

# 基于多尺度融合的岷江流域国土 空间资源环境承载力评价

王格, 周子祺, 夏建国, 欧定华, 费建波, 龚顺娅, 向玉潇

(四川农业大学 资源学院, 四川 成都 611130)

**摘要:** [目的] 进行基于多尺度融合的流域国土空间资源环境承载力评价研究, 为后续有针对性地开展国土空间格局优化打下基础, 也为流域的可持续发展提供科学依据和参考, 促进资源和环境的协调发展。[方法] 以岷江流域为例, 从国土空间的多功能性特征与内涵出发, 构建多尺度的国土空间资源环境承载力评价体系, 并通过应用改进后的多尺度融合模型, 对2000, 2010和2020年3期研究断面的评价结果进行微观细部分析。[结果] ①长期以来, 流域整体生态承载力( $CC_E$ )多数在中等水平, 生活承载力( $CC_L$ )多数在中等及以下, 生产承载力( $CC_P$ )以低等级为主, 造成综合承载力( $CC_C$ )以较低等级为主且无高等级; ②研究期内, 所有承载力的较低等级区域均有所扩张;  $CC_E$ 多发生在流域中部与东南部,  $CC_L$ 在流域上、中、下游均有发生,  $CC_P$ 多发生在双流西部、南部与仁寿县,  $CC_C$ 多发生在汶川县、蒲江县、井研县等地; ③岷江上游具有高 $CC_E$ 、低 $CC_L$ 和 $CC_P$ 的原因应归结于受到了地势地貌条件与社会经济水平所带来的双重影响, 而成都主城区在社会经济高质量发展的推动下取得了突出水平的 $CC_L$ ,  $CC_P$ 和 $CC_C$ 并得以长期稳定保持。[结论] 岷江流域在自然本底条件和社会经济水平方面存在巨大的区域差异, 造成各地区承载力水平不一, 阻碍实现地区间协调均衡发展。坚持推进高质量发展, 调动省会成都的溢出效应与辐射作用, 有利于提升承载力等级, 缩小地区差距, 带动流域整体协同发展。

**关键词:** 国土空间; 资源环境承载力; 多尺度融合模型; 岷江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0152-10

中图分类号: F205

**文献参数:** 王格, 周子祺, 夏建国, 等. 基于多尺度融合的岷江流域国土空间资源环境承载力评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 152-161. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.017; Wang Ge, Zhou Ziqi, Xia Jianguo, et al. Evaluation of carrying capacity of territorial space resources and environment with multi-scale integration in Minjiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 152-161.

## Evaluation of Carrying Capacity of Territorial Space Resources and Environment With Multi-scale Integration in Minjiang River Basin

Wang Ge, Zhou Ziqi, Xia Jianguo, Ou Dinghua, Fei Jianbo, Gong Shunya, Xiang Yuxiao

(School of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

**Abstract:** [Objective] The evaluation of carrying capacity of territorial space resources and environment in watersheds were studied based on multi scale fusion in order to provide scientific basis and reference for the sustainable development of the basin, and promote the coordinated development of resources and environment. [Methods] Using the Minjiang River basin as an example and considering the multifunctional characteristics and connotations of territorial spatial resources, we established a multi-scale evaluation system for territorial spatial resources and environmental carrying capacity. By applying an improved multiscale integration model, this study conducted a detailed micro-analysis of the evaluation results for research cross-sections from the years 2000, 2010, and 2020. [Results] ① Over the long term, the overall ecological carrying capacity ( $CC_E$ ) of the basin has mostly been at a medium level. The living carrying capacity ( $CC_L$ ) has generally been at a medium level or below, while the production carrying capacity ( $CC_P$ )

收稿日期: 2023-12-20

修回日期: 2024-06-25

资助项目: 四川省科技计划项目“国土空间生态修复关键技术研究”(2021YFS0279)

第一作者: 王格(1995—), 女(汉族), 河南省郑州市人, 博士研究生, 研究方向为国土空间优化与生态修复。Email: ge\_wang@stu.sicau.edu.cn.

通信作者: 夏建国(1967—), 男(汉族), 四川省雅安市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源与环境研究。Email: xiajianguo@126.com.

has predominantly been at a very low level. Consequently, the comprehensive carrying capacity ( $CC_C$ ) has mainly been at a low level, with no instances of a very high level. ② During the study period, the regions with low levels of all carrying capacities expanded. The expansion of  $CC_E$  mostly occurred in the middle and southeast of the basin; the expansion of  $CC_L$  occurred in the upper, middle, and lower reaches of the basin; the expansion of  $CC_P$  mostly occurred in the western and southern parts of Shuangliu and Renshou; and the expansion of  $CC_C$  mostly occurred in Wenchuan, Pujiang, and Jingyan. ③ The high  $CC_E$  and low  $CC_L$  and  $CC_P$  in the upper reaches of the Minjiang River can be attributed to the combined effects of topographical conditions and socioeconomic levels. In contrast, Chengdu's central urban area has achieved outstanding levels of  $CC_L$ ,  $CC_P$ , and  $CC_C$ , driven by high-quality socioeconomic development, and has maintained these levels over the long term. [Conclusion] The Minjiang River Basin exhibits significant regional differences in natural conditions and socioeconomic levels, resulting in varying levels of carrying capacity across different areas and hindering coordinated and balanced regional development. Persistently promoting high-quality development and leveraging the spillover and radiative effects of Chengdu City, the provincial capital, will help enhance the carrying capacity levels, reduce regional disparities, and drive overall coordinated development across the basin.

**Keywords: territorial space; resources and environment carrying capacity; multi-scale integration model; the Minjiang River basin**

2022年,中共二十大报告中,明确提出要“积极促进区域协调发展,优化国土空间发展格局”。在此背景下,资源环境承载力评价作为全面反映国土空间资源利用与社会经济发展状况,揭示区域承载能力与发展潜力的重要方法,已成为国土空间规划的核心内容,也被视为国土空间优化的重要基石<sup>[1-2]</sup>。当前已有诸多学者对此展开了深入研究,构建了多种多样的评价体系,研究角度也从一开始较为局限地集中在土地资源<sup>[3]</sup>、水资源<sup>[4]</sup>、大气环境等<sup>[5]</sup>单方面扩展延伸至现今更为广泛、综合的资源环境承载力评价,并与国土空间开发适宜性评价共同构成“双评价”,成为国土空间规划编制的基础和前提<sup>[6-7]</sup>。现有文献中,学者们大多从单尺度视角出发,以行政区划为评价单元进行承载力测算<sup>[8]</sup>,也有少部分文献将评价单元定为栅格<sup>[9]</sup>。中国作为一个河流众多的国家,对流域地区资源环境承载状况的调查还远远不够,且现有文献更关注流域水资源承载力评价<sup>[10]</sup>,缺少针对国土空间且更为综合的资源环境承载力评价研究;同时对多尺度融合的评价体系构建与测算方法探究还有待深入,需强化评价结果在宏观区域内对微观细部的差异性表达,进一步提升评价研究的综合性与准确性。因此,“如何在流域地区进行多尺度融合的国土空间资源环境承载力评价研究?”这一科学问题成为了本文关注的重点。

岷江流域地处四川省境内,横跨中国第二、三级阶梯,自北向南地质地貌迥异,同时存在平原、丘陵、山地等多种地形,造成了该流域在资源环境与社会经济等方面地区差异显著。因而,岷江流域所包含的国

土空间功能分配不均、布局结构不合理的问题也更为复杂、突出,是亟需优化国土空间发展格局、推进流域整体协调同步发展的重点地区。因此,通过探明岷江流域的资源利用上限与生态环境底线,可为该区域今后进一步优化国土空间格局、促进区域协调发展打下坚实基础。

综上所述,围绕上文提出的科学问题,本研究以岷江流域为例,以“三生”导向下的国土空间属性特点为理论基础,构建多尺度的国土空间资源环境承载力评价体系,并利用改进的多尺度融合模型,对2000,2010,2020年共3期的国土空间资源环境承载力进行全面评估,明晰流域宏观整体与地区微观细节的承载力变化特征与分布规律。以期填补在流域地区开展多尺度融合的国土空间资源环境承载力评价研究的空白,丰富相关评价研究的理论体系,为研究区各级政府制定规划治理政策、优化国土空间布局提供重要的科学理论基础与方法参考。

## 1 研究区概况

岷江作为长江上游水量最大的一级支流,起源于松潘县岷山南麓,在都江堰分为内、外江,外江为干流,经过新津、彭山、东坡等区(县)直达乐山市中区,并于乐山大佛与大渡河及其支流青衣江汇流,至宜宾市翠屏区汇入长江,全长711 km。本研究中岷江流域的边界范围参考以往相关研究<sup>[11-12]</sup>,且为保证研究区域在行政区划上的完整性,界定了岷江流域空间范围,涉及阿坝、成都、眉山、乐山、自贡和宜宾共6市

(州), 32 个区县, 面积约 53 049.65 km<sup>2</sup>, 占四川省国土总面积的 10.91%。岷江流域在海拔、气候、植被等方面具有显著的区域差异, 因而在不同地区体现出各自鲜明的特点。其中, 在海拔较高的阿坝 5 县中, 拥有丰富的水能、森林、矿产资源; 自成都往南的研究区由平原与丘陵山地组成, 地势平坦, 物产丰富, 人口、城镇集中, 交通便利, 耕地资源丰富, 是重要的粮油产区, 因此工农业非常发达, 不断促进着流域内成都、乐山、宜宾等城市在社会、经济、文化等方面的飞速发展。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

在本文采用的栅格数据中, 地均生产总值、植物净初级生产力和人口密度数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>); 年降水量、城市夜间灯光和生态环境质量数据均来自国家科技资源共享服务平台——国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>); 县级全年 PM2.5 均值数据来自 ACAG (<https://sites.wustl.edu/acag/datasets/surface-pm2-5/>)。行政区划数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。人口数据、经济与社会数据来自《四川统计年鉴》《中国县域统计年鉴》以及各市、区(县)统计年鉴和统计公报。水资源相关数据来源于各市、区(县)的水资源公报。

在完成原始数据搜集整理后, 对栅格数据利用 ArcGIS 10.2 软件进行预处理, 包括投影变换使坐标系一致、裁剪区域、重采样调整空间分辨率(统一为 30 m×30 m)等。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 理论基础: 三生功能导向下的国土空间及其资源环境承载力内涵** 本文以国土空间资源环境承载力作为研究对象, 其关键在于该对象以“国土空间”的概念内涵为基础依托, 是构建承载力评价体系的重要支撑。而从另一个角度看, 资源环境承载力也是国土空间的承载支持与发展依赖, 因为想要达到国土空间布局合理且结构优化, 构建出人地耦合、和谐统一的绿色发展格局, 则必须依靠资源环境承载力作为底线支撑, 通过提升承载力水平, 进而营造可持续发展新局面。

有学者指出<sup>[13]</sup>, 国土空间是一种由生态、生活和生产空间共同构成的多功能复合体。由于生产、生活、生态所表达的微观地理现象在空间上会出现尺度集成现象, 即某个空间评价单元可能包含了单一或若干的生态、生产与生活功能, 因此宏观层面的国土空

间放在任何一个地域都是微观尺度的“三生”功能的复合。换句话说, 国土空间是集成“三生”复合配置的复杂空间, 在功能分属方面具有多功能性。综上所述, 本研究通过对国土空间的多功能性进行理解阐释与内涵拓展, 以此为依据将资源环境承载力分为生态承载力 (CC<sub>E</sub>)、生活承载力 (CC<sub>L</sub>) 和生产承载力 (CC<sub>P</sub>), 分别对应国土空间展现出的生态、生活与生产功能, 并将 3 类承载力求和取平均后作为综合承载力 (CC<sub>C</sub>), 最终构建出一套完整的国土空间及其资源环境承载力内涵解析框架(图 1)。

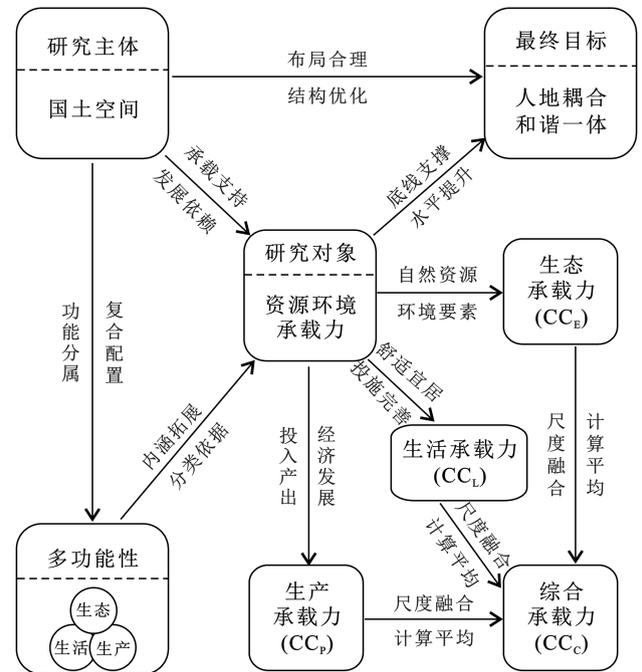


图 1 国土空间及其资源环境承载力内涵解析框架

Fig.1 Connotation analysis framework of territorial space and its resource and environment carrying capacity

**2.2.2 评价体系构建** 本文围绕生产空间集约高效, 生活空间宜居适度, 生态空间山清水秀的高品质国土空间格局目标, 推进“三生”共融理念, 结合图 1 建立的内涵框架, 在遵循数据指标科学性、代表性、可获取性原则的前提下, 依据研究区生态环境现状和经济社会发展情况, 通过参考相关文献<sup>[14-16]</sup>并咨询专家意见, 选取了 32 个指标共同构成国土空间资源环境承载力评价体系(表 1)。其中, 生态承载力 (CC<sub>E</sub>) 包含了国土空间生态功能所提供的自然资源与环境要素, 主要从水资源、耕地资源、空气质量、土壤质量、生态环境质量和生态系统生产力共 6 方面反映; 生活承载力 (CC<sub>L</sub>) 侧重表现国土空间生活功能中舒适宜居和设施完善、方便快捷的特点, 由居住空间、交通承载、资源保障、教育支持、医疗资源、人口承载和城镇规模共 7 部分组成; 生产承载力 (CC<sub>P</sub>) 重点放在对国

土空间生产功能的效率性和集约性的考查,从资源投入与供给、生产效率、工业发展状况和经济发展水平这 4 方面挑选指标。

本研究在选取各类承载力指标时,分为行政单元(区县级)和空间格网(30 m×30 m)两个尺度。在行政单元尺度下,研究从宏观角度把握各区县的生产、生活、生态情况,侧重各区县作为一个行政管理主体所表现出的国土空间承载能力,因此指标大多可从统

计年鉴中直接获得,或是经过浅加工处理的统计数据,指标内容侧重体现一定区域内的某物总量或某物均值、强度等概念,指标类型区分较细。而在格网尺度下,研究选择了一些能准确、全面反映生产、生活、生态承载力的指标,使评价结果能够有效呈现出国土空间承载力的微观细节差异及变化情况。同时,为避免数据重复冗余和分析时太过繁杂,格网尺度不再设置准则层分类。

表 1 多尺度的岷江流域国土空间资源环境承载力评价指标体系  
Table 1 Evaluation index system of territorial space resources and environment carrying capacity evaluation in Minjiang River basin from multi-scale

目标层	尺度层	准则层	指标层/(单位)	极性	计算方法	权重
生态承载力 (CC <sub>E</sub> )	行政单元尺度	水资源	年降水量/mm	+	栅格数据	0.109 7
			水资源开发利用率/%	-	用水总量/水资源总量×100%	0.111 3
			产水模数/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	+	水资源总量/总面积	0.489 1
			人均水资源占有量/(m <sup>3</sup> /人)	+	水资源总量/总人口	0.067 1
		耕地资源	人均耕地面积/(m <sup>2</sup> /人)	+	耕地面积/总人口	0.111 9
	有效灌溉面积/hm <sup>2</sup>		+	统计年鉴	0.020 2	
	空气质量	全年 PM <sub>2.5</sub> 均值/(μg·m <sup>-3</sup> )	-	栅格数据	0.072 2	
		土壤质量	化肥施用强度/(g·m <sup>-2</sup> )	-	化肥施用量/耕地面积	0.018 5
	格网尺度	生态环境质量	生态环境质量指数	+	栅格数据	0.5
		生态系统生产力	植物净初级生产力/(kg·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	+	栅格数据	0.5
生活承载力 (CC <sub>L</sub> )	行政单元尺度	居住空间	人均居住用地面积/(m <sup>2</sup> /人)	+	居住用地面积/总人口	0.104 8
			交通承载	公路密度/(km/万人)	+	公路里程/总人口
		交通通达度/(km·km <sup>-2</sup> )		+	公路里程/总面积	0.064 5
		资源保障		人均用水量/(m <sup>3</sup> /人)	+	用水总量/总人口
			生活用电量/(kW·h)	+	统计年鉴	0.211 3
	教育支持	每万人拥有基础教育(小学、中学)学校数/(所/万人)	+	中小学学校数/总人口	0.220 6	
		医疗资源	每千人口执业医师数/(人)	+	执业医师数/总人口	0.074 4
			每万人医院床位数/(张/万人)	+	医院床位数/总人口	0.085 5
	格网尺度	人口承载	人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	+	栅格数据	0.5
		城镇规模	城市夜间灯光/(-)	+	栅格数据	0.5
生产承载力 (CC <sub>P</sub> )	行政单元尺度	资源投入与供给	万元产值耗水/(m <sup>3</sup> /万元)	-	用水总量/地区生产总值	0.031 5
			全社会固定资产投资/(万元)	+	统计年鉴	0.094 5
		生产效率	人均地区生产总值/(元/人)	+	地区生产总值/总人口	0.055 3
			农林牧渔业总产值/(万元)	+	统计年鉴	0.059 2
			第一产业增加值/(万元)	+	统计年鉴	0.044 1
	工业发展状况	第二产业增加值/(万元)	+	统计年鉴	0.122 2	
		第三产业增加值/(万元)	+	统计年鉴	0.160 5	
		工业产品销售利润总额/(万元)	+	统计年鉴	0.147 4	
		第一产业从业人员数/(万人)	+	统计年鉴	0.051 5	
		第二产业从业人员数/(万人)	+	统计年鉴	0.077 1	
格网尺度	经济发展	第三产业从业人员数/(万人)	+	统计年鉴	0.156 7	
		地均生产总值/(万元·km <sup>-2</sup> )	+	栅格数据	1	

2.2.3 指标权重计算 评价体系中,行政单元尺度的指标权重由熵值法计算得到,该方法能够有效克服当

引入多指标变量后所引发的信息重叠,消除了人为确定权重的主观性和评价分析中的不确定性,以更加科

学客观的方式表现出各指标要素间的内部影响与作用机制<sup>[17]</sup>。具体步骤如下:

(1) 数据标准化,即对数据进行无量纲化处理,能够消除不同指标各自的单位所造成的影响。常用的数据标准化方法有很多,本研究选用极值法,其计算公式如下:

正向指标:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (1)$$

负向指标:

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (2)$$

其中,  $X'_{ij}$  为指标  $X_{ij}$  经过标准化处理后的值。

(2) 根据标准化后的值,计算第  $i$  个方案的第  $j$  项指标占该指标整体的比重。

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (3)$$

(3) 计算第  $j$  项指标的熵值。

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

其中,  $-k > 0$ ,  $\ln$  为自然对数,一般令  $k = 1/\ln j$ ,  $0 \leq e_j \leq 1$ 。

(4) 计算第  $j$  项指标的差异性系数

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

(5) 确定第  $j$  项指标的权重

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (6)$$

另外,由表 1 可知,各类承载力属于格网尺度的指标数量均为 1 或 2 个,此时若再用熵值法计算则较为冗余多余,因此当某承载力的格网尺度指标仅有一个时,权重为 1;而当有两个时,权重均为 0.5。

2.2.4 多尺度融合模型 本研究基于赵文武等<sup>[18]</sup>、单薇等<sup>[19]</sup>的研究成果,对多尺度融合模型加以改进,最终形成的模型表达式如下:

$$CC_{E.L.P} = \alpha \sum_{i=1}^n A_i \times \beta + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n B_i \times \gamma \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times \beta}{\sum_{i=1}^n A_i \times \beta + \sum_{i=1}^n B_i \times \gamma} \quad (8)$$

$$CC_C = \frac{CC_E + CC_L + CC_P}{3} \quad (9)$$

式中:  $CC_{E.L.P}$  表示多尺度融合后的国土空间生态、生活、生产承载力评价价值;  $CC_C$  为综合承载力;  $n$  是区县数量;  $A_i$  与  $B_i$  分别表示第  $i$  个区县格网尺度和行政单元尺度的承载力指标(经标准化处理后);  $\beta$  与  $\gamma$

分别表示格网尺度和行政单元尺度下的指标权重;  $\alpha$ ,  $(1 - \alpha)$  分别为格网尺度、行政单元尺度评价结果所占的比重,由公式(8)计算得到。该模型本质是利用迭代法连通了不同尺度数据之间彼此的数量与空间关系,从而顺利实现多尺度下的数据融合。

### 3 结果与分析

本研究使用 ArcGIS 10.2 软件对 2000, 2010, 2020 年共 3 期的国土空间资源环境承载力评价结果进行了可视化处理,同时将评价范围按 0~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8, 0.8~1.0 分成“低”“较低”“中”“较高”“高”共 5 个等级,并统计出不同承载力等级比例情况。下面将对各类承载力的评价结果从数量比例与空间分布两方面依次进行分析。

#### 3.1 生态承载力( $CC_E$ )评价结果

对于  $CC_E$ , 研究区一直以中等水平为主。从数量比例来看(表 2), 2000—2020 年, 较低等级区域的比例增幅最为明显, 从 6.25% 上升至 21.43%; 其次, 高等级与低等级区域所占比例发生了小幅度增长, 前者总涨幅为 0.33%, 后者仅在 2010 年后从 0 变为 0.01%。中与较高等级区域比例在 20 a 间整体均有所减小, 其中较高等级的区域比例在持续下降: 从 2000 年的 23.89% 缩减到 2010 年的 17.56%, 在 2020 年又降至 13.92%; 中等级区域比例呈起伏变化: 2000—2010 年具上升趋势, 从 69.82% 增至 73.29%, 之后一直下降至 2020 年的 64.28%。

表 2 生态承载力( $CC_E$ )各等级面积及占比  
Table 2 Area and proportion of each level of  $CC_E$

承载力等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%
低	0	0	0	0	4.99	0.01
较低	3 314.98	6.25	4 813.16	9.07	11 366.21	21.43
中	37 041.07	69.82	38 881.84	73.29	34 102.63	64.28
较高	12 672.63	23.89	9 317.70	17.56	7 382.05	13.92
高	20.97	0.04	36.96	0.07	193.76	0.37

从空间分布来看(图 2), 较低等级区域的分布位置从成都逐渐蔓延至眉山、乐山、自贡和宜宾等地, 多集中在流域中部与东南部地区, 同时在茂县西北部也能观察到较低等级区域的扩张。2000 年, 高等级区域仅在洪雅县有极少量分布, 2010 年时又有沙湾区和峨眉山市加入此列, 2020 年后可在乐山与宜宾的其他地区观察到该类区域。低等级区域在 2010 年之前不存在, 2020 年于成都主城区及邻近的双流区有极少量分

布。较高等级区域在 2000 年集中分布于流域北部和西南部,然而在这之后的 20 a 间,位于阿坝的该等级面积持续减少,尤其在松潘、茂县、黑水三县,但理县与汶川的较高  $CC_E$  区域基本都得到了良好保留,且理县在 2010 年后可见较高等级范围的显著扩张。

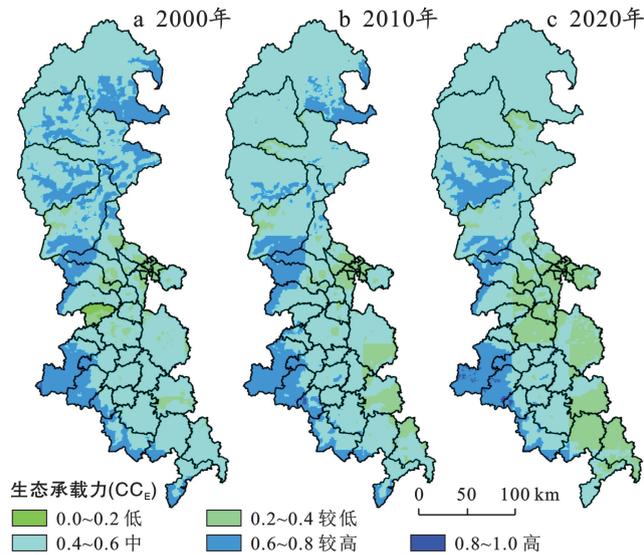


图 2 国土空间生态承载力( $CC_E$ )空间分布

Fig.2 Spatial distribution of territorial space ecological carrying capacity ( $CC_E$ )

### 3.2 生活承载力( $CC_L$ )评价结果

对于  $CC_L$ ,流域普遍等级始终不高。从数量占比来看(表 3),虽较高与高等级区域面积在研究期内持续上升,但二者的合计比例始终未突破 1%,未能形成规模扩张;与此同时,较低等级区域的范围扩张了 8 411.8  $km^2$ ,涨幅高达 47.23%,到 2020 年流域内已有近半数的国土空间具有较低等级的  $CC_L$ 。低与中等等级的区域面积占比虽较高,但在研究期内整体各下降了 1.86% 和 14.47%;不同的是低等级的区域范围先扩张后紧缩,而中等等级则与之相反。

表 3 生活承载力( $CC_L$ )各等级面积及占比

Table 3 Area and proportion of each level of  $CC_L$

承载力等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/ $km^2$	比例/%	面积/ $km^2$	比例/%	面积/ $km^2$	比例/%
低	14 009.01	26.41	27 145.07	51.17	13 021.21	24.55
较低	17 811.39	33.57	24 644.11	46.45	26 223.19	49.43
中	21 109.39	39.79	945.85	1.78	13 434.70	25.32
较高	113.86	0.21	289.65	0.55	340.59	0.64
高	5.99	0.01	24.97	0.05	29.96	0.06

从空间分布来看(图 3),较高与高等级区域主要集中在成都主城区(由锦江区、青羊区、金牛区、武侯

区、成华区组成)内,2000 年后也可于郫都、双流二区观测到极少量的分布。中等等级区域常见于松潘县(2000 年、2020 年)、理县(2000 年、2020 年)、成都主城区、郫都区东南部和双流区东北部。较低等级区域在流域内的分布最为广泛,常见于上游的黑水县(2010 年、2020 年)和茂县(2000 年、2020 年),中游的成都各区县、眉山彭山区与东坡区,下游的乐山市中区、沙湾区和夹江县,以及宜宾翠屏区等地;另外,对比图 3a 与 3c 可知,近 20 年间,该等级区域在上游的黑水县、汶川县,中游的仁寿县北部与中部,下游的乐山五通桥区、夹江县中部与南部、犍为县、沐川县等地均出现了显著扩张。低等级区域常年在流域中下游分布,例如中游洪雅、仁寿、丹棱、青神四县,下游井研、荣县、叙州区等地;而该等级区域在 2000 年后的收缩主要发生在下游乐山的五通桥区,以及夹江、犍为、沐川三县。

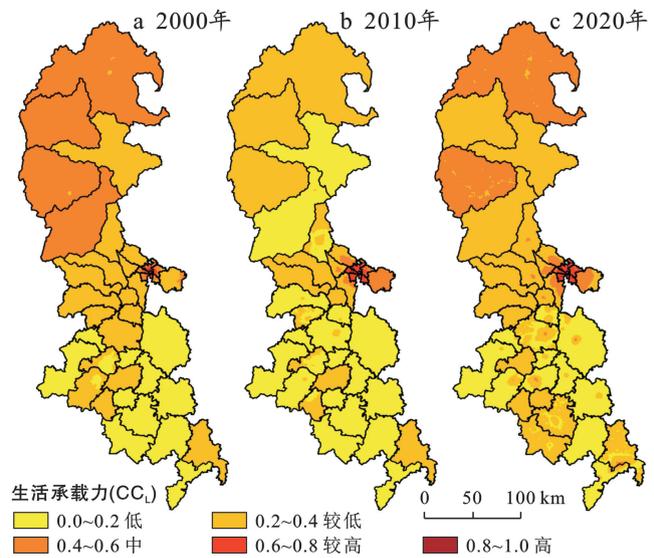


图 3 国土空间生活承载力( $CC_L$ )空间分布

Fig.3 Spatial distribution of territorial space living carrying capacity ( $CC_L$ )

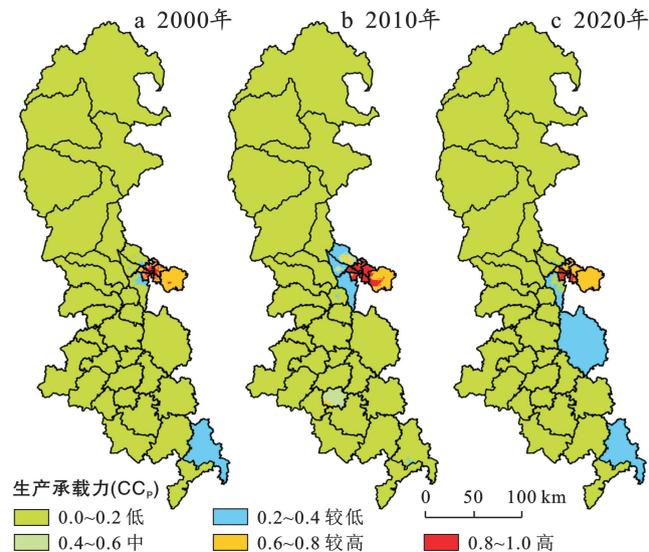
### 3.3 生产承载力( $CC_P$ )评价结果

对于  $CC_P$ ,流域常年以低等级区为主。从数量占比来看(表 4),2000 与 2010 年,研究区 95% 以上的国土空间具有低水平的  $CC_P$ ,尽管到 2020 年已有部分区域的  $CC_P$  水平得到了提升,但仍有近 90% 的地区保持着低水平的状态。较低与较高等级的区域占比均有“先减后增、波动上升”的变化特点,其中较低等级的区域扩张最为显著,其占比的总涨幅高达 167.27%。中、高等级区域的面积变化规律一致,均呈“先增后减、波动下降”的发展特点,特别是中等等级区域在 2020 年时已几近消失,面积仅为 2  $km^2$ 。

表 4 生产承载力( $CC_p$ )各等级面积及比例Table 4 Area and proportion of each level of  $CC_p$ 

承载力等级	2000年		2010年		2020年	
	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%
低	50 415.84	95.04	50 845.32	95.84	47 636.22	89.80
较低	1 656.99	3.12	1 011.77	1.91	4 428.63	8.35
中	3.00	0.01	178.78	0.34	2.00	0.004
较高	771.06	1.45	521.37	0.98	803.03	1.51
高	202.75	0.38	492.40	0.93	179.78	0.34

从空间分布来看(图 4),除个别区域外,研究区绝大部分的  $CC_p$  均始终处于低等级,但该等级面积在近年于双流西部与南部、仁寿县等地发生了显著减少。2020 年较低等级的主要分布区域与前文提到的低等级面积萎缩区域相一致,说明减少的低等级区域多数升级成了较低等级区域,另外翠屏区在 2000,2020 年也是较低等级的主要分布区。流域内中等级区域始终极少,仅在 2010 年的郫都区东南部、温江区中南部可观察到稍具规模的分布。较高与高等级区域均常年集中分布于成都主城区,其中成都主城区多数为较高等级区域,但西部始终是高等级区域的所在地。

图 4 国土空间生产承载力( $CC_p$ )空间分布Fig.4 Spatial distribution of territorial space production carrying capacity ( $CC_p$ )

### 3.4 综合承载力( $CC_c$ )评价结果

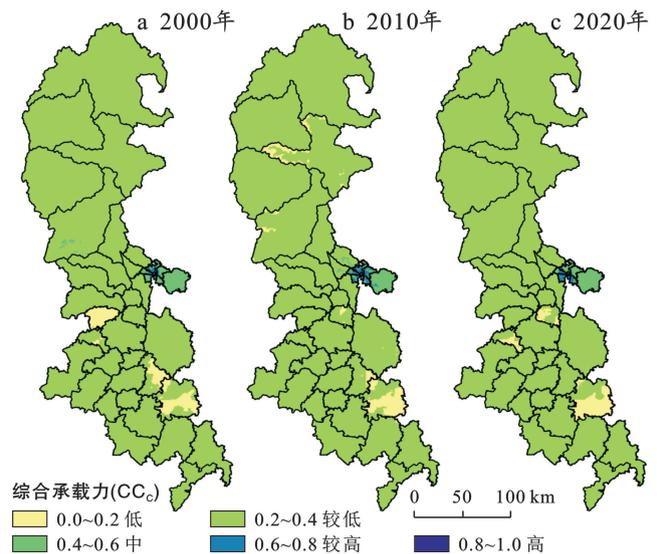
对于  $CC_c$ ,研究区始终以较低等级为主,且无高等级区域。从数量比例来看(表 5),流域 90% 以上国土空间的  $CC_c$  始终处于较低水平,且近 10 a 较低等级区域占比仍在上升,至 2020 年已达到 95.53%。较高等级区域所占比例在研究期间整体也有所增加,但近 10 a 有下降的变化趋势,减幅达到 38%。与 2000 年相比,2020 年的低、中等级区域比例分别下降了

0.44%,0.26%,其中低等级区域在 2010 年之前比例增加了 1.06%,后又减少了 1.5%;中等级区域比例在 2000—2010 年期间由 1.82% 减至 1.56% 后基本保持稳定,并于 2020 年略微升至 1.57%。

表 5 综合承载力( $CC_c$ )各等级面积及比例Table 5 Area and proportion of each level of  $CC_c$ 

承载力等级	2000年		2010年		2020年	
	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%	面积/ km <sup>2</sup>	比例/%
低	1 620.03	3.05	2 183.35	4.12	1 386.32	2.61
较低	50 352.92	94.92	49 791.60	93.86	50 677.53	95.53
中	967.83	1.82	825.00	1.56	830.99	1.57
较高	108.87	0.21	249.70	0.47	154.81	0.29
高	0	0	0	0	0	0

从空间分布来看(图 5),荣县除北部以外常年存在低等级区域,另有 2000 年的蒲江县、2010 年的茂县西部与北部、2020 年的丹棱县南部等地出现过该等级;彭山区、丹棱县和荣县的低等级区域有所扩张,但蒲江县与井研县的低等级区域都已消除。流域内除成都主城区外,其余各区县均常年分布着较低等级区域,并在汶川县、蒲江县、井研县等地逐渐扩张。中、较高等级区域均一直在成都主城区集中分布,其中较高等级区域仅出现于成都主城区西部,其余为中等级区域所占据。

图 5 国土空间综合承载力( $CC_c$ )空间分布Fig.5 Spatial distribution of territorial space comprehensive carrying capacity ( $CC_c$ )

## 4 讨论

(1) 国土空间资源环境承载力影响因素分析。通过对上述评价结果的详细分析,研究发现,岷江上游

的  $CC_E$  水平在研究期内始终保持着较高水平,这与蒋尊梅等<sup>[20]</sup>、谢尚春等<sup>[21]</sup>的研究相符。由于该地区海拔较高、地形复杂,致使国土空间开发利用难度大,难以在现有基础上开展较大规模的扩张,这让国土空间最原始的生态属性及其蕴涵的自然资源得以保留,尤其是林地与草地资源产生了大量的生态盈余<sup>[21-22]</sup>,使该区域的  $CC_E$  能够长期保持较高水平。但同时,上述原因限制了岷江上游的城镇开发建设和耕地集约利用,也令该地区的社会经济发展更加艰难。因此,先天的地理环境特点与长期社会经济欠发达共同造成了该地区  $CC_L$  与  $CC_P$  等级均不高,直接导致  $CC_C$  常年处于较低水平,这印证了李刚等<sup>[23]</sup>的研究。

值得注意的是,成都主城区一直拥有较高及以上水平的  $CC_L$  与  $CC_P$ ,且  $CC_C$  水平长期保持在中等及以上,位居全流域首位。这与现有文献中的一些结论十分相似<sup>[24-27]</sup>。姜豪等<sup>[28]</sup>指出,社会经济是影响成都城市综合承载力的主因。成都主城区在经济发展、文化建设、社会进步等方面在四川全省均处于突出地位,且由高速发展的城市化带来的第三产业蓬勃发展引发了该地区的产业结构优化升级<sup>[29]</sup>,进而二者结合共同促进了社会经济逐步转向高质量发展,极大提升了资源利用效率,保证了地区内的承载力水平始终处于高位。

(2) 研究创新与不足。与现有文献相比,本研究存在以下两点创新:①基于流域地区国土空间的“三生”功能属性特点,构建资源环境承载力评价体系。在现有的少数对流域地区的资源环境承载力进行评价的研究中,大多是将评价体系分为资源、环境和社会经济这3个子系统<sup>[30-31]</sup>。本文则是将国土空间本身作为构建评价体系的基础依托,以充分体现三生赋予国土空间的多功能性,有利于与当前国家和地方各级政府积极推行、实施的国土空间规划相呼应,使岷江流域未来国土空间开发与利用方向更加明确。②利用改进的多尺度融合模型完成资源环境承载力评价。当前,已出现少量利用多尺度数据开展资源环境承载力评价的研究<sup>[32-33]</sup>,其中特别是吴浩等<sup>[34]</sup>采用了30 m,2 km 和街道3个尺度的时空数据,对武汉市的资源环境承载力进行时空特征分析。但上述文献存在两个问题:一是未能构建出一套完整的多尺度资源环境承载力评价体系;二是对不同尺度的指标数据的融合过程过于简单,在利用变异系数法、层次分析法、专家打分法等方法确定指标权重后,仅作栅格的加权叠加分析即得到最终评价结果。因此,本研究不仅弥补了构建多尺度国土空间资源环境承载力评价体系的缺失,也提高了多尺度数据融合方法的科学性,使

评价结果更加准确、客观。

另外,本研究仍存在一些不足,例如在确定网格尺度指标的权重时过于简单,若网格尺度指标不少于3个则应找寻更科学客观的方法确定权重;又如在分析国土空间资源环境承载力的影响因素时,仅通过与其他类似研究进行对照,从而找寻造成承载力等级高或低的原因,缺乏定量化研究。因此,上述不足是未来相关研究需要重点突破的方向。

## 5 结论

(1) 从岷江流域整体来看,生态承载力( $CC_E$ )始终以中等水平为主,但研究区超过99%的面积常年被中等及以下的生活承载力( $CC_L$ )区域所占据,生产承载力( $CC_P$ )也长期保持在低等级,因而导致流域九成以上的综合承载力( $CC_C$ )始终处于较低水平且不存在高等级区域。

(2) 从承载力等级变化特点来看,2000—2020年,所有类型承载力的较低等级区域均在扩张。其中,对于  $CC_E$ ,扩张多发生于流域中部与东南部地区,但流域北部、西南部的较高等级区域始终得到了良好保留;对于  $CC_L$ ,在上游(如黑水县、汶川县)、中游(如仁寿县北部与中部)和下游(如犍为县、沐川县)均出现了显著扩张;对于  $CC_P$ ,多数的扩张区域是由原本的低等级区域转化而来,表明以双流西部与南部、仁寿县为首的一些地区发生了由低至较低的等级提升;对于  $CC_C$ ,主要在汶川县、蒲江县、井研县等地持续扩张。

(3) 从承载力的影响因素来看,岷江上游受地势地貌影响能够长期保持较高水平的  $CC_E$ ,但也制约了社会经济发展,导致  $CC_L$  与  $CC_P$  等级较低且提升难度大,无法促进  $CC_C$  提高。城市化与产业结构优化升级为成都主城区带来了社会经济高质量发展,是该地区  $CC_L$  与  $CC_P$  等级始终居高不下的主因,使  $CC_C$  得以一直稳定在中至较高水平。

## 参考文献(References)

- [1] 吴明艳,晋王强,杨斌,等.甘肃省资源环境承载力水平评价及耦合协调性研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2023,41(1):213-223.  
Wu Mingyan, Jin Wangqiang, Yang Bin, et al. Evaluation and coupling coordination of resource and environment carrying capacity in Gansu, China [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2023,41(1):213-223.
- [2] 杨秀敏,耿静,徐游,等.基于TOPSIS模型的海南岛土地综合承载力时空变化及障碍度诊断[J].生态学报,2022,

- 42(22):9324-9334.
- Yang Xiumin, Geng Jing, Xu You, et al. Spatio-temporal change and obstacle degree diagnosis of comprehensive land carrying capacity in Hainan Island based on TOPSIS model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(22):9324-9334.
- [3] Cui Guangming, Zhang Xuliang, Zhang Zhaohui, et al. Comprehensive land carrying capacities of the cities in the Shandong peninsula blue economic zone and their spatio-temporal variations [J]. *Sustainability*, 2019,11(2):439.
- [4] Zhang Shanghong, Xiang Mengshi, Yang Jiasheng, et al. Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity models for water resources based on optimal water cycle theory [J]. *Ecological Indicators*, 2019,101:432-443.
- [5] Guo Qian, Wang Jiayang, Yin Hongling, et al. A comprehensive evaluation model of regional atmospheric environment carrying capacity: Model development and a case study in China [J]. *Ecological Indicators*, 2018,91:259-267.
- [6] 杨钦宇,余婷,卢庆强,等.市县“双评价”技术方法及应用体系研究:基于国土空间规划整体认知视角[J].*城市发展研究*,2023,30(2):7-12.
- Yang Qinyu, Yu Ting, Lu Qingqiang, et al. Research on technology methods and application systems of “double evaluation” at city and county levels: Based on the overall cognition of territorial spatial planning [J]. *Urban Development Studies*, 2023,30(2):7-12.
- [7] 刘晶晶,王静,李泽慧,等.基于双评价的城市建设用地供给与空间发展方向研究:以烟台市为例[J].*地域研究与开发*,2021,40(5):162-168.
- Liu Jingjing, Wang Jing, Li Zehui, et al. Research on construction land supply and direction of urban development based on the double evaluation: Taking Yantai City as example [J]. *Areal Research and Development*, 2021,40(5):162-168.
- [8] 罗巧灵,许琪敏,陈菲雨,等.面向国土空间规划的鄂州市资源环境承载力评价[J].*武汉大学学报(工学版)*,2023,56(7):807-816.
- Luo Qiaoling, Xu Qimin, Chen Feiyu, et al. Evaluation of resource and environment carrying capacity of Ezhou City from the perspective of national territory spatial planning [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023,56(7):807-816.
- [9] 倪维秋,刘茗,王静,等.基于主体功能区的农产品主产区国土空间生态风险评价[J].*江苏农业科学*,2022,50(17):276-282.
- Ni Weiqiu, Liu Ming, Wang Jing, et al. Ecological risk assessment of land space in main agricultural production areas based on main functional areas [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022,50(17):276-282.
- [10] 周燕,罗雅文,禹佳宁,等.流域国土空间水资源承载力评价及保护方法研究[J].*人民长江*,2024,55(2):125-133.
- Zhou Yan, Luo Yawen, Yu Jianing, et al. Research on evaluation and protection method of water resources carrying capacity in territorial space of a basin [J]. *Yangtze River*, 2024,55(2):125-133.
- [11] 宋述军,周万村.岷江流域土地利用结构对地表水水质的影响[J].*长江流域资源与环境*,2008,17(5):712-715.
- Song Shujun, Zhou Wancun. Effects of land use structure on surface water quality in Minjiang River basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008,17(5):712-715.
- [12] 甘书龙.四川省农业资源与区划—上篇[M].四川成都:四川省社会科学院出版社,1986:34-56.
- Gan Shulong, Fu Shouning, Tang Hongqian, et al. *Agricultural Resources and Regionalization of Sichuan Province* [M]. Chengdu: Sichuan Academy of Social Sciences, 1986.
- [13] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].*地理研究*,2018,37(6):1100-1114.
- Wang Cheng, Tang Ning. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural production-living-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality [J]. *Geographical Research*, 2018,37(6):1100-1114.
- [14] 王路,白晶晶,郑春丽.内蒙古自治区生态承载力历史演化及预测[J].*生态科学*,2021,40(5):155-163.
- Wang Lu, Bai Jingjing, Zheng Chunli. Historical evolution and prediction of ecological carrying capacity in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. *Ecological Science*, 2021,40(5):155-163.
- [15] 陆文涛,尹彩春,张杨,等.基于“三线一单”指标体系的生态承载力与产业布局一致性评价[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2021,57(4):749-755.
- Lu Wentao, Yin Caichun, Zhang Yang, et al. Consistency evaluation of ecological carrying capacity and industrial layout based on “three lines one permit” index system [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021,57(4):749-755.
- [16] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J].*地理研究*,2021,40(4):1096-1110.
- Feng Yanwei, Zhen Jianghong, Ma Chenyang. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of ecological security pattern in Inner Mongolia [J]. *Geographical Research*, 2021,40(4):1096-1110.
- [17] 王振坡,朱丹,王丽艳.区域协同下京津冀城市群城市综合承载力评价[J].*首都经济贸易大学学报*,2018,20(6):73-81.
- Wang Zhenpo, Zhu Dan, Wang Liyan. The evaluation

- of urban comprehensive carrying capacity of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration under regional collaboration [J]. *Journal of Capital University of Economics and Business*, 2018, 20(6):73-81.
- [18] 赵文武,傅伯杰,陈利顶.尺度推绎研究中的几点基本问题[J].*地球科学进展*, 2002, 17(6):905-911.  
Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Liding. Some fundamental issues in scaling [J]. *Advance In Earth Sciences*, 2002, 17(6):905-911.
- [19] 单薇,金晓斌,冉娜,等.江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(7):1541-1551.  
Shan Wei, Jin Xiaobin, Ran Na, et al. “Production-living-ecological” function evaluation and coupling coordination analysis of land use in Jiangsu Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7):1541-1551.
- [20] 蒋尊梅,江晓波.基于生态足迹的岷江上游土地资源利用评价[J].*贵州农业科学*, 2011, 39(8):200-203.  
Jiang Zunmei, Jiang Xiaobo. Evaluation of sustainable use of land resource in upper reaches of Minjiang River based on ecological footprint [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(8):200-203.
- [21] 谢尚春,刘慧,王海涛,等.岷江上游生态安全综合评价[J].*安徽农业科学*, 2010, 38(11):5807-5809.  
Xie Shangchun, Liu Hui, Wang Haitao, et al. Comprehensive evaluation on ecological security in the upper Min River Basin [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(11):5807-5809.
- [22] 龙海峰,赵兵.基于生态足迹下的黑水县生态承载力分析[J].*西南师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(11):201-206.  
Long Haifeng, Zhao Bing. On analysis of ecological capacity in Heishui country based on ecological footprint [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 39(11):201-206.
- [23] 李刚,卢晓宁,边金虎,等.岷江上游土地资源承载力评价[J].*水土保持研究*, 2015, 22(1):262-268.  
Li Gang, Lu Xiaoning, Bian Jinhui, et al. Evaluation of land carrying capacity in upper reaches of Minjiang River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1):262-268.
- [24] 王维,江源,张林波,等.基于生态承载力的成都产业空间布局研究[J].*环境科学研究*, 2010, 23(3):333-339.  
Wang Wei, Jiang Yuan, Zhang Linbo, et al. Study on Chengdu industrial spatial distribution based on ecological carrying capacity [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(3):333-339.
- [25] 权泉,朱佳玲,刘云强,等.四川省城市群综合承载力、驱动因子与空间演化[J].*中国农业资源与区划*, 2018, 39(8):218-229.  
Quan Quan, Zhu Jialing, Liu Yunqiang, et al. Comprehensive carrying capacity of urban agglomeration, driving factors and spatial evolution in Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(8):218-229.
- [26] 王翠华,冉瑞平,魏晋.区域土地综合承载力空间差异评价研究:以四川省为例[J].*国土与自然资源研究*, 2010(2):30-31.  
Wang Cuihua, Ran Ruiping, Wei Jin. Research on spatial difference of regional land comprehensive carrying capacity: A case study in Sichuan Province [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2010(2):30-31.
- [27] 游韵,潘科,刘斌,等.基于城市差异化的土地综合承载力评价:以四川省为例[J].*桂林理工大学学报*, 2019, 39(2):500-507.  
You Yun, Pan Ke, Liu Bin, et al. Evaluation of land comprehensive carrying capacity based on urban differentiation [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2019, 39(2):500-507.
- [28] 姜豪,陈灿平.城市综合承载力研究:以成都为例[J].*软科学*, 2016, 30(12):59-62.  
Jiang Hao, Chen Canping. Study on urban comprehensive carrying capacity: A case of Chengdu [J]. *Soft Science*, 2016, 30(12):59-62.
- [29] 段苏芮.城市扩张对就业的影响变化研究:以成都市为例[J].*山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(4):602-605.  
Duan Surui. Research on the Influence of Urban Expansion on Employment: A case analysis of Chengdu City [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 48(4):602-605.
- [30] 卞正富,于昊辰,雷少刚,等.黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J].*煤炭学报*, 2021, 46(5):1378-1391.  
Bian Zhengfu, Yu Haochen, Lei Shaogang, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River basin, China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5):1378-1391.
- [31] 王艳,雷淑珍.黄河流域资源环境承载力评价研究[J].*人民黄河*, 2022, 44(8):17-21.  
Wang Yan, Lei Shuzhen. Evaluation of resources and environment carrying capacity of the Yellow River basin [J]. *Yellow River*, 2022, 44(8):17-21.

- producing areas of China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110785.
- [22] Kadiresan K, Khanal P R. Rethinking irrigation for global food security [J]. *Irrigation and Drainage*, 2018, 67(1): 8-11.
- [23] Tan Yaogeng, Dong Zengchuan, Guzman S M, et al. Identifying the dynamic evolution and feedback process of water resources nexus system considering socioeconomic development, ecological protection, and food security: A practical tool for sustainable water use [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(12): 6495-6522.
- [24] 刘显, 徐悦悦, 孙从建, 等. 黄河上中游水资源与粮食安全耦合关系特征分析: 以陕甘宁青为例 [J]. *地球环境学报*, 2022, 13(4): 369-379.  
Liu Xian, Xu Yueyue, Sun Congjian, et al. Analysis of the coupling characteristics between water resources and food security in the upper and middle reaches of the Yellow River: A case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region, Northwest China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2022, 13(4): 369-379.
- [25] 刘苗苗, 潘佩佩, 任佳璇, 等. 京津冀粮食安全与农业用水安全耦合协调研究 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(2): 170-182.  
Liu Miaomiao, Pan Peipei, Ren Jiakuan, et al. Coupling coordination of food security and agricultural water security in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(2): 170-182.
- [26] Mwambo F M, Fürst C, Nyarko B K, et al. Maize production and environmental costs: Resource evaluation and strategic land use planning for food security in northern Ghana by means of coupled energy and data envelopment analysis [J]. *Land Use Policy*, 2020, 95: 104490.
- [27] 阴柯欣, 商庆凯, 米文宝. 宁夏耕地生产力与粮食安全耦合关系及趋势预测 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(7): 37-45.  
Yin Kexin, Shang Qingkai, Mi Wenbao. Analysis and forecast of coupling relationship between cultivated land productivity and food security in Ningxia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(7): 37-45.
- [28] 罗海平, 余兆鹏, 邹楠. 我国粮食主产区生态与粮食安全耦合协调分析: 基于 1995—2015 年面板数据 [J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(10): 32-39.  
Luo Haiping, Yu Zhaopeng, Zou Nan. The empirical study on the spatial coupling of ecology and food security in major grain-producing areas in China: Based on 1995—2015 panel data [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(10): 32-39.
- [29] 薛选登, 马路. 粮食主产区土地生态与粮食安全耦合协调性分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(9): 1-11.  
Xue Xuandeng, Ma Lu. Analysis on the coupling and coordination of land ecological and food security in main grain producing areas [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(9): 1-11.
- [30] 唐启飞, 何蒲明. 农业生态环境: 粮食生产: 农业补贴耦合协调发展研究: 以湖北省为例 [J]. *生态经济*, 2019, 35(9): 116-120.  
Tang Qifei, He Puming. Analysis of coupling coordination development among the agricultural Environment Grain production-agricultural subsidy: A case study of Hubei Province [J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(9): 116-120.
- Wu Lan, Wu Quan, Aodeng Gaowa, et al. Evaluation of environmental carrying capacity of land and space resources in Liangcheng County [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 100-107.
- [34] 吴浩, 江志猛, 林安琪, 等. 基于隐性—韧性—显性的武汉城市资源环境承载力空间特征 [J]. *地理学报*, 2021, 76(10): 2439-2457.  
Wu Hao, Jiang Zhimeng, Lin Anqi, et al. Analyzing spatial characteristics of urban resource and environment carrying capacity based on Covert-Resilient-Overt: A case study of Wuhan City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(10): 2439-2457.

(上接第 161 页)

- [32] 潘昱奇, 李满春, 姜朋辉, 等. 基于多源国土空间数据的资源环境综合承载力及人口承载力评价: 以江苏省常州市为例 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 350-356.  
Pan Yuqi, Li Manchun, Jiang Penghui, et al. Evaluation on comprehensive carrying capacity of resources and environment, and population carrying capacity based on multi-source land spatial data: Taking Changzhou City of Jiangsu Province as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4): 350-356.
- [33] 乌兰, 吴全, 敖登高娃, 等. 凉城县国土空间资源环境承载力评价研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(7): 100-107.