjin [J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(2):119—123.】
- [3] PONCE D L B D, MARSHALL J D. Relationship between urbanization and CO₂ emissions depends on income level and policy. [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(7):3632—9.
- [4] VERMEIREN K, VANMAERCKE M, BECKERS J, et al. ASSURE:a model for the simulation of urban expansion and intraurban social segregation [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(12):2377—2400.
- [5] ZHANG Q, SETO K C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(9):2320—2329.
- [6] FANG C L, WANG Y, FANG J W. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(2):153—170.
- [7] GROSSMAN G, KRUEGER A. Economic environment and the economic growth [J]. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2):353—377.
- [8] RU X, CHEN S, DONG H. An empirical study on relationship between economic growth and carbon emissions

based on decoupling theory [J]. Journal of Sustainable Development, 2012, 5(8) : 43—51.

[9] 方创琳, 鲍超, 乔标. 城市化过程与生态环境效应 [M]. 科学出版社, 2008.

【FANG C L, BAO C, QIAO B. Urbanization process and ecoenvironmental effects [M]. Science Press, 2008. 】

[10] 刘耀彬. 城市化与生态环境耦合机制及调控研究 [M]. 经济科学出版社, 2007.

【LIU Y B. Coupling mechanism and regulation of urbanization and eco-environment [M]. Economic Science Press, 2007. 】

[11] TIAN L, CHEN J, YU S X. Coupled dynamics of urban landscape pattern and socioeconomic drivers in Shenzhen, China [J]. Landscape Ecology, 2014, 29(4) : 715—727.

[12] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析 [J]. 地理学报, 2009, 64(4) : 387—398.

【CHEN M X, LU D D, ZHANG H. Comprehensive evaluation and the driving factors of china's urbanization [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4) : 387—398. 】

[13] 王洋, 方创琳, 王振波. 中国县域城镇化水平的综合评价及类型区划分 [J]. 地理研究, 2012, (07) : 1305—1316.

【WANG Y, FANG C L, WANG Z B. The study on comprehensive evaluation and urbanization division at county level in China [J]. Geographical Research, 2012, 31(7) : 1305—1316. 】

[14] WEI C, YU S, QIN Y, et al. An application of a new method in permafrost environment assessment of Muli mining area in Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(3) : 609—616.

[15] CAO W, ZHOU S, WU S. Land-use regionalization based on landscape pattern indices using rough set theory and catastrophe progression method [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(4) : 1611—1620.

[16] 付云鹏, 李燕伟, 徐琛, 等. 城市化与资源环境耦合协调关系研究 [J]. 城市, 2016(4) : 26—29.

【FU Y P, LI Y W, XU C, et al. Study on the coupling and coordinative relationship between urbanization and resources and environment [J]. City, 2016 (4) : 26—29. 】

[17] 冯东海, 沈清基. 基于相关性和关联耦合分析的上海市生态环境优化思考 [J]. 城市规划学刊, 2015(6) : 75—83.

【FENG D H, SHEN Q J. Research on ecological environment optimization in Shanghai based on correlation and correlation coupling analysis [J]. Urban Planning Forum, 2015 (6) : 75—83. 】

-
- [18] 沈有禄. 教育资源配置公平指标体系建构 [C] // 中国教育经济学会年会会议. 2008.
- 【SHEN Y L. Construction of an equitable index system for allocation of educational resources [C] // Annual Meeting of China Education Economics, 2008. 】
- [19] BENEDETTO F, GIUNTA G, MASTROENI L. A maximum entropy method to assess the predictability of financial and commodity prices [J]. Digital Signal Processing, 2015, 46 (C) :19—31.
- [20] 康江江, 王发曾, 丁志伟, 等. 基于突变级数理论的太原经济圈城镇化水平研究 [J]. 资源开发与市场, 2015, 31(11) : 1293—1296.
- 【KANG J J, WANG F Z, DING Z W, et al. Urbanization level evaluation of Taiyuan economic circle based on catastrophe progression method [J]. Resource Development & Market, 2015, 31(11) : 1293—1296. 】
- [21] 范斐. 辽宁沿海经济带城市化水平与资源环境压力的关联分析 [J]. 资源开发与市场, 2010, 26(8) : 699—702.
- 【FAN F. Urbanization level of resources and environmental pressures associated in Liaoning coastal economic belt [J]. Resource Development & Market, 2010, 2010, 26(8) : 699—702. 】
- [22] 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞. 突变级数法在区域生态系统健康评价中的应用 [J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3) : 50—54.
- 【LI Y, CHEN X H, ZHANG P F. Application of catastrophe progression method to evaluation of regional ecosystem health [J]. China Population Resources & Environment, 2007, 17(3) : 50—54. 】
- [23] 关伟, 王宁. 沈阳经济区经济与环境耦合关联分析 [J]. 地域研究与开发, 2014, 33(3) : 43—48.
- 【GUAN W, WANG N. A Correlative analysis of the economic and environmental coupling in Shenyang economic zone [J]. Areal Research & Development, 2014, 33(3) : 43—48. 】
- [24] LI Y, LI Y, ZHOU Y, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 98 (1) : 127 —133.
- [25] CHIU W Y, TZENG G H, LI H L. Developing e-store marketing strategies to satisfy customers' needs using a new hybrid gray relational model [J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2014, 13(02) : 231—261.
- [26] ZHAO Y, WANG S, ZHOU C. Understanding the relation between urbanization and the eco-environment in China's Yangtze River Delta using an improved EKC model and coupling analysis [J]. Science of The Total Environment, 2016, 571: 862—875.
- [27] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用 [J]. 生态学报, 2005 (11) : 3003—3009.

【QIAO B, LIN F C. The dynamic coupling model of the harmonious development between urbanization and eco-environment and its application in arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11) : 3003—3009. 】

[28] 徐晔. 我国战略性新兴产业环境技术效率测度研究 [M]. 经济管理出版社, 2014.

【XU Y. Establishment of China' s strategic emerging industries environmental technology efficiency measurement [M]. Economic Management Press, 2014. 】

[29] 甘静, 郭付友, 佟连军, 等. 吉林省松花江流域产业系统与环境系统时空耦合特征 [J]. 世界地理研究, 2017, 26(2) : 101—109.

【GAN J, GUO F Y, TONG L J, et al. Spatial-temporal coupling characteristics of industrial systems and environmental systems in the Songhua River Basin in Jilin Province [J]. Journal of World Geography, 2017, 26 (2) : 101—109. 】