

文章编号: 1008-2786-(2018)5-679-14

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000364

地质生态环境与城市化关联性研究

——以重庆市为例

曾卫^{1,2*}, 杨春¹, 周瀚韬³

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400030; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030;

3. 中铁二院重庆勘察设计研究院, 重庆 400030)

摘 要: 地质生态环境是承载城市的重要物质基础, 与城市发展存在极其复杂的关系, 从时间和空间层面对二者演进趋势、时序规律和空间分异差异进行归纳和认识有助于促进地质生态环境与城市化协调发展。首先构建地质生态环境与城市化的指标评价体系, 利用 SPSS21.0 软件分别获得了 1990—2015 年重庆市地质生态环境与城市化评价指标的主成分权重系数, 及 2015 年重庆市 38 个区县若干地质生态环境指标水平与人口密度、人均 GDP、城市空间发展强度、工业综合能耗等城市化指标水平的皮尔逊相关系数。借助关联耦合分析方法, 从时间和空间层面获得了重庆市地质生态环境与城市化的关联度、耦合度和协调度大小。结果表明: 经济城市化和绿化生态水平分别对城市化系统和地质生态环境系统的贡献份额最大; 1990—2015 年重庆市地质生态环境与城市化的耦合协调水平呈现持续增长态势, 关联度、耦合度和协调度从低关联—低水平耦合—严重不协调—城市化发展滞后, 过渡到高关联—高水平耦合—高级协调—地质生态环境滞后阶段; 2015 年重庆市 38 个区县地质生态环境与城市化的关联度、耦合度和协调度都存在显著的分区差异, 渝西较发达地区的耦合协调程度普遍高于渝东北和渝东南远郊欠发达地区, 区域经济发展水平与耦合度、协调度存在很大的空间对应关系。正确辨识地质生态环境与城市化耦合协调关系的时空演化规律和特征, 通过城市规划的主动干预作用, 采取适当的城市发展政策和环境保护战略对促进地质生态环境与城市化的协调可持续发展具有重要意义。

关键词: 地质生态环境; 城市化; 关联耦合模型; 重庆市

中图分类号: TU984.1

文献标志码: A

“地质生态”一词最初源于德国地理学家 Troll (1939) 提出的景观生态学和生物地质学, 主要探讨在地球运动和人类活动影响下承载人类生物圈物质基础活动的地质实体变化规律^[1,2]。而地质生态环境是在地质生态学、地质学、地理学、生态学、环境科学等多学科研究基础上逐步形成的一门综合的、复杂的、跨学科的环境自然科学, 是由地质圈、土壤圈、水圈为代表的地质环境和生物圈、大气圈、人类圈为主的生态环境若干组成的客观实体, 主要探讨地球客观运动和人类外部技术作用下各圈层的时空特

征、演化规律及对人类活动的影响作用^[3,4]。一方面, 地质生态环境作为城市建设的基础条件和提高人类生活质量的物质资源, 其通过环境选择、人口迁移、资源争夺和政策干预对城市形态、空间结构、发展方向、基础设施及建筑设计产生约束与限制; 另一方面, 城市化通过传统农业社会向工业和服务业为主的现代化社会转型, 经济、空间和文化向农村区域扩张, 在为城镇提供更多选择和机遇的同时, 也通过人口集聚、空间扩张、资源消耗对地质生态环境产生环境风险与胁迫压力。一直以来城市化与生态环境

收稿日期 (Received date): 2018-01-27; **改回日期** (Accepted date): 2018-06-20

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金面上项目 (51378517); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS16004)。[National Natural Science Foundation of China (51378517); Chongqing University Postgraduates, Innovation Project (CYS16004)]

作者简介 (Biography): 曾卫 (1957-), 男, 四川雅安人, 加拿大华人教授, 主要从事城乡地质生态环境研究。[ZENG Wei (1957-), male, born in Ya'an, Sichuan province, Canadian Chinese professor, research on geo-ecological environment] E-mail: zengw@cqu.edu.cn

的关系研究是城乡规划和区域发展探讨的核心问题,尤其是二者间关系的耦合协调发展对可持续城市化发展具有重要意义。由于自然条件、政策制度 and 经济基础等不同,我国城市化发展模式具有显著的区域性差异,深入解析城市化模式的时序演化规律、空间分异差异及其与地质生态环境的交互耦合协调时空关系,能够为区域的城市化发展和环境保护提供科学依据^[5]。

目前有关二者关联性的国内外研究成果主要涉及交互耦合时空测度、耦合类型判别、多尺度对比、耦合演变规律和耦合机制等方面。研究理论基础有动态层级律、非线性协同律、耦合裂变律、随机涨落律、阈值律和预警律等六大基础定律^[6,7]。研究方法主要涉及定性分析和数学回归分析、灰色关联分析、投入产出分析、3S 等定量分析,由静态、定性分析逐渐转向动态、定量评价研究^[8]。研究尺度从全球、区域宏观尺度到城市尺度,其中区域尺度和城市尺度较多^[7]。研究学者涉及欧美、俄罗斯和中国等,以生态学、地理学、经济学、管理学以及城乡规划学科为主。其中,Grossman 和 Krueger 利用美国 42 个发达地区的城镇发展基础数据,对城市化过程曲线进行理论和实证研究,提出环境库兹涅茨曲线模型(Environment Kuznets Curve Model),揭示随着城镇经济水平的发展,环境质量呈现倒 U 型的演变规律,与经济发展相同步的城市化与生态环境耦合呈现先松弛、后紧密、再协调的发展阶段^[9],为后来二者耦合协调关系研究建立理论基础。国内学者在 Grossman 和 Krueger 研究基础上将环境库兹涅茨曲线与城镇化对数曲线进行几何数学关联,按照时序演化规律将城市化与生态环境的耦合关系划分为低水平协调、拮抗、磨合和高水平协调四个阶段,据此推导出两者间交互耦合的数理函数关系,并通过对浙江省的实证分析揭示出我国城市化与生态环境交互耦合时序演化规律^[10,11]。基于耗散结构理论,刘耀彬按照城市化与生态环境耦合协调程度大小将城市化与生态环境耦合发展关系划分为高级协调模式、基本协调模式、冲突模式、衰退模式以及临界模式等五种模式,通过类型组合和平面几何分析建立研判城市化与生态环境耦合关系的定量评价体系^[12]。黄金川采用 SPSS 相关性分析、PCA 分析等方法对三峡流域 15 个区县城镇化率与生态环境耦合关系定量辨识^[13],提出库区城市化与生态环境耦合关系的空间分异差异。通过梳理城市化与生态环

境相关性研究文献发现多数研究主要集中在地理生态环境领域,评价指标选取主要涉及生态环境、气象环境,大气环境、水资源环境和城市绿化水平等地表实体空间以上的评价要素^[14,15],较少关注地表实体空间以下的地质环境要素。实证范围主要集中在城市干旱地区、城市群和省级层面等区域尺度,针对地质、地理条件复杂的山地城市关注较少,尤其是地下空间高强度开发的山地地区。山地城市是未来我国城市化进程和经济发展最具潜力的核心地区,更是我国的生态安全屏障,以重庆市为代表的三峡库区地质生态环境敏感和地下空间高强度开发区域,地质生态环境在城镇化进程中极易受到城镇建设活动的影响与破坏。因此研究重庆市地质生态环境与城市化的耦合协调发展关系最具有代表性和实践意义,深入解析其耦合协调类型与时空规律,提出城乡规划主动干预的优化对策,对实现以重庆为代表的山地城市地质生态环境与城市化协调可持续发展具有重要意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

重庆位于中国内陆西南部、长江上游地区,幅员面积 8.24 万平方公里,地跨 105°11' ~ 110°11'E、28°10' ~ 32°13'N,是我国中西部唯一的直辖市,具有典型的山地城市特征。按照“两点”定位,“两地、两高”目标的要求,处在“一带一路”和长江经济带的“Y”字型联结点上的重庆,在国家区域发展和对外开放格局中越来越发挥着独特而重要的作用,成为中国区域经济增长最快、经济发展水平较高的西部核心增长极,对周边地区的辐射带动作用不断加强(图 1)。2015 年,重庆市人口 3016.55 万人,占全国人口 2.45%,建成区面积 1529.15 km²;地区生产总值 1717.27 亿元,在中国 34 个省、直辖市中排名 20,年均增速 10.5% 排名第一。从 2005—2015 年,城市化率从 45.2% 增长到 60.9%,年增长率 1.57% 高于全国平均水平。随着近年社会经济的快速发展,重庆市区域地质生态环境也面临日益突出的问题,如何协调重庆市山地复杂地质地理条件、三峡库区脆弱地质生态环境与快速城市化经济建设可持续发展将成为城乡规划者面临的新挑战和难题。

1.2 数据来源

研究选取范围以重庆市 38 个区县(包括重庆

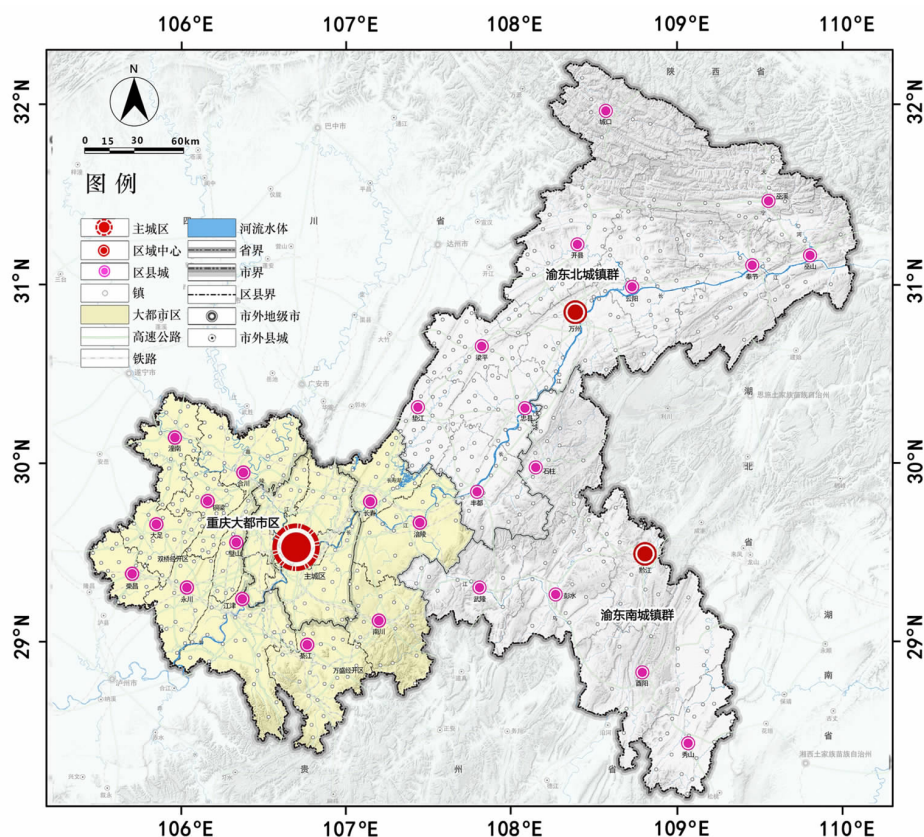


图1 研究区域重庆市38区县的位置图

Fig. 1 Location of 38 counties in Chongqing, China

市大都市功能区、渝东城市群和渝东南城市群等涵盖的38个区县数据)为数据范本^①,综合考虑数据样本的可取性和科学性,从时空视角分别对重庆市地质生态环境指标与城市化指标进行分析。通过重庆市《重庆市统计年鉴》(1990—2015年)、《重庆市国民经济和社会发展统计公报》(1990—2015)、《重庆市环境统计年报》(1990—2015)、《重庆市大都市区规划》、《重庆市环境保护和生态建设十二五规划》、重庆市规划局网站以及重庆市气象监测网站等,时间层面的数据选择1990—2015年重庆市共计25年的相关指标数据,空间层面的数据选择2015年重庆市38区县的相关指标数据。

1.3 评价指标体系建立

为精确度量和评价地质生态环境与城市化的关联性,在遵循科学性、数据可获取性和研究可实施性

原则基础上,参照相关研究成果^[16],结合研究区域的实际情况,分别对地质生态环境表征指标和城市化表征指标进行分析和初步筛选,最终形成地质生态环境评价指标体系和城市化评价指标体系。时间层面形成了地质环境水平、大气环境水平、水生态水平、绿化生态水平和固体废弃物处置水平5个一级指标,以及地质稳定性分区、人均绿地面积、污水集中处理率等18个基础指标所组成的重庆市地质生态环境评价指标体系;形成了人口、空间、经济和社会城市化4个一级指标^[17],城镇人口密度、人均GDP、城市建成区面积等14个二级指标所构成的重庆市城市化评价指标体系。并采用SPSS21.0统计分析软件对获取的地质生态环境指标与城市化指标进行主成分分析,确定各指标的权重系数(表1)。空间层面考虑到数据的可取性及空间分布的直观

①本文所采用的分区按照重庆市2016年统计年鉴简要说明:重庆市大都市区包括渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区、涪陵区、长寿区、江津区、合川区、永川区、南川区、綦江区、大足区、璧山区、铜梁区、潼南区和荣昌区21个区;渝东北城市群包括万州区、梁平区、城口县、丰都县、垫江县、忠县、开州区、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪县等11区县;渝东南城市群包括黔江区、武隆区、石柱县、秀山县、酉阳县、彭水县等6区县(自治县)。

表 1 重庆市地质生态环境与城市化综合评价指标及权重

Tab.1 The evaluation index and weights of geo-ecological environment and urbanization in Chongqing

目标层	一级指标	代码	综合权重值/SPSS	二级指标	综合权重值/SPSS
地质生态环境	地质稳定性水平	E1	0.11	地壳稳定性分区	0.31
				水土流失面积占辖区面积/%	0.29
				自然灾害造成直接经济损失/万元	0.40
	水生态水平	E2	0.26	城市水功能区水质达标率/%	0.16
				污水集中处理率/%	0.23
				人均水资源拥有量/L	0.11
				酸雨频率/%	0.13
				万元国内生产总值 COD 排放强度/吨	0.18
				工业用水处理率/%	0.19
				万元国内生产总值 SO ₂ 排放强度/吨	0.28
	空气质量水平	E3	0.14	空气质量优良率/%	0.72
	绿化生态水平	E4	0.28	人均公共绿地面积/m ²	0.35
				森林覆盖率/%	0.31
				城市绿化覆盖率/%	0.32
				自然保护区覆盖率/%	0.02
	固体废弃物处理水平	E5	0.21	工业固体废弃物排放量/吨	0.36
				生活垃圾无害化处理率/%	0.32
				工业固体废弃物综合利用率/%	0.32
城市化	人口城市化	U1	0.31	城镇人口密度/(人·km ²)	0.25
				总人口/万人	0.24
				第三产业从业人员比重/%	0.27
	经济城市化	U2	0.37	非农业人口占总人口比重/%	0.24
				人均 GDP/元	0.29
				全社会固定资产投资/亿元	0.20
	空间城市化	U3	0.21	人均地方财政收入/元	0.25
				二、三产业占 GDP 比重/%	0.26
				人均道路面积/m ²	0.39
	社会城市化	U4	0.11	城市建成区面积/km ²	0.28
				城市居民人均房屋建筑面积/m ²	0.33
				社会消费品零售总额/万元	0.21
				平均每万人在校大学生数/人	0.18
				城镇居民家庭恩格尔系数/%	0.14
				每万人拥有床位数/位	0.26
				电视覆盖率/%	0.21

注:SPSS 法指 IBM SPSS Statistics21.0 主成分统计分析。

性,形成了常住人口、人均 GDP、工业综合能耗等 6 个城市化评价指标;及地质稳定性水平、生态用地比例、空气质量指数等 5 个地质生态环境空间评价指标,通过 SPSS21.0 软件进行要素相关性分析,获取地质生态环境与城市化两两指标间的皮尔逊相关系数 R 值(表 2)。

1.4 关联耦合评价方法

关联性是系统之间以及系统内部各要素之间两两变量相互影响的关联程度。对地质生态环境而言,地质生态环境内部各要素间以及与城市人口、经济、社会等外部要素存在确定性或不确定性的联系,这种联系是否具有明确的数理函数关系,他们的关联方向、大小、类型及函数关系均需要科学地佐证^[18]。故而,对地质生态环境与城市化关联性的科学辨识需要借助适宜的分析方法,研究采用 SPSS21.0 统计分析软件和关联耦合分析方法对地

质生态环境与城市化关系进行解构分析^[19],从时间和空间视角对地质生态环境与城市化的关联度、耦合度和协调度进行定量测度。一方面有助于对地质生态环境与城市化的时空变化规律和系统间相关作用关系进行多角度、多类型和多侧面的表征认识;另一方面也可以根据地质生态环境与城市化的关联耦合分析结论对重庆市地质生态环境优化和城市化可持续发展进行针对性调控优化和规划主动干预。具体实施步骤如下(图 2):

(1)确定评价序列,从时间层面和空间层面分别确定地质生态环境(X)评价指标和城市化评价指标(Y)两组分析序列组。

(2)选取合适的地质生态环境综合水平和城市化综合水平评价指标体系后,对获取的源数据进行归一化处理,得到无量纲处理结果^②。归一化处理时,评价指标分为正向效应指标和负向效应指标,正

表 2 空间视角下重庆市地质生态环境与城市化指标间的皮尔逊相关系数 R 值

Tab. 2 R Pearson correlation value of Chongqing geo-ecological environment and urbanization index from spatial perspective

	城乡建设用地面积	常住人口	人均 GDP	人口密度	工业综合能源消耗量	空间发展强度指数①	城市人均公园绿地面积	地质稳定性水平	生态用地比例②	空气质量指数	综合生态安全指数③
城乡建设用地面积	1	0.74 **	0.07	-0.52 *	0.36	0.36	0.26	0.06	0.05	0.14	-0.25
常住人口		1	0.51 *	0.12	0.49	0.72 **	0.34	-0.12	-0.29	-0.29	-0.56 *
人均 GDP			1	0.49	0.33	0.87 **	0.19	0.19	-0.78 **	-0.68 **	-0.73 **
人口密度				1	0.12	0.31	0.12	-0.21	-0.38	-0.61 *	-0.25
工业综合能源消耗量					1	0.38	0.29	0.11	-0.26	-0.33	-0.19
空间发展强度指数						1	0.23	0.15	-0.70 *	-0.54 *	-0.76 **
城市公园绿地面积							1	0.18	-0.15	-0.15	-0.11
地质稳定性水平								1	-0.39	-0.13	-0.24
生态用地比例									1	0.62 **	0.79 **
空气质量指数										1	0.59 *
综合生态安全指数											1

注:①空间发展强度指数本文参考冯东海(2015),采用了当年建筑施工面积毛密度(万 m²/km²)、人均 GDP 指标(万元)和住宅建筑面积(万 m²)等三个指标,在进行数据无量纲处理后进行算数平均叠加。以上指标均来源重庆市 2016 年统计年鉴,网站:<http://www.cqjtj.gov.cn/tjnj/2016/indexch.htm>。

②生态用地比例数据本文采用国土 2015 年统计数据,将园地、林地、草地和基本农田四个指标进行叠加处理,参照《重庆市大都市区规划》相关成果,综合和考虑取得。数据来源:重庆市国土资源和房屋管理局 <http://www.cqgtfw.gov.cn/>,重庆市规划局 <http://www.cqpub.gov.cn/>。

③综合生态安全指数数据参照王楷德(2007),冯海亮等(2013)等计算方法获得;

** :在置信度(双侧)为 0.01 时候,相关性是显著的; * :在置信度(双侧)为 0.05 时候,相关性是显著的。

②指标数据的无量纲处理方法参照王文俊(2003)以及王少剑等(2015)。

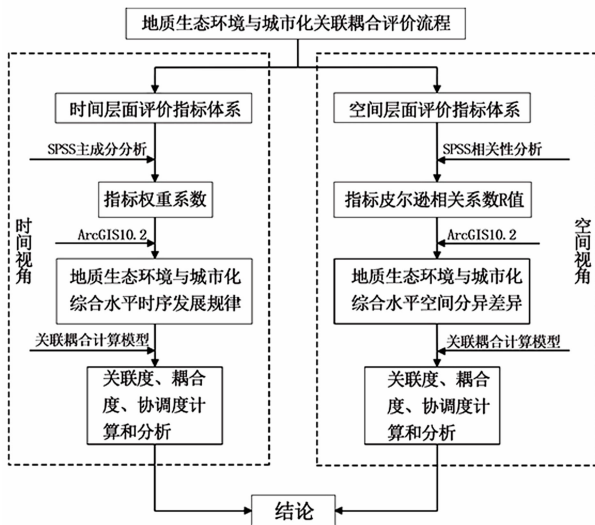


图2 地质生态环境与城市化关联性评价流程图

Fig. 2 The evaluation flow of relevance between geo-ecological environment and urbanization

向效应指标数值越大说明地质生态环境质量(或城市化水平)越好,负向效应指标数值越大说明地质生态环境(或城市化水平)越差,对正、负指标进行处理时其效应函数计算方法不同。其中数据归一化处理:

$$P'_{\mu_{\text{负}}} = \frac{P_{\mu_{\text{max}}} - P_{\mu}}{P_{\mu_{\text{max}}} - P_{\mu_{\text{min}}}} \text{ 或者 } P'_{\mu_{\text{正}}} = \frac{P_{\mu} - P_{\mu_{\text{min}}}}{P_{\mu_{\text{max}}} - P_{\mu_{\text{min}}}}$$

式中, P_{μ} 是指标体系内某指标的值, $P_{\mu_{\text{min}}}$ 为指标体系内某指标的最小值, $P_{\mu_{\text{max}}}$ 为指标体系内某优势指标的最大值, P'_{μ} 为评价指标无量纲处理后的数值。

(3) 然后对重庆市 1990—2015 年时间序列的地质生态环境指标与城市化指标进行 SPSS 主成分分析, 遴选出各评价指标的权重系数; 同时对 2015 年重庆市 38 个区县的空间序列指标数据进行 SPSS 相关性分析, 获得地质生态环境—城市化两两指标间的皮尔逊相关系数 R 值;。

(4) 利用耦合关联分析模型计算关联度, 根据源数据处理结果对重庆市地质生态环境指标与城市化指标水平的时序发展趋势和空间分异差异进行分析, 确定地质生态环境与城市化主要影响因素, 将时空序列获取的地质生态环境与城市化指标数据按照关联度(γ)、耦合度(O)和协调度(X)模型进行计算, 其数值大小均在 $[0, 1]$ 之间, 不同的取值范围代表了地质生态环境与城市化间不同关联性大小(表3)。

(1) 关联度模型 关联度是事物要素群(X)与

事物要素群(Y)两个系统间的关联程度大小; 其关联度 γ_{xy} 的计算公式:

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi(K) \quad (1)$$

其中, $N=1, 2, 3, 4, \dots, K$ 是要素数量, $\xi(K)$ 是两个要素群要素 x 与要素 y 的关联系数, x, y 是地质生态环境与城市化要素类型, 其公式为:

$$\xi(K) = \frac{\min_x \min_y |\Phi_x^a - \Phi_y^a| + \rho \max_x \max_y |\Phi_x^a - \Phi_y^a|}{|\Phi_x^a - \Phi_y^a| + \rho \max_x \max_y |\Phi_x^a - \Phi_y^a|}$$

其中, ρ 是系数, 研究中取 $\rho=0.5$, Φ_x^a 和 Φ_y^a 是地质生态环境质量表征指标和城市化质量表征指标标准化后的取值。

(2) 耦合度模型 耦合度是两个或者两个以上事物系统间的密切关系现象和相互依赖程度; 其耦合度 O 的计算公式:

$$O = \left(\frac{Z_1 \times Z_2 \times Z_3 \times \dots \times Z_n}{\Pi(Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

其中, n 是指计算系统的类型数量, 文中涉及到地质生态环境指标群和城市化指标群 2 个, 故 $n=2$; 耦合度取值 $[0, 1]$, 通过耦合度取值大小可以分析地质生态环境与城市化的关系密切程度, O 值越大说明关联性越密切。

(3) 协调度模型 协调度是事物要素群(X)与事物群(Y)两个系统在发展过程中的协调一致性大小程度; 其协调度 X 的计算公式:

$$X = \sqrt{OT} \quad (3)$$

其中, O 是耦合度大小值, T 是地质生态环境与城市化协调度综合系数, $T = \alpha Z_1 + \beta Z_2$, α 和 β 分别代表地质生态环境与城市化的贡献份额综合系数待定值, 本研究中认为地质生态环境与城市化同等重要, 故 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

2 重庆市地质生态环境与城市化的时空格局分析

2.1 地质生态环境与城市化时序发展规律

通过重庆市近 25 年的城市化综合指标水平主成分分析可知(表1), 经济城市化指标(0.37)权重系数最大, 是城市化综合水平影响最大的因素。在二级指标体系中, 人均 GDP(0.11)、二三产业占 GDP 比重(0.10)、人均地方财政收入(0.10)、人均道路面积(0.08)、第三产业从业人员比重(0.08)所

表 3 关联性评价标准表
Tab.3 The evaluation standard table of relevance

指标水平	关联度(γ)	耦合度(O)	协调度(X)	发展类型判断	
[0,0.35]	关联关系 较低	低水平 耦合状态	严重不协 调状态	$0 \leq f(U) - f(E) \leq 0.1$	低关联—低水平耦合—严重不协调
				$f(U) - f(E) > 0.1$	低关联—低水平耦合—严重不协调—地质生态环境受阻
				$f(E) - f(U) > 0.1$	低关联—低水平耦合—严重不协调—城市化受阻
(0.35,0.5]	关联关系 中等	中等水平 耦合状态	基本协调 状态	$0 \leq f(U) - f(E) \leq 0.1$	中关联—中等水平耦合—基本协调
				$f(U) - f(E) > 0.1$	中关联—中等水平耦合—基本协调—地质生态环境受阻
				$f(E) - f(U) > 0.1$	中关联—中等水平耦合—基本协调—城市化受阻
(0.5,0.8]	关联关系 较高	较高水平 耦合状态	较高级 协调状态	$0 \leq f(U) - f(E) \leq 0.1$	较高关联—较高水平耦合—较高级协调
				$f(U) - f(E) > 0.1$	较高关联—较高水平耦合—较高级协调—地质生态环境滞后
				$f(E) - f(U) > 0.1$	较高关联—较高水平耦合—较高级协调—城市化滞后
(0.8,1]	关联关系 最强	高水平 耦合状态	高级 协调	$0 \leq f(U) - f(E) \leq 0.1$	高关联—高水平耦合—高级协调
				$f(U) - f(E) > 0.1$	高关联—高水平耦合—高级协调—地质生态环境滞后
				$f(E) - f(U) > 0.1$	高关联—高水平耦合—高级协调—城市化滞后

资料来源:根据王少剑(2015)、冯东海(2015)等,见参考文献[7]、[18],笔者整理。

占综合权重达到城市化综合指标 47%,人均 GDP、二三产业所占 GDP 比重和人均地方财政收入等指标是影响重庆市城市化快速发展的重要原因。图 3 揭示了城市化综合水平和人口城市化、经济城市化、空间城市化和社会城市化等一级指标水平近 25 年的波动趋势,可以看出重庆市城市化综合水平在 1990—2015 年一直保持上升趋势,尤其是 2000 年后其增长态势迅猛,只在 2006 年出现短暂慢增长。说明重庆市在经历西部大开发和成为直辖市以后,作为西部区域的中心城市发展迅速,城市建成区规模、城镇人口密度、人均 GDP 产值、第三产业从业人员比重和人均道路面积呈现快速增长态势。人口城市化和经济城市化贡献份额一直处于曲线上端,说明重庆市近 25 年城市化发展主要得益于经济发展和人口城市化转变。其中,人口城市化曲线在 1990—2012 年前一直位于其他三条曲线上端,对城市化综合水平提升的贡献份额最大。经济城市化曲线在 1990—2012 年仅次于人口城市化曲线,2012 年之后经济城市化曲线首次超过人口城市化曲线,表明重庆市城市化开始由人口城市化主导转向经济城市化主导。空间城市化曲线整体也呈现上升趋势,在 2007 年增长幅度较大,2007 以后保持小幅度增长,基本保持稳定水平。社会城市化曲线位于所有曲线最下端,其贡献份额最小,对城市化综合水平影响较小。

从表 1 可以看出,绿化生态水平在地质生态环境综合指标体系中所占权重最大(0.28),是地质生态环境综合水平影响最大的因素。空气质量优良率(0.10)、人均公共绿地面积(0.10)、森林覆盖率(0.09)、城市绿化覆盖率(0.09)、固体废弃物排放量(0.08)、生活垃圾无害化处理(0.07)工业固体废弃物综合利用率(0.07)和污水集中处理率(0.06)所占比重大达 66%,对地质生态环境综合水平贡献份额最大。可以看出绿化生态水平、水生态水平和固体废弃物处置水平是地质生态环境综合水平最主要的三个因素,城市绿化水平的提高、生活垃圾无害化处理加强和工业固体废弃物排放控制是优化重庆市地质生态环境的最有效途径。图 4 揭示了地质生态环境综合水平及其一级指标地质稳定性水平、水生态水平、大气环境水平、绿化生态水平和固体废弃物处理水平 1990—2015 年的变动趋势。地质生态环境综合水平整体保持增长态势,只有 2006 和 2014 年年出现大幅波动和回落变化。其中,地质稳定性水平曲线波动变化较小,只在 2006 年出现大幅波动达到峰值,但由于其一直处于曲线最下端,所占份额最小,对地质生态环境综合水平的影响也最小。水生态水平曲线一直在[0.08,0.16]波动范围之内,2005 年以前位于最上端,其所占份额最大,对地质生态环境综合水平影响最大,2006 年之后虽然保持增长趋势,但是增长幅度较小,明显低于绿化生态水

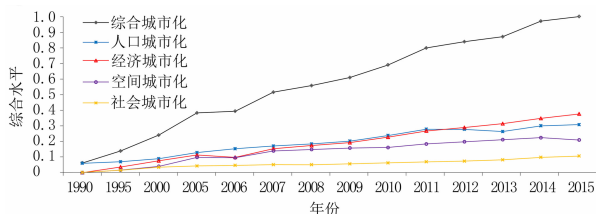


图3 1990—2015年重庆市城市化综合水平趋势图

Fig. 3 The general urbanization trend of Chongqing from 1990 to 2015

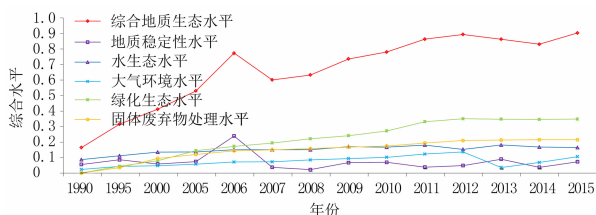


图4 1990—2015年重庆市地质生态环境综合水平趋势图

Fig. 4 The general geo-ecological environment trend of Chongqing from 1990 to 2015

平曲线。大气环境水平曲线在1990—2013年一直处于稳定的增长趋势,2013年出现急剧回落,之后又呈现增长趋势。绿化生态水平曲线增长幅度最大,1990—2005年一直处于较低水平,2005年后一直位于5个一级指标曲线的最上面,所占地质生态环境综合水平贡献份额最大。固体废弃物处理水平曲线是最为稳定的增长曲线,2006年以后一直高于水生态水平曲线。

2.2 地质生态环境与城市化空间分异差异

在空间层面,根据重庆市2015年38个区县地质生态环境与城市化指标值统计,应用ArcGIS10.2对各区县相关要素的空间布局进行分析,再通过SPSS21.0计算出重庆市地质生态环境指标与城市化指标的皮尔逊相关系数值 R 大小(表2)。从城市化综合指标水平来看,在0.01置信水平上与地质生态环境具有显著相关性关系的城市化指标主要有:人均GDP与生态用地比例、空气质量指数和综合生态安全指数存在显著的负相关性,与空间发展强度存在显著正相关性;人口密度与空气质量指数具有显著的负相关性,相关系数 $R=0.61$,与空间发展强度存在正相关性,表明随着人口密度的增加,空间发展强度加强,空气质量指数下降。在0.05置信水平上,常住人口与综合生态安全指数存在负相关性,与人均GDP具有正相关性;空间发展强度指数与空气

质量具有负相关性。从地质生态环境指标水平来看,在0.01置信水平上与城市化指标具有显著相关性关系的地质生态环境指标主要有:生态用地比例与人均GDP、空间发展强度指数具有显著负相关性,与综合生态安全指数具有显著正相关性;空气质量指数与人口密度、人均GDP表现出显著的负相关关系(皮尔逊系数值 $R=0.61, 0.68$),随着人口密度减小,人均GDP经济发展的合理控制,空气质量指数提升。在0.05置信水平上,空气质量指数与空间发展强度具有相关性,相关性系数 $R=0.58$;综合生态安全指数与常住人口的数量大小具有负相关性。

从图5来看,重庆市38个区县的城市化指标水平分布存在明显区域分异差异,主城九区为中心的重庆市大都市区(均值0.65)城市化指标水平最高,渝东北城镇群(均值0.39)次之,渝东南城镇群(均值0.29)最低,其中渝北区、渝中区和江北区居前三位,北碚区在主城九区中为最低。涪陵(0.78)、万州(0.75)、永川(0.73)和合川(0.71)是主城区外城市化指标水平最高的地区。渝东北城镇群中,万州区城市化指标水平居首位,城口县(0.16)最低。渝东南城镇群中,黔江区(0.54)城市化指标水平最高,整体城市化发展水平较弱。图6揭示了重庆市38个区县地质生态环境质量水平在空间的分布差异,渝东南城镇群地质生态环境质量综合水平(0.83)明显高于其他区域,酉阳县和巫溪县平均水平均在0.91以上,主城九区的地质生态环境质量(0.28)明显低于主城区外其他区县,欠发达远郊县县的地质生态环境质量水平普遍比城市化水平较高的较发达地区好,说明城市化水平高低对地质生态环境质量的影响显著。

3 重庆市地质生态环境与城市化交互耦合评价结果

3.1 时间视角下的耦合发展趋势分析

为了探讨地质生态环境与城市化的关联性大小,基于时间视角,将地质生态环境综合水平划分为地质稳定性水平、大气环境水平、水生态水平、绿化生态水平和固定废弃物处理水平六项一级指标,将城市化划分为人口、经济、空间和社会城市化四项一级指标,根据关联度、耦合度和协调度计算公式(1)~(3),计算出地质生态环境与城市化在

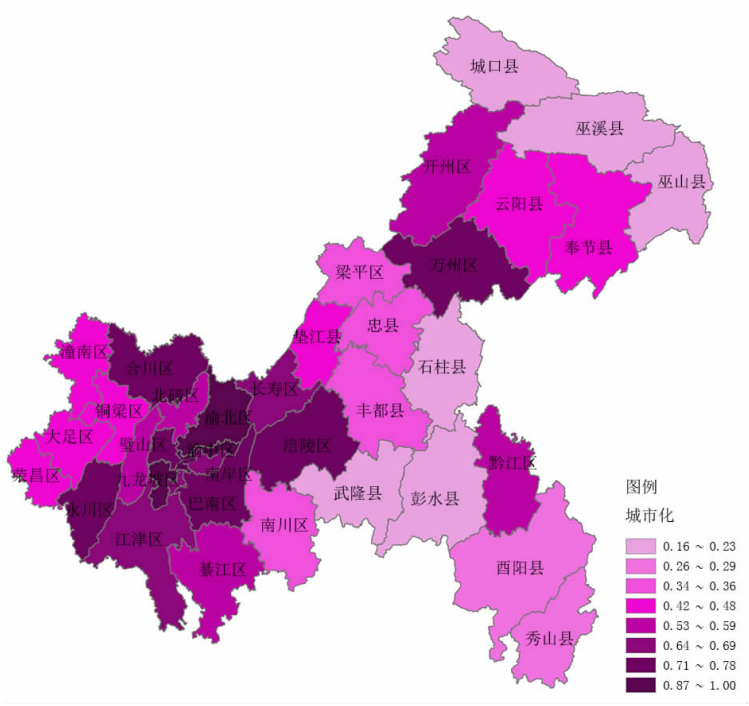


图5 2015年重庆市38区县城市化综合水平空间分异图

Fig.5 Spatial differentiation of urbanization in 38 districts of Chongqing in 2015

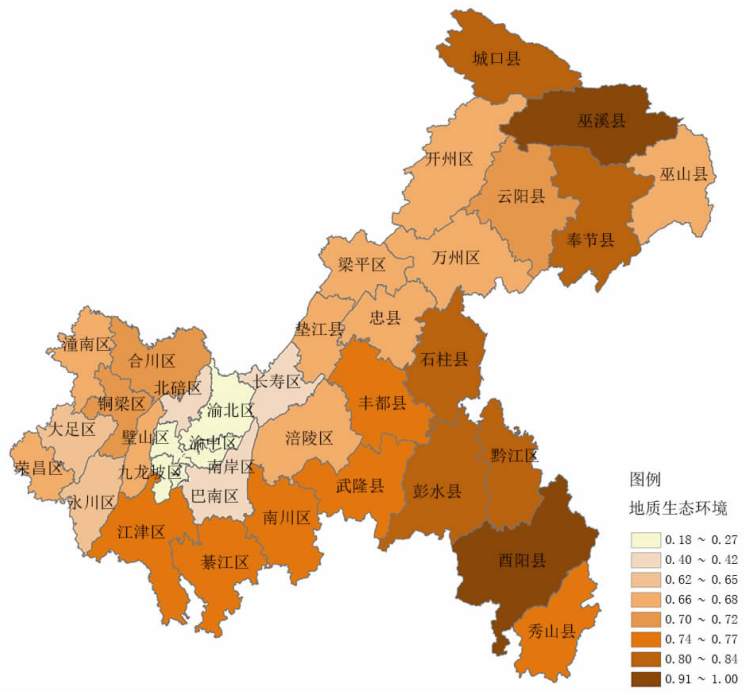


图6 2015年重庆市38区县地质生态环境综合水平空间分异图

Fig.6 Spatial differentiation of geo-ecological environment in 38 districts of Chongqing in 2015

1990—2015年间的关联度、耦合度和协调度大小，可以看出关联度曲线和耦合度曲线呈现持续增长规律(图7)：

(1)1990—2000年，这一阶段二者间的关联度、

耦合度和协调度一直处于快速的增长趋势，但是一直在0.5水平以下，尤其是耦合度和协调度在0.4水平以下，二者之间的联系、影响程度以及发展过程协调性均较低，彼此间关系呈现严重不协调状态。

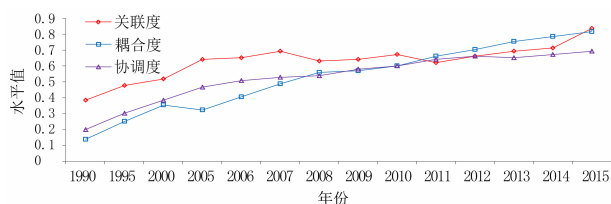


图7 1990—2015年重庆市地质生态环境与城市化关联度、耦合度和协调度趋势图

Fig. 7 The trend of correlation, coupling and coordination degree of geo-ecological environment and urbanization of Chongqing from 1990 to 2015

地质生态环境综合水平从 0.13 增长到 0.41, 城市化综合水平从 0.06 增长到 0.24, 地质生态环境综合水平减去城市化综合水平值在 $[0.12, 0.18]$, 表明城市化发展水平低下, 城市化进程发展受阻, 对地质生态环境的胁迫作用最小。

(2) 2000—2006 年, 这一阶段二者间关联度、耦合度和协调度迅速增长, 地质生态环境与城市化关联度关系较高, 关联度系数达到 0.65, 耦合度和协调度在 $[0.36, 0.51]$ 间, 协调度在 2005 年出现短暂回落之后又迅速回升, 处于中度耦合和基本协调发展阶段, 整体关系从严重不协调状态过渡到基本协调状态。地质生态环境综合水平 (0.77) 大于城市化综合水平 (0.39), 城市化发展仍处于滞后阶段, 但是相较于前一阶段得到快速发展, 地质生态环境水平也在这一阶段得益于城市生态环境建设呈现出明显的增长态势, 城市化发展对地质生态环境负面影响小。

(3) 2007—2010 年, 这一阶段地质生态环境与城市化之间的关联度不再增加, 较之前出现小幅度回落趋势, 关联度系数维持在 0.65, 耦合度和协调度在 $[0.49, 0.60]$ 间, 保持较慢增长速度, 协调度在 2008 年首次超过耦合度, 地质生态环境与城市化的影响程度、发展过程协调性关系越来越紧密, 从基本协调状态过渡到较高级协调状态。在这一阶段城市化综合水平增长到 0.80, 开始趋近于地质生态环境综合水平, 城市人口规模扩大, 城市经济发展以传统高能耗、高污染的重工业发展为主, 地质生态环境在 2007 年出现大幅度回落, 表明地质生态环境开始受到城市化发展的影响, 但仍在地质生态环境的承载能力范围内。

(4) 2010—2015 年, 地质生态环境与城市化的

关联度、耦合度和协调度均突破 0.60, 保持持续增长态势, 从较高级协调状态转向高级协调状态, 由城市化滞后转向地质生态环境滞后阶段。城市化综合水平在 2013 年首次超过地质生态环境综合水平, 而地质生态环境综合水平呈现波浪形波动规律, 在 2012 年达到峰值后开始出现回落, 表明第二产业为主导的工业污染加重, 地质生态环境质量下降, 地质生态环境综合水平发展滞后, 城市化发展影响逐渐超过其承载能力范围。

3.2 空间视角下的耦合分异差异

在空间视角下, 将城市化指标水平和地质生态环境指标水平简化为常住人口、人均 GDP、城市空间发展强度、工业综合能耗要、地质稳定性水平、空气质量指数、生态用地比例和综合生态安全指数等两个要素群组, 根据公式 (1) — (3) 计算地质生态环境与城市化的关联度、耦合度和协调度 (图 8d)。结果表明, 从空间分布差异来看, 地质生态环境与城市化关联度较高的区域主要分布在渝西较发达地区, 沿渝东南和渝东北远郊区县降低, 全域除酉阳县、城口县和武隆区外关联度均处于较高水平, 说明重庆市各区县地质生态环境与城市化间有着较为密切的关联 (图 8a)。从耦合度水平来看 (图 8b), 全市约有 47% 的区县处于较高水平以上耦合阶段, 整体耦合关系较好, 济发展水平较高的主城九区以及远郊区县是耦合度水平较低区域, 其中渝东北远郊区县城口 (0.37) 和巫溪 (0.39) 最低。从协调度来看 (图 8c), 约有 62% 的区县处于较高级协调阶段, 环主城九区的永川、合川、江津、长寿和涪陵, 以及长江流域沿线的丰都、忠县、万州等是较高级协调区域, 其中江津 (0.66) 协调度最大, 城市化指标水平 (0.69) 与地质生态环境质量水平 (0.75) 处于较高级协调状态, 地质生态环境承载能力大于城市化所需生态荷载, 是所有区县中地质生态环境与城市化协调关系最佳的区县, 其他区域的协调度水平有待提升。

4 结论

研究构建了地质生态环境与城市化关联性评价的关联度、耦合度和协调度测算模型, 通过多时序的社会经济统计资料和空间对比分析, 揭示出地质生态环境与城市化耦合协调的时空分布规律与特征, 结果表明:

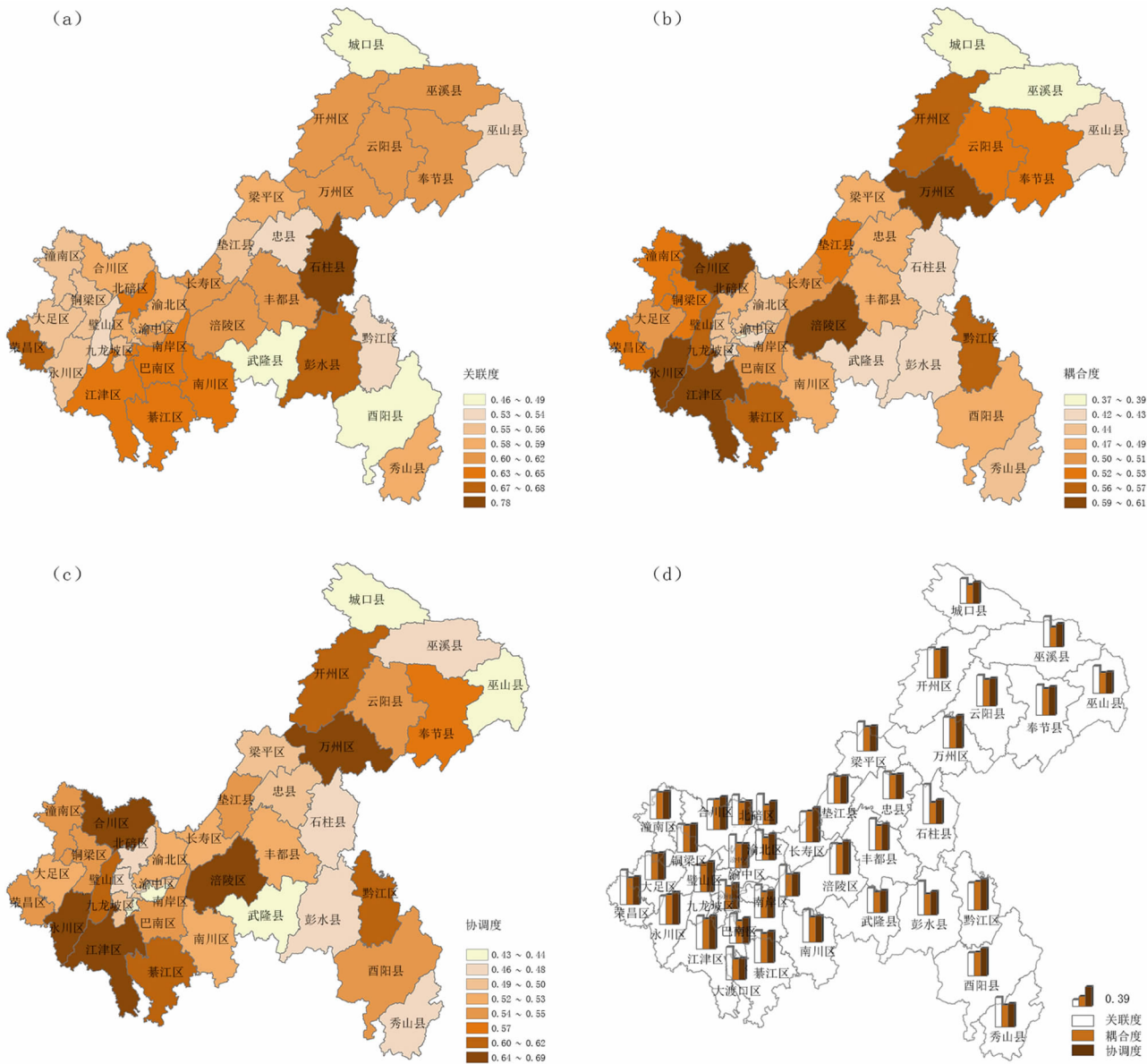


图8 2015年重庆市38区县空间关联度、耦合度和协调度分布：
(a)关联度；(b)耦合度；(c)协调度；(d)三者对比

Fig.8 Spatial differentiation of correlation,coupling and coordination degree in 38 districts of Chongqing in 2015:
(a)Correlation degree;(b)Coupling degree;(c)Coordination degree;(d)Contrast of the three

(1)经济城市化和绿化生态水平分别在城市化系统和地质生态环境系统中所占权重最大,是影响城市化综合水平和地质生态环境质量的主要因素。随着经济规模总量增加重庆市生态环境保护的投资力度加大,绿化生态水平和固体废弃物处理水平的提升在一定程度上缓解环境生态压力,绿化生态水平占据主要影响作用,契合重庆市城市化发展的实际情况;

(2)1990—2015年,重庆市地质生态环境与城

市化耦合协调关系呈现持续增长态势,从低关联—低水平耦合—严重不协调—城市化受阻阶段,逐步走向高关联—高水平耦合—高级协调—地质生态环境滞后阶段;

(3)2015年重庆市39个区县地质生态环境与城市化的关联度、耦合度和协调度存在显著的空间差异,呈现出渝西较发达地区的耦合协调程度普遍高于渝东北和渝东南远郊欠发达地区的现象,经济发展水平较高的区域,其耦合度和协调度水平会相

对较高,欠发达地区或者经济水平发展最高的地区,其耦合度和协调度会较低。

快速城市化进程对地质生态环境造成深刻影响,纵观二者间复杂的交互作用关系,如何认识和处理地质生态环境与城市化协调发展,切实解决好地质生态环境与城市化的耦合协调关系问题是学术界和政府决策部门亟待解决的一大难点问题,开展地质生态环境与城市化关联性研究是未来地球系统科学与城乡规划学的热点和前沿领域,也是推动地质生态环境与城市化协调可持续发展的难点问题。研究在此引入地质生态环境概念,主要基于以下两点思考:

(1)拓展城市化与生态环境关联性探讨的学科领域和空间范畴,将地质生态环境理念引入城市化与生态环境耦合协调关系研究当中。城市化除了与多数研究关注的水、大气、生物等生态环境要素具有复杂关系外,还与复杂的地质环境存在交互作用,尤其近年来城市化发展越来越多地走向地质地理环境复杂和地下空间密集开发的山地城市,将地质地理环境要素纳入二者关联性研究十分必要。

(2)更加关注地质地理环境特殊的山地城市化发展模式,重庆市是我国山地城市研究的典型代表,其城市化发展模式正由传统的人口城市化主导逐渐转向经济城市化驱动,经济建设成为推动城市化快速发展的主导因素,社会城市化比重持续增加并占据重要作用,城市发展更加注重内在质的提升。随着城市化水平的持续推进,城市环境保护的投资建设力度加大,人工生态响应措施缓解环境资源和生态条件的负荷压力,地质生态环境综合水平伴随城市化的持续推进而提高,二者间的耦合协调关系走向健康发展,其城市化发展模式和地质生态环境保护对其他山地城市具有重要的借鉴和参考价值。未来我国城市化进程推进的主要区域集中在地质地理环境复杂的山地城市,山地城市地质生态环境具有复杂性和多样性与脆弱性和敏感性并存的双重特性,如何定位山地城市化复杂系统的整体功能和发展模式?如何刻画山地城市地质生态环境要素与外部城市化要素之间的联系?如何探究山地城市地质生态环境与城市化间的耦合协调关系及交互作用机制?如何诊断山地城市地质生态环境与城市化耦合协调关系健康水平?研究将进一步建立山地城市化与地质生态环境关联性探讨的系统理论框架,通过

筛选山地城市化与地质生态环境耦合协调的主控要素和解析二者时空演变特征,辨识地质生态环境与城市化的耦合协调发展阶段、类型和规律,构建二者耦合协调的病理诊断模型,建立地质生态环境与城市化耦合协调的反馈实施平台和规划调控机制,通过城市规划的主动干预作用协调二者间的健康关系,对未来指导山地城市化可持续发展和制定地质生态环境保护政策具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] TROLL C. Landscape ecology and bio-geocenology [J]. A Terminological Study Geoform, 1971, (8): 43-46
- [2] 曾卫,陈肖月.地质生态变化下山地城镇的衰落现象研究[J].西部人居环境学刊,2015,30(01):92-99 [ZENG Wei, CHEN Xiaoyue. Analysis of the decline of mountainous cities under the change of geological ecology [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2015, 30(01): 92-99]
- [3] TROFIMOV V T. Ecological geological system and their types, position in the ecosystem structure and task of the investigation [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 425-438
- [4] 杨春.地质生态环境与城镇建设关联性研究——以重庆市为例[D].重庆:重庆大学,2018 [YANG Chun. Research on the correlation of geological ecological environment and urban construction—A case study of Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018]
- [5] 陈明星.城市化领域的研究进展和科学问题[J].地理研究,2015,34(4):614-630 [CHEN Mingxing. Research progress and scientific issues in the field of urbanization [J]. Geographical Research 2015, 34(4): 614-630]
- [6] 方创琳,杨玉梅.城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律[J].干旱区地理,2006,29(1):1-8 [FANG Chuanglin, YANG Yumei. Basic laws of the interactive coupling system of urbanization and ecological environment [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(1): 1-8]
- [7] 王少剑,方创琳,王洋.京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J].生态学报,2015,35(7):2244-2254 [WANG Shaojian, FANG Chuanglin, WANG Yang. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2244-2254]
- [8] NISHIDE K. Economic models for the environmental Kuznets curve: a survey [J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2010, 34:1187-1201
- [9] 吴玉鸣,田斌.省域环境库兹涅茨曲线的扩展及其决定因素——空间计量经济学模型实证[J].地理研究,2012,31(04):627-640. [WU Yuming, TIAN Bin. The extension of regional Environmental Kuznets Curve and its determinants: An empirical

- research based on spatial econometrics model [J]. *Geographical Research*, 2012, **31**(04): 627 – 640]
- [10] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. *地理研究*, 2003, **22**(2): 211 – 220 [HUANG Jinchuan, FANG Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment [J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(2): 211 – 220]
- [11] 黄金川. 城市化与生态环境耦合关系理论与方法研究[D]. 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003 [HUANG Jinchuan. The theory and method of coupling relation between urbanization and eco-environment [D]. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, 2003]
- [12] 刘耀彬, 宋学锋. 城市化与生态环境耦合模式及判别[J]. *地理科学*, 2005, **25**(4): 408 – 414 [LIU Yaobin, SONG Xuefeng. Model and criterion of urbanization and ecological environment coupling [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(4): 408 – 414]
- [13] 黄金川, 方创琳, 冯仁国. 三峡库区城市化与生态环境耦合关系定量辨识[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(02): 153 – 158. [HUANG Jinchuan, FANG Chuanglin, FENG Renguo. Quantitative research on the relationship between urbanization and eco-environment—case of the three Gorges Area. [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(02): 153 – 158]
- [14] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 城市化与城市生态环境关系研究综述与评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2005, **15**(03): 55 – 60. [LIU Yaobin, LI Rendong, SONG Xuefeng. Summary and comment of the correlation study of urbanization and urban eco-environment [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2005, **15**(03): 55 – 60]
- [15] 吴玉鸣, 张燕. 中国区域经济增长与环境的耦合协调发展研究[J]. *资源科学*, 2008, **30**(1): 25 – 30 [WU Yuming, ZHANG Yan. Analyzing coupled regional economic growth and environmental conservation in China [J]. *Resources Science*, 2008, **30**(1): 25 – 30]
- [16] 严姗, 孜比布拉·司马义. 北疆地区城市化发展与生态环境的灰色关联性分析[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **34**(01): 47 – 51. [YAN Shan, SIMAYI ZibiBuLa. Gray relevance analysis of urbanization and ecological environment of North Xinjiang [J]. *Journal of Tianjin Normal University Natural Science Edition*, 2014, **34**(01): 47 – 51]
- [17] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. *地理学报*, 2005, (02): 237 – 247. [LIU Yaobin, LI Rendong, SONG Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, (02): 237 – 247]
- [18] 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, (06): 75 – 83 [FENG Donghai, SHEN Qingji. Optimization of ecological environment in Shanghai based on correlation and coupling analysis [J]. *Urban Planning Forum*, 2015, (06): 75 – 83]
- [19] BARBOSAF R. Assessing the environment-benthic fauna coupling in protected and urban areas of southern Brazil [J]. *Biological Conservation*, 2006, **129**(3): 408 – 417]

Associative Analysis of Geo-ecological Environment and Urbanization: A Case Study of Chongqing, China

ZENG Wei^{1,2*}, YANG Chun¹, ZHOU Hantao³

(1. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing, 400030, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing, 400030, China;

3. China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chongqing, 400030, China)

Abstract: Geo-ecological environment is the important material basis for cities, and has extremely complex relations with urban development. Summarizing the evolution trend, time rules and spatial differences from the aspect of time and space contributes to the coordinating development of geo-ecological environment and urbanization. An index evaluation system of the geo-ecological environment and urbanization was first constructed. The main component weight coefficient of the geo-ecological and urbanization evaluation index of Chongqing from 1990 to 2015, and the Pearson correlation coefficient of geo-ecological environment index level and population density, per capita GDP, urban spatial development intensity, industrial comprehensive energy consumption and other urbanization index levels of the 38 districts and counties of Chongqing for 2015 were respectively obtained

using the SPSS 21.0 software. Using the correlation coupling analysis method, the correlation degree, coupling degree and coordination degree of the geo-ecological environment and urbanization in Chongqing were obtained at time and space levels. The results showed that the economic urbanization and greening ecological level made the largest share of contribution to the urbanization system and the geo-ecological environment system, respectively. From 1990 to 2015, the coupling and coordination relationship between the geo-ecological environment and urbanization in Chongqing had shown a continuous growth trend, and the correlation degree, coupling degree and coordination degree had transitioned to a high correlation-high level coupling-high level coordination-geo-ecological environment lagging stage from low correlation-low level coupling-serious in coordination-urbanization development lagging. Furthermore, the correlation degree, coupling degree and coordination degree of the geo-ecological environment and urbanization in the 38 districts and counties of Chongqing for 2015 had undergone significant regional differences. Moreover, the degree of coupling coordination in more developed areas of western Chongqing was generally higher than that in less developed areas of northeastern and southeastern Chongqing, and a large spatial correspondence was exhibited between the level of regional economic development, and the coupling degree and coordination degree. It is of great significance to correctly identify the evolution regularity and characteristics of coupled coordination relations between geo-ecological environment and urbanization, and adopt the appropriate policy on urban development and environment protection strategies to promote the balanced and sustainable development.

Key words: geo-ecological environment; urbanization; coupling analyzing model; Chongqing