

重庆市城镇化与生态系统健康的时空耦合特征

周玲燕, 李维杰, 王勇, 卞鸿雁, 王秋红, 刘岩, 袁贞贞

(西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: [目的] 研究山地城市城镇化与生态系统健康的时空交互耦合特征以及生态系统健康与城镇化之间的复杂关系, 为该地区城镇的科学管理与可持续发展提供科学依据。[方法] 以山地城市重庆市为例, 运用熵值法和活力—组织力—弹力—服务模型(V-O-R-S)分析了城镇化与生态系统健康亚系统的时空演变特征, 探讨 2000—2020 年重庆市城镇化与生态系统健康亚系统间交互耦合关系的机理。[结果] ①2000—2020 年重庆市综合城镇化水平呈逐年上升的趋势, 但仍存在空间发展不均衡的问题, 核心带及低值区均受地形起伏影响显著; ②2000—2020 年生态系统健康指数一直处于适中状态, 城镇化发展迅速的区域生态系统健康状况恶化显著, 植被覆盖度较高的渝东南与渝东北生态系统健康状况良好。[结论] 城镇化与生态系统健康亚系统间的交互耦合关系呈上升趋势, 但是目前未达到高度协调阶段, 仍有矛盾存在。重庆市要实现高质量且可持续的发展, 仍需走绿色发展路径, 解决时空不均的问题。

关键词: 城镇化; 生态系统健康; 耦合协调度模型; 山地城市; 重庆市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0397-12

中图分类号: X171.1

文献参数: 周玲燕, 李维杰, 王勇, 等. 重庆市城镇化与生态系统健康的时空耦合特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 397-408. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230419.001; Zhou Lingyan, Li Weijie, Wang Yong, et al. Spatiotemporal coupling characteristics between urbanization and ecosystem health in Chongqing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 397-408.

Spatiotemporal Coupling Characteristics Between Urbanization and Ecosystem Health in Chongqing City

Zhou Lingyan, Li Weijie, Wang Yong, Bian Hongyan, Wang Qiuhong, Liu Yan, Yuan Zhenzhen

(School of Geographical Sciences, Southwestern University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal interactive coupling characteristics between mountainous urbanization and ecosystem health, and the complex relationship between ecosystem health and urbanization were studied to provide a scientific basis for the scientific management and sustainable development of urban areas in the region. [Methods] The spatial and temporal evolution characteristics of urbanization and ecosystem health subsystems were analyzed for Chongqing City (a mountainous city) from 2000 to 2020 using the entropy value method and the vigor-organizational-resilience-service (V-O-R-S) model to determine the mechanism of the interactive coupling relationship between urbanization and ecosystem health subsystems. [Results] ① The comprehensive urbanization level in Chongqing City from 2000 to 2020 increased year by year. However, there was still a problem of uneven spatial development, and both the core zone and the low-value area were significantly affected by topographic relief. ② The ecosystem health index from 2000 to 2020 was moderate. The ecosystem health of the regions with rapid urbanization deteriorated significantly, while the ecosystem health of Southeast Chongqing and Northeast Chongqing with higher vegetation cover was good. [Conclusion] The interactive coupling between urbanization and ecosystem health subsystems was on the rise, but has not yet reached a highly coordinated stage, and contradictions still exist. To achieve high-quality

收稿日期: 2022-12-04

修回日期: 2023-02-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“山地城市景观可持续性: 尺度、机理、安全公正操作空间”(42101296)

第一作者: 周玲燕(1997—), 女(汉族), 重庆市人, 硕士研究生, 主要研究方向为区域环境与可持续发展。Email: 13436019326@163.com.

通讯作者: 王勇(1975—), 男(汉族), 山西省柳林县人, 博士, 教授, 主要从事生态环境与资源承载力等方面的研究。Email: Wyong826@163.com.

and sustainable development in Chongqing City, it will still be necessary to take the green development path and solve the problem of spatial and temporal inequality.

Keywords: urbanization; ecosystem health; coupled coordination degree model; mountainous city; Chongqing City

改革开放以来,中国经历了世界上规模最大、速度最快的城镇化,城镇人口比例从改革初期的 17.92% 发展到 2020 年的 63.9%^[1]。快速的城镇化成为拉动区域经济增长的引擎,促进了城市景观的扩张,集聚了劳动力、产业和资本,提高了居民的福祉^[2]。然而,社会—经济要素的腾飞和繁荣依赖于资源和能源的消耗,城市不透水面将自然景观取而代之,因此造成一系列生态问题^[3-4],如:生物栖息地遭到破坏、生物多样性减低、环境污染以及生物多样性退化^[5-8]。如何将生态文明的理念全面贯穿于城镇化进程中,实现环境保护和社会经济发展的协同发展,是中国城镇发展的重点和关键问题^[9-10]。2020 年的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第 14 个 5 年规划和 2035 年远景目标的建议》提出中国的城镇化要走“绿色发展路径”,需尽早逾越环境库兹涅茨曲线顶点,理论结合实践^[11-13],在“美丽中国”的沃土中建立“美丽城市”。

中国城市网络以及等级系统日趋完善^[14],但由于区位、历史、自然禀赋的差异,各个规模不同的城镇化的高质量发展路径要因地制宜、问题导向治理以及生态与发展兼顾。理解不同城市的城镇化与生态环境的交互耦合关系是制定区域城镇化可持续发展策略的关键^[15]。20 世纪 90 年代,美国经济学家 Grossman 与 Krueger 最早提出了环境库兹涅茨曲线^[16],构建了环境污染与人均收入随发展过程而变化的经验曲线,呈现倒 U 型关系,发现当经济发展到达临界点后,人均收入与生态环境实现了协同发展^[17-18]。国内学者在城镇化与大气环境安全^[19]、城镇化与生态环境^[20]、城镇化与生境质量^[21]以及城镇化与能源环境效率耦合分析等^[22]领域均进行了深入探索。这些实证研究为进一步定性和定量地研究城市化与生态环境的关系提供了重要参考。然而,以往研究中使用的生态环境指标与人为因素直接或间接相关,无法反映自然生态系统的本质^[23-24]。较少研究城镇化与生态系统组成部分(即结构、功能或服务)的耦合关系,不利于明确探索人地系统之间的相互作用和影响程度。

重庆市位于西南腹地,是城市人口大于 3000 万的超大规模都市区,具有典型的山地城市景观,其城市景观扩张模式、生态系统结构、功能、物质及能量流动均受山地城市的 3D 景观的限制和影响。本文分

别应用熵值法整合了城镇化的多维特征(人口、社会、经济和空间)^[25]和活力—组织力—弹力—服务模型(V-O-R-S)^[26]表征生态系统健康(是指在一定时间和空间范围内,在保持自身结构和功能完整并能有效抵抗外界干扰的情况下,可以提供稳定、可持续的生态系统服务的能力^[27-28]),然后使用耦合协调度模型计算了城镇化与生态系统健康之间的耦合协调性^[29],探讨重庆市自 2000 年以来城镇化与生态系统健康组分间以及生态系统健康与城镇化亚系统间的交互耦合关系轨迹。具体研究目标如下:①选择重庆市为典型山地城市,刻画重庆市 2000—2020 年城镇化与生态系统健康的交互耦合的时序特征;②选取 2000 和 2020 年时间截面,刻画城镇化与生态系统健康亚系统间交互耦合关系的空间格局。③结合直辖以来重庆市城镇化的重大历史变革,透视城镇化与生态健康时空的交互耦合的内在机制以及政策对两者的调控及影响。

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

重庆市(105°11′—110°11′E, 28°10′—32°13′N)作为典型的山地景观城市,西部和中部位于四川盆地边缘,主要地貌为丘陵和平行山谷,平均海拔约 491 m;东南和东北分别位于大巴山和武陵山的交汇处,主要地貌类型为山地,平均海拔约为 869 m。重庆市山地面积约占 76%,地质生态环境极其敏感脆弱。重庆市面积 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,其下辖 23 区 15 县,2014 年重庆市规划局构建了“一区两群”的城镇空间格局,其“一区”包含都市核心区、都市功能拓展区、都市发展新区,“两群”包含渝东北生态涵养发展区和渝东南生态保护发展区。2020 年以来重庆市的常住人口达 3 124 万人,占全国总人口的 2.27%,全市 GDP 达 2.5 万亿元,占全国 GDP 的 2.46%。重庆市自直辖以来,城镇化率从 1997 年的 31% 提升到 2020 年的 65%,然而经济的提升与人口的聚集对生态环境产生了巨大的影响,人与自然的矛盾在逐步加剧。

1.2 数据来源

城镇化是一个复杂而动态的发展过程,伴随着人口、产业、社会、空间以及生态等多维因素而变化^[30-32],根据相关研究成果和当地实际情况^[20,33],从人口、经济、空间和社会这 4 个方面选取了 8 项指标,

以综合性、典型性以及可操作性为原则构建综合城镇化水平评价模型(表 1)。所有城市数据均来自 2001—2021 年重庆市统计年鉴(http://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/tjnj/)。基于相关研究和数据可获得性,运用活力、组织力、弹力和服务这 4 个组分构建一个全面的生态系统健康评估框架。具体来说,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)用于监测植被生长状况,用于表征活力,其主要源于 modis 卫星,MOD13Q1 产品的 NDVI 数据。采用 2000—2020 年 30 m 分辨率土地利用/覆被变化(LUCC)数据评估组织力、弹力和服务,该数据主要来自武汉大学 1990—2020 年全国土地利用现状遥感监测数据集^[34]。夜间灯光数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS)。根据刘纪远等人^[35]提出的土地利用划分方法,土地利用数据分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。由于城镇化亚系统与生态系统健康组分指标的量纲不同,需要采用极差标准化法对原始指标数据进行归一化,具体计算公式为:

正向指标处理为:

$$X_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (1)$$

负向指标处理为:

$$X_{ij} = \frac{X_{j\min} - X_{ij}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (2)$$

式中: X_{ij} 是指标 j 在第 i 年的原始值; $X_{j\min}$ 、 $X_{j\max}$ 分别是指标 j 在所有年限中的最小值和最大值。

表 1 衡量综合城镇化水平的指标

Table 1 Indicators used to measure the level of comprehensive urbanization

准则层	系统层	指标层	指标属性
综合城市 化指 数	人口城镇化	城镇人口密度/(人·km ⁻²)	+
		城镇人口比例/%	+
	经济城镇化	人均国内生产总值/万元	+
		第二、三产值占 GDP 比重/%	+
	空间城镇化	人均道路面积/m ²	+
		建成区面积比例/%	+
	社会城镇化	每百万人医生人数/人	+
		每百万人学生人数/人	+

2 研究方法

2.1 综合城镇化水平评估

城镇化(UR)指标值的计算有以下两个步骤:

①参照以往的研究^[36],采用熵值法确定城镇化系统中各指标的权重。熵值法是一种用来评定指标离散

程度的数学方法,其具有广泛与普遍的意义,因此在许多领域得以运用。通常,熵值越大,系统结构越平衡,系数差越小,指数权重越小。相反,该指数的权重就越大。②采用线性加权法计算城镇化及其亚系统的指标值。具体的计算步骤如下:

(1) 计算第 j 个指标下第 i 个项目的指标值的比重 S_{ij} :

$$S_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (3)$$

(2) 计算指标 j 的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n S_{ij} \ln S_{ij} \quad (4)$$

其中, $k = \frac{1}{\ln(n)}$ ($0 \leq e_j < 1$)。

(3) 计算指标 j 的权重:

$$\omega_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^k (1 - e_j) \quad (5)$$

(4) 计算城镇化体系的指标值:

$$S_{\lambda i} = \sum_{j=1}^k \omega_j x_{ij} \quad (6)$$

式中: X_{ij} 表示第 j 个指标下第 i 个项目的指标值; S_{ij} 表示 X_{ij} 的比重; e_j 表示指标 j 的熵值; ω_j 表示指标 j 的权重; $S_{\lambda i}$ 表示 λ 年中城市 i 的指数值; n 表示指标数。

2.2 生态系统健康评价

生态系统健康(EH)是区域生态系统质量的重要表征,其中主要包括 4 个组分:活力、组织力、弹力和服务。基于 Peng 等^[37]提出的评估方法,采用 V-O-R-S 模型评价区域生态系统健康状况。需要注意的是,每个组分都需要进行标准化处理。生态系统健康指标的具体计算方法如下:

$$EHI = \sqrt[4]{EV \times EO \times ER \times ESSDR} \quad (7)$$

式中:EHI 是生态系统健康指数,其范围为 0 到 1。基于等间隔法,本文将生态系统健康指数由低到高分 5 个等级:脆弱(0~0.2],较弱(0.2~0.4],适中(0.4~0.6],亚健康(0.6~0.8]和健康(0.8~1]。

(1) 生态系统活力(EV)通常定义为生态系统代谢或净初级生产力。本研究采用 NDVI 来反映生态系统活力,由于其在生态环境质量监测中的有效作用,在区域生态系统健康评价中得到了广泛的应用^[37]。

(2) 生态系统组织力(EO)是指区域生态系统结构的稳定性和复杂性。通常使用景观格局指数所包含的景观异质性和景观连通性评估生态系统组织力^[37]。具体而言,运用香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)和平均斑块分维数(mean patch fractal dimension, MPFD)来反映景观异质

性。景观连通度指数主要包括两个方面：①整体景观的连通性，由景观破碎度指数和景观蔓延度指数来计算；②林地、草地以及水域等重要斑块的连通性，以破碎度指标和聚合度指标来衡量。此外，根据以往的研究，整体景观的异质性、连通性和重要生态斑块的连通性的权重分别为 0.35, 0.35, 0.30^[26,37]。具体的计算方法为：

$$EO = 0.35LH + 0.35LC + 0.30IC = (0.25SHDI + 0.10MPFD) + (0.25FN_1 + 0.01CONT) + (0.07FN_2 + 0.03COHE_1 + 0.07FN_3 + 0.03COHE_2 + 0.07FN_4 + 0.03COHE_3) \quad (8)$$

式中：FN₁, CONT 分别为景观破碎度指数和景观蔓延度指数；FN₂, FN₃, FN₄ 分别为林地、草地和水域的景观破碎度指数；CONT₁, CONT₂, CONT₃ 分别为林地、草地和水域的聚集度指数。

(3) 生态系统弹性(ER)是指生态系统在人类活动的干扰下保持自身结构稳定性的能力^[37-39]。基于相关参考文献^[26,37]，对每一类土地利用类型赋予相应弹性系数(表 2)。

$$ER = \sum_{i=1}^n A_i \times ERC_i \quad (9)$$

式中：ER 指生态系统弹性；n 代表第 n 种土地利用类型；ERC_i 代表第 i 种土地利用对应的弹性系数；A_i 指第 i 类土地利用类型的面积比例。

表 3 生态系统单位面积生态系统服务价值当量

Table 3 Ecosystem services value unit area of different ecosystem types

类型	亚类	林地	草地	耕地	湿地	水域	未利用地	建设用地
供给服务	食物生产	33.00	43.00	100.00	36.00	53.00	2.00	0.00
	原材料	100.00	12.00	13.00	8.00	12.00	1.34	0.00
	气体调节	100.00	35.00	17.00	56.00	12.00	1.39	0.00
调节服务	气候调节	30.00	12.00	7.00	100.00	15.00	0.96	0.00
	水源涵养	22.00	8.00	4.00	72.00	100.00	0.37	0.00
	废物处理	12.00	9.00	9.00	97.00	100.00	1.75	0.00
支持服务	土壤形成与保护	100.00	56.00	37.00	50.00	10.00	4.23	0.00
	生物多样性保护	100.00	41.00	23.00	82.00	76.00	8.87	0.00
文化服务	娱乐文化	44.00	19.00	4.00	100.00	95.00	5.12	0.00
权重		60.08	26.00	23.69	66.64	52.52	2.89	0.00

2.3 耦合协调度模型

基于耦合协调度模型，本文研究了城镇化与生态系统健康之间的交互耦合关系。该模型被广泛运用于多个领域，其主要用于测量两个或多个系统之间的交互程度以及耦合水平，反映了系统从无序到有序的发展趋势^[44]。首先使用公式(13)计算城镇化与生态

表 2 生态系统弹性系数

Table 2 Ecosystem resilience factors

用地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
弹性系数	0.3	0.8	0.7	0.8	0.2	0.1

(4) 生态系统服务供给指人类直接或间接向生态系统中获取的生态产品和服务^[40]；生态系统服务需求指人类当前使用、消费或预期获得的所有服务和产品的数量^[41]；生态系统服务供需比(ecosystem service supply-demand ratio, ESSDR)揭示了生态系统服务供给与人类需求间的关系，反映了盈余或不足的实际情况^[42]。其具体公式为：

$$ES_S = \left[\sum_{i=1}^N w_i \times LA_{(i,t)} \right] / \sum_{i=1}^n LA_{(i,t)} \quad (10)$$

式中：ESS 表示生态系统服务供给能力；w_i 表示生态系统服务价值权重系数(表 3)，其参考了 Xie^[42] 和 Chen^[43] 对每一类土地利用类型的赋值；LA_(i,t) 表示在第 t 年第 i 类土地利用类型的面积。

$$ES_D = OLS_{(m,n)} \times P_{(m,n)} \quad (11)$$

式中：ESD 表示人类对生态系统服务的需求；OLS_(m,n) 表示第 n 年 m 区县的夜间灯光数据；P_(m,n) 表示第 n 年 m 区县城镇面积比例。

$$ESSDR_j = \frac{ES_S - ES_D}{(ES_{S_{max}} + ES_{D_{max}}) / 2} \quad (12)$$

式中：ESSDR_j 表示第 j 年生态系统服务供给与需求之比。

系统健康之间的耦合度，然后在耦合度分析的基础上，使用公式(14)–(15)测量城镇化与生态系统健康之间的耦合协调度。具体计算公式为：

$$C = 2\sqrt{(U_1 \times U_2) / (U_1 + U_2)^2} \quad (13)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (14)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (15)$$

式中: C 为城镇化与生态系统健康之间的耦合度; T 表示城镇化与生态系统健康之间的综合评价指标; D 表示城镇化与生态系统健康之间的耦合协调度。 U_1 、 U_2 分别为综合城镇化水平和生态系统健康指数。这两个子系统对于评估城镇化与生态系统健康之间的协调程度同样重要,因此它们被给予相同的权重,即 $\alpha = \beta = 0.5$ ^[33]。参照以往的研究结果^[45-47],本文把耦合协调度由低到高分分为 5 个层次:严重失调(0~0.2]、中度失调(0.2~0.4]、基本协调(0.4~0.6]、中度协调(0.6~0.8]和高度协调(0.8~1]。

3 结果与分析

3.1 综合城镇化、生态系统健康以及二者间耦合协调度的时序分析

如图 1 所示,2000—2020 年重庆市综合城镇化水平、人口城镇化、经济城镇化、空间城镇化以及社会城镇化的指数均呈对数上升。其中,综合城镇化水平由 2000 年的 0.04 增长到 2020 年的 0.34;人口城镇化由 0.01 增长到 0.09;经济城镇化由 0.00 增长到 0.15;空间城镇化由 0.00 增长到 0.15;社会城镇化由 0.04 增长到 0.05。2000—2020 年重庆市生态系统健康及其组分的变化趋势。其中生态系统健康指数在 2000—2010 年,由 0.45 提升至 0.56,在 2010—2020 年,由 0.55 下降 0.54;活力值由 0.49 提升至 0.79;组织力值从 0.34 增长到 0.51;弹力值维持在 0.50 左右;服务值由 0.59 下降至 0.56(图 2)。如图 3 所示,重庆市综合城镇化与生态系统健康之间的耦合协调度从 2000 年的中度失调(0.35)向 2020 年基本协调(0.59)转变,其结果与 Yang 等^[48]人研究的地球生态环境与城镇化间的耦合协调关系的结果相似。

重庆市城镇化发展过程中,经济城镇化起着主导作用。由此表明,重庆市自 1997 年直辖以来,凭借着直辖政策以及西部大开发战略等,在市委、市政府的正确领导下,重庆市经济水平得到迅速提升。在城镇化发展前期,政策驱使大量农村人口向城镇转移,致使城镇人口密度增加,建成区空间的扩张,推动着城镇快速发展;在 2009 年国务院发布《国务院关于推进重庆市统筹城乡改革和发展的若干意见》中,提出扩大内陆开发以及产业优化升级开发战略,将重庆市的经济发展水平推向另一个高度。这一结果与 Yang 等^[48]的研究相似,证实了经济发展和城市化之间的正相关作用。而生态系统健康指数先增后减,由此发现,在《国务院关于推进重庆市统筹城乡改革与发展的若干意见》中,要求重庆市建设为中国中心城市,就需要走北拓东跨和西进南优的路径;北拓东跨需要发

展两江新区,西进南优需要提升西永和西彭组团,优化南部老城区,也就扩大了原有的建成区布局,大量的林地草地转换为建设用地,导致生态环境质量降低,生态系统健康指数从 2010 年开始有所下降。在重庆市耦合协调度值处于中度失调阶段时,综合城镇化水平较低,并且以人口的聚集和以传统高耗能、高污染的重工业发展为主导的城市经济发展对生态环境造成了巨大的压力^[38],生态系统的健康状况较差;而在基本协调的阶段,也是重庆市综合城镇化水平高速发展的时期,虽然科技进步、人才引进、新能源发展以及产业结构的调整,并且加大对生态环境的保护力度,但由于建成区空间布局的扩大,大量草地林地转化为不透水面,致使生态系统健康状况有所降低。

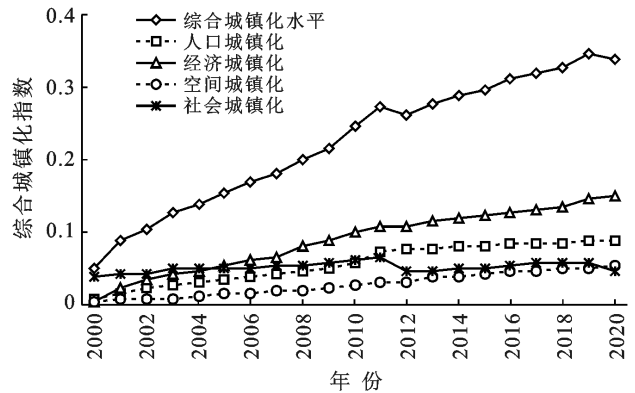


图 1 重庆市 2000—2020 年综合城镇化及其亚系统的变化曲线
Fig.1 Change curves of comprehensive urbanization and its subsystems in Chongqing City from 2000 to 2020

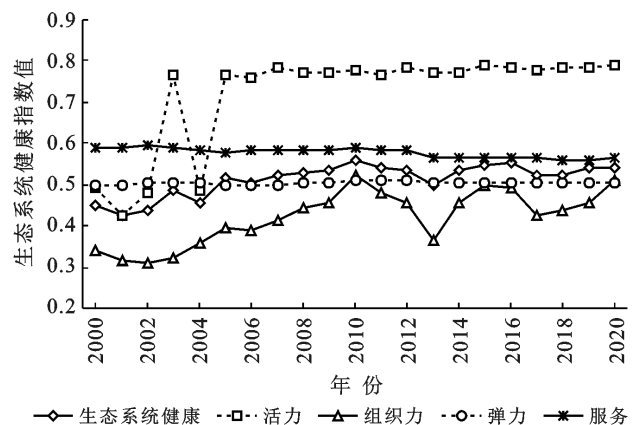


图 2 重庆市 2000—2020 年生态系统健康及其组分的变化曲线

Fig.2 Change curves of ecosystem health and its components in Chongqing City from 2000 to 2020

3.2 综合城镇化、生态系统健康以及二者间耦合协调度的空间格局分析

如图 4 所示,2000 和 2020 年重庆市综合城镇化水平的空间分布格局,38 个区县的水平都有所提升,

但仍存在明显的区域差异。具体而言,重庆市综合城镇化水平较高的区域主要分布在都市区,存在空间聚集性;综合城镇化水平较低的区域主要分布在渝东南和渝东北地区。2000 和 2020 年重庆市生态系统健康的空间总体布局变化较小,仍存在明显的区域差异。具体而言,生态系统健康指数高值区主要分布在重庆市渝东南和渝东北地区,低值区主要分布在都市区。2000 年和 2020 年重庆市综合城镇化与生态系统健康之间耦合协调度的空间格局。渝中区为严重失调;合川区、江津区、涪陵区、开县、万州、云阳、奉节县和巫山县为基本协调;其余区县均为中度失调。渝中区、江北区和渝北区处于严重失调;潼南县、梁平县、忠县、城口县、巫山县、巫溪县和云阳县处于基本协调;其余区县均属于中度协调。

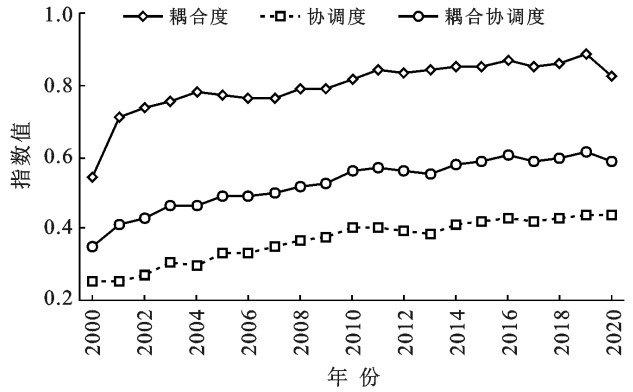


图 3 重庆市 2000—2020 年综合城镇化与生态系统健康之间的耦合协调度的变化曲线
 Fig.3 Change curves of the coupling coordination between urbanization and ecosystem health in Chongqing City from 2000 to 2020

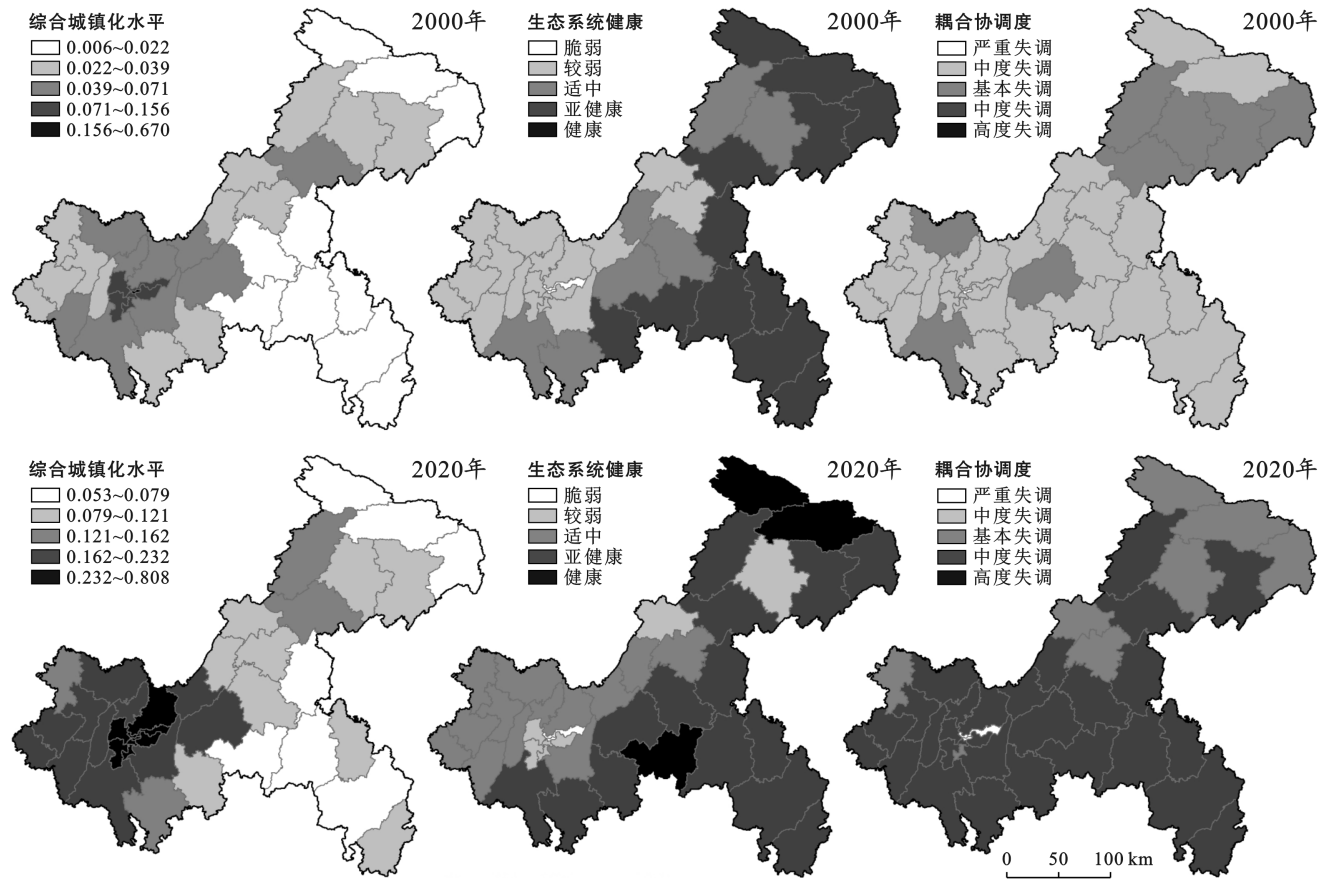


图 4 重庆市 2000—2020 年综合城镇化和生态系统健康以及二者间耦合协调度的空间格局
 Fig.4 Spatial patterns of urbanization and ecosystem health and their degree of coupling and coordination in Chongqing City from 2000 to 2020

总之,2000—2020 年重庆市各区县的综合城镇化水平均有所提升,但仍存在区域发展不均衡的问题,主要是都市功能核心区的地势较缓,利于城镇扩张,且因虹吸效应,拥有重庆市优质的市场资源、技术人员以及资金,得以快速发展,其水平最高;而都市功

能扩展区与都市发展新区得益于都市功能核心区的边缘效益而快速发展,此外,因成渝城市群一体化发展,其城镇化要素的聚集能力增强,发展潜力逐渐增强;渝东南与渝东北地区由于其高耸的地势对交通有所限制而发展较缓。而核心都市圈由于人口聚集、经

济提升导致人类活动强度增加以及建成区土地的扩张^[48],破坏了生态系统的结构与功能,从而导致生态系统健康状况下降;而都市功能拓展区和都市发展新区大量修建交通道路与公共住房,但人口密度比核心都市区低,人类活动较弱,其发展维持在生态环境承受范围内,并且人类的生态保护意识增强,因此该地区的生态健康水平有所提升;渝东南和渝东北地区由于高耸的地势,人口密度低,经济发展较缓,植被覆盖度高,资源开发强度相对较小,生态系统结构和功能相对完整,生态系统健康一直处于良好的状态。其中,大都市区地势平坦,利于建城区扩张,城市建设强度日渐增大,劳动人口的聚集以及经济的发展使得综合城镇化水平有很大的提升,并且大都市区经济较为发达,居民环保意识较强,愿主动改善生态环境,2020年的生态系统健康指数相较于2000年有较高的提升,因此二者间耦合协调度较高;而渝东南和渝东北地区山地丘陵较多,土地利用效率较低,经济发展水平以及城镇进程缓慢,综合城镇化水平提升程度较小,但植被覆盖率高,对草地林地的破坏较少,生态系统健康指数较高,因此该地区的2020年的耦合协调度较2000年有所提升。

3.3 综合城镇化与生态系统健康组分之间耦合协调性的时序分析

如图5所示,2000—2020年重庆市综合城镇化与生态系统健康组分之间交互耦合关系的时序变化。综合城镇化与活力、组织力、弹力以及服务之间的关系均呈对数上升的趋势,并且均由中度失调向中度协调转换。其中综合城镇化与活力间的耦合协调度由2000年的0.37提升至2020年的0.70;与组织力间的值由0.32提升至0.59;与弹力间的值由0.38提升至0.62;与服务间的值由0.38提升至0.59。

在综合城镇化与生态系统健康组分间的交互耦合关系中,以活力、组织力、弹力和服务为主导,由此表明,在发展前期,由人口的增加驱动着城镇的扩张,将大量的林地草地转换为建设用地,扩张的强度较大,导致弹力水平下降,但仍未达到活力、组织力和服务的阈值。然而在发展的后期,修建大量的道路,增加了景观的破碎度,导致组织力波动较大;对资源与能源需求的增加也会导致服务下降,最终导致生态系统健康状况下降。因此在发展前期,需要加大对弹力的保护;而在发展后期,需要增大供给以及斑块间的连通度。

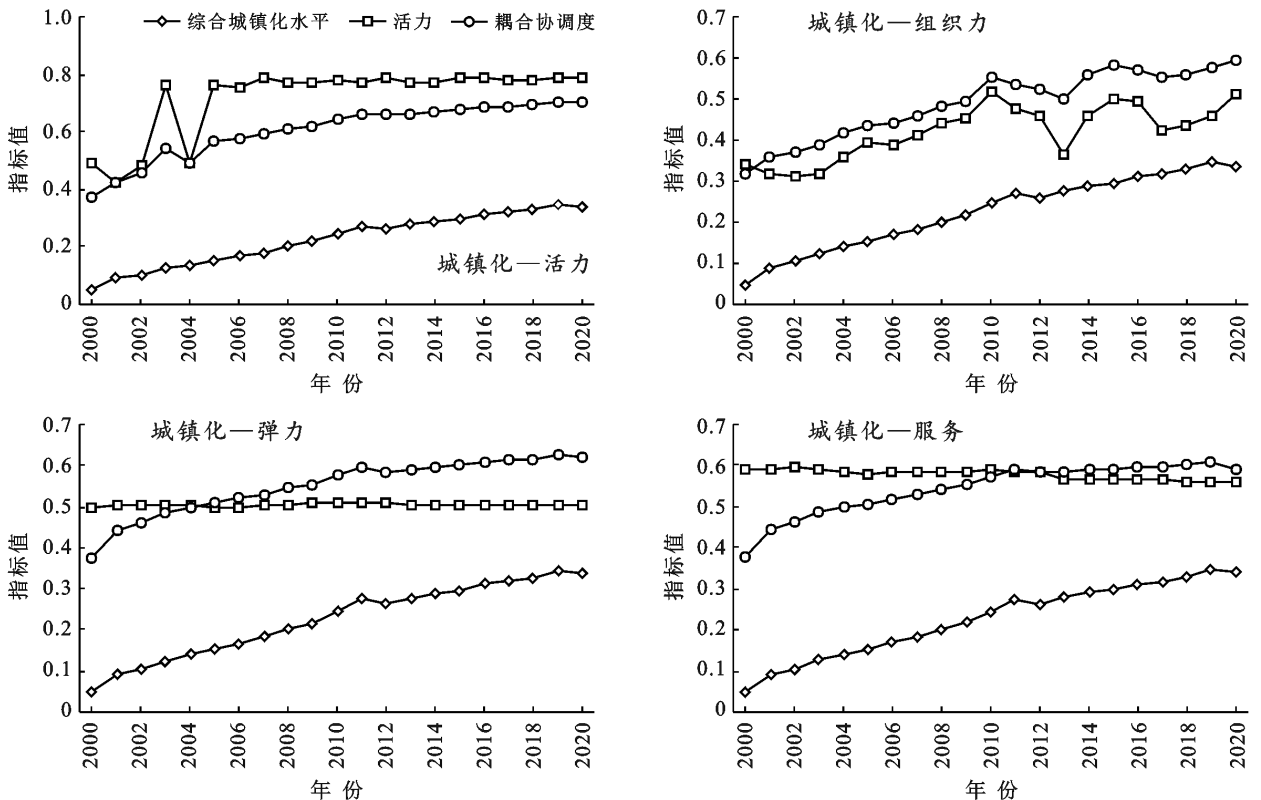


图5 重庆市2000—2020年综合城镇化与生态系统健康组分间交互耦合作用时间趋势

Fig.5 Temporal trends in interactive coupling between urbanization and ecosystem health subsystems in Chongqing City from 2000 to 2020

3.4 生态系统健康和综合城镇化亚系统之间耦合协调度的时序分析

如图 6 所示,2000—2020 年重庆市生态系统健康与社会城镇化、空间城镇化、经济城镇化和人口城镇化间交互耦合关系均呈对数上升的趋势。生态系统健康与社会城镇化间的耦合协调度值在 2000—2011 年由 0.34 提升至 0.41,在 2011—2020 年由 0.41 下降为 0.35;与空间城镇化间由 0.12 提升至 0.34;与经济城镇化间由 0.15 提升至 0.48;与人口城镇化间由 0.16 提升至 0.41。由图 6 可知,生态系统健康与城镇化亚

系统之间的交互关系中,后者一直处于滞后阶段。由此说明重庆市在发展前期,政府注重经济的发展,虽对环境造成一定破坏,仍在生态承载力以内;而在发展后期,产业结构发生转变,注重生态恢复与保护,因此生态系统一直处于较好的健康状况之中。重庆市自直辖以来,政策引导的新一轮城市发展,将大量农村劳动力流向城市,带来巨大的人口红利,但与之相配的医疗与教育资源不充足,因此社会城镇化虽在提升但一直处于较低的水平;由人口城镇化水平的提升推动着城市空间拓展以及经济发展,但水平都较低。

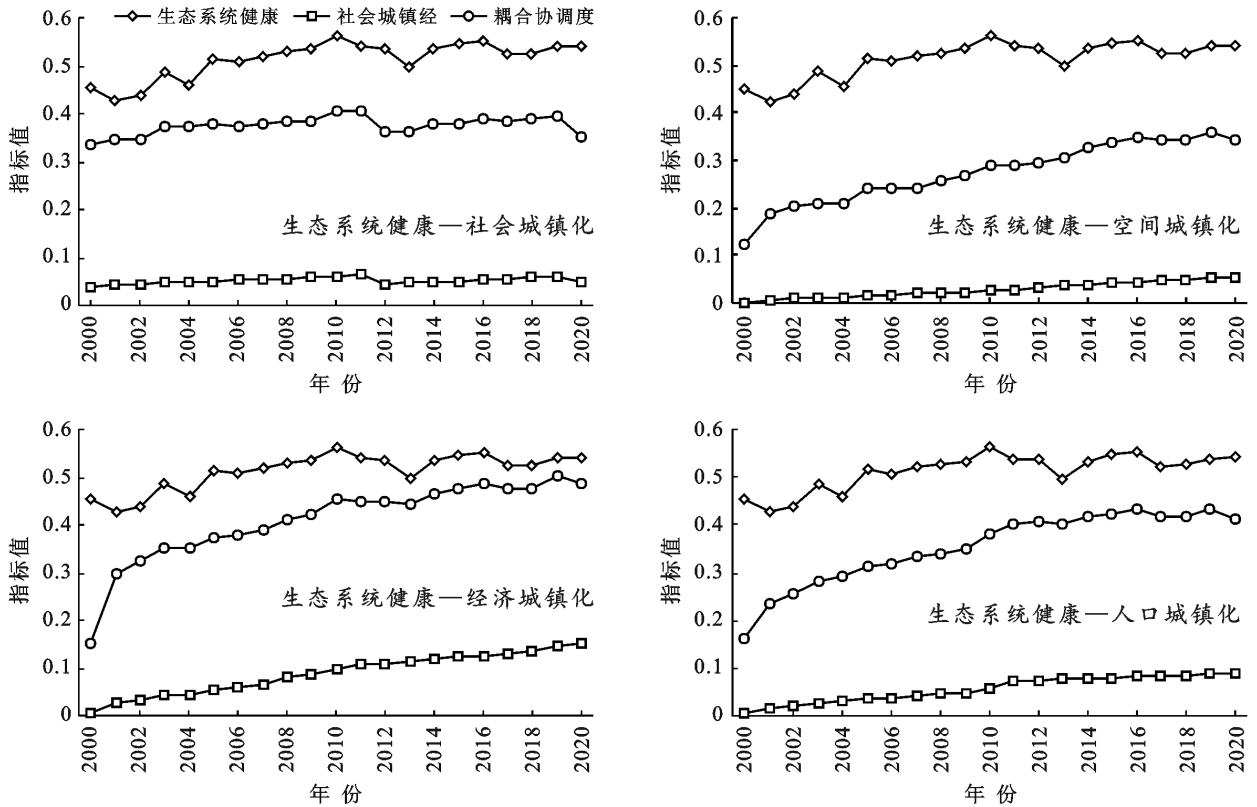


图 6 重庆市 2000—2020 年生态系统健康与综合城镇化亚系统之间交互耦合作用的时间趋势

Fig.6 Temporal trends in the interactive coupling between ecosystem health and urbanization subsystems in Chongqing City from 2000 to 2020

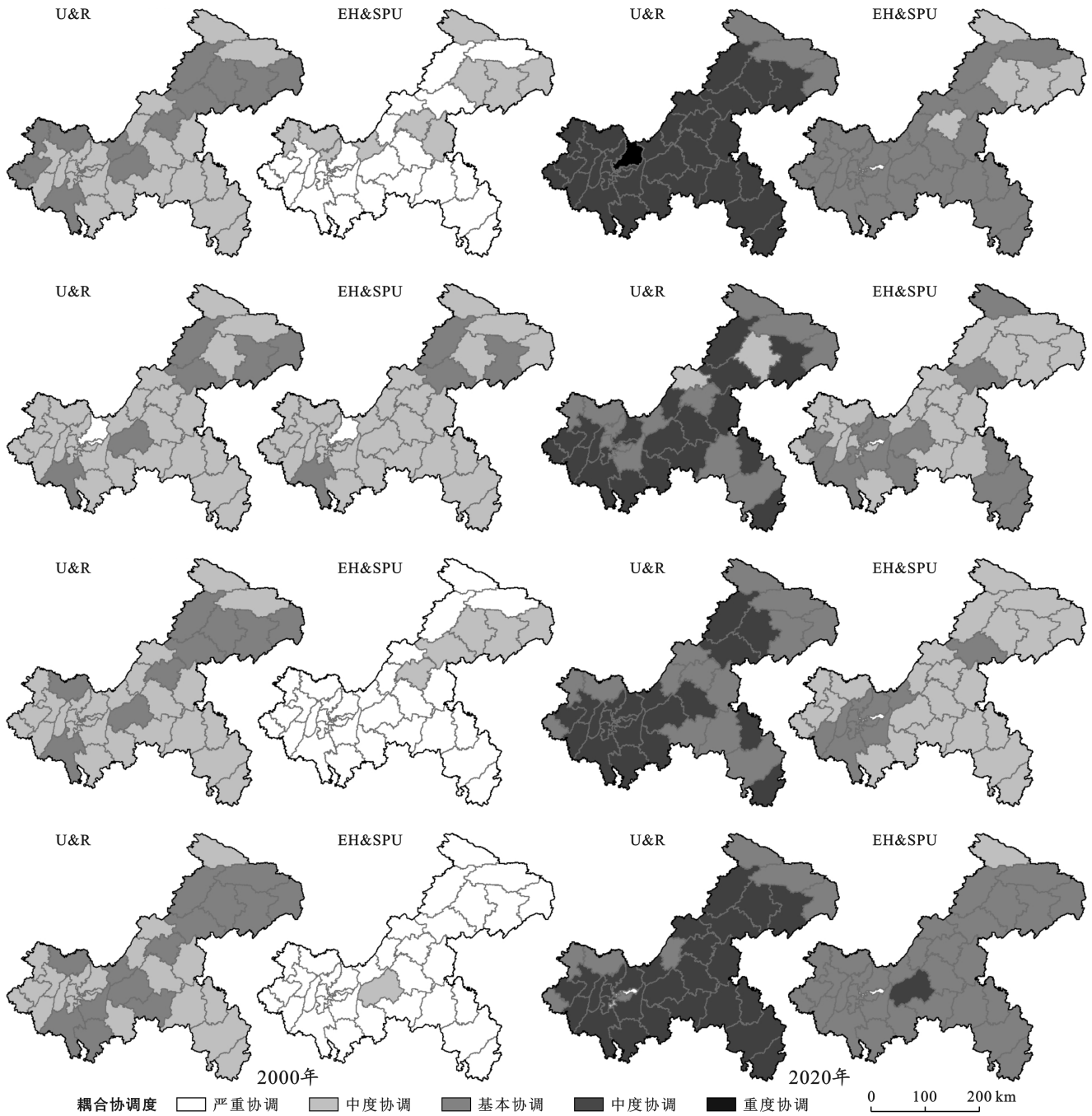
3.5 综合城镇化与生态系统健康亚系统之间交互耦合的空间格局

如图 7 所示,2000 和 2020 年重庆市综合城镇化与生态系统健康亚系统间的交互耦合关系的空间格局。重庆市城镇化与活力、组织力、弹力以及服务之间的交互耦合关系,主要由基本协调向中度协调转换。在 2000 年重庆市城镇化与活力、组织力、弹力与服务间的耦合协调度在都市区发展新区、渝东北处于基本协调的状态,其余地区均处于中度失调状态;2020 年城镇化与活力、组织力、弹力与服务之间的耦合协调度在大多处于中度协调的状态,其余地区均处于基本协调的程度。重庆市 2020 年生态系统健康与

综合城镇化亚系统之间的交互耦合度较 2000 年均有所提升。在 2000 年,都市区与渝东南地区的生态系统健康与人口城镇化之间的交互耦合关系为严重失调;与社会城镇化间,都市区与渝东南地区主要为中度失调;与经济城镇化以及空间城镇化之间,都市区与渝东南地区主要均为严重失调。在 2020 年,各区县生态系统健康与人口城镇化之间的交互耦合关系均为基本协调;与社会城镇化之间维持着中度失调的水平;与空间城镇化之间,都市功能核心区为基本协调,其余地区均为中度失调;与经济城镇化之间,各个区县均为基本协调的水平。其中重庆市 38 个区县 2020 年城镇化与生态系统健康组分间耦合协调度明显

高于 2000 年,其主要因为在发展前期城镇化水平低下,前期的发展主要依赖于 1994 年的住房市场改革和 1997 年重庆市的直辖政策,引领城市发展,推动大量农

村富余劳动力进入城镇,带来巨大人口红利,驱动人口城镇化发展。前期发展城镇化造成的污染也较小,对生态环境的压力最小,生态系统健康指数较高。



注:U&V 表示城镇化与活力间的交互耦合关系;U&O 表示城镇化与组织力间的交互耦合关系;U&R 表示指城镇化与弹力间的交互耦合关系;U&ES 表示城镇化与生态系统服务间的交互耦合关系;EH&PU 表示生态系统健康与人口城镇化间的交互耦合关系;EH&SOU 表示生态系统健康与社会城镇化间的交互耦合关系;EH&SPU 表示生态系统健康与空间城镇化间的交互耦合关系;EH&EU 表示生态系统健康与经济城镇化间的交互耦合关系。

图 7 重庆市城镇化和生态系统健康亚系统间交互耦合关系的空间格局

Fig.7 Spatial patterns of interaction and coupling between urbanization and ecosystem health subsystems in Chongqing City

在发展后期,得益于人口规模的扩大以及经济的快速发展,综合城镇化水平得到很大的提升,而生态系统健康指数有所下降,表明生态环境受到城镇化的影响,但仍在生态环境承载力以内,并且在城镇化进

展和工业化进程中,可持续发展理念和环保意识促使地方政府更加注重人和自然和谐相处^[49],并且随着对环境友好和环境技术投资的增加,环境污染问题得以改善,生态系统健康仍维持在较好的水平,因而

2020 年城镇化与生态系统健康组分间耦合协调度有明显的提升。其中 2020 年重庆市生态系统健康与城镇化亚系统之间的交互耦合度的值较 2000 年有所提升,但仍处于较低水平,并且城镇化亚系统的水平远低于生态系统健康的指数值,表明随着西部大开发战略的实施,国务院发布的《国务院关于推进重庆市统筹城乡改革和发展的若干意见》,以及住房和城乡建设部门发布的《全国城镇体系规划纲要(2010—2020 年)》,将大量农村剩余劳动力推向城市,带来了巨大的人口红利,但城镇医疗与教育资源的紧张,导致社会城镇化虽在提升但一直处于较低的水平^[50];由人口城镇化水平的提升推动着建成区的拓展以及经济的发展,但城市产业发展疲软^[48],增长的水平都较低,并且对生态环境造成一定程度的污染,致使生态系统健康指数呈缓慢下降的状态,因而耦合协调度水平较低。

4 结论和建议

本文运用熵值法量化了综合城镇化水平;使用了基于生态完整性和人类对生态系统服务需求的生态系统健康评价方法(活力—组织力—弹力—服务, V-O-R-S);其中对于要素耦合效应的研究分析表明,大多数研究者关注的是“一对一”的双要素耦合效应,揭示了单要素之间的耦合机制和规律,对“一对多”以及“多对多”要素间的耦合关系和机制的研究仍然缺乏,因此文本运用“一对多”的耦合协调度模型研究了 2000—2020 年重庆市县域尺度上城镇化与生态系统健康组分之间,以及生态系统健康与城镇化亚系统之间的交互耦合关系。主要发现如下:①融合人口、社会、经济及空间维度,重庆市的综合城镇化水平从 2000 年的 0.05 提升至 2020 年的 0.34,其中城镇化的发展由人口增长和城镇扩张的初始阶段转换为后期以经济增长驱动发展的阶段,仍存在空间发展不均衡的问题,大都市区的综合城镇化水平平均高于渝东南和渝东北地区;②2000—2020 年的生态系统健康指数一直处于适中状态(0.43~0.56),在所有组分中活力对其有较大的影响,其中综合城镇化水平较高的都市区的生态系统健康状况恶化显著,而地势高耸且综合城镇化水平较低的渝东南生态保护区与渝东北生态涵养发展区的生态系统健康状况良好。③城镇化与生态系统健康组分以及生态系统健康与城镇化亚系统的交互耦合轨迹处于倒 U 形曲线左侧,仍未到达拐点,因此重庆市要实现高质量、具有韧性且可持续的发展,仍需走因地制宜、绿色发展的道路,解决时空不均问题。

对此提出以下有效且可行的政策建议:大都市区的耦合协调度相对较高,但生态系统健康状况薄弱仍是制约城镇化发展的主要因素。大规模的城市扩张破坏了地表植被,导致生物多样性减少。因此,这些地区应实施生态修复,加强绿色基础设施建设,促进产业结构转型、优化和升级,以提高资源和环境的承载能力^[33]。无序的路网扩张增加了景观破碎化程度,阻碍了物质循环和能量流动。因此,该地区应进一步完善生态廊道,基础设施建设应尽量避免林地和耕地,确保自然生态系统斑块的完整性。人口集聚和城市扩张对资源和环境的承载能力施加巨大压力,导致自然生态系统的抗逆力下降。因此,在城市化过程中,政府应进行合理的空间规划,避免城市盲目扩张,提高土地利用效率,缓解生态环境压力^[23]。人口的快速增长伴随着对生态系统产品和服务需求的增加。然而,不合理的资源开发和城市建设破坏了生态系统服务的供需平衡。因此,这些地区应关闭资源消耗产业,发展绿色服务业,建立自然保护区,形成低消费、绿色、低碳的生态系统服务体系^[48]。渝东北和渝东南的耦合协调度相对较低,城市化滞后是两者不和谐的主要原因。本地区应摒弃资源产出、能源消耗的传统经济发展模式,这种模式不仅造成严重的生态环境问题,而且制约了城市的可持续发展。未来,区域要立足自身生态环境优势,发展旅游、绿色、创新产业,打造三峡旅游区、乌江廊等一批文化旅游品牌,提升区域影响力和经济水平^[51]。该地区还面临人才流失的问题,影响了该地区整体城镇化水平。因此,政府应实施一些吸引人才的有利政策,提高城市公共服务和管理能力,鼓励农村人口就近工作,确保人人享有同等的公共服务。由于地形的限制,该地区约 64.21% 的新扩建土地坡度超 25°,增加了地质灾害的潜在风险^[52]。因此,该区域应充分考虑地质生态环境的脆弱性和敏感性,合理布局空间,避免城市大规模扩张。采取多中心发展模式,有利于栖息地保护,降低地质灾害风险。政府应提高居民整体教育水平,加强生态保护知识的宣传,增强公众对环境友好型生活方式的意识。本研究希望上述政策建议能够为推动生态保护和城镇化高质量发展提供一条绿色、低碳、创新的道路。

[参 考 文 献]

- [1] 方创琳. 改革开放 40 年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 1-9.
- [2] Bian Hongyan, Gao Jie, Wu Jianguo, et al. Hierarchical analysis of landscape urbanization and its impacts on regional sustainability: A case study of the Yangtze River

- Economic Belt of China [J]. *Cleaner Production*, 2021, 279:123267.
- [3] Kang Peng, Chen Weiping, Hou Ying, et al. Spatial-temporal risk assessment of urbanization impacts on ecosystem services based on pressure-status-response framework [J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1):1-11.
- [4] Peng Jian, Tian Lu, Zhang Zimo, et al. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a karst landscape in China [J]. *Ecosystem Services*, 2020,46:101199.
- [5] He Chunyang, Gao Bin, Huang Qingxu, et al. Environmental degradation in the urban areas of China: Evidence from multi-source remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,193:65-75.
- [6] Jonathan Foley. Living by the lessons of the planet [J]. *Science*, 2017,356(6335):251-252.
- [7] Alma Mendoza-Ponce, Rogelio Corona-Nunez, Florian Kraxner, et al. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico [J]. *Global Environmental Change*, 2018,53:12-23.
- [8] Chang Mingyang, Luo Xinyi, Zhang Yaru, et al. Land-use diversity can better predict urban spontaneous plant richness than impervious surface coverage at finer spatial scales [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,323:116205.
- [9] Fang Chuanglin, Liang Longwu, Chen Dan. Quantitative simulation and verification of urbanization and eco-environment coupling coil in Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,83:103985.
- [10] Lu Yonglong, Yuan Jingjing, Lu Xiaotian, et al. Major threats of pollution and climate change to global coastal ecosystems and enhanced management for sustainability [J]. *Environmental Pollution*, 2018,239:670-680.
- [11] Fu Bojie, Mark Stafford-Smith, Wang Yanfen, et al. The Global-DEP conceptual framework: Research on dryland ecosystems to promote sustainability [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48:17-28.
- [12] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展 [J]. *地理学报*, 2019,74(12):2431-2436.
- [13] Liu Jiyuan, Deng Xiangzheng. Impacts and mitigation of climate change on Chinese cities [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011,3(3):188-192.
- [14] 张艺帅, 赵民, 程遥. 面向新时代的城市体系发展研究及其规划启示: 基于“网络关联”与“地域邻近”的视角 [J]. *城市规划*, 2021,45(5):9-20.
- [15] 任宇飞, 方创琳, 孙思奥, 等. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展 [J]. *地理学报*, 2020,75(3):589-606.
- [16] Gene M. Grossman, Alan B. Krueger. *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* [M]. UK: Cambridge, 1991.
- [17] Jill L. Caviglia-Harris, Dustin Chambers, James R. Kahn. Taking the “U” out of Kuznets: A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation [J]. *Ecological Economics*, 2009,68(4):1149-1159.
- [18] Bashir Muhammad. Energy consumption, CO₂ emissions and economic growth in developed, emerging, and Middle East and North Africa countries [J]. *Energy*, 2019,179:232-245.
- [19] Liu Wenjie, Jiao Fengchao, Ren Lijun, et al. Coupling coordination relationship between urbanization and atmospheric environment security in Jinan City [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,204:1-11.
- [20] Fang Chuangling, Liu Haimeng, Wang Shaojian. The coupling curve between urbanization and the eco-environment: China’s urban agglomeration as a case study [J]. *Ecological Indicators*, 2021,130:108107.
- [21] Tang Feng, Wang Li, Guo Yiqiang, et al. Spatio-temporal variation and coupling coordination relationship between urbanization and habitat quality in the Grand Canal, China [J]. *Land Use Policy*, 2022,117:106119.
- [22] Wang Jieyu, Wang Shaojian, Li Shijie, et al. Coupling analysis of urbanization and energy-environment efficiency: Evidence from Guangdong province [J]. *Applied Energy*, 2019,254:113650.
- [23] Xie Xue, Fang Bin, Xu Hanzeyu, et al. Study on the coordinated relationship between urban land use efficiency and ecosystem health in China [J]. *Land Use Policy*, 2021,102:105235.
- [24] He Jianhua, Pan Zhenzhen, Liu Dianfeng, et al. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,673:553-564.
- [25] 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.
- [26] Pan Zhenzhen, He Jianhua, Liu Dianfeng, et al. Predicting the joint effects of future climate and land use change on ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Applied Geography*, 2020,124:102293.
- [27] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法 [J]. *生态学报*, 2001,21(11):1885-1892.
- [28] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向 [J]. *生态学报*, 2001,21(12):2106-2116.
- [29] Chen Jiandong, Li Zhiwen, Dong Yizhe, et al. Coupling coordination between carbon emissions and the eco-environment in China [J]. *Cleaner Production*,

- 2020,276:123848.
- [30] Bai Xuemei, Shi Peijun, Liu Yanshi. Society: Realizing China's urban dream [J]. *Nature*, 2014,509(7499): 158-160.
- [31] Fang Chuanglin, Liu Haimeng, Li Guangdong. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016,26(8):1081-1116.
- [32] Zhao Yabo, Wang Shaojian, Zhou Chunshan. 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.
- [33] Liao Shiju, Wu Ya, Siu Waiwong, et al. Provincial perspective analysis on the coordination between urbanization growth and resource environment carrying capacity(RECC) in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020,730(9):138964.
- [34] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [35] 刘纪远,张增祥,庄大方,等.20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].*地理研究*,2003,22(1):1-12.
- [36] Kang Peng, Chen Weiping, Hou Ying, et al. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Science of The Total Environment*, 2018,636:1442-1454.
- [37] Peng Jian, Liu Yanxu, Wu Jiansheng, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015,143:56-68.
- [38] Li Weijie, Xie Shiyong, Wang Yong, et al. Effects of urban expansion on ecosystem health in Southwest China from a multi-perspective analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,294(6141):126341.
- [39] 陈万旭,赵雪莲,钟明星,等.长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析[J].*生态学报*,2022,42(1): 138-149.
- [40] Benjamin Burkhard, Franziska Kroll, Felix Müller, et al. Landscapes' capacities to provide ecosystem services: A concept for land-cover based assessments [J]. *Landscape Online*, 2009,15:1-22.
- [41] Xu Qian, Yang Ren, Zhuang Dachang, et al. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,279:123849.
- [42] Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhen Lin, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services [J]. *Ecosystem Services*, 2017,26:146-15.
- [43] Chen Junyu, Jiang Bo, Bai Yang, et al. Alatalo, Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization [J]. *Science of The Total Environment*, 2019,650:1426-1439.
- [44] Tang Panli, Huang Jiejun, Zhou Han, et al. Local and telecoupling coordination degree model of urbanization and the eco-environment based on RS and GIS: A case study in the Wuhan urban agglomeration [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021,75:103405.
- [45] Muhadaisi Ariken, Zhang Fei, Nwc D, et al. Corrigendum to "Coupling coordination analysis and spatio-temporal heterogeneity between urbanization and eco-environment along the silk road economic belt in China" [J]. *Ecological Indicators*, 2020,121:107014.
- [46] Yang Yi, Hu Na. The spatial and temporal evolution of coordinated ecological and socioeconomic development in the provinces along the Silk Road Economic Belt in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,47: 101466.
- [47] Shi Tao, Yang Shenyan, Zhang Wei, et al. Coupling coordination degree measurement and spatiotemporal heterogeneity between economic development and ecological environment: Empirical evidence from tropical and subtropical regions of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,244:118739.
- [48] Yang Chun, Zeng Wei, Yang Xin. Coupling coordination evaluation and sustainable development pattern of geo-ecological environment and urbanization in Chongqing Municipality, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,61:102271.
- [49] Chen Wanxu, Gu Tianci, Zeng Jie. Urbanization and ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River urban agglomerations, China: A U-curve relationship [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,318:115565.
- [50] 张引,杨庆媛,闵婕.重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析[J].*地理学报*,2016,71(5):817-828.
- [51] Chen Jiandong, Li Zhiwen, Dong Yizhe, et al. Coupling coordination between carbon emissions and the eco-environment in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,276:123848.
- [52] Jia Liuyao, Ma Qun, Du Chunlan, et al. Rapid urbanization in a mountainous landscape: patterns, drivers, and planning implications [J]. *Landscape Ecology*, 2020,35(11):2449-2469.