

# 成都都市圈生态与社会经济系统耦合协调动态演化、多情景模拟及其政策启示

刘 轶, 王倩娜, 廖奕晴

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

**摘要:** 成都都市圈作为长江上游重要的生态屏障区和经济中心,开展生态—社会经济耦合协调研究对其可持续发展具有重要意义。利用InVEST模型分析研究区2010年、2015年、2020年生态系统服务功能变化,通过耦合协调度模型分析其与社会经济系统的耦合协调动态演化过程,基于InVEST—PLUS模型模拟分析2035年自然发展、产业引领、绿色低碳三种情景下生态与社会经济系统的耦合协调变化趋势。结果表明:(1)2010年、2015年、2020年生态系统综合服务指数平均值分别为0.43、0.41、0.44,总体处于一般等级,空间分布无较大差异,整体呈“西部优于东部、中部最低”的特点;(2)2010—2020年,两系统间耦合协调度由0.29上升至0.36,实现了由中度失调向轻度失调状态的转变,但空间分布不平衡,整体格局由“东部优于西部”转为“西部优于东部”;(3)2020—2035年,两系统间耦合协调水平持续改善,三种情景耦合协调度由大到小依次为:绿色低碳情景>自然发展情景>产业引领情景,表明修复治理措施力度的加大有利于改善研究区大部分区域的协调状态。根据研究结果提出筑屏“三山”、涵养“三江”、协同“三区”三点政策启示,可为成都都市圈可持续协调发展提供科学依据和支撑,亦可为其他都市圈提供参考和样本。

**关键词:** 耦合协调;多情景模拟;InVEST模型;PLUS模型;成都都市圈

党的“十八大”以来,习近平总书记多次强调“绿水青山就是金山银山”理念<sup>[1]</sup>,指明了实现发展和保护协同共生的新路径。在此背景下,如何处理好人与自然的关系、从保护自然中寻找发展机遇是中国实现可持续发展的重要方向。2021年11月,四川省政府正式印发《成都都市圈发展规划》<sup>[2]</sup>(以下简称“《规划》”),这是继南京都市圈、福州都市圈后,国家层面批复的第三个都市圈规划,也是中西部首个都市圈规划<sup>[3]</sup>。与南京、福州都市圈相比,成都都市圈总体还处于起步阶段,存在资源环境约束趋紧、城镇空间布局与生态环境承载力适应度及匹配性低等问题<sup>[4]</sup>。且作为长江上游重要的生态屏障区和经济中心,“在优化提升生态功能的同时,为成渝双城经济圈建设提供有力支撑”<sup>[2]</sup>是成都都市圈发展的总体要求。

目前,成都都市圈的既往研究多集中于轨道交通<sup>[5]</sup>、空间结构<sup>[6]</sup>、经济一体化等<sup>[7]</sup>领域,生态系统方面的系统研究<sup>[8]</sup>尚不多见,尤其是缺少充分考虑生态系统功能与社会经济发展关系,对两者进行统筹分析的耦合类研究。耦合协调是指两个及以上的系统之间,

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500581); 成都市科技项目(2019-RK00-00261-ZF)

作者简介: 刘轶(2000-),女,湖南岳阳人,硕士,研究方向为风景园林规划与设计、新能源景观。

E-mail: 1575124783@qq.com

通讯作者: 王倩娜(1986-),女,重庆人,博士,副教授,研究方向为生态空间规划、绿色基础设施、新能源景观、基于3S技术的景观生态分析。E-mail: qnwang@scu.edu.cn

通过自身或外界的不断交互作用而彼此影响以达到一定协同水平的现象<sup>[9]</sup>。在其他都市圈或城市群中,生态与经济的耦合协调已成为研究热点,如秦晓川等<sup>[10]</sup>构建青岛都市圈生态系统服务与经济一致性指数,以探讨二者时空协调性特征;孙久文等<sup>[11]</sup>依据耦合协调度模型、空间自相关和地理探测器,分析黄河流域七大城市群2007—2019年生态保护和经济发展耦合协调时空特征与驱动机制。

近年来,耦合协调相关研究已从定性现状分析转向定量趋势评价,并从不同角度提出了库兹涅茨曲线(EKC)计量、耦合协调度、系统动力学和剪刀差方法等模型。目前,国内相关研究主要是通过构建生态与社会经济系统的指标体系,利用耦合度和耦合协调度模型,量化分析两者间的耦合协调情况。研究方法上,多基于马世骏等<sup>[12]</sup>的“社会—经济—自然复合生态系统指标体系”作出地域性调整,指标值多源于统计数据;研究内容上,大多仅分析某一时时间段的耦合协调发展变化及其驱动机制<sup>[11]</sup>,从土地利用变化入手模拟未来耦合协调趋势的研究极少。

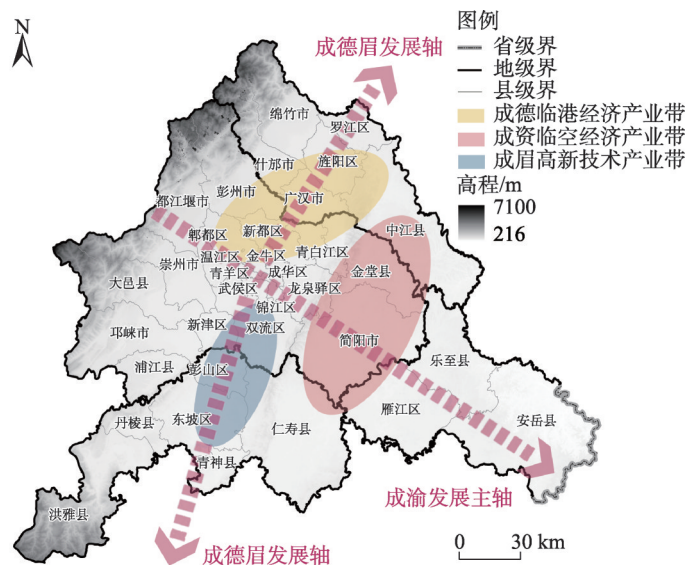
为解决以往采用统计数据评价区域生态质量,导致生态系统自然属性被掩盖的问题,赵武生等<sup>[13]</sup>已尝试基于InVEST模型,通过评估多种生态系统服务功能来剖析经济—社会—生态子系统的耦合协调关系及时空变化特征。土地利用类型是决定生态系统服务功能的重要因素<sup>[14]</sup>,土地利用类型的变化会改变生态系统的结构、过程和功能<sup>[15]</sup>,进而显著影响生态系统服务功能。因此,越来越多的学者耦合InVEST模型和CLUE-s、FLUS、PLUS等土地利用模拟模型进行碳储量变化<sup>[16]</sup>、生境质量变化<sup>[17]</sup>等预测研究。其中,PLUS模型通过融合转化分析策略和格局分析策略,避免了转化类型随类别增加呈指数增长的缺陷<sup>[18]</sup>,适用性更强。然而,将InVEST-PLUS模型引入耦合协调关系的研究并不多见。综上所述,随着绿色经济时代区域协调发展战略的深入实施,InVEST-PLUS模型在耦合协调动态演化及多情景模拟领域具有较好的应用前景。

鉴于此,本文以成都都市圈为研究区域,首先利用InVEST模型分析研究区2010年、2015年、2020年生态系统服务功能变化,而后通过耦合协调度模型分析其与社会经济系统的耦合协调动态演化过程。最后,基于InVEST-PLUS模型和耦合协调度模型对2035年自然发展、产业引领、绿色低碳三种情景下的耦合协调变化趋势进行模拟。旨在明确成都都市圈生态与社会经济的协调发展程度和时空变化规律,以为成都都市圈可持续发展提供科学依据和支撑,亦可为其他都市圈提供参考和样本。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

成都都市圈(102°49′~105°27′E, 29°15′~31°42′N)由成都市、德阳市、眉山市及资阳市组成,地处四川盆地西部,总面积3.31万km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。气候温和,四季分明,属亚热带季风湿润气候。地势西高东低,河网纵横,总体呈“两分山地、四分平坝、四分丘陵”的格局<sup>[19]</sup>。截至2020年,域内常住人口2966.31万人,常住人口城镇化率56.55%,地区生产总值(GDP)2.23万亿元<sup>[20]</sup>。进行生态与社会经济耦合协调关系的动态演变及模拟研究,是落实成都都市圈总体发展要求、推动“两轴三带”(图1)高质量建设的重要举措。



注：图片来源于《成都都市圈发展规划》<sup>[2]</sup>。

图1 成都都市圈地理位置及其“两轴三带”空间布局规划示意图

Fig. 1 Location of Chengdu Metropolitan Area and its spatial layout plan of "two axes and three belts"

## 1.2 数据来源

开展本文所采用的数据见表1，所有数据坐标系统一为WGS\_1984\_UTM。成都市与资阳市行政边界统一采用2016年成都市代管简阳市之后的边界线进行计算。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 综合评价指标体系构建

成都都市圈综合评价指标体系包括生态与社会经济两大系统。生态系统方面，参考《规划》“推进流域协同治理、加强大气污染联防联控、联合开展土壤污染防治与固废处置、协同推进全面绿色低碳转型发展<sup>[2]</sup>”等指导意见及既往研究<sup>[24]</sup>，选择水源涵养、土壤保持、固碳释氧、生境质量四项生态系统服务功能作为一级指标。社会经济系统方面，参考相近尺度研究<sup>[25]</sup>，选取经济发展指数、社会发展指数两个一级指标。后根据《规划》中“到2025年，成都都市圈经济总量突破3.3万亿元，城乡居民人均可支配收入接近东部发达地区水平，常住人口城镇化率达75%<sup>[2]</sup>”的发展目标，选择GDP、常住人口城镇化率、人口规模、城乡居民人均可支配收入四个二级指标。所有指标的权重均采用层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）—熵权法确定（表2）。

### 1.3.2 基于InVEST模型的生态系统服务功能评估

采用InVEST模型评估研究区2010年、2015年、2020年、2035年水源涵养、土壤保持、固碳释氧、生境质量四项生态系统服务功能。水源涵养模块（Water Yield）采用基于水量平衡的估算方法，生物物理表参数参考刘宇<sup>[26]</sup>研究结果和InVEST模型用户指南设置，模型结果与四川省水资源公报数据多次对比并反复调试后，确定季节性因子Z值取1.2时，模型效果最佳。泥沙输移比模块（Sediment Delivery Ratio）是基于经典土壤流失方程（USLE）的一种改进，包括土壤侵蚀减少量和泥沙持留量两部分，土壤保持措施因子P值根据周彬等<sup>[27]</sup>研究设置。碳储量模块（Carbon Storage and Sequestration）运用土地

表1 数据类型及来源  
Table 1 Data types and sources

数据类型	数据名称	数据年份	数据来源	单位	分辨率
基础数据	行政边界	2020	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn/">http://www.geodata.cn/</a> )	—	矢量数据
	土地利用	2010、2015、2020	武汉大学年度中国土地覆盖数据集 (CLCD) <sup>[21]</sup>	—	30 m
自然环境 数据	年降雨量*	2010、2015、2020	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn/">http://www.geodata.cn/</a> )	mm	1 km
	潜在蒸散量			—	—
	年均气温*	2020	资源环境科学与数据中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	°C	1 km
	流域及子流域边界	2010、2015、2020		—	矢量数据
	国家公园、自然保护区	2020		—	—
	中国土壤数据库	1995	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zhans/">http://data.tpdc.ac.cn/zhans/</a> )	—	1 km
	DEM数据*	2020	地理空间数据云 ( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )	m	30 m
	坡度*		利用ArcGIS软件基于DEM数据计算所得	—	—
	坡向*			(°)	—
	到水体距离*	2020	基于全球地理信息资源目录服务系统 ( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> ) 中水体、铁路、高速公路、国道、省道、城市一级道路、城市二级道路、城市三级道路的矢量数据，经过ArcGIS欧氏距离计算得到	m	30 m
交通区位 数据	到铁路距离*				
	到高速公路距离*				
	到国道距离*				
	到省道距离*				
	到城市一级道路距离*				
	到城市二级道路距离*				
社会经济 数据	到城市三级道路距离*				
	GDP*	2010、2015、2020	四川省统计年鉴 <sup>[19,22,23]</sup>	亿元	统计数据
	常住人口城镇化率			%	
	人口规模			万人	
	城乡居民可支配收入	2020	地理国情监测云平台 ( <a href="http://www.dsac.cn/">http://www.dsac.cn/</a> )	元	
	人口密度*			人/km <sup>2</sup>	1 km

注：表中带\*数据为PLUS模型驱动因素所需数据。

利用数据和地上生物量、地下生物量、土壤、死亡有机质四大基本碳库的碳储量来估算碳固持，研究区不同地类的平均碳密度数据参照庄子薛等<sup>[8]</sup>以成德眉资地区为例的碳储量时空变迁研究设置。生境质量模块（Habitat Quality）以土地利用数据和每种威胁因子对生境的影响为基础<sup>[28]</sup>，人类活动强度越大，生境所受威胁越大。根据遥感影像资料及实地调研结果可知，研究区居民主要活动区域以耕地、建设用地和道路等为主，故选取耕地、建设用地、未利用地、主要交通道路（高速公路、国道、省道、铁路）作为威胁因子。参考滕雅丽等<sup>[29]</sup>研究和InVEST模型用户指南，确定各威胁因子的权重和最大影响距离，以及不同土地利用类型的生境适宜度和每种生境类型对各威胁因子的相对敏感性。

基于各生态系统服务功能的重要性差异，为量化四种生态系统服务功能的总体效应，本文运用熵权法求得水源涵养（0.25）、土壤保持（0.18）、固碳释氧（0.29）、生境



表2 综合评价指标体系及指标权重  
Table 2 The integrated evaluation index system and index weights

宏观系统	权重	一级指标	权重	二级指标	单位	权重	指标属性
生态系统	0.5	水源涵养服务功能	0.12	产水深度	mm	0.12	+
		土壤保持服务功能	0.09	土壤侵蚀模数	t/km <sup>2</sup>	0.09	-
		固碳释氧服务功能	0.14	碳储量	t/hm <sup>2</sup>	0.14	+
		生境质量服务功能	0.15	生境质量指数	—	0.15	+
社会经济系统	0.5	经济发展指数	0.28	GDP	亿元	0.15	+
				常住人口城镇化率	%	0.13	+
		社会发展指数	0.22	人口规模	万人	0.10	+
				城乡居民人均可支配收入	元	0.12	+

注：+表示正指标，-表示逆指标。某指标值越大评价价值越高则为正指标，某指标值越小评价价值越高则为逆指标。

质量（0.28）服务功能的权重，按权重叠加得到生态系统综合服务指数（Comprehensive index for ES, CES）<sup>[30]</sup>。基于ArcGIS平台自然间断点法，按CES值将生态系统综合服务分为差（0~0.2）、较差（0.2~0.4）、一般（0.4~0.6）、良（0.6~0.8）、优（0.8~1）五个等级。

1.3.3 耦合协调发展分析

采用极差法对所有指标进行标准化处理，再通过综合指数法得到生态系统综合评价指数  $F_{(x)}$  和社会经济系统综合评价指数  $F_{(y)}$ ，计算公式为：

$$F_{(x)} = \sum_{i=1}^m a_i x_i \ (i = 1, 2, [\dots], m); F_{(y)} = \sum_{j=1}^n b_j y_j \ (j = 1, 2, [\dots], n) \tag{1}$$

式中： $a_i$ 、 $b_j$  分别表示生态、社会经济系统第  $i$ 、 $j$  个指标的权重； $x_i$ 、 $y_j$  分别表示生态、社会经济系统第  $i$ 、 $j$  个指标标准化处理后的数值。当  $F_{(x)} > F_{(y)}$  时，为社会经济发展滞后型；当  $F_{(x)} < F_{(y)}$  时，为生态滞后型；当  $F_{(x)} = F_{(y)}$  时，为同步发展型。

通过耦合度模型，计算两系统间的耦合度  $C$ ，公式为：

$$C = \sqrt{\frac{F_{(x)} \times F_{(y)}}{[F_{(x)} + F_{(y)}]^2}} \tag{2}$$

综合发展指数反映生态与社会经济的综合水平，由  $F_{(x)}$  和  $F_{(y)}$  加权而来，计算公式为：

$$T = gF_{(x)} + hF_{(y)} \tag{3}$$

式中： $T$  表示两系统间的综合发展指数； $g$  和  $h$  分别表示生态系统和社会经济系统的权重。对于都市圈此类由经济、政治、文化和社会共同作用的地域空间组织形式而言，两系统同等重要，故本文设定  $g=h=0.5$ 。

为避免出现  $F_{(x)}$  和  $F_{(y)}$  都较低，但两者耦合度却很高的情况<sup>[25]</sup>，引入耦合协调度模型，计算公式为：

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{4}$$

式中： $D$  表示两系统间的耦合协调度， $D \in [0, 1]$ ， $D$  值越接近 1，系统整体的耦合协调程度越高。参照熊曦等<sup>[31]</sup>的划分标准，将研究区生态系统和社会经济系统的耦合协调度划

分为三大区间、10个等级（表3），并以市（区、县）为单位，绘制各行政区2010年、2015年、2020年、2035年耦合协调状态的空间分布及其变化图。

表3 耦合协调度等级划分标准

Table 3 Classification criteria for coupling coordination degree

协调等级	失调衰退区间				过渡调和区间		协调发展区间			
	极度失调	严重失调	中度失调	轻度失调	濒临失调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调
D值	(0, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.2, 0.3)	[0.3, 0.4)	[0.4, 0.5)	[0.5, 0.6)	[0.6, 0.7)	[0.7, 0.8)	[0.8, 0.9)	[0.9, 1)

1.3.4 基于PLUS模型的土地利用变化多情景模拟

PLUS模型主要包括用地扩张分析策略（Land Expansion Analysis Strategy, LEAS）和基于多类随机斑块种子的CA模型（CA based on multitype random patch seeds, CARS）两大模块。本文先利用LEAS模块，分析研究区2010—2015年、2015—2020年的用地扩张情况，再通过马尔可夫链计算得到2035年各类用地的需求，最后基于CARS模块预测2035年研究区土地利用变化情况。

（1）情景设置

为明确不同发展重点对研究区两大系统间耦合协调发展的影响，根据研究区现状、发展规划<sup>[2,4]</sup>和相关文献<sup>[8,30]</sup>设定了三种发展情景（表4）。

表4 多情景设定

Table 4 Settings for multi-simulation scenarios

情景类型	发展情况	生态保护目标	土地利用需求设置
自然发展情景	以2015—2020年土地利用变化规律为参考，不人为干预各类用地间的转化速率，土地利用需求基本不受政策调整的影响	青山绿道蓝网相呼应的城市生态格局基本形成	2015—2020年，研究区城镇化进程持续推进，故将相关数据视为2035年自然发展情景下的转移成本矩阵，通过马尔科夫链得到其土地利用需求
产业引领情景	将产业发展作为首要目标，聚焦粮食安全和第二、三产业升级问题。严格保证耕地不减少的同时，建设用地有序扩张	保护自然生态系统的基本稳定，提升森林、草原质量	调试模型后设定林地、草地转为耕地的概率增加15%，耕地转移为建设用地的概率减少20%，草地、水域、未利用地转为建设用地的概率增加20%
绿色低碳情景	将贯彻落实“双碳”战略作为首要目标，聚焦优化生态空间网络和筑牢生态绿色本底问题。重视对林地、草地等高碳汇能力生态系统的保护和修复	构筑多层次、网络化、功能复合的“一心一屏三网三环多片”生态空间格局	调试模型后设定耕地、水域转移为建设用地的概率降低40%，建设用地转为林地、草地、水域的概率增加20%

（2）驱动因素和限制因子的选取

本文共确定15项驱动因素和5项限制因子。驱动因素选取依据为：参考既往研究<sup>[8]</sup>，选取DEM、坡度、坡向、年均气温、年降雨量5项自然环境因素；多层次轨道交通网络和水利基础设施等建设会对土地利用方式产生显著影响，因此选取到铁路、高速公路、国道、省道、水体及城市一、二、三级道路的距离8项交通区位因素；此外，研究区设定了2025年GDP与常住人口城镇化率的具体目标<sup>[2]</sup>，因此选取GDP和人口密度2项社会经济因素。表1中带\*数据为驱动因素所需数据。

限制因子指一定时间内不会发生土地利用类型变化的区域<sup>[8]</sup>，该类区域被限制土地的开发和转换。研究区内包括大熊猫国家公园，白水河、龙溪—虹口2个国家自然保护区，岷山—邛崃山生物多样性保护区，龙门山、龙泉山、岷江、沱江等生态屏障，双

流、天府2处机场用地。

(3) 转移成本矩阵设定

转移成本矩阵反映当前用地类型转换为目标用地类型的可能，1代表可能转换，0代表不能转换。本文根据既往相关研究<sup>[8]</sup>及政策规划<sup>[2]</sup>，确定2035年多情景下的转移成本矩阵（表5）。

自然发展情景下，转移成本参考庄子薛等<sup>[8]</sup>以成德眉资地区为例的碳储量时空变迁研究设置。产业引领情景下，在自然发展情景基础上设定建设用地不会转为其他用地。又基于都市农业发展目标，设定耕地不会转为林地和草地。绿色低碳情景下，植被覆盖度提高、水土流失得到有效治理，故在自然发展情景基础上设定林地、草地、水体不会转为耕地，建设用地存在转为草地的可能。

(4) 邻域因子参数设置

邻域因子反映了不同用地类型中间及邻域范围内不同土地利用单元之间的相互作用<sup>[30]</sup>，数值范围为0~1，数值越大，表示该土地类型越难转化为其他地类，扩张能力越强，反之则越容易转变为其他地类。本文根据各用地类型扩张面积占比计算邻域因子，后结合不同情景下各用地类型的扩张趋势对邻域因子进行调整（表5）。

(5) 精度验证

基于PLUS模型，以2015年土地利用数据为基础模拟2020年土地利用数据，将其与2020年实际土地利用数据对比，得到混淆矩阵结果。计算结果表明：本文总体精度为0.938，Kappa系数为0.857，说明PLUS模型的模拟准确度较高，在本文中适宜性较好。

表5 成都都市圈多情景下土地利用转移成本矩阵及邻域因子参数设置

Table 5 Cost matrix and neighborhood factor parameter settings for land use transfer under multi-simulation scenarios in Chengdu Metropolitan Area

情景类型	2020年土地利用类型	2035年土地利用类型转移可能性						邻域因子参数
		耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	
自然发展情景	耕地	1	1	1	1	0	1	0.075
	林地	1	1	1	0	0	0	0.141
	草地	1	1	1	1	0	1	0.182
	水域	1	1	1	1	0	1	0.062
	未利用地	1	1	1	1	1	1	0.060
	建设用地	0	1	0	1	0	1	0.373
产业引领情景	耕地	1	0	0	1	0	1	0.106
	林地	1	1	1	0	0	0	0.113
	草地	1	1	1	1	0	1	0.056
	水域	1	1	0	1	0	1	0.067
	未利用地	1	1	1	1	1	1	0.102
	建设用地	0	0	0	0	0	1	0.430
绿色低碳情景	林地	1	1	1	1	0	1	0.047
	林地	0	1	1	0	0	0	0.257
	草地	0	1	1	1	0	0	0.305
	水域	0	1	1	1	0	1	0.173
	未利用地	1	1	1	1	1	1	0.071
	建设用地	0	1	1	1	0	1	0.353

1.3.5 基于PLUS-InVEST模型的耦合协调多情景模拟

将PLUS模型得到的2035年多情景下的土地利用结果，结合InVEST模型进行计算，得到2035年多情景下水源涵养、土壤保持、固碳释氧、生境质量的生态系统服务功能评估结果。再将其与未来社会经济指标（表6）代入耦合协调度模型，得到2035年多情景下的耦合协调发展模拟结果。

表6 成都都市圈2010—2020年社会经济指标赋值及2035年预测值

Table 6 Socio-economic indicators values from 2010 to 2020 and predicted values for 2035 in Chengdu Metropolitan Area					
指标	年份	成都市	德阳市	眉山市	资阳市
GDP/亿元	2010实际值	5889.5	917.3	542.0	348.9
	2015实际值	10662.3	1525.8	958.7	572.8
	2020实际值	17716.7	2404.1	1423.7	807.5
	2035预测值	43521.3	5681.3	3127.1	1894.7
常住人口城镇化率/%	2010实际值	65.8	41.3	34.1	30.7
	2015实际值	73.0	47.9	42.4	34.9
	2020实际值	78.8	56.0	50.1	41.3
	2035预测值	88.6	75.2	72.3	73.7
人口规模/万人	2010实际值	1405.5	361.7	295.2	366.5
	2015实际值	1685.3	348.5	297.9	347.6
	2020实际值	2094.7	345.7	295.6	231.0
	2035预测值	2200.0	341.7	310.3	325.0
城乡居民人均可支配收入/元	2010实际值	12897.0	10396.4	9461.78	9526.1
	2015实际值	25495.0	19918.0	19575.5	19354.0
	2020实际值	37508.0	29575.0	29311.0	28319.0
	2035预测值	74884.3	61251.0	58800.6	59665.4

未来社会经济指标预测采用政策规划目标与灰色预测GM(1, 1)模型相结合的方法，以2010年、2015年、2020年实际值和2025年、2030年目标值为样本，利用GM(1, 1)模型计算得到2035年预测值，再根据研究区经济现状和政策要求对2035年预测值作出合理调整。通过对研究区2010年、2015年、2020年经济运行数据的预测检验，已验证该方法的可行性和有效性。

2 结果分析

2.1 2010—2020年生态系统服务功能时空变化

研究区2010年、2015年、2020年CES平均值分别为0.43、0.41、0.44，总体处于一般等级，呈先降（降幅4.65%）后升（增幅7.32%）的态势。从不同等级CES面积占比看（图2），两极分化明显，以较差等级为主，优、良等级次之，一般和差等级极少（7%以下）。图3表明，2010—2015年研究区产水量和土壤保持量下降使生态系统综合功能受损；2015—2020年，《成都市生态文明建设2025规划》《德阳市“十三五”环境保护规划》等政策相继出台并落实到位，产水量和生境质量水平有所提升，生态修复工作显著改善了生态系统服务功能。

2010—2020年，研究区CES等级空间分布无较大差异（图4），整体呈“西部优于东



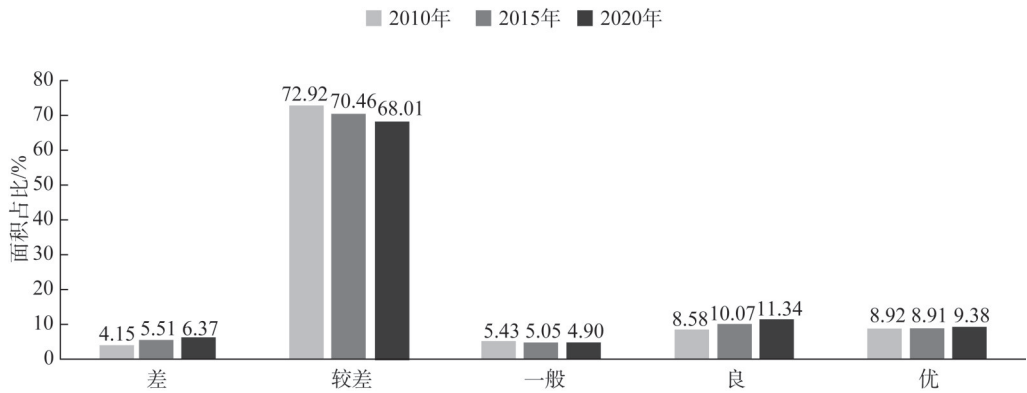


图2 成都都市圈2010—2020年不同等级CES面积占比

Fig. 2 Proportion of CES area at different levels from 2010 to 2020 in Chengdu Metropolitan Area

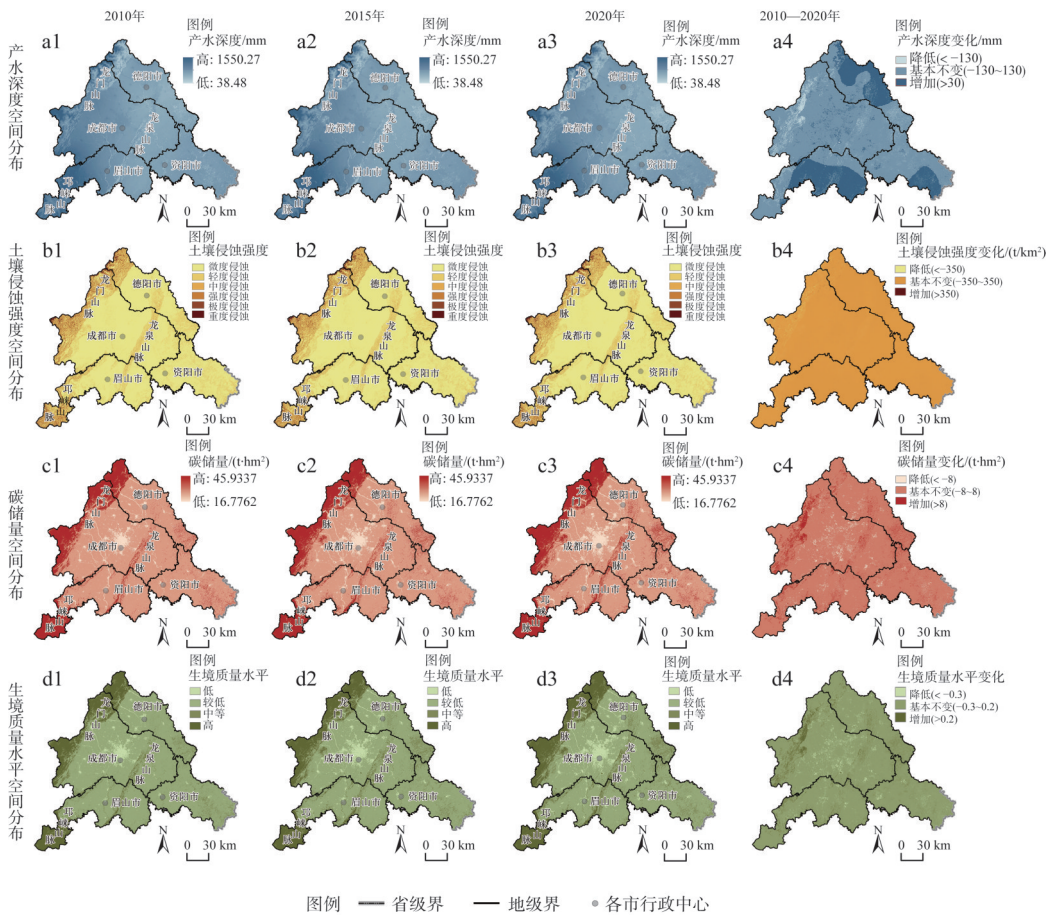


图3 成都都市圈2010—2020年生态系统服务功能空间分布及变化

Fig. 3 Spatial distribution and changes of ecosystem service functions from 2010 to 2020 in Chengdu Metropolitan Area

部、中部最低”的特点。优、良等级主要集中于龙门山脉、邛崃山脉、龙泉山脉附近，该区域以林地、草地为主，植被覆盖度高，水源涵养、固碳释氧、生境质量功能较强。受城镇化和人类活动影响，差等级区域逐年扩大且聚集度高，主要分布于人口密度大、

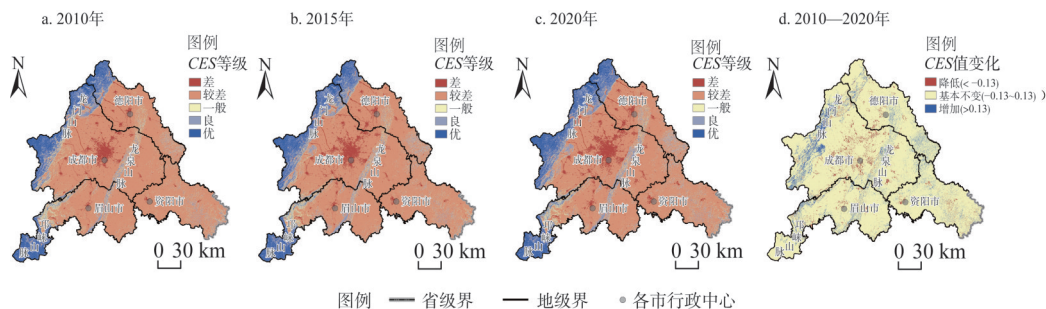


图4 成都都市圈2010—2020年CES等级空间分布及变化

Fig. 4 Spatial distribution and changes of CES levels from 2010 to 2020 in Chengdu Metropolitan Area

交通可达性高、硬质化水平高的各市行政中心附近，以建设用地为主。较差和一般等级区域面积逐年减少，主要分布于建成区与自然保护区之间，大部分为耕地，较少为环城生态区中的林地或草地。

10年内，研究区大部分区域CES等级基本不变（92.15%）。CES值上升区域的面积为1012.45 km<sup>2</sup>（3.06%）。其中，成都市崇州市、大邑县、都江堰市、彭州市、邛崃市通过建立自然保护地体系构建生态安全底线，碳储量和生境质量水平有效提升；德阳市中江县，眉山市丹棱县、青神县降雨量增加，蒸散量降低，使得其产水量显著增加。CES值下降的区域面积为1586.72 km<sup>2</sup>（4.79%），主要发生在城市建成区、高速路网及国省干道附近，包括成都市简阳市、锦江区、龙泉驿区、郫都区、青白江区、双流区、温江区、武侯区、新都区，德阳市广汉市、罗江区，眉山市仁寿县，资阳市雁江区。

## 2.2 2010—2020年耦合协调动态演化

### 2.2.1 综合评价指数分析

2010—2020年，研究区生态系统与社会经济系统发展水平呈“X”型变化（图5），生态系统增长速度小于社会经济系统。从综合发展的同步性看，2019年后，社会经济系统综合评价指数超过生态系统，协调类型由社会经济发展滞后型转为生态滞后型，表明经济发展对生态的促进作用大于生态对经济发展的贡献，可能发生以牺牲生态质量为代

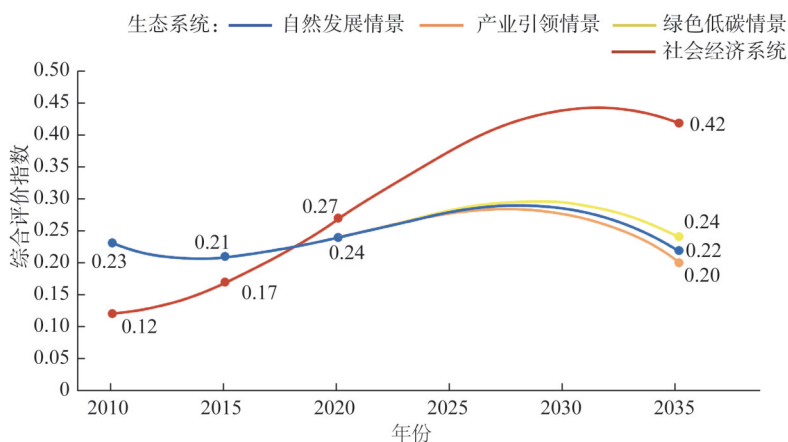


图5 成都都市圈2010—2035年生态系统与社会经济系统综合评价指数的多项式拟合趋势图

Fig. 5 Polynomial fitted trend graph for integrated evaluation indices of ecosystem and socio-economic system from 2010 to 2020 in Chengdu Metropolitan Area

价推动社会经济发展的情况。

2.2.2 耦合协调度时空变化

2010—2020年，研究区生态系统与社会经济系统耦合度、耦合协调度均呈上升趋势（表7）。耦合度由2010年的0.47增加至2015年的0.50后保持不变，两系统间的相互作用程度稳定，相互促进关系有所提升。耦合协调度由0.29上升至0.36，经历了由中度失调调整至轻度失调的过程。

2010—2020年，研究区协调状态空间分布差异较大（图6），整体格局由2010年、

表 7 成都都市圈 2010—2020 年生态系统与社会经济系统耦合协调发展评价结果

Table 7 Coupling coordination development evaluation results of ecosystem and socio-economic system from 2010 to 2020 in Chengdu Metropolitan Area

年份	耦合度 <i>C</i> 值	耦合类型	耦合协调度 <i>D</i> 值	协调状态	协调类型
2010	0.47	中度耦合	0.29	中度失调	社会经济发展滞后型
2015	0.50	中度耦合	0.31	轻度失调	社会经济发展滞后型
2020	0.50	中度耦合	0.36	轻度失调	生态发展滞后型

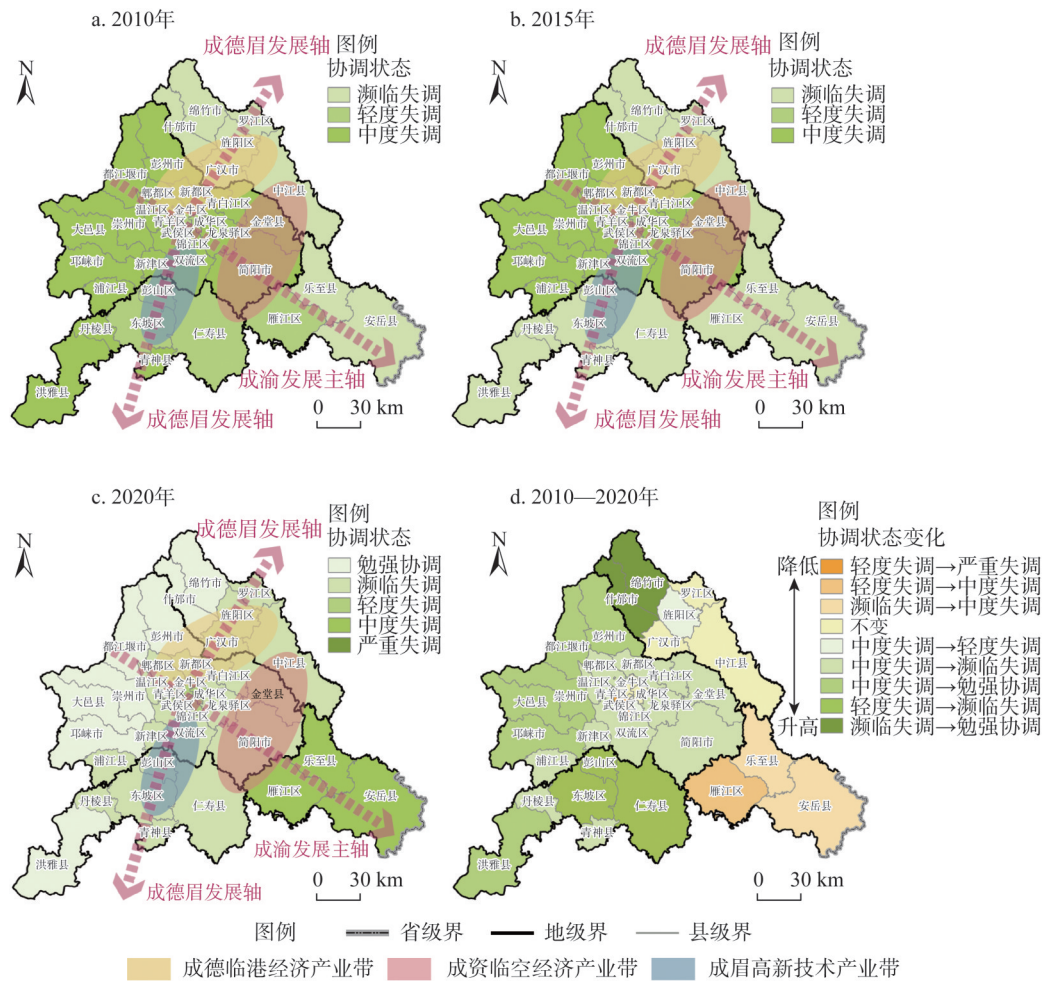


图 6 成都都市圈 2010—2020 年协调状态空间分布及变化

Fig. 6 Spatial distribution and changes of coordination status from 2010 to 2020 in Chengdu Metropolitan Area



2015年的“东部优于西部”转为2020年的“西部优于东部”，协调状态空间结构层次逐渐明显：高水平区域片状分布，集中于邛崃山脉、龙门山脉附近，包括成都市邛崃市、大邑县、崇州市、都江堰市、彭州市，德阳市什邡市、绵竹市，眉山市洪雅县；低水平地区零星分布，包括成都市武侯区和资阳市全域。整体由东向西递增梯度明显，相同状态分布较集中。

10年内，研究区71%区域耦合协调度上升，高水平协调状态区域明显增多。从“两轴三带”的发展布局来看，在建设长江上游重要生态屏障和大熊猫国家公园的背景下，作为成渝发展主轴起点的龙门山脉区域耦合协调度持续上升，由此带动了岷山、邛崃山的生物多样性保护工程，大熊猫、川金丝猴、牛羚、绿尾虹雉等珍稀野生动物及其栖息地得以重点保护。“三带”中，成眉高新技术产业带发挥了发展平台集聚和重大政策汇聚的显著优势，眉山市东坡区、彭山区、仁寿县协调状态优化提升。受虹吸效应影响，资阳市耦合协调度下降。

### 2.3 2035年多情景耦合协调模拟

2035年三种情景下研究区土地利用类型以耕地、林地和建设用地为主（图7），耕地、未利用地面积减小，建设用地面积增加。四种生态系统服务功能的分布与2020年相似（图8），高值区多为植被覆盖率较高的地区。基于此，得到2035年三种情景下生态系统与社会经济系统的耦合协调变化趋势模拟（图9）。

#### 2.3.1 综合评价指数分析

2020—2035年，研究区生态系统和社会经济系统综合评价指数均呈先上升后下降的

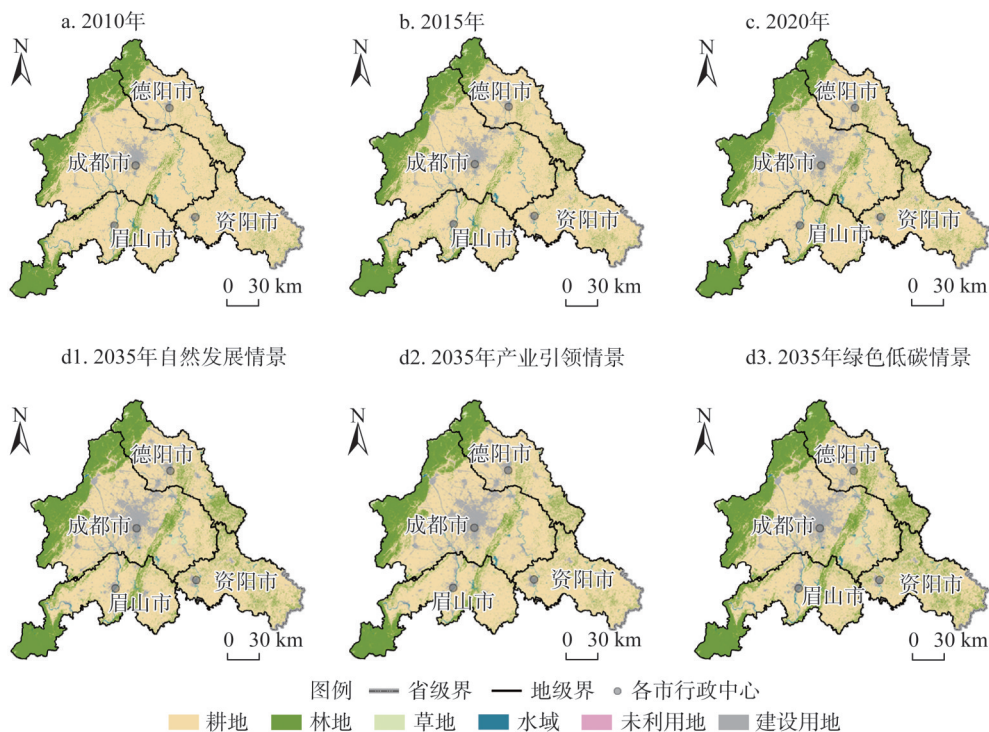


图7 成都都市圈2010—2020年土地利用类型及2035年多情景下的模拟土地利用类型

Fig. 7 Land use types from 2010 to 2020 and simulated land use types for 2035 under multi-simulation scenarios in Chengdu Metropolitan Area



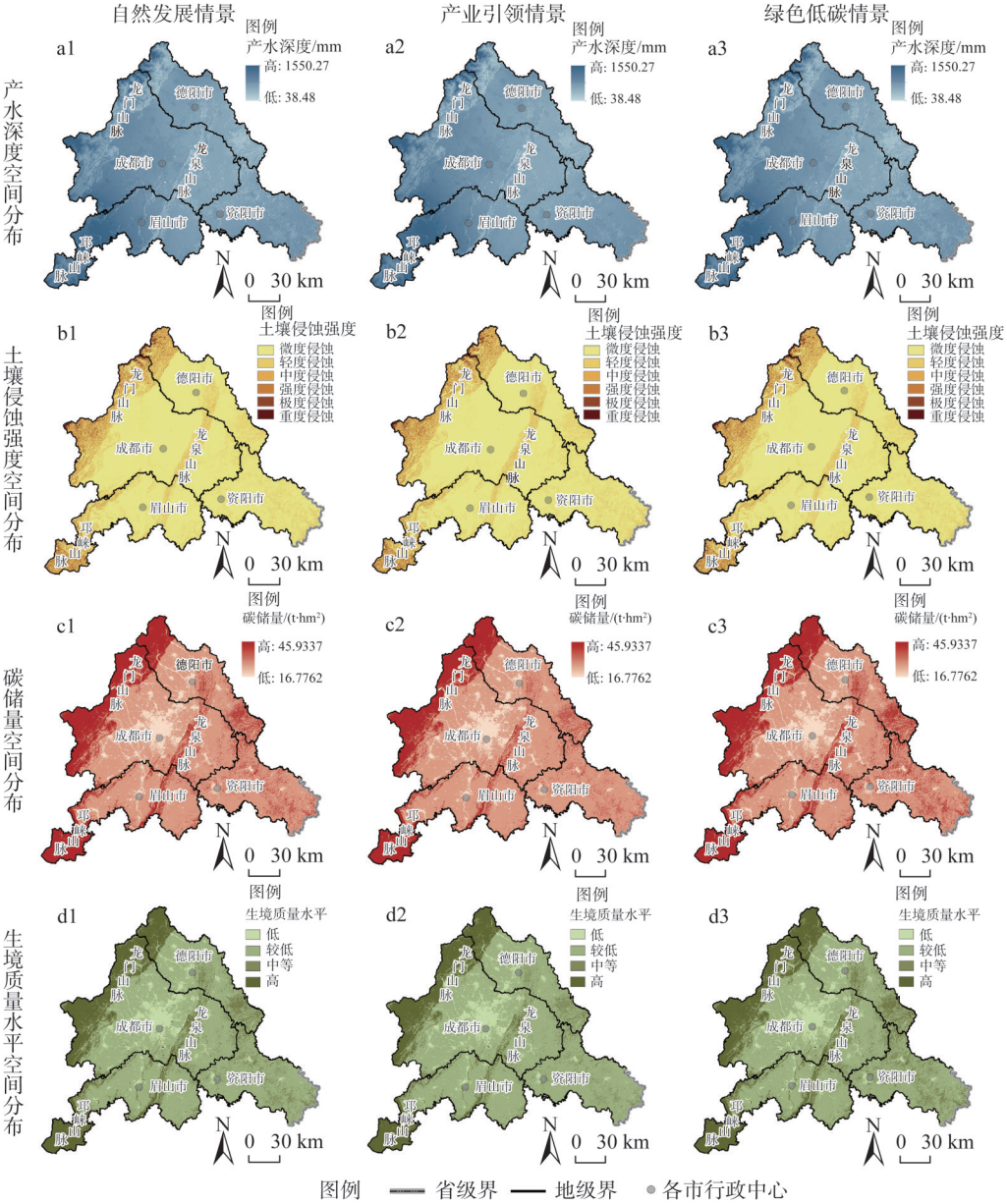


图8 成都都市圈2035年多情景下的生态系统服务功能空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecosystem service functions under multiple scenarios in 2035 of Chengdu Metropolitan Area

趋势（图5），属生态滞后型。两系统间发展差距持续扩大，产业引领情景差距最大，绿色低碳情景差距最小。生态系统和社会经济系统分别在2029年、2031年前后达到峰值，表明2020—2029年两系统发展相辅相成，产业“含绿量”提升发展“含金量”；2029—2031年，生态系统综合评价指数下降，此阶段生态系统承载能力接近上限；2031—2035年，社会经济综合评价指数下降，生态文明建设与经济发展的矛盾日益显著。

2.3.2 耦合协调度时空变化

2020—2035年，由于三种情景下CES值均呈波动下降趋势，研究区生态系统与社会

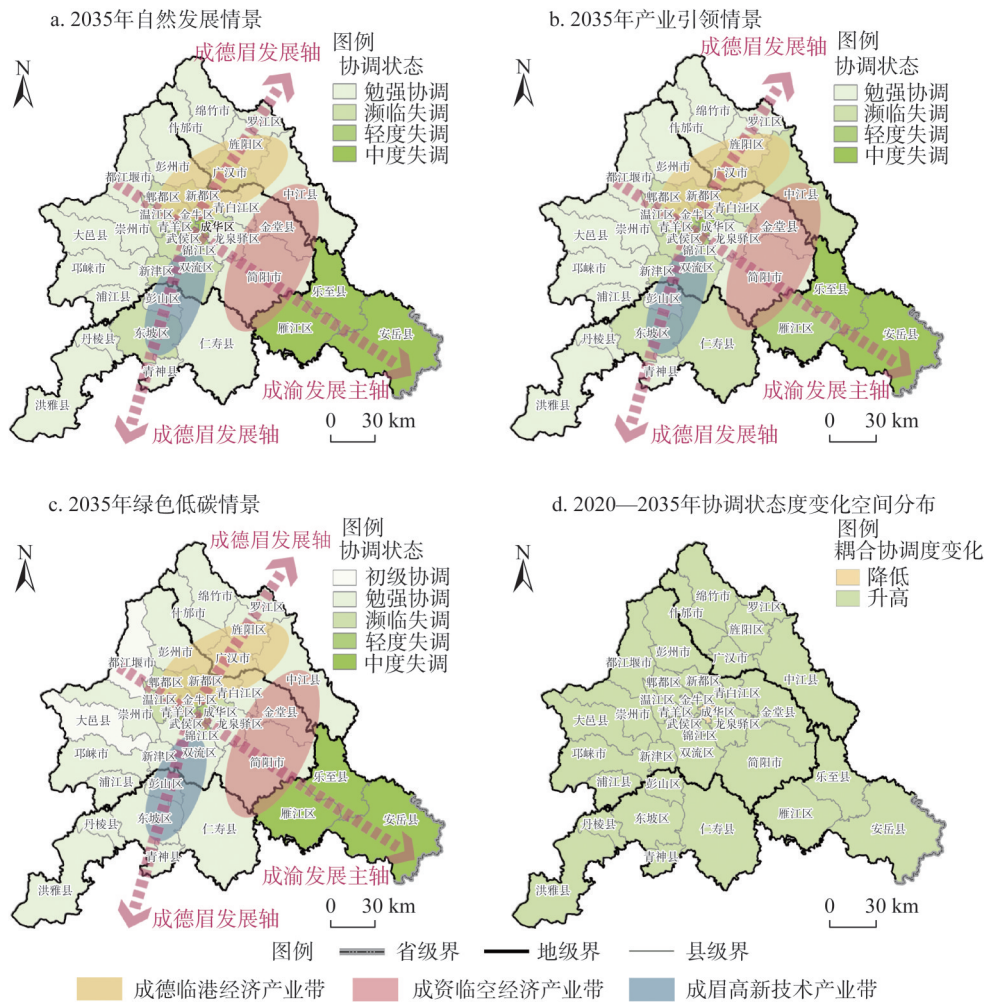


图9 成都都市圈2035年多情景下的协调状态空间分布及耦合协调度变化

Fig. 9 Coordination status spatial distribution and coupling coordination degree changes of Chengdu Metropolitan Area under multi-simulation scenarios in 2035

经济系统耦合度下降，耦合协调度缓慢上升（表8）。CES值受土地利用变化影响最大，三种情景下耕地面积均下降、建设用地面积均上升，城市扩张是都市圈发展的必然结果。自然发展情景下，林地、草地的管控效果较好，耕地保护意识有待加强，耦合协调度适中；产业引领情景下，耕地面积减少趋势减缓，但建设用地的大力扩张导致农业用

表8 成都都市圈2035年多情景下生态系统与社会经济系统耦合协调发展评价结果					
Table 8 Coupling coordination development evaluation results of ecosystem and socio-economic system of Chengdu Metropolitan Area under multi-simulation scenarios in 2035					
情景类型	耦合度C值	耦合类型	耦合协调度D值	协调状态	协调类型
自然发展情景	0.49	中度耦合	0.41	濒临失调	生态发展滞后型
产业引领情景	0.48	中度耦合	0.39	轻度失调	生态发展滞后型
绿色低碳情景	0.50	中度耦合	0.43	濒临失调	生态发展滞后型

地和生态用地的分布破碎化,耦合协调度最低;绿色低碳情景下,林地、草地等碳汇能力较强的地类明显增加,水域的破碎化现象得到缓解,耦合协调度最高。由此可见,修复治理措施力度的加大有利于改善研究区大部分区域的协调状态。

2035年,研究区协调状态空间分布与2020年相近,呈“西部优于东部、中部最低”的特点(图9)。除成都市成华区外,其他区域耦合协调度有所提升。高水平区域集中于龙门山脉、邛崃山脉、龙泉山脉附近,包括成都市崇州市、大邑县、都江堰市、简阳市、金堂县、龙泉驿区、彭州市、郫都区、蒲江县、青白江区、邛崃市、双流区、新都区、新津区,德阳市全域、眉山市全域。低水平区域分布于成德眉发展轴和成渝发展主轴交汇中心,包括成都市成华区、金牛区、锦江区、青羊区、武侯区,以及资阳市全域。

自然发展情景下,勉强协调是协调状态的主要类型,占比57.14%，“三带”中成眉高新技术产业带大部分区域处于濒临失调状态。相较自然发展情景,产业引领情景勉强协调状态区域减少,“三带”中成德临港经济产业带大部分区域由勉强协调转为濒临失调状态,但资阳市雁江区改善为轻度失调状态。绿色发展情景下,勉强协调状态占比最大(62.86%),成都市都江堰市、大邑县提升至初级协调状态,“三带”区域均调整为勉强协调状态,整体发展态势良好。

### 3 耦合协调发展格局的建构

不同情景下各市(区、县)协调状态呈现显著的空间异质性特征,区域发展方向和生态本底质量匹配程度有待提高。因此,基于各市(区、县)适宜发展情景,以提升研究区生态与社会经济系统耦合协调关系为主要目标,参考长株潭、西安都市圈等发展规划,本文明确了“三山三江三区”的耦合协调发展格局(图10),以此衔接四川省“四区九带”国土空间生态修复总体格局和成都都市圈“两轴三带”空间规划布局与“一心一屏三网三环多片”生态空间格局。

(1)筑屏“三山”:牢筑龙门山、邛崃山、龙泉山屏障。推动建设龙门山生物多样性保护与水源涵养修复区、邛崃山生物多样性保护与水土流失综合防治修复区,通过生境修复、廊道建设等措施提升大熊猫、川金丝猴等国家重点珍稀野生动物栖息地质量,有序恢复植被垂直带谱,强化水土保持和水源涵养功能。同时落实龙泉山山水林田湖草生态保护修复区建设,实施天然林和储备林保护,提高山脊生态公益林数量和丰富度,通过全域增绿增景实现人居环境质量提升。

(2)涵养“三江”:恢复岷江、涪江、沱江生境。打造岷江中下游、沱江中下游、涪江支流绿色生态廊道,依托岷江、沱江流域自然岸线和青龙湖、白鹭湾等湿地协同实施“三江”两岸造林绿化,推进生态廊道、绿道有机衔接,形成上连全省、下接区县,蓝绿交织的河湖生态体系。在山地及丘陵地区的沟渠、塘、湖实施污染源控制、生态补水等措施,提升生境质量和径流补给功能。

(3)协同“三区”:依托“三区”完善“三带”建设。成德临港经济产业带以临港产业优先区为关键点,发挥德阳市罗江区先进材料、电子信息的产业优势,通过配套化提升产业规模化,加强与成都、德阳产业功能区的有效衔接。成眉高新技术产业带以特色农业示范区为基本点,开展蒲江—丹棱交界地带融合发展试点,加大品种改良和技术推



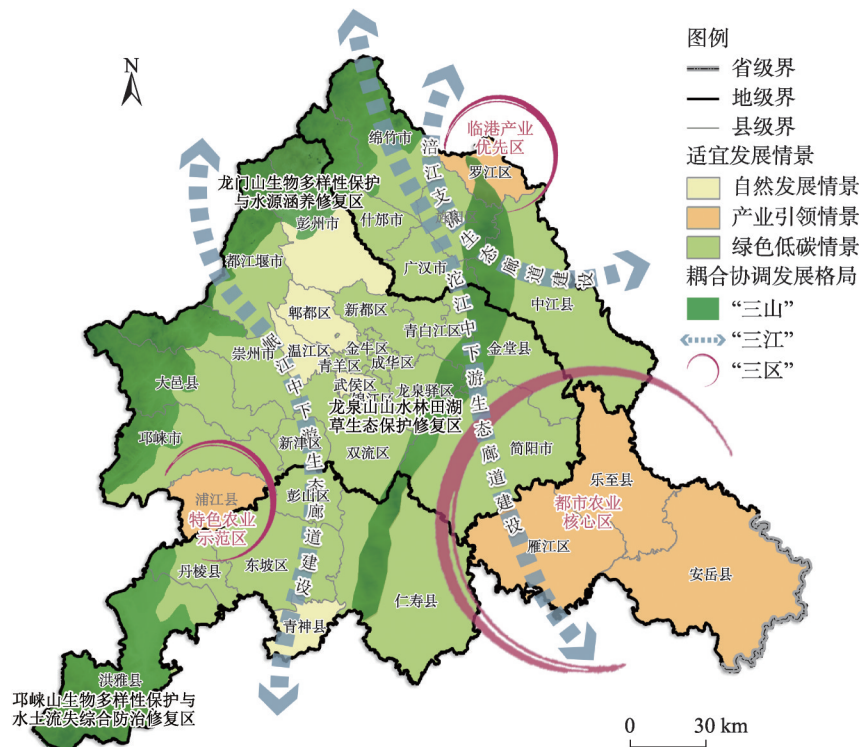


图 10 成都都市圈各市（区、县）适宜发展情景及“三山三江三区”耦合协调发展格局

Fig. 10 Suitable development scenarios for each city (district, county) and "three mountains, three rivers, three districts" coupling coordination development pattern in Chengdu Metropolitan Area

广力度，壮大以柑橘、樱桃为主打产品的区域特色农业。成资临空经济产业带以都市农业核心区为突破点，保证轨道交通、汽车两大支柱产业的同时，在简阳—雁江—乐至交界地带发展以农耕文化、艺术创意、科普教育、休闲娱乐为重点的都市农业，有效降低“虹吸效应”。

#### 4 结论及展望

本文以成都都市圈为研究区域，首先利用InVEST模型分析研究区2010年、2015年、2020年生态系统服务功能变化，而后通过耦合协调度模型分析其与社会经济系统的耦合协调动态演化过程。最后，基于InVEST-PLUS模型和耦合协调度模型对2035年自然发展、产业引领、绿色低碳三种情景下的耦合协调变化趋势进行模拟。研究结论如下：

(1) 2010年、2015年、2020年CES平均值分别为0.43、0.41、0.44，总体处于一般等级。空间分布无较大差异，整体呈“西部优于东部、中部最低”的特点，与碳储量和生境质量水平空间分布相似。

(2) 2010—2020年，生态系统与社会经济系统发展水平呈“X”型变化，两系统耦合协调度由0.29上升至0.36，耦合协调程度由中度失调的社会经济滞后型发展为轻度失调的生态滞后型。高水平协调状态区域明显增多，但空间分布不平衡，整体格局由2010年、



2015年的“东部优于西部”转为2020年的“西部优于东部”。“三带”中成眉高新技术产业带、成资临空经济产业带耦合协调发展优于成德临港经济产业带。

(3) 2020—2035年,生态系统与社会经济系统耦合协调水平持续改善,耦合协调程度由轻度失调的生态滞后型发展为濒临失调的生态滞后型。三种情景都以勉强协调状态为主,耦合协调度由大到小依次为:绿色低碳情景>自然发展情景>产业引领情景。表明修复治理措施力度的加大有利于改善研究区大部分区域的协调状态,但个别东部城市仍无法跳出中度失调的发展状态。“三带”中成眉高新技术产业带、成德临港经济产业带受发展情景影响较大。

(4) 2010年、2015年、2020年、2035年耦合协调分析结果,体现了现有《成都都市圈发展规划》<sup>[2]</sup>和《关于推动成德眉资同城化发展的指导意见》<sup>[32]</sup>中战略部署的科学性:①生态系统服务功能的损失反映出坚持“生态优先、绿色发展”原则、构建“三山、三网、两环、多片”区域生态安全格局的必要性;②城市扩张是都市圈发展的必然结果,《规划》<sup>[2]</sup>强调“改善生态用地质量比保持数量平衡更重要”,持续加强龙泉山脉、龙门山脉、邛崃山脉的生态保护与修复力度,强化岷江、沱江、涪江等流域上下游污染协同治理势在必行;③依据区域资源禀赋与空间特征划分功能区的规划措施,有利于增强研究区城镇空间布局与资源环境承载力的适应度及匹配性。

此外,本文三种情景仅采用统一的社会经济指标赋值,而生态与社会经济两大系统关系复杂,不同情景下社会经济发展情况存在差异,未来可选用经济学专业模型对社会经济指标进行更科学、准确的预测,以便更好地分析生态与社会经济的耦合关系。

## 参考文献(References):

- [1] 人民日报. 绿水青山就是金山银山. [http://www.qstheory.cn/qshy/jx/2022-09/29/c\\_1129040861.htm](http://www.qstheory.cn/qshy/jx/2022-09/29/c_1129040861.htm), 2022-09-29. [People's Daily Comment Department. Clear waters and green mountains. [http://www.qstheory.cn/qshy/jx/2022-09/29/c\\_1129040861.htm](http://www.qstheory.cn/qshy/jx/2022-09/29/c_1129040861.htm), 2022-09-29.]
- [2] 四川省人民政府. 成都都市圈发展规划. <http://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2021/11/29/40678782564141e68f4d1d27180befb9/files/d359ac2bcce440c782b597db912491f2.PDF>, 2021-11-29. [Sichuan Provincial People's Government. Development Plan for Chengdu Metropolitan Area. <http://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2021/11/29/40678782564141e68f4d1d27180befb9/files/d359ac2bcce440c782b597db912491f2.PDF>, 2021-11-29.]
- [3] 川观新闻.《成都都市圈发展规划》出炉系全国第三个、中西部唯一都市圈规划. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1717774135822544655&wfr=baik>e, 2021-11-29. [Chuanguan News "The metropolitan area Development Plan" is the third and only metropolitan area plan in Central and Western China. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1717774135822544655&wfr=baik>e, 2021-11-29.]
- [4] 朱直君, 彭耕, 熊琳, 等. 成都都市圈空间协同策略探讨. 规划师, 2020, 36(19): 79-83. [ZHU Z J, PENG G, XIONG L, et al. Coordinated spatial development strategies of Chengdu Metropolitan Area. Planners, 2020, 36(19): 79-83.]
- [5] 王超深. 轨道交通线网影响下的大都市区空间结构模式研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2019. [WANG C S. Study on spatial structure of metropolitan area influenced of urban railway transit network. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.]
- [6] 代鑫, 刘前媛, 唐鹏, 等. 城市群空间结构演变规律及优化方向研究: 以成都平原经济区为例. 城市规划, 2022, 46(10): 104-114. [DAI X, LIU Q Y, TANG P, et al. Research on the evolution rules and optimization direction of the spatial structure of urban agglomeration: A case study of Chengdu plan economic zone. City Planning Review, 2022, 46(10): 104-114.]
- [7] 崔宏凯, 张林, 王子健, 等. 物流产业发展和区域经济增长的关联效应研究: 基于长江经济带三大都市圈的面板数

- 据. 经济问题, 2021, (3): 78-85. [CUI H K, ZHANG L, WANG Z J, et al. Research on the correlation effect between the development of logistics industry and regional economic growth: Based on panel data of three metropolitan areas of the Yangtze Economic Belt. *On Economic Problem*, 2021, (3): 78-85.]
- [8] 庄子薛, 谢梦晴, 张文萍, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测: 以成德眉资地区为例. 风景园林, 2022, 29(5): 38-44. [ZHUANG Z X, XIE M Q, ZHANG W P, et al. Temporal and spatial changes and multi-scenario simulation prediction of carbon storage based on FLUS-InVEST model: A case study of Chengdu-Deyang-Meishan-Ziyang Area. *Landscape Architecture*, 2022, 29(5): 38-44.]
- [9] 孔凡斌, 杨文才, 徐彩瑶. 环杭州湾城市群生态环境与社会经济耦合协调关系及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(6): 2287-2297. [KONG F B, YANG W C, XU C Y. Coordinated relationship and influencing factors of ecological environment and socio-economic coupling of urban agglomeration around Hangzhou Bay in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2287-2297.]
- [10] 秦晓川, 付碧宏. 青岛都市圈生态系统服务—经济发展时空协调性分析及优化利用. 生态学报, 2020, 40(22): 8251-8264. [QIN X C, FU B H. Spatio-temporal coordination between ecosystem services and economic development and its optimal utilization in Qingdao Metropolitan Region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(22): 8251-8264.]
- [11] 孙久文, 崔雅琪, 张皓. 黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1673-1690. [SUN J W, CUI Y Q, ZHANG H. Analysis of the spatiotemporal pattern and mechanism of the coupling between ecological protection and economic development in urban agglomerations in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1673-1690.]
- [12] 马世骏, 王如松. 社会—经济—自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9. [MA S J, WANG R S. Social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 1-9.]
- [13] 赵武生, 石培基. 基于 InVEST 模型的复合生态系统耦合协调关系研究: 以兰西城市群为例. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1883-1894. [ZHAO W S, SHI P J. The coupling and coordination of complex ecosystem based on the InVEST model: A case study in the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration. *China Environmental Science*, 2023, 43(4): 1883-1894.]
- [14] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. *Corporate Environmental Strategy*, 1997, 6(2): 200-201.
- [15] 白娥, 薛冰. 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响. 植物生态学报, 2020, 44(5): 543-552. [BAI E, XUE B. A review of influences of land use and land cover change on ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5): 543-552.]
- [16] WANG Z Y, LI X, MAO Y T, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108499, Doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108499.
- [17] WEI Q Q, ABUDUREHEMAN M, HALIKE A, et al. Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109632, Doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109632.
- [18] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569, Doi: 10.48550/arXiv.2010.11541.
- [19] 成都社会科学在线. 成都都市圈是个什么“圈”? . <http://www.cdsk.org.cn/detail.jsp?id=24855>, 2022-05-24. [Chengdu Social Science Online. What is metropolitan area?. <http://www.cdsk.org.cn/detail.jsp?id=24855>, 2022-05-24.]
- [20] 四川省统计局. 四川统计年鉴 2020. <http://tjj.sc.gov.cn/tjnj/cs/2020/zk/indexce.htm>, 2021. [Sichuan Provincial Bureau of Statistics. *Sichuan Statistical Yearbook 2020*. <http://tjj.sc.gov.cn/tjnj/cs/2020/zk/indexce.htm>, 2021.]
- [21] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [22] 四川省统计局. 四川统计年鉴 2010. <http://tjj.sc.gov.cn/scstjj/c105855/nj.shtml>, 2011. [Sichuan Provincial Bureau of

- Statistics. Sichuan Statistical Yearbook 2010. <http://tjj.sc.gov.cn/scstjj/c105855/nj.shtml>, 2011.]
- [23] 四川省统计局. 四川统计年鉴 2015. <http://tjj.sc.gov.cn/tjnj/cs/2015/zk/indexce.htm>, 2016. [Sichuan Provincial Bureau of Statistics. Sichuan Statistical Yearbook 2015. <http://tjj.sc.gov.cn/tjnj/cs/2015/zk/indexce.htm>, 2016.]
- [24] 胡影, 冯晓明, 巩杰. 基于生态系统服务的宁夏回族自治区自然—社会经济协调性分析. 生态学报, 2022, 42(16): 6523-6533. [HU Y, FENG X M, GONG J. Coordination analysis of the nature and social-economic system of Ningxia Hui Autonomous Region based on ecosystem services. *Acta Ecological Sinica*, 2022, 42(16): 6523-6533.]
- [25] 杨培峰, 焦泽飞. 生态—社会经济系统耦合方法在县域国土空间生态修复规划中的运用: 以四川威远县为例. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2308-2319. [YANG P F, JIAO Z F. Application of ecological socio economic system coupling method in county land spatial ecological restoration planning: A case study of Weiyuan county, Sichuan province. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(9): 2308-2319.]
- [26] 刘宇. 基于 InVEST 模型的喀斯特地区茶园生态系统服务功能评估: 以云南省广南县为例. 昆明: 云南大学, 2021. [LIU Y. Assessment of tea plantation ecosystem services in Karst Area based on InVEST model: A case study of Guangnan county, Yunnan province. Kunming: Yunnan University, 2021.]
- [27] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9-13, 19. [ZHOU B, YU X X, CHEN L H, et al. Soil erosion simulation in mountain areas of Beijing based on InVEST model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 9-13, 19.]
- [28] 张梦迪, 张芬, 李雄. 基于 InVEST 模型的生境质量评价: 以北京市通州区为例. 风景园林, 2020, 27(6): 95-99. [ZHANG M D, ZHANG F, LI X. Evaluation of habitat quality based on InVEST model: A case study of Tongzhou district of Beijing, China. *Landscape Architecture*, 2020, 27(6): 95-99.]
- [29] 滕雅丽, 谢苗苗, 王回茵, 等. 资源型城市土地利用转型及其对生境质量的影响: 以乌海市为例. 生态学报, 2022, 42(19): 7941-7951. [TENG Y L, XIE M M, WANG H H, et al. Land use transition in resource-based cities and its impact on habitat quality: A case of Wuhai city. *Acta Ecological Sinica*, 2022, 42(19): 7941-7951.]
- [30] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响研究. 生态学报, 2023, 43(11): 1-15. [REN Y M, LIU X P, XU X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model. *Acta Ecological Sinica*, 2023, 43(11): 1-15.]
- [31] 熊曦, 肖俊. 武陵山片区城镇化与生态环境耦合协调度时空分异: 以六个中心城市为例. 生态学报, 2021, 41(15): 5973-5987. [XIONG X, XIAO J. Evaluation of coupling coordination between urbanization and eco-environment in six central cities, Wuling Mountain area. *Acta Ecological Sinica*, 2021, 41(15): 5973-5987.]
- [32] 中共四川省委、四川省人民政府.《关于推动成德眉资同城化发展的指导意见》. <http://jhj.sc.gov.cn/scjhj/qyhz/2020/8/3/0355a02de0574313bc175d4a444e8cfe.shtml>. [Sichuan Provincial Committee of the Communist Party of China, Sichuan Provincial People's Government. Guiding opinions on promoting the development of urban integration of Chengdu, Deyang, Meishan and Ziyang. <http://jhj.sc.gov.cn/scjhj/qyhz/2020/8/3/0355a02de0574313bc175d4a444e8cfe.shtml>.]

## Dynamic evolution and multi-scenario simulation of ecosystem and socio-economic system coupling coordination in Chengdu Metropolitan Area and its policy implications

LIU Yi, WANG Qian-na, LIAO Yi-qing

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Chengdu Metropolitan Area in China serves as an important ecological screen area and economic center in the upstream Yangtze River, and it is of great significance to conduct research on ecosystem and socio-economic system coupling and coordination for regional sustainable development. Firstly, based on InVEST model, this study analyzes the changes in ecosystem service functions in the study area in 2010, 2015, and 2020. Furthermore, the coupling coordination degree model is applied to analyze the dynamic evolution process of its coupling coordination with the socio-economic system. Finally, based on InVEST-PLUS model and with the consideration of land use changes, this study simulates and analyzes the coupling coordination change trends of ecosystem and socio-economic system under three scenarios: natural development, industry-led, and low-carbon in 2035. The results show the following conclusions: (1) The average values of comprehensive index for ES in 2010, 2015, and 2020 were 0.43, 0.41, and 0.44, respectively, which were generally in the average level. There is no significant difference in spatial distribution, and the overall presents the characteristics of "the west is better than the east, and the central part is the lowest". (2) From 2010 to 2020, the coupling coordination degree between the two systems increased from 0.29 to 0.36, achieving a transition from a status of moderate disorder to mild disorder. However, there exists spatial imbalance in the spatial distribution, with the overall pattern shifting from "the east is better than the west" to "the west is better than the east". (3) From 2020 to 2035, the level of coupling coordination between the two systems continues to improve. Among the three scenarios, the coupling coordination degree is ranked as follows: low-carbon scenario > natural development scenario > industry-led scenario, indicating that intensifying restoration and governance measures is beneficial for improving the coordination status in most parts of the study area. Finally, based on the research results, three policy implications are proposed: building "three mountains", conserving "three rivers", and coordinating "three districts". The research results are benefit for providing a scientific basis and support for the sustainable and coordinated development of Chengdu Metropolitan Area, and also offer reference and samples for other metropolitan areas.

**Keywords:** coupling coordination; multi-scenario simulation; InVEST model; PLUS model; Chengdu Metropolitan Area