

# 西南喀斯特典型区国土空间功能质量评价 及耦合协调分析 ——以广南县为例

李思楠<sup>1</sup>, 赵筱青<sup>1</sup>, 普军伟<sup>2</sup>, 王 茜<sup>1</sup>, 苗培培<sup>1</sup>, 谭 琨<sup>1</sup>

(1. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500)

**摘要:** 城镇、农业和生态功能组成整个国土空间功能系统, 分析国土空间功能质量状况, 揭示它们的耦合协调关系, 是实现国土空间可持续发展的重要基础。为探究西南喀斯特地区国土空间功能的发展状况, 分析其质量分布特征, 以西南喀斯特典型区广南县为例, 基于城镇、农业和生态功能质量评价指标体系的构建, 借助综合评价法和探索性空间数据分析法, 对国土空间的功能质量与空间特征进行了评估, 并利用耦合协调度模型分析了国土空间功能的耦合协调状况。研究发现: (1) 城镇和农业功能质量以低值为主, 生态功能质量以高值为主, 综合功能的高低质量的数量结构较平均, 不同功能质量的空间分布存在差异; (2) 四种国土空间功能质量均具有正相关性, 以“高一高”和“低一低”集聚为主, 并呈地域分布差异; (3) 喀斯特地区各类功能相互影响较大, 低耦合区和高耦合区分布差异显著, 在建设用地上耦合度最低; (4) 喀斯特地区国土空间功能的耦合协调关系可分为轻度失调、濒临失调、勉强协调和轻度协调, 它们的空间分布差异与综合功能质量相似, 国土空间功能耦合协调区管控措施的提出可有效推动喀斯特地区国土空间的可持续发展, 促进国土空间功能质量的提高。研究结果可为西南喀斯特地区国土空间的均衡发展和优化调控提供参考。

**关键词:** 国土空间; 功能质量评价; 耦合协调; 喀斯特地区; 广南县

国土空间是经济社会发展的载体, 是人类生存的依托, 早在党的十八大报告中, 已将国土空间规划视为生态文明建设的首要举措<sup>[1]</sup>。然而, 随着中国城镇化的快速推进, 城乡建设用地快速扩张, 农业和生态用地持续萎缩, 不同国土功能类型冲突严重, 引发一系列生态环境和社会问题, 给中国国土空间的发展带来巨大的挑战<sup>[2]</sup>。在此背景下, 评估区域国土空间的功能质量状况, 探究不同功能的协调发展程度, 成为区域发展研究中备受关注的热点议题。

以云贵高原为中心的西南喀斯特地区是中国分布最集中、范围最广的喀斯特地貌发育区<sup>[3]</sup>。该地区岩溶作用强烈, 生态系统易受外界干扰而发生退化, 生态环境保护的压力较大, 是典型的生态脆弱区<sup>[4]</sup>。严重的石漠化状况也使该区域成为中国社会经济和农业发展的主要“洼地”, 是国家扶贫和生态修复的重点地区。当前西南喀斯特地区正处于城镇化和工业化快速发展阶段, 区域城镇功能质量得到了较大提升, 但这也限制了农业和生

收稿日期: 2020-07-06; 修订日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42061052); 云南省科技厅—云南大学联合基金项目 (2018FY001(-017)); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2020Y0030); 云南大学研究生创新人才培养项目 (C176230200)

作者简介: 李思楠 (1994-), 男, 云南普洱人, 硕士, 研究方向为国土空间调控。E-mail: lisanan@zju.edu.cn

通讯作者: 赵筱青 (1969-), 女, 云南大理人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用变化及国土空间优化。E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

态的发展,产生严重的空间功能冲突,加剧生态和贫困问题。因此,探究国土空间功能质量的发展现状并分析各功能的协调发展水平,成为解决西南喀斯特地区国土空间功能冲突的关键,对其的研究被赋予了重要的和迫切的理论和现实意义。

合理认知国土空间功能质量是量化分析国土资源协调配置的关键环节<sup>[5]</sup>,而科学构建国土空间功能质量指标体系是质量评估的重要基础。在当前的研究中,许多学者从不同角度对区域城镇、农业和生态功能质量的评价指标体系进行了大量的探索,构建形式主要涵盖以下两个方面:(1)自然、社会和经济等可持续发展要素是构成国土空间的重要基础<sup>[6]</sup>,有学者以经济—环境<sup>[7]</sup>、城市化—生态<sup>[8]</sup>、土地—产业—人口<sup>[9]</sup>和水—食物—能源—环境<sup>[10]</sup>等不同主题要素的集合作为切入点,构建了不同分析视角下的国土空间功能质量评价指标体系,揭示区域城镇、农业和生态功能状况与可持续发展的相互联系<sup>[11]</sup>。(2)以城镇、农业、生态为主导的国土空间功能已成为中国国土空间规划的核心<sup>[12,13]</sup>,众多学者以此为对象直接展开国土空间功能质量的评估,并从生态系统服务功能<sup>[14]</sup>、承载潜力<sup>[15]</sup>、净初级生产力生产空间评估模型<sup>[16]</sup>和行为主体的主观用地意图<sup>[17]</sup>等视角展开三类功能质量评价指标体系的构建。同时,也有学者针对土地利用多功能化,以三类功能下的各二级功能为对象构建了不同的评价指标体系,进而评估区域三类空间的质量状况<sup>[18-20]</sup>。在喀斯特地区的耦合协调分析中,学者们主要关注于生态、环境、资源、经济等不同要素的发展,并对不同要素组合间的耦合协调发展状况进行了探索,如水—碳<sup>[21]</sup>、生态环境—经济发展<sup>[22]</sup>、水—土<sup>[23]</sup>和水—热—人—地<sup>[24]</sup>等。

综上所述,已有研究为深入探索国土空间功能质量状况积累了经验,也为喀斯特地区国土空间的可持续发展提供了参考。但总结发现,当前国土空间功能质量评价的指标体系大多基于一些常用数据进行构建,且构建框架基本相同,没有充分考虑所处地区的资源环境和社会经济发展状况,因此评估结果缺乏区域发展特色和实用性。同时,侧重从国土空间的不同组成要素展开耦合协调分析,缺乏对以三种功能为主体的关注,使国土空间发展对三种功能协调状况的认知不足,加剧区域发展的矛盾与冲突。此外,目前仍然缺乏对喀斯特地区国土空间功能方面的相关研究。

因此,考虑到当前研究的局限性和喀斯特地区国土空间功能质量研究的重要性,研究以西南喀斯特典型区广南县为例。该县位于西南喀斯特集中连片带上,喀斯特地貌连片度较高,占研究区总面积的3/5,石漠化严重,生态环境脆弱,可反映西南喀斯特地区的特点,具有代表性和典型性。通过构建国土空间功能质量评价模型,量化评估国土空间单一功能和综合功能的质量状况和空间分异特征,并判断各类功能的耦合协调状况,提出管控措施,旨在为西南喀斯特地区的国土空间优化和生态环境保护提供参考,并为其他类似区域提供方法借鉴。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

广南县位于云南省东南部、文山州东北部(104°31'~105°39'E, 23°29'~24°28'N),地处滇、桂、黔三省区交界处,全县总面积7730.09 km<sup>2</sup>(图1)。该县处于云贵高原向广西东部延伸的斜坡地段,地势由西南向东北呈阶梯状倾斜,西南高、东北低,山区、半山区占全县国土总面积的94.7%。它也属于中国西南喀斯特集中连片区的一部分,喀斯特地貌

广布, 主要分布于县域的南部、西部和西南部, 2018年面积达4625.69 km<sup>2</sup>, 占全县总面积的3/5, 并且主要由重度石漠化区组成, 石漠化状况严重(图2)。广南县也是一个农业生产占比较大的边疆少数民族地区, 经济形势恶劣, 生产力低下, 是中国的国家级贫困县之一。国土空间发展的混乱局面导致环境问题恶化和贫困加剧, 严重威胁着区域生态环境和社会经济的可持续发展。

## 1.2 数据来源及处理

从地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 获取研究区 2018 年 15 m 空间分辨率的 Landsat 8 OLI 影像, 利用 ENVI 和 ArcGIS 对其进行几何校正、图像增强、镶嵌和裁剪等处理后, 根据影像的光谱特征和纹理形状, 构建了 2018 年土地利用数据集, 包括水田、旱地、园地、林地、草地、城镇建设用地、农村居民点、水域和未利用地等九种土地利用类型; 根据岩性特征划喀斯特区和非喀斯特区, 在喀斯特区构建石漠化程度数据集, 包括无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化等五种石漠化程度类型。为检验结果精度, 在全域范围内选取了 246 个随机采样点对分类结果进行验证, 土地利用类型和石漠化程度类型的准确度分别为 90.45% 和 85.11%, 准确度较高, 满足研究需要。

从广南县统计局、自然资源局、水务局和生态环境局等政府部门以及县人民政府网站 (<https://www.yngn.gov.cn/>) 获取了社会经济、地质灾害、矿产资源、水资源利用、环境保护和气象水文等数据, 然而, 由于数据的格式表达不一, 对统计表格和纸质文本等无法空间化的数据进行了统一的处理。例如, 社会经济的空间数据通过乡镇赋值、网格衰减和 Kriging 插值得到, 交通设施、水利设施和旅游景区等数据通过空间数字化得到, 环境空气质量和气象数据通过气象站点 Kriging 插值得到。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 国土空间功能质量评价

#### (1) 指标体系构建

通过实地考察和相关文献查阅<sup>[4,25,26]</sup>, 结合喀斯特地区不同国土空间功能类型的特点, 分别建立城镇、农业和生态功能质量的评价指标体系。

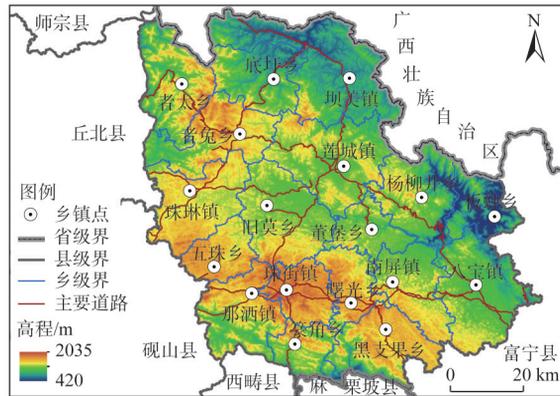


图1 研究区区位

Fig. 1 Location of the study area

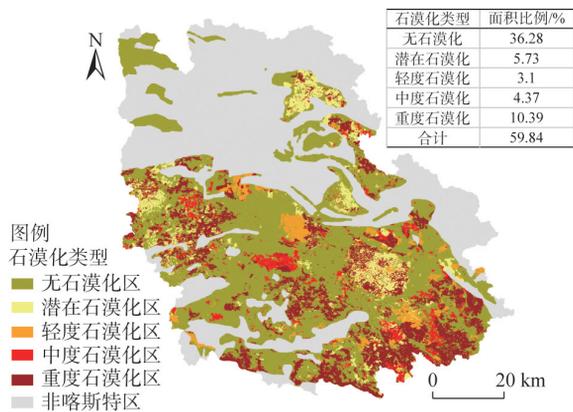


图2 2018年石漠化现状分布

Fig. 2 Distribution of rocky desertification in 2018

从经济效益产出、社会发展、承载能力、生活保障和区位条件五个方面构建城镇功能质量的评价指标体系（表1）。其中，经济效益产出能够表征城镇功能带来的收益状况，选取经济密度和GDP增长率反映经济效益产出状况。社会发展情况是城镇功能发展状况的重要表征，并具体体现在人口活力和城镇发展状况等方面，采用人口密度、劳动人口比例、新增外来人口数量、农业转城镇人口数量、城镇空间利用效率和城镇化率反映社会发展状况。承载能力能够表征城镇功能质量在未来一定时期内可提升空间的大小，选取社会经济承载力和资源环境承载力反映承载能力状况。生活保障是城镇功能得以稳固提升的基础，只有满足人们的日常生活所需，才能维持区域城镇功能质量的稳定，因此，选取水资源供需比例、人均粮食占有量、基础设施完善度和公共服务设施覆盖度反映生活保障状况。区位条件也是影响城镇功能质量大小的重要指标，一般情况下，现有城镇用地的周边区域城镇功能质量较高，交通路网是城镇功能质量提升的“血管”，并且考虑到喀斯特地区的实际状况，石漠化严重地区也会对城镇功能质量的提升产生重要的影响，因此，选取距城镇建设用地距离、距交通干线距离和距石漠化重度区距离反映区位条件状况。

表1 城镇功能质量评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of urban function quality

目标	准则	指标	单位	获取方式	趋向	权重	
城镇功能质量	经济效益产出	经济密度	万元/km <sup>2</sup>	GDP/土地总面积	+	0.0497	
		GDP增长率	%	资料收集	+	0.0676	
	社会发展	人口密度	人/km <sup>2</sup>	人口总数/土地总面积	+	0.0361	
		劳动人口比例	%	劳动人口数/人口总数	+	0.0563	
		新增外来人口数量	人	资料收集	+	0.0619	
		农业转城镇人口数量	人	资料收集	+	0.0703	
		城镇空间利用效率	%	DEA	+	0.0813	
		城镇化率	%	资料收集	+	0.0521	
	承载能力	社会经济承载力			模糊综合评价法	+	0.0502
		资源环境承载力			模糊综合评价法	+	0.0521
	生活保障	水资源供需比例	%		资料收集	+	0.0448
		人均粮食占有量	kg/人		粮食总产量/人口总数	+	0.0428
		基础设施完善度	%		资料收集	+	0.0711
		公共服务设施覆盖度	%		公共服务设施面积/土地总面积	+	0.0626
	区位条件	距城镇建设用地距离	m		欧氏距离	-	0.0856
		距交通干线距离	m		欧氏距离	-	0.0323
距石漠化重度区距离		m		欧氏距离	+	0.0832	

从气候条件、区位条件、资源与效益产出和耕作与土壤条件四个方面构建农业功能质量的评价指标体系（表2）。气候条件是影响农业种植和生产最主要的因素，它的变化对于农业功能质量的干扰最大，本文选取年平均温度和年总降雨量反映气候条件状况。然而，在一般情况下，距现状耕地和农村居民点越近，农业生产和生活质量越高，而县道和乡道的分布也为农业种植和农产品运输提供了很好的交通运输基础，因此，选取距农村居民点距离、距一般道路距离和距现状耕地距离反映农业功能的区位条件状况。资

表2 农业功能质量评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of agricultural function quality

目标层	准则层	指标层	单位	获取方式	趋向	权重
农业功能 质量	气候条件	年平均温度	°C	气象站点插值	+	0.1252
		年总降雨量	mm	气象站点插值	+	0.0557
	区位条件	距农村居民点距离	m	欧氏距离	-	0.0140
		距一般道路距离	m	欧氏距离	-	0.0783
		距现状耕地距离	m	欧氏距离	-	0.0129
资源与 效益产出	土地垦殖率	土地垦殖率	%	耕地面积/土地总面积	+	0.0516
		粮食单产	t/km <sup>2</sup>	粮食总产量/耕地面积	+	0.0417
		人均耕地面积	m <sup>2</sup> /人	耕地面积/人口总数	+	0.0427
		第一产业产值占比	%	第一产业产值/GDP	+	0.0218
耕作与 土壤条件	灌溉保证率	灌溉保证率	%	资料收集	+	0.1090
		有机质含量	g/kg	资料收集	+	0.0240
		全氮含量	g/kg	资料收集	+	0.0217
		有效磷含量	mg/kg	资料收集	+	0.1000
		速效钾含量	mg/kg	资料收集	+	0.0654
		有效锌含量	mg/kg	资料收集	+	0.0628
		水溶态硼含量	mg/kg	资料收集	+	0.0467
		土层厚度	cm	资料收集	+	0.0206
	耕地质量等级	耕地质量等级		资料收集	+	0.0827
		土壤pH值		资料收集	+	0.0232

源与效益的产出能够较好地反映区域农业功能的发展程度，通常基于耕地规模、农作物产量和农业收入等指标对其进行表征，结合数据资料的收集情况，采用土地垦殖率、粮食单产、人均耕地面积和第一产业产值占比反映资源与效益产出的状况。较好地耕作条件是提高农用地适宜性的有效途径，而土壤养分状况是土壤肥力的主要评价指标，养分含量较高的土壤具有较强的农业生产能力，因此，结合喀斯特地区农用地分等定级数据库，选取灌溉保证率、有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有效锌含量、水溶态硼含量、土层厚度、耕地质量等级和土壤pH值反映耕作与土壤条件。

从生态敏感性和生态重要性两个角度构建生态功能质量的评价指标体系（表3）。其中，生态敏感性是生态系统对人类活动反应的敏感程度，反映产生生态失衡与生态环境问题的可能性大小。由于喀斯特地区水土流失严重，生态环境的可承载能力弱以及整体质量差，因此采用土壤侵蚀量、生境质量指数、环境承载力、生态脆弱指数、岩石裸露度和景观分离度反映喀斯特地区的生态敏感性。同时，各类生态环境要素（如水源、植被和物种等）对区域生态维护具有重要作用，考虑到喀斯特地区水资源下渗严重、植被覆盖程度低以及物种丰度低等问题，采用水源涵养量、水网密度、生物多样性指数、植被净初级生产力、植被覆盖度、生态系统服务价值、生态用地斑块密度、景观结构指数和生态用地恢复率反映喀斯特地区的生态重要性。

为消除各评价指标之间量纲、数量级和正负趋向等差异，对原始指标进行极值标准化处理，并采用熵权法对各评价指标的权重进行计算。然而，虽然熵权法自动计算权重具有客观性且可信度高<sup>[25]</sup>，但不能结合区域实际状况。因此，为确保所得权重兼顾喀斯

表3 生态功能质量评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of ecological function quality

目标层	准则层	指标层	单位	获取方式	趋向	权重
生态功能 质量	生态敏感性	土壤侵蚀量	t/km <sup>2</sup>	RUSLE	+	0.0793
		生境质量指数		HQI	+	0.1025
		环境承载力		模糊综合评价法	+	0.0288
		生态脆弱度		CASA	+	0.0748
		岩石裸露度		遥感提取	+	0.0695
		景观分离度		Fragstats提取	+	0.0430
	生态重要性	水源涵养量	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	降水储存	+	0.0846
		水网密度		(水库+河流+湖泊面积) / 土地总面积	+	0.0492
		生物多样性指数		Shannon-Wiener	+	0.1123
		植被净初级生产力	g C/(m <sup>2</sup> · a)	NPP	+	0.0943
		植被覆盖度	%	NDVI	+	0.0694
		生态系统服务价值		ESV	+	0.0585
		生态用地斑块密度		Fragstats提取	+	0.0342
		景观结构指数		Fragstats提取	+	0.0287
		生态用地恢复率	%	遥感解译	+	0.0709

特地区特色以及在喀斯特地区研究的科学性，研究选择了五位在国土资源研究中有丰富理论知识的专家，采用专家打分法再计算各功能质量的指标权重；然后，将熵权法得到的权重大小顺序与专家打分法进行比较，基于专家打分意见对排序错误的指标权重进行修正，最终得到符合喀斯特地区实际情况的城镇、农业和生态功能质量的指标权重值。

### (2) 国土空间单一功能质量评价

目前，在用地质量状况评价中，常用的评价方法有主成分分析法、综合评价法、目标加权平均法和层次分析法等，其中综合评价法可综合观察某个或多个指标变动对国土空间功能质量的影响程度<sup>[27]</sup>，因此采用综合评价法对国土空间功能质量进行计算。计算公式如下：

$$D_i = \sum_{j=1}^n W_j Y_{ij} \quad (1)$$

式中： $D_i$ 为国土空间功能*i*的功能质量，介于0~1之间，数值越大功能越强； $W_j$ 为国土空间功能*i*的质量评价指标权重； $Y_{ij}$ 为经过处理后的指标值； $j$ 为维数。

对于三个单一国土空间功能质量的评价结果，基于ArcGIS采用自然断裂法将它们分别划分为以下五个等级：高、较高、一般、较低和低。

### (3) 国土空间综合功能质量评价

#### ① 功能权重确定

在城镇、农业和生态功能质量评价指标体系构建的基础上，采用综合平衡法和AHP层次分析法对国土空间系统中各评价因子的相对权重值进行计算，得到喀斯特地区城镇、农业和生态功能的综合权重值分别为0.290、0.336和0.374。

采用专家打分法对综合权重值进行论证，得到城镇、农业和生态功能的综合权重

值分别为0.236、0.349和0.415,该结果大小顺序与算法自动计算结果一致,但考虑到专家打分法的人为主观性,研究仍采用算法自动计算结果作为喀斯特地区国土功能的综合权重值。

## ② 综合功能质量评价

国土空间综合功能质量是整个国土空间功能系统所承载和提供城镇、农业和生态功能的整体质量高低。基于权重计算结果,通过ArcGIS的加权叠加得到国土空间综合功能质量,将其划分为相同的五个等级。计算公式如下:

$$Z_b = D_c W_c + D_n W_n + D_s W_s \quad (2)$$

式中:  $Z_b$  为国土空间综合功能质量;  $D_c$ 、 $D_n$ 和 $D_s$ 分别为城镇、农业和生态功能的质量;  $W_c$ 、 $W_n$ 和 $W_s$ 分别为城镇、农业和生态功能的权重。

### 1.3.2 国土空间功能质量空间分析

探索性空间数据分析法(ESDA)是通过对其一地理事物分布格局的描述和可视化处理,发现其空间分布模式、集聚特点和异常,揭示研究对象之间的空间模式和空间相互作用<sup>[28]</sup>。ESDA包括全局空间自相关分析和局部空间自相关分析,其中,以全局空间自相关研究整体空间关系,以局部空间自相关研究空间的变异状况。为了更好地分析国土空间功能质量的差异问题,本文通过ArcGIS和GeoDa空间计量分析软件引入ESDA,进而探究各国土空间功能质量的相互作用机制。

#### (1) 全局空间自相关

全局空间自相关通常采用Moran's  $I$ 指数进行分析<sup>[24]</sup>,计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中:  $n$  为研究对象的样本数量(个);  $(x_i - \bar{x})$ 和 $(x_j - \bar{x})$ 分别为第 $i$ 和 $j$ 个空间单元上属性值和平均值的偏差;  $w_{ij}$ 为空间权重矩阵,当 $i$ 和 $j$ 相邻时, $w_{ij} = 1$ ,反之为0。

#### (2) 局部空间自相关

局部空间自相关采用局部Moran's  $I$ 指数表示,并以LISA图识别国土空间功能质量高值、低值的空间关联模式<sup>[29]</sup>,计算公式如下:

$$I_i = x_i \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \quad (4)$$

### 1.3.3 国土空间功能耦合协调评估

#### (1) 耦合协调度模型构建

参考已有研究<sup>[9,30,31]</sup>,结合1.3.1构建的国土空间功能质量评价模型,得到国土空间功能耦合协调度模型:

$$C = \left[ \frac{D_c \times D_n \times D_s}{(D_c + D_n) \times (D_n + D_s) \times (D_c + D_s)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$B = \sqrt{C \times Z_b} \quad (6)$$

式中:  $C$  为耦合度;  $B$  为耦合协调度。耦合度越大,国土空间功能之间的影响程度越大;耦合协调度越大,国土空间功能发展的一致性水平越高。

## (2) 耦合协调度等级划分

为更好地分析空间分布情况，探讨国土空间发展的一致性水平，应进一步划分耦合协调度等级。在参考相关研究的基础上，建立国土空间功能耦合协调度等级的划分标准（表4）。

表4 国土空间功能耦合协调度等级划分标准

Table 4 Classification criteria of territorial spatial function coupling coordination degree

耦合协调区间	区间类型	取值范围	耦合协调类型
不可接受区间	失调	[0, 0.1)	极度失调
		[0.1, 0.2)	严重失调
		[0.2, 0.3)	中度失调
		[0.3, 0.4)	轻度失调
		[0.4, 0.5)	濒临失调
过渡区间	协调	[0.5, 0.6)	勉强协调
		[0.6, 0.7)	轻度协调
可接受区间		[0.7, 0.8)	中度协调
		[0.8, 0.9)	良好协调
		[0.9, 1]	优质协调

## 2 结果分析

### 2.1 国土空间功能质量特征

不同国土空间功能质量在数量结构和空间分布上存在显著差异（表5、图3）。

城镇功能质量介于0.30~0.79之间，均值为0.51，整体以低值为主。其中，低级和较低级占比较多，分别占33.87%和31.49%；高级占比最少，仅占1.77%。高值区主要分布于中部和东南部，这些地区城镇化率、基础设施完善度和公共服务设施覆盖度较高，为城镇功能的发展提供了优越的社会经济条件。中部的高值区处于县城所在地，人口活力最高，交通便利，使城镇功能质量较高。低值区主要集中于南部和东部，南部石漠化程度较重，生态环境恶劣，生活保障水平较差，而东部人口活力低，社会经济承载力弱，上述因素的存在阻碍了城镇功能的发展（图3a）。

农业功能质量介于0.34~0.74之间，均值为0.55，整体以低值为主。其中，一般级和较低级占比较多，分别占30.04%和25.75%；高级占比最少，仅占4.72%。高值区主要分布于西部和南部，这些地区气候条件以及耕作与土壤条件较好，为农业功能的发展提供了有利的基础环境，且与其他地区相比，更密集的道路网络也为农业的耕作与运输提供

表5 国土空间功能质量等级结构

Table 5 Level structure of territorial spatial function quality

(%)

功能类型	质量等级				
	低	较低	一般	较高	高
城镇功能	33.87	31.49	23.57	9.3	1.77
农业功能	17.96	25.72	30.04	21.56	4.72
生态功能	15.10	22.19	15.31	26.37	21.03
综合功能	10.97	28.88	29.37	22.13	8.65

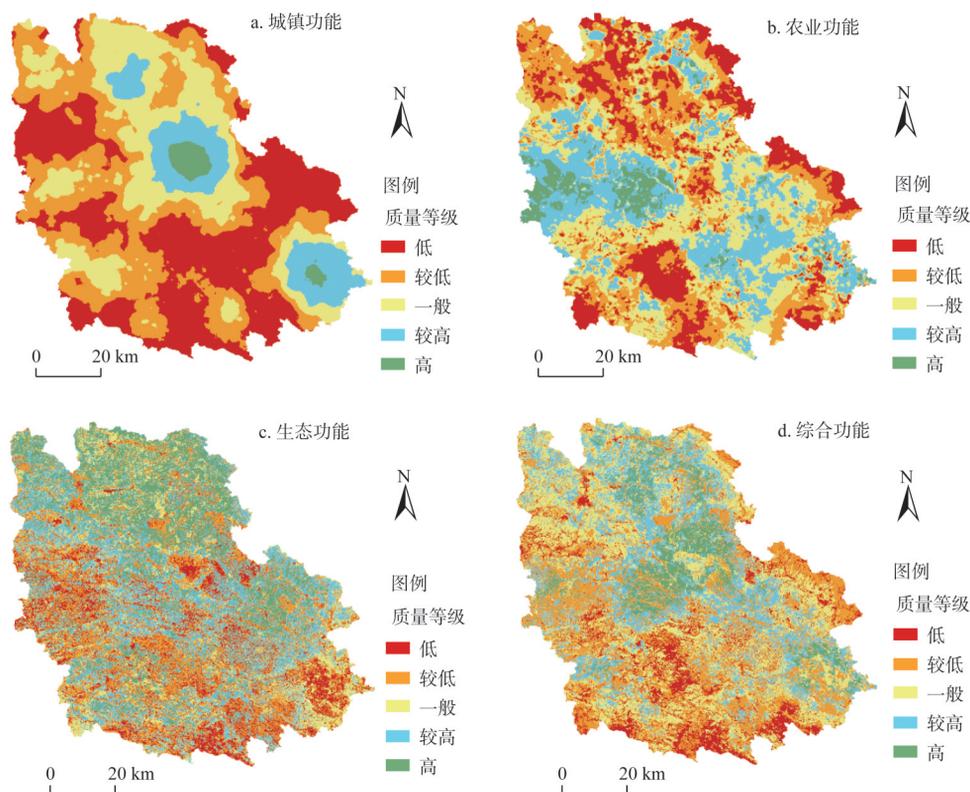


图3 国土空间功能质量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of territorial spatial function quality

了便利的交通条件。低值区主要分布于北部和西南部，北部是全域生态环境状况最好的地区，各级公益林区广泛分布，并且随着退耕还林等大规模生态保护工程的实施，耕地数量大量减少，使农业功能质量处于较低水平；西南部喀斯特地貌广泛分布，石漠化状况严重，农业种植环境恶劣，并且由于当前喀斯特地区农民的农业种植意愿下降，使粮食单产较低和耕地弃耕率较高，这些都是造成农业功能质量较低的原因（图3b）。

生态功能质量介于0.09~0.68之间，均值为0.37，整体以高值为主。其中，较高级占比最多，占26.37%；低级占比最少，占15.10%。生态功能质量空间差异明显，呈现由东北向西南整体下降的趋势。东北部林地分布规模较大，植被覆盖度较高，生境质量较好，生态保育能力较高，生态环境对外界干扰的修复力较强，使区域生态功能质量较高。西南部是喀斯特地貌的集中分布区，生态环境质量整体较低，并且由于当地特殊的地质环境，水资源下渗严重，水源涵养功能较差，生物多样性受到极大的限制，造成了区域生态功能质量整体偏低（图3c）。

综合功能质量介于0.26~0.57之间，均值为0.41。其中，一般级和较低级占比较多，分别占29.37%和28.88%；高级占比最少，仅占8.65%。综合功能质量呈显著的南北分异特征，北部主要为高值区，该地区城镇和生态功能质量较高，虽然农业功能在一定程度上被遏制，但国土空间整体发展较好；南部主要为低值区，三种单一国土空间功能质量均处于全域的最低水平（图3d）。

## 2.2 国土空间功能质量空间分异

### 2.2.1 全局空间自相关分析

城镇、农业、生态和综合功能质量的Moran's  $I$ 指数分别为0.505、0.542、0.479和0.573，均通过 $P=0.01$ 的显著性水平检验。

从结果上看，Moran's  $I$ 指数均大于0，表明各国土空间功能质量水平在相邻单元具有显著的正相关性，并在全局空间上呈现较强的依赖性和集聚效应。综合功能和农业功能的指数较大，而生态功能的指数最小，说明综合功能和农业功能的质量水平在全域内的整体差异比生态功能小，且综合功能和农业功能的功能质量比生态功能更具空间的同化效应，它们对于邻近区域的质量水平高低的依赖性也更强。

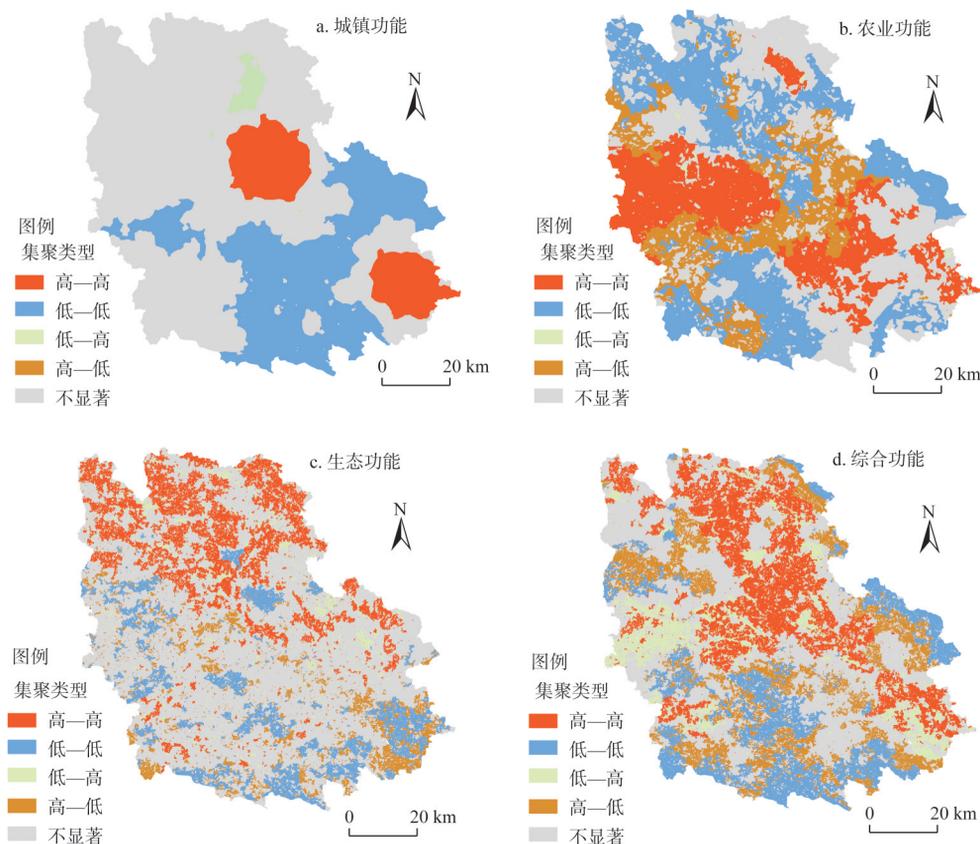


图4 国土空间功能质量集聚特征空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of cluster features of territorial spatial function quality

### 2.2.2 局部空间自相关分析

通过GeoDa软件构建不同国土空间功能质量的集聚特征分布图(图4)。

各国土空间功能质量的集聚均以“高一高”集聚和“低一低”集聚为主，“高一高”集聚表明国土空间功能质量与周边地区呈正相关关系，且它们都是功能质量水平较高的地区；“低一低”集聚虽然也表明国土空间功能质量与周边地区呈正相关，但它们属于功能质量水平较低的地区，低于“高一高”集聚。在农业功能质量和综合功能质量的空间集聚中，出现了较多的“低一高”集聚和“高一低”集聚，在这两种集聚类型下，国土

空间功能质量与周边地区呈负相关关系,其中“低—高”集聚表明该区域内国土空间功能质量低于周边相邻地区,而“高—低”集聚则相反。

从主要集聚类型的分布上看,不同类型的功能质量存在不同的空间分异特征。城镇功能质量的“高—高”集聚区主要分布于中部和东南部,“低—低”集聚区主要分布于南部和东部(图4a);农业功能质量的“高—高”集聚区主要分布于西部和东南部,“低—低”集聚区主要分布于西北部和西南部(图4b);生态功能质量的“高—高”集聚区主要分布于北部,“低—低”集聚区主要分布于南部(图4c);综合功能质量的“高—高”集聚区主要分布于北部和中部,“低—低”集聚区主要分布于南部(图4d)。从喀斯特地区国土空间功能质量的整体格局中可以发现,在“高—高”集聚下,四种国土空间功能质量均呈显著的“组团”式分布;在“低—低”集聚下,城镇、农业和综合功能质量主要呈“组团”式分布,而生态功能质量主要呈“散布”式分布,且北部的“低—低”集聚与石漠化重度区重合度较高,由此表明重度石漠化可能是影响喀斯特地区国土空间功能质量“低—低”集聚的原因之一。

## 2.3 国土空间功能耦合协调分析

### 2.3.1 国土空间功能耦合度分析

国土空间功能耦合度在0.32~0.65之间,基于相关研究对耦合度等级的划分<sup>[32]</sup>,广南县国土空间功能耦合度整体处于拮抗水平及以上,这说明全域内城镇、农业和生态功能的关系密不可分,相辅相成,若其中某种功能的发展产生负面效应,就会抑制其他两种功能的提升。

从空间分布上看,广南县国土空间功能耦合度呈显著的地域差异特征(图5)。高耦合度区主要分布于北部、东部、西北部和西南部,这些地区生态环境质量整体较好,社会经济可发展潜力较大,城镇、农业和生态功能之间相互影响的程度较高。低耦合度区主要分布于西部、南部、中部和东南部,并且与城镇功能质量高值区和生态功能质量低值区的空间重合度较高,因此高城镇功能质量和低生态功能质量是导致国土空间功能耦合度偏低的主要原因。此外,在建设用地上,国土空间功能耦合度处于全区最低值。

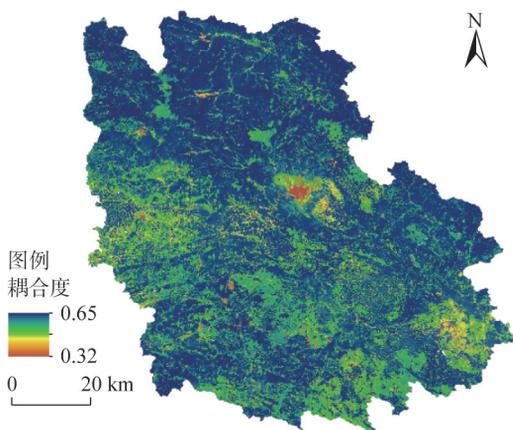


图5 国土空间功能耦合度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of territorial spatial function coupling degree

### 2.3.2 国土空间功能耦合协调度分析

国土空间功能耦合协调度在0.35~0.67之间,均值为0.51,表明国土空间功能整体处于勉强协调阶段,它们的发展基本一致。根据耦合协调度的分级标准,广南县国土空间功能耦合协调度表现为轻度失调、濒临失调、勉强协调和轻度协调四种类型(图6)。四种耦合协调类型的空间分异特征与国土空间综合功能质量基本一致,综合功能质量较高的地区,国土空间功能的协调程度也高,反之亦然。

#### (1) 轻度协调区

轻度协调区主要分布于中部和北部，国土空间发展的协调性最好，各类功能之间发展的一致性水平最高，属于“高一高”地区。中部属于广南县县城的辐射区，社会经济发展条件和区位优势明显，且该地区主要为非喀斯特区，地质环境较好，国土空间各类功能的发展有较好的社会、经济和环境等方面基础条件；北部为全区生态环境状况最好的地区，土地、物种和生态等资源丰富，气候条件优良，居民生活幸福指数较高，区位空间、生态环境、综合交通等优势较为明显，国土空间发展的整体性和协调性较好。

(2) 勉强协调区

勉强协调区主要分布于西北部和东南部，国土空间发展的协调性比轻度协调区差。西北部主要是林业种植区，植被覆盖度较高，资源较丰富，气候条件较好，然而，该地区城镇化建设起步较晚，虽然近年来发展迅速，但落后于中部和东南部等城镇化优先发展区，国土空间发展的整体性和协调性相对较好。西南部的勉强协调区区位条件和交通条件较好，农业耕作状况较优，然而，该地区由于存在重度石漠化的分布，生态环境整体受到石漠化状况的影响较重，造成生态功能水平与其他功能不匹配，成为区域发展的薄弱环节。

(3) 濒临失调区

濒临失调区主要分布于东部和南部，国土空间发展的协调性处于协调到失调的过渡阶段。这些地区社会经济发展水平普遍不高，资源环境承载能力较弱，对城镇化高速发展的支撑力较小，且第一产业占据了区域发展的重要地位，产业占比较高，而生态环境较脆弱，这些因素都对国土空间功能的协调发展带来了巨大的压力。

(4) 轻度失调区

轻度失调区主要分布于南部，国土空间发展的协调性最差，各类功能之间发展的一致性水平最低，属于“低—低”地区。南部属于重度石漠化的集中区，生态环境质量最差，不利于城镇的建设和农业的开发，并成为阻碍其经济社会发展的瓶颈，最终导致国土空间发展的综合水平和协调性最差的局面，进行国土空间功能的优化与调控已迫在眉睫。同时，在全域的建设用地中，国土空间功能的耦合协调度也处于轻度失调水平。

2.3.3 国土空间功能耦合协调区管控

国土空间功能协调区（包括轻度协调区和勉强协调区；耦合协调度 $\geq 0.5$ ）和国土空间功能失调区（包括濒临失调区和轻度失调区；耦合协调度 $< 0.5$ ）存在显著的地域分布差异，因此，不同的耦合协调类型也意味着不同的国土空间管控模式。

(1) 国土空间功能协调区

在国土空间功能协调区中，区域整体发展处于协调状态，但耦合协调度却不高，它的未来仍然留有充足的发展空间。

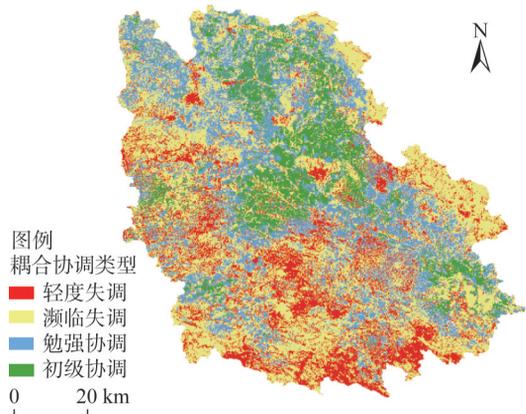


图6 国土空间功能耦合协调类型空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of coupling coordination types of territorial spatial function

从国土空间功能质量和耦合协调度的分析中可以发现,协调区主要集中在一种或两种功能较为突出的地区,但这也意味着其他国土空间功能的“牺牲”。因此,应在严格保护喀斯特地区生态环境和耕地资源的基础上,通过宏观调控和内部挖掘积极探索国土空间的集约开发模式,减少过度利用已开发土地的浪费做法,提高国土空间利用效率,这也应成为喀斯特地区国土空间管理的最终目标。其次,以空间管制、规划调控和转变功能发展模式等手段,实现对有序国土空间的调整和管理,并在这个过程中保持或进一步发展现有的国土空间功能成果。最后,以多功能协调驱动发展替代传统的单一功能驱动发展,优化国土空间整体发展格局,实现喀斯特地区城镇、农业和生态功能的和谐共生和共同增长。

## (2) 国土空间功能失调区

在国土空间功能失调区中,城镇、农业和生态功能的发展程度极不一致,且冲突较大,表明这些地区目前的国土空间综合效能没有达到国土资源利用的预期水平,未来利用和发展潜力巨大;然而,这些潜力的发掘与激活需要针对各类功能存在的问题提出行之有效的改善措施。

**城镇功能:**对于国土空间功能失调区中城镇功能质量较低的区域,结合对城镇功能质量的分析,城镇功能的优化提升建议如下:①针对人口活力低且社会经济承载力弱,政府要采取一定的行政措施,增强人口和产业等城镇功能要素的空间集聚,并在激活经济发展的活力和潜力的同时,积极培育地方优势产业,推动产业转型,并制定相关优惠政策,为劳动力、资本和技术等城镇要素的流动创造条件;②针对生活保障水平较差的区域,在不破坏生态环境的前提下,应积极开展基础设施和公共服务设施建设,完善相关生活配套措施,并在保障其他地区水资源和粮食供给的前提下,实施资源的“调度”和“再分配”,以满足城镇功能提升的需求;③针对石漠化程度较重且生态环境恶劣的区域,严重的石漠化状况始终是困扰喀斯特地区城镇功能提升的主要原因之一,因此,在石漠化严重地区(特别是石漠化重度区和石漠化中度区),城镇功能应在石漠化程度得到显著改善后再进行发展,这也是区域生态环境得以快速恢复的重要基础。

**农业功能:**对于国土空间功能失调区中农业功能质量较低的区域,结合对农业功能质量的分析,农业功能的优化提升建议如下:①针对耕地数量大量减少的区域,应对基本农田区和高质量耕地资源实施严格的保护,当区域重大生态保护工程和重点石漠化治理工程无法避开对基本农田和高质量耕地的占用时,遵循占补平衡原则,对占用耕地进行补充;②针对粮食单产较低和耕地弃耕率较高的区域,应探索粮食生产规模激励机制,激发农业产量较低地区的农业生产积极性,并积极推行耕地经营权的有序流转,提高耕地集约利用水平,同时回收和整理闲置、荒芜、低质量的耕地,对其进行集中治理和质量提升后实行再分配政策,以减少耕地资源的抛荒率;③针对石漠化状况严重且种植条件恶劣的区域,应积极推广生态农业发展模式,鼓励高产抗旱农作物(如甘薯、地瓜和马铃薯等)在喀斯特地区的种植,并减少对环境影响较大的农作物(如三七等)的种植,提升区域农业发展水平和绿色效益。

**生态功能:**对于国土空间功能失调区中生态功能质量较低的区域,结合对生态功能质量的分析,生态功能的优化提升建议如下:①针对生态系统功能下降的区域,在维护现有生态功能质量的基础上,注重发挥生态用地周边的耕地资源在调节水文、调节气

候、维护生物多样性和提供美学景观等生态系统服务功能的作用，从而推动生态功能的提升；②针对石漠化状况严重且生态环境质量整体较低的区域，可构建自然恢复与生态保护区建设相结合的生态治理模式，大力实施生态移民、植树造林、封山育林和坡改梯工程，并采用一些生态生物技术，推动植被顺向演替，加快生态环境恢复进程。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文以西南喀斯特典型区广南县为对象，通过构建城镇、农业和生态功能质量的评价指标体系，量化和评估了喀斯特地区国土空间功能质量现状和空间特征，并采用耦合协调度模型分析了国土空间各功能系统的耦合协调状况，提取不同的管控措施。得到以下结论：

(1) 广南县不同国土空间功能质量的等级结构和空间分布存在显著差异。城镇功能质量以低值为主，高值区主要分布于中部和东南部，低值区主要分布于南部和东部；农业功能质量以低值为主，高值区主要分布于西部和南部，低值区主要分布于北部和西南部；生态功能质量以高值为主，空间分布呈东北向西南倾斜下降的趋势；综合功能质量的低值和高值较平衡，空间分布呈北高南低的趋势。

(2) 广南县城镇、农业、生态和综合功能质量均呈正相关性，并以“高一高”集聚和“低—低”集聚为主，但不同功能存在地域分布差异。

(3) 广南县国土空间功能耦合度整体处于拮抗水平及以上，各类功能间相互影响较大，高耦合区主要分布于北部、东部、西北部和西南部，低耦合区主要分布于西部、南部、中部和东南部，建设用地均处于耦合度最低水平。

(4) 广南县国土空间功能耦合协调类型可分为轻度失调、濒临失调、勉强协调和轻度协调，它们的空间分布差异与国土空间综合功能质量吻合较高。轻度协调区主要分布于中部和北部，勉强协调区主要分布于西北部和东南部，濒临失调区主要分布于东部和南部，轻度失调区主要分布于南部。国土空间功能耦合协调区管控措施的提出可有效推动喀斯特地区国土空间的可持续发展，促进国土空间功能质量的提高。

(5) 综合考虑城镇、农业和生态功能要素的本底水平和发展状况，结合区域内不同石漠化等级，可有效评估喀斯特地区国土空间功能质量状况和耦合协调关系，构建以国土空间功能协同发展为导向的喀斯特地区国土空间发展模式，该方法可为类似资源禀赋地区的国土空间规划和精细化管理提供较好的思路。

#### 3.2 讨论

##### 3.2.1 喀斯特地区国土空间功能质量的空间异质性

从广泛的研究中可以发现，城镇、农业和生态功能的不协调发展是一个受自然、社会和经济等因素影响的复杂的权衡过程，它可以通过很多可能的机制发生<sup>[33,34]</sup>。例如，地形、资源环境、气候条件和区位因素等区域本土因素构成了国土空间功能质量的先决条件，而城镇化、工业化和农业现代化等外部因素则决定了国土空间功能质量的发展潜力。特别是在喀斯特地区，这种国土空间功能质量的发展趋势显得更为明显。

通过对西南喀斯特地区国土空间功能质量的计算发现，在不同区域和不同功能类型下，国土空间功能表现出显著差异性，这一结果为喀斯特地区城镇、农业和生态功能的

强解耦效应<sup>[35]</sup>提供了经验证据。随着城镇化水平的提升,人们对生活条件和环境有了更高的要求,石漠化程度严重的地区由于生态环境状况恶劣,已不能满足人们的生活需求,而自然环境、区位状况和发展基础等因素优势明显的地区,吸引了人口的集聚与流动,使城镇功能质量较高。但高水平的城镇功能质量也会限制生态维护功能(如水土保持和生物多样性保护等),并进一步影响农业的种植环境<sup>[31]</sup>,导致农业和生态功能质量处于较低水平。随着粮食需求的增长,在耕地资源和气候条件优越的地区,农业用地对周边生态用地的侵占以及农药、化肥等使用后产生的非点源污染共同导致了生态功能质量的下降<sup>[36]</sup>。在林业资源丰富、生态环境质量整体较好的地区,具有较高的生态功能质量,在区域规划中常被定义为生态保护区,并且针对其制定了相应的政策保护机制,这也在一定程度上扼制了城镇和农业功能的发展,导致城镇和农业功能质量较低。

在今后的发展过程中,针对喀斯特地区国土空间功能质量的空间异质性,在国土空间规划和整治中,要根据区域发展现实状况,通过国土空间资源的合理有效配置,弥补功能短板、发挥功能优势,以促进喀斯特地区国土空间功能的协调发展,缓解在生态脆弱地区特别是石漠化重度区中生态环境保护的压力。

### 3.2.2 研究的局限性和展望

由于数据缺失和获取难度较大等因素,本文只针对西南喀斯特地区现状下的国土空间功能质量和耦合协调模式进行了探讨,而缺乏对它们动态变化情况的分析。众所周知,城镇、农业和生态功能之间存在相互转化的情况,产生了国土空间功能的权衡与协同效应<sup>[37]</sup>,可以此为基础开展喀斯特地区国土空间优化与管控的研究,从而进一步改善喀斯特地区的生态环境状况,以上内容将在未来的研究中继续展开。

### 参考文献(References):

- [1] 陈明星,梁龙武,王振波,等.美丽中国与国土空间规划关系的地理学思考.地理学报,2019,74(12):2467-2481. [CHEN M X, LIANG L W, WANG Z B, et al. Geographical thinking on the relationship between beautiful China and land spatial planning. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2467-2481.]
- [2] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析.地理学报,2017,72(7):1290-1304. [LIU J L, LIU Y S, LI Y R. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of "Production-Living-Ecological" spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1290-1304.]
- [3] FAN Z, JING L, YUE T, et al. Scenarios of land cover in karst area of Southwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8): 6407-6420.
- [4] 张军以,苏维词,王腊春,等.西南喀斯特地区城乡融合发展乡村振兴路径研究.农业工程学报,2019,35(22):1-8. [ZHANG J Y, SUN W C, WANG L C, et al. Rural revitalization path under urban-rural integration economic development in karst region of Southwest China. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(22): 1-8.]
- [5] 李欣,殷如梦,方斌,等.基于“三生”功能的江苏省国土空间特征及分区调控.长江流域资源与环境,2019,28(8):1833-1846. [LI X, YIN R M, FANG B, et al. Research on the functional zoning and regulation of Jiangsu province's territorial space based on the "Production-Living-Ecological" function. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(8): 1833-1846.]
- [6] 林锦耀,黎夏.基于空间自相关的东莞市主体功能区划分.地理研究,2014,33(2):349-357. [LIN J Y, LI X. MFOZ planning of Dongguan based on spatial autocorrelation by using genetic algorithms. *Geographical Research*, 2014, 33(2): 349-357.]
- [7] AKADIRI S S, BEKUN F V, SARKODIE S A. Contemporaneous interaction between energy consumption, economic growth and environmental sustainability in South Africa: What drives what?. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 468-475.

- [8] LIU R F, ZHANG J M, XU M Q, et al. Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: A case study in Northern Ningxia, China. *Land Use Policy*, 2018, 77: 163-173.
- [9] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼. 中国环渤海地区人口—土地—产业非农化转型协同演化特征. *地理研究*, 2015, 34(3): 475-486. [YANG R, LIU Y S, LONG H L. The study on non-agricultural transformation co-evolution characteristics of "population-land-industry": Case study of the Bohai Rim in China. *Geographical Research*, 2015, 34(3): 475-486.]
- [10] MOMBLANCH A, PAPADIMITRIOU L, JAIN S K, et al. Untangling the water-food-energy-environment nexus for global change adaptation in a complex Himalayan water resource system. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 35-47.
- [11] ZHANG Y N, LONG H L, TU S S, et al. Spatial identification of land use functions and their trade-offs/synergies in China: Implications for sustainable land management. *Ecological Indicators*, 2019, 107, 105550, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105550>.
- [12] 赵筱青, 李思楠, 谭琨, 等. 城镇—农业—生态协调的高原湖泊流域土地利用优化. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 296-307, 336. [ZHAO X Q, LI S N, TAN K, et al. Land use optimization of plateau lake basin based on town-agriculture-ecological spatial coordination. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(8): 296-307, 336.]
- [13] 赵筱青, 李思楠, 普军伟, 等. 云南喀斯特山区国土空间优化分区与管控. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2339-2357. [ZHAO X Q, LI S N, PU J W, et al. Optimal partitions and control of territorial space in karst mountainous areas of Yunnan province. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2339-2357.]
- [14] 谢余初, 张素欣, 林冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 217-229. [XIE Y C, ZHANG S X, LIN B, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 217-229.]
- [15] 金贵, 邓祥征, 张倩, 等. 武汉城市圈国土空间综合功能分区. *地理研究*, 2017, 36(3): 541-552. [JIN G, DENG X Z, ZHANG Q, et al. Comprehensive function zoning of national land space for Wuhan Metropolitan Region. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 541-552.]
- [16] 朱媛媛, 余斌, 曾菊新, 等. 国家限制开发区“生产—生活—生态”空间的优化: 以湖北省五峰县为例. *经济地理*, 2015, 35(4): 26-32. [ZHU Y Y, YU B, ZENG J X, et al. Spatial optimization from three spaces of production, living and ecology in national restricted zones: A case study of Wufeng county in Hubei. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 26-32.]
- [17] 刘春芳, 王奕璇, 何瑞东, 等. 基于居民行为的三生空间识别与优化分析框架. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2113-2122. [LIU C F, WANG Y X, HE R D, et al. An analysis framework for identifying and optimizing Ecological-Production-Living space based on resident behavior. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2113-2122.]
- [18] ZHOU D, XU J, LIN Z. Conflict or coordination? Assessing land use multi-functionalization using production-living-ecology analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, 577: 136-147.
- [19] ZOU L L, LIU Y S, YANG J X, et al. Quantitative identification and spatial analysis of land use ecological-production-living functions in rural areas on China's southeast coast. *Habitat International*, 2020, 100, 102182, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102182>.
- [20] 李思楠, 赵筱青, 普军伟, 等. 西南喀斯特典型区国土空间地域功能优化分区. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 242-253, 314. [LI S N, ZHAO X Q, PU J W, et al. Optimization of regionalization of territorial space function regions in typical karst areas of Southwest China. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(17): 242-253, 314.]
- [21] KANG Z Q, CHEN J, YUAN D X, et al. Promotion function of forest vegetation on the water & carbon coupling cycle in karst critical zone: Insights from karst groundwater systems in South China. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125246, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125246>.
- [22] SUN M Y, LI X H, YANG R J, et al. Comprehensive partitions and different strategies based on ecological security and economic development in Guizhou province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 122794, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122794>.
- [23] 周鹏, 邓伟, 彭立, 等. 典型山地水土要素时空耦合特征及其成因. *地理学报*, 2019, 74(11): 2273-2287. [ZHOU P, DENG W, PENG L, et al. Spatio-temporal coupling characteristic of water-land elements and its cause in typical mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2273-2287.]
- [24] 贾仰文, 郝春洋, 牛存稳, 等. 典型山地降水径流时空演变及“水—热—人—地”匹配性分析. *地理学报*, 2019, 74

- (11): 2288-2302. [JIA Y W, HAO C P, NIU C W, et al. Spatio-temporal variations of precipitation and runoff and analyses of water-heat-human-land matching characteristics in typical mountainous areas of China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2288-2302.]
- [25] 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. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1541-1551. [SHAN W, JIN X B, RAN N, et al. "Production-Living-Ecological" function evaluation and coupling coordination analysis of land use in Jiangsu province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1541-1551.]
- [26] 魏小芳, 赵宇鸾, 李秀彬, 等. 基于“三生功能”的长江上游城市群国土空间特征及其优化. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1070-1079. [WEI X F, ZHAO Y N, LI X B, et al. Characteristics and optimization of geographical space in Urban Agglomeration in the Upper Reaches of the Yangtze River based on the function of "Production-Living-Ecological". *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1070-1079.]
- [27] 刘彦随, 刘玉, 陈玉福. 中国地域多功能性评价及其决策机制. *地理学报*, 2011, 66(10): 1379-1389. [LIU Y S, LIU Y, CHEN Y F. Territorial multi-functionality evaluation and decision-making mechanism at county scale in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10): 1379-1389.]
- [28] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 等. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 934-944. [ZHANG F F, ZHANG Q N, LI F D, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 934-944.]
- [29] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征: 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据. *北京理工大学学报: 社会科学版*, 2019, 21(6): 41-50. [LYU Q, LIU H B. Spatio-temporal evolution characteristics of county scale carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei Region: A study based on DMSP/OLS nighttime light data. *Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2019, 21(6): 41-50.]
- [30] 范擎宇, 杨山, 胡信. 耦合视角下长三角地区城镇化协调度的时空特征及交互机制. *地理研究*, 2020, 39(2): 289-302. [FAN Q Y, YANG S, HU X. Temporal and spatial characteristics and interaction process of urbanization coordination in the Yangtze River Delta Region from the perspective of coupling. *Geographical Research*, 2020, 39(2): 289-302.]
- [31] 韩增林, 赵启行, 赵东霞, 等. 2000—2015年东北地区县域人口与经济耦合协调演变及空间差异: 以辽宁省为例. *地理研究*, 2019, 38(12): 3025-3037. [HAN Z L, ZHAO Q H, ZHAO D X, et al. Population and economic coupling coordinated evolution and spatial differences at county level in Northeast China during 2000-2015: Taking Liaoning province as an example. *Geographical Research*, 2019, 38(12): 3025-3037.]
- [32] 任亚文, 曹卫东, 张宇, 等. 长江经济带三大城市群城镇化与生态环境时空耦合特征. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(11): 2586-2600. [REN Y W, CAO W D, ZHANG Y, et al. Temporal and spatial coupling characteristics of urbanization and ecological environment of three major urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(11): 2586-2600.]
- [33] CORDINGLEY J E, NEWTON A C, ROSE R J, et al. Can landscape-scale approaches to conservation management resolve biodiversity-ecosystem service trade-offs?. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(1): 96-105.
- [34] 赵筱青, 李思楠, 谭琨, 等. 基于功能空间分类的抚仙湖流域“3类空间”时空格局变化. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 299-305, 313. [ZHAO X Q, LI S N, TAN K, et al. Spatial-temporal pattern change of 'urban-agriculture-ecological space' in Fuxian Lake Basin based on functional space classification. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 299-305, 313.]
- [35] 郭莎莎, 陈明星, 刘慧. 城镇化与资源环境的耦合过程与解耦分析: 以北京为例. *地理研究*, 2018, 37(8): 1599-1608. [GUO S S, CHEN M X, LIU H. Coupling procedure and decoupling analysis of urbanization and resource environment: The study of Beijing. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1599-1608.]
- [36] SHEN Z, QIU J, HONG Q, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 138-146.
- [37] GONG J, LIU D Q, ZHANG J X, et al. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, Western China. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 283-293.

## Territorial space function quality evaluation and coupling coordination analysis in typical karst areas of Southwest China: A case study of Guangnan county

LI Si-nan<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-qing<sup>1</sup>, PU Jun-wei<sup>2</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, MIAO Pei-pei<sup>1</sup>, TAN Kun<sup>1</sup>

(1. College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Institute of International Rivers & Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Urban function, agricultural function, and ecological function make up the entire territorial spatial function system. Scientifically grasping the quality of regional territorial spatial functions and deeply revealing their coupling coordinated relationships is an important basis for achieving sustainable development of territorial space. In order to explore the development status of territorial spatial functions in karst areas of Southwest China and their characteristics of spatial structures, Guangnan, a typical karst county, was taken as a study area. Based on the construction of urban, agricultural, and ecological function evaluation index systems, the paper evaluated the function quality and its spatial characteristics with the help of comprehensive evaluation method and exploratory spatial data analysis method, used coupling coordinated degree model to examine the coupling coordinated status of territorial spatial functions, and further explored the territorial space development of coordinated development of urban-agricultural-ecological functions. The results showed that: (1) The urban function quality and agricultural function quality showed mainly low values, and the ecological function quality had mainly high values. The low and high values of comprehensive function quality tended to be evenly distributed. And the spatial distribution of different functional qualities was different. (2) The development of all the four territorial spatial function qualities had a positive correlation, which was mainly "high-high" and "low-low" agglomerations, and there were differences in geographical distribution. (3) Territorial spatial functions in karst areas had a great influence on each other, and the distribution of low- and high-coupling areas was significantly different. Of all the functions, the coupling degree was the lowest in the function of construction land. (4) The coupling coordinated relationship of territorial space functions could be divided into four levels from imbalance to coordination, and the differences in their spatial distribution were similar to the differences in the territorial spatial comprehensive function quality. The countermeasures of territorial space coupling coordination areas could effectively promote the sustainable development of territorial space for karst areas, and improve the territorial space function quality in karst areas. The results of this research provide references for territorial spatial balanced development and optimized regulation in karst areas of Southwest China.

**Keywords:** territorial space; evaluation of functional quality; coupling coordination; karst areas; Guangnan county