

云南喀斯特山区国土空间优化分区与管控

赵筱青¹, 李思楠¹, 普军伟², 谈树成¹, 陈俊旭¹

(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: 国土空间的协调发展是区域可持续发展的前提, 如何优化国土空间结构并构建合理的管控模式成为亟需解决的重要问题之一。以云南喀斯特典型山区文山市为例, 探讨基于“双评价”的国土空间优化方法及冲突区的修正规则, 对喀斯特山区国土空间进行优化分区, 并提出国土空间分区及石漠化分区的管控模式。研究发现: (1) 云南喀斯特山区国土空间优化后可划分为城镇开发边界区、城镇预留区、永久基本农田区、一般农业区、生态保护红线区和一般生态区六种类型, 其中, 生态保护红线区面积最大, 城镇开发边界区面积最小; (2) 城镇开发边界区和城镇预留区主要分布于东部和东南部, 永久基本农田区和一般农业区主要分布于北部和南部, 一般生态区主要分布于西北部和西南部, 生态保护红线区主要分布于西部、南部、东部和东北部, 其中东部和东北部主要为石漠化区; (3) 从各国土空间类型的发展潜力和趋势对国土空间分区提出了管控措施和模式; 从轻度石漠化区、中度石漠化区以及重度石漠化区角度对城镇、农业和生态三类空间, 提出了石漠化区开发和保护的途径和方法。研究结果可为云南喀斯特山区国土空间的合理发展和石漠化的治理提供决策支持, 研究方法和思路为国土空间优化和管控提供参考。

关键词: 国土空间; “双评价”; 优化分区; 管控途径; 云南喀斯特山区

国土空间是人们赖以生存和发展的家园, 是社会经济和自然地理系统持续发展的物质基础, 对于任一区域, 都具有城镇、农业和生态等多种功能属性。近年来, 随着中国城市化进程的加速, 人们开发地表的强度不断增大, 利用地表的功能性也愈加复杂, 使国土空间格局发生了剧烈的改变^[1], 城乡建设用地的急剧扩张占用大量高质量的农业和生态用地, 造成国土空间各功能间严重的矛盾与冲突^[2]。人地矛盾、国土资源低效利用、环境污染和城乡发展失衡等问题也日益突显, 对国土空间可持续发展带来了巨大的挑战^[3]。城镇、农业和生态三类功能用地的不同空间配置将产生差异显著的空间效益。因此, 实现城镇—农业—生态功能的协同优化和统筹发展, 探索可持续发展框架下国土空间优化分区方案及管控模式, 已成为区域可持续发展研究的重要课题^[4]。

在国土空间优化方面, 以往的研究关注于从土地与自然系统内部环境的关系对国土空间结构进行优化和调控^[5,6], 并从生态系统服务价值^[7]和气候变化^[8]等多角度展开相关分析; 也有研究针对社会经济的可持续发展, 分析国土空间结构与区域可持续发展的关系^[9], 并以主体功能区为对象, 在国土空间分区框架、指标体系和分区方法等^[10,11]方面进行探讨。目前, 基于地域功能适宜性^[1]和资源环境承载力^[10]对国土空间格局进行优化的方

收稿日期: 2020-04-13; 修订日期: 2020-07-20

基金项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金项目 (2018FY001-017); 国家自然科学基金项目 (41361020); 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: 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

法不断出现,针对不同区域的不同国土空间结构和需求,在明确土地功能的基础上,对国土空间的组合模式^[12]、“三线”(城镇扩张边界、永久基本农田和生态保护红线)划定^[13]和空间优化布局^[14-16]等内容展开了大量研究。在国土空间管控方面,最初主要从技术、体制和管理层面进行了试点研究与方法探索^[17,18];随着研究的深入,国土空间管控研究逐渐转向以管控分区为研究对象,以用途管制为主导思路,对管控的目标^[19]、现存问题^[20]和策略^[21]等方面的内容,从管控的法理、逻辑、分区和政策环境等多种角度进行了探讨;亦有部分研究从自然资源监管与土地发展权的角度讨论了以自然资源为对象的监管运行机制^[22,23]。这些研究为深入开展国土空间优化和管控积累了经验,然而对于“双评价”结果在国土空间优化中的应用和实现方法依然处于探索阶段,目前多侧重于理论内涵和技术流程等方面的分析;对国土空间的管控也只是理论性和框架性探讨,缺少实践性研究。

喀斯特地区石漠化是中国三大生态灾害之一,云南喀斯特山区占中国西南喀斯特集中连片区面积的37.54%,是中国石漠化危害程度最深、喀斯特分布最广和治理难度最大的喀斯特区之一^[24]。该区域喀斯特作用强烈,生态系统的稳定易受到外界因素的影响而发生变化,严重阻碍社会经济和生态环境的可持续发展,导致生态环境的脆弱和贫困人口的集中^[24,25]。近年来,喀斯特山区城镇化的快速发展引发的国土空间功能冲突和矛盾更加剧了区域生态和贫困问题,对喀斯特山区的国土空间进行优化与管控被赋予了十分重要和迫切的理论意义和现实意义。然而,目前对喀斯特山区国土空间优化和管控的关注十分有限。因此,以云南典型喀斯特山区文山市为研究案例区,基于2017年土地利用现状数据和社会经济数据,探讨基于“双评价”的国土空间优化方法,对云南喀斯特山区国土空间结构进行优化,并提出国土空间管控模式,为喀斯特山区国土空间的规划和管理提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

文山市属于典型的高原喀斯特岩溶山区,位于云南省东南部(103°43'~104°27'E, 23°05'~23°42'N),下辖17个街道办事处和乡镇(图1)。土地总面积2965.18 km²,地形复杂,地势西北高、东南低,山区、半山区面积占土地总面积的90%。

文山市属于中国西南喀斯特集中连片区的一部分,喀斯特岩溶地貌突出,约占全市总面积的20%,集中分布于文山市东部、东北部、东南部和西北部,东北部石漠化程度较高(图1)。全市水土资源短缺、生态脆弱问题非常突出,极大地限制了区域国土空间的发展。虽然当地实施了生态治理工程,但收效缓慢,加上国土空间格局的快速转变,城乡建设用地的大范围扩张,阻碍了区域石漠化治理的效率,加剧了生态恢复和农业发展的压力。

1.2 数据处理及研究框架

1.2.1 数据来源及处理

采用10 m空间分辨率的2017年冬季Sentinel-2A遥感影像为数据源,数据来源于欧洲太空局开放存取中心(<https://scihub.copernicus.eu/>)。为了消除遥感影像数据中存在的

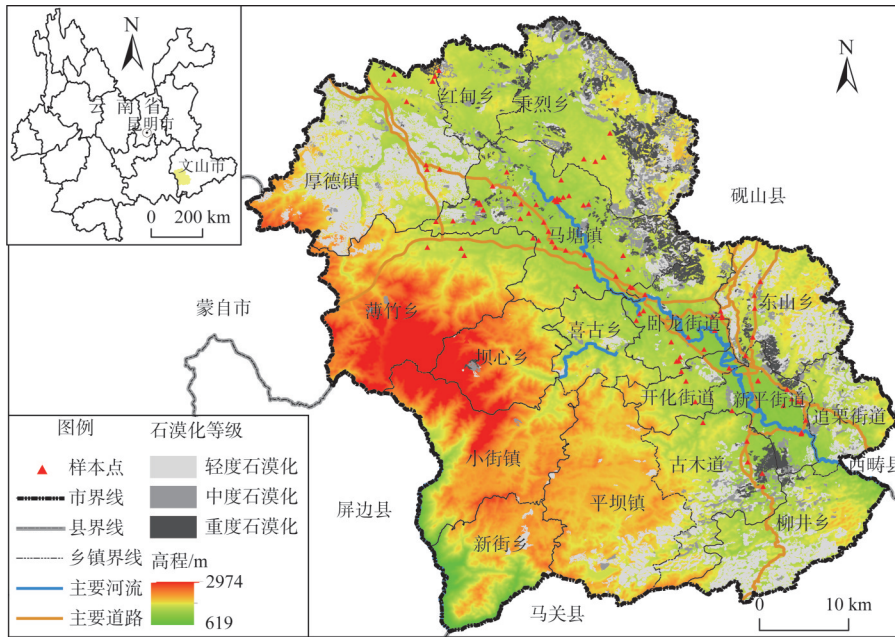


图1 研究区区位图

Fig. 1 Location of the study area

误差，对其进行大气校正和预处理。首先，通过ENVI 5.1软件“FLAASH Atmospheric Correction”工具对遥感影像进行大气校正，排除大气干扰；然后，采用文山市行政边界，选取控制点对遥感影像进行地理配准；最后根据文山市边界裁剪出研究区的遥感影像。

根据影像的光谱特征和纹理形状，通过人机交互式遥感解译提取水田、旱地、园地、林地、草地、城镇建设用地、农村居民点、其他建设用地、水域和未利用地共10种土地利用类型。根据喀斯特山区的岩性特征，将研究区的岩石分为碳酸盐岩和非碳酸盐岩两种类型，其中碳酸盐岩区划为石漠化区，非碳酸盐岩区划为无石漠化区。在石漠化区，参考相关文献对云南喀斯特山区石漠化等级的划分标准，结合研究区实际情况，采用植被加土被覆盖率和岩石裸露率两个指标划分石漠化等级（表1），将石漠化等级划分为轻度、中度和重度共三种石漠化类型。最后，选取了195个样本点（图1）（主要涉及难以区分且变化很大的土地利用类型和石漠化类型）到实地进行分类结果验证，土地利用类型和石漠化类型的解译精度分别为88.18%和86.32%。

通过走访气象局、水务局、自然资源局、生态环境局和统计局等政府部门收集了文山市气象、水资源、旅游、矿产、生态环境和社会经济等方面的数据，并对统计数据 and 文本数据等非空间数据通过 ArcGIS 和相关统计分析软件进行前期处理、统计和空间制图，所有空间数据统一转换为 WGS84-UTM48N 投影坐标系。根据喀斯特

表1 石漠化等级划分标准

Table 1 Classification standards of rocky desertification levels (%)

石漠化等级	指标	
	植被+土被覆盖率	岩石裸露率
轻度石漠化	35~50	30~50
中度石漠化	20~35	50~70
重度石漠化	<20	>70

山区地形破碎度高和用地分异显著的实际状况以及遥感影像情况和图斑大小, 预设上图单元的空间尺度为10 m×10 m、20 m×20 m、30 m×30 m、40 m×40 m、60 m×60 m和80 m×80 m。经过多次试验, 发现30 m×30 m的结果最佳。因此, 选择30 m×30 m作为本文的空间尺度。

1.2.2 研究框架

首先, 根据喀斯特山区自然和人文社会环境特殊性构建国土空间开发适宜性和资源环境承载力的评价指标体系, 分别进行国土空间开发适宜性和资源环境承载力的评价; 然后, 对城镇、农业和生态三类国土空间功能用地适宜性评价结果进行叠加, 划分国土空间综合适宜区和冲突区; 根据喀斯特山区国土空间的功能用地发展导向和“三区三线”的内涵, 结合资源环境承载力分级结果制定国土空间冲突区修正规则, 对冲突区进行调整, 得到云南喀斯特山区国土空间优化分区结果; 最后, 结合石漠化分区结果, 探讨云南喀斯特山区国土空间管控措施。研究框架如图2所示。

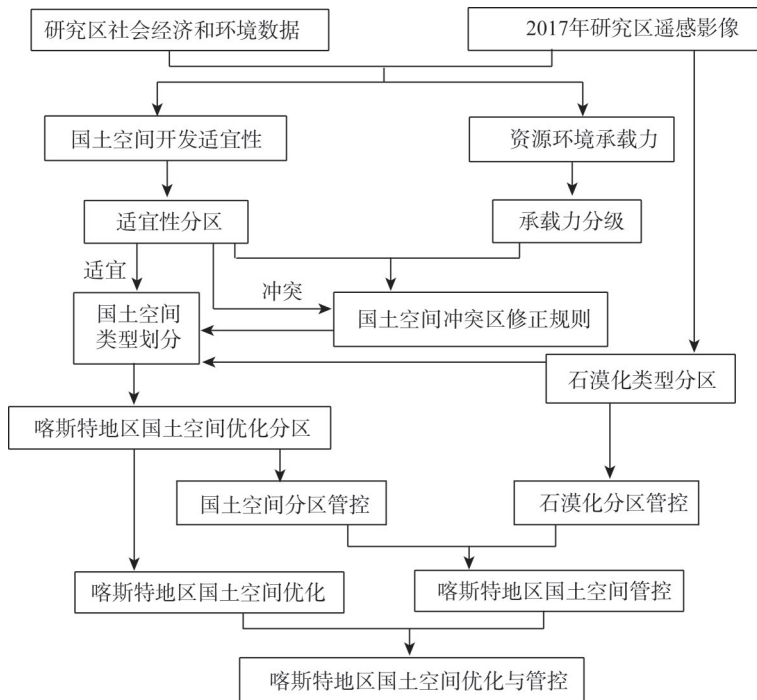


图2 研究框架

Fig. 2 Study framework

1.3 研究方法

1.3.1 国土空间开发适宜性评价

国土空间具有城镇功能、农业功能和生态功能, 通过实地考察和相关文献的查阅^[26-28], 分别建立三类功能用地的适宜性评价指标体系, 采用综合评价法^[29]评估喀斯特山区国土空间适宜性状况, 并将适宜性分为最适宜、适宜、不适宜和最不适宜四个等级。其中, 城镇开发适宜性评价指标体系从条件限制和区位支撑两个方面选取了13个指标(表2), 农业开发适宜性评价指标体系从土壤管理情况、立地条件、气候条件、土壤养分状况、

土壤理化性质和政策条件六个方面选取了20个指标（表3），生态保护适宜性评价指标体系从生态敏感性、生态重要性和政策条件三个方面选取了10个指标（表4）。

表2 喀斯特山区城镇开发适宜性评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of urban development suitability in karst mountainous areas

目标	准则	指标	获取方式	趋向	权重		
城镇开发适宜性	条件限制	自然地理	坡度/(°)	DEM	-	0.0935	
		生命安全	地质灾害易发区	资料收集	-	0.0693	
			活动断层影响区	资料收集	-	0.0451	
			岩溶塌陷易发区	资料收集	-	0.0503	
			矿山占地	资料收集	+	0.0627	
	生态安全及粮食安全	生态保护红线区	资料收集	-	0.0337		
		永久基本农田区	资料收集	-	0.0579		
		现状地类	遥感解译	+	0.0623		
		区位支撑	地理区位	距中心市区距离/m	缓冲区	-	0.1634
				距建制镇距离/m	缓冲区	-	0.1105
			距农村居民点距离/m	缓冲区	-	0.0673	
	交通区位		距国道/省道距离/m	缓冲区	-	0.1305	
			距县道/乡道距离/m	缓冲区	-	0.0535	

表3 喀斯特山区农业开发适宜性评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of agricultural development suitability in karst mountainous areas

目标	准则	指标	获取方式	趋向	权重	
农业开发适宜性	土壤管理情况	灌溉保证率/%	资料收集	+	0.0983	
		区位支撑	距居民点距离/m	缓冲区	-	0.0235
	距农村道路距离/m		缓冲区	-	0.0697	
	距现状耕地距离/m		缓冲区	-	0.0237	
	立地条件		坡度/(°)	DEM	-	0.0350
		坡向	DEM	+	0.0253	
		高程/m	DEM	-	0.0479	
	气候条件	年10℃积温/℃	资料收集	+	0.1033	
		年降雨量/mm	数据插值	+	0.0710	
	土壤养分状况	有机质	有机质含量/(g/kg)	资料收集	+	0.0438
			大量元素	全氮含量/(g/kg)	资料收集	+
		有效磷含量/(mg/kg)		资料收集	+	0.0863
		速效钾含量/(mg/kg)		资料收集	+	0.0799
		微量元素	有效锌含量/(mg/kg)	资料收集	+	0.0539
		水溶态硼含量/(mg/kg)	资料收集	+	0.0531	
	土壤剖面及理化性状	土壤质地	土壤质地	资料收集	+	0.0442
			土层厚度/cm	资料收集	+	0.0685
		剖面构型	剖面构型	资料收集	+	0.0157
			pH值	资料收集	+	0.0317
	政策管控	永久基本农田	资料收集	+	—	

表4 喀斯特山区生态保护适宜性评价指标体系

Table 4 Evaluation index system of ecological protection suitability in karst mountainous areas

目标	准则	指标	获取方式	趋向	权重	
生态保护适宜性	生态敏感性	水土流失敏感性	土壤侵蚀量/(t/hm ²)	RUSLE	+	0.0838
		地质灾害敏感性		资料收集	+	0.0331
		石漠化敏感性		遥感解译	+	0.0995
	生态重要性	水源涵养功能重要性	水源涵养量/(m ³ /hm ²)	降水储存	+	0.1419
		土壤保持功能重要性	土壤保持量/(t/hm ² ·a)	RUSLE	+	0.1735
		生物多样性维护重要性	生境质量指数	HQI	+	0.1253
			自然保护区分布	资料收集	+	0.1066
	政策管控	生态保护红线	公益林分布	资料收集	+	0.0605
			净初级生产力/[g C/(m ² ·a)]	NPP	+	0.1758
				资料收集	+	—

将三个适宜性评价结果在 ArcGIS 中进行叠加分析, 遵循生态优先、最适宜类型优先、区域协调和因地制宜等原则, 首先将现状城镇建设用地划入城镇最适宜区, 将现状重度石漠化区划入生态最适宜区; 三类国土空间功能用地如果均为不同适宜等级的区域, 通过反木桶原理^[30]将其划为适宜等级最高的功能用地的最适宜区或适宜区 (最终的适宜等级由该区域的最高适宜等级是最适宜级还是适宜级决定, 后续涉及适宜等级的选择皆以此进行确定); 如果只有一种功能用地是最高适宜等级的区域, 将其划为该功能用地的最适宜区或适宜区; 如果有两种或两种以上国土空间功能用地都具有相同的最高适宜等级的区域, 若相同的用地中有生态功能用地, 则划为生态功能用地的最适宜区或适宜区, 若无, 将其划为国土空间冲突区; 如果三种国土空间功能用地都是不适宜级或最不适宜级的区域, 则划为国土空间冲突区。最终, 得到六个国土空间适宜区 (包括城镇最适宜区、城镇适宜区、农业最适宜区、农业适宜区、生态最适宜区和生态适宜区) 和一个国土空间冲突区 (图 3a)。

1.3.2 资源环境承载力评价

(1) 指标体系构建

根据喀斯特山区资源、环境和社会经济状况以及相关文献资料查阅^[31-33], 从资源承载力系统、环境承载力系统和社会经济承载力系统三个子系统角度, 考虑水土资源、旅游资源、区位资源、矿产资源、生态环境、水环境、大气环境和社会经济等 8 个因素, 选取地均水资源量、生境质量和城镇化率等 31 个指标, 构建资源环境承载力评价指标体系, 并以熵权法计算标准化后各指标的权重 (表 5)。

(2) 分级评价方法

研究采用模糊综合评价法计算资源环境承载力, 该方法能够有助于避免与客观真实之间的偏离问题, 且能够考虑众多影响因素, 从多个层次对资源环境承载力进行综合评价^[30]。首先, 利用模糊综合评价法计算级别特征值 (T), 将资源环境承载力分为理想承载、高承载、一般承载、低承载、较低承载和不可承载等六个评价等级; 然后, 采用降半梯形分布函数^[30]按照所建立的指标体系和指标标准化结果, 计算得到各指标在各评价

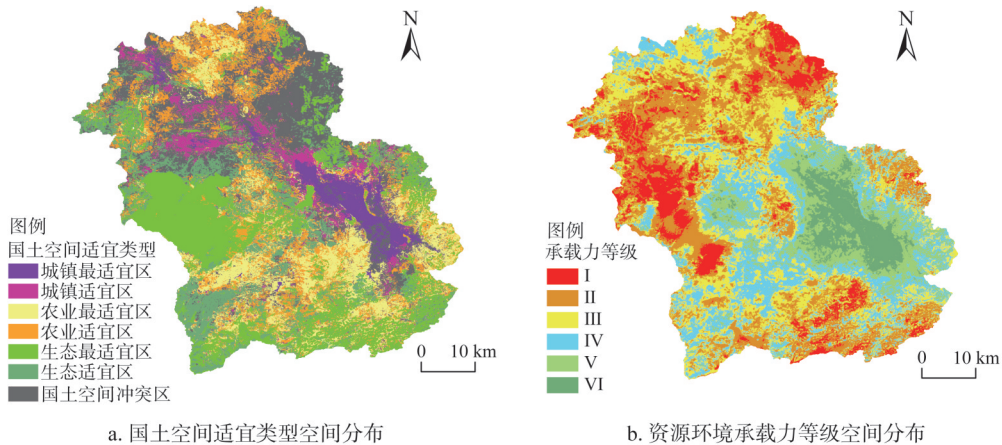


图3 国土空间适宜类型及资源环境承载力等级空间分布

Fig. 3 Distribution of the territorial spatial suitable types and the grades of resources and environment carrying capacity

等级的隶属度，并通过模糊矩阵加权运算得到资源环境承载力在各等级区间的总隶属度；最后，通过整合各等级区间的总隶属度得到资源环境承载力结果。

为了将资源环境承载力评价结果与国土空间开发适宜性评价中的适宜性分区结果相对应，应对评价结果进行分等定级。依据相关研究中的等级划分方法及其划分结果，采用自然断裂法将资源环境承载力分为六个等级，I~VI等级，承载力依次增加（图3b）。

1.3.3 基于“双评价”的国土空间优化

(1) 国土空间类型划分

在国土空间“三区三线”中，三区为城镇空间、农业空间和生态空间，三线为城镇开发边界、永久基本农田和生态保护红线，三区互不重叠，三线互不交叉^[34]。为了研究需要，本文对国土空间类型进行以下划分^[18]：将城镇空间分为城镇开发边界区和城镇预留区，将农业空间分为永久基本农田区和一般农业区，将生态空间分为生态保护红线区和一般生态区（即国土三类空间的六类分区）。其中，城镇开发边界区是在一定时期内可以进行城镇开发和集中建设的地域空间边界；城镇预留区是城镇空间中除城镇开发边界区外，对未来城镇开发和建设的留白区；永久基本农田区是按照一定时期人口和社会经济发展的需求，依法确定的不得占用、不得开发以及需要永久保护的优质耕地边界；一般农业区是除永久基本农田区外，供应农村居民生活和日常口粮的农业空间；生态保护红线区是在生态空间中具有重要生态功能、必须强制性严格保护的的范围；一般生态区是除生态保护红线区外的其他生态空间。基于此，对国土空间开发适宜性评价得到的城镇最适宜区、城镇适宜区、农业最适宜区、农业适宜区、生态最适宜区和生态适宜区进行六种国土空间类型的划分：城镇最适宜区为城镇开发边界区，城镇适宜区为城镇预留区，农业最适宜区为永久基本农田区，农业适宜区为一般农业区，生态最适宜区为生态保护红线区，生态适宜区为一般生态区。

(2) 国土空间冲突区修正规则制定

在喀斯特山区，各国土空间类型的发展对于区域资源环境本底状况的要求不同^[35]，其中，城镇空间对承载力要求最高，农业空间次之，生态空间最小。基于喀斯特山区国

表5 喀斯特山区资源环境承载力评价指标体系

Table 5 Evaluation index system of the resources and environment carrying capacity in karst mountainous areas

目标	准则	指标	趋向	权重		
资源环境承载力评价	资源承载力	水资源	地均水资源量/(m ³ /hm ²)	+	0.0653	
			人均水资源量/(m ³ /人)	+	0.0225	
			供水比例/%	+	0.0236	
			万元GDP用水量/(m ³ /万元)	-	0.0576	
		土地资源	耕地资源/%	+	0.0373	
			建设用地资源/%	+	0.0382	
		旅游资源	旅游资源吸引力	+	0.0373	
		区位资源	距道路距离/m	+	0.0396	
			距水源距离/m	+	0.0391	
		矿产资源	查明矿产资源价值/万元	+	0.0585	
		环境承载力	生态环境	植被净初级生产力/[g C/(m ² · a)]	-	0.0420
				生境质量指数	-	0.0519
	水土流失环境			产水量/mm	+	0.0333
			土壤保持量/[t/(hm ² · a)]	+	0.0187	
			石漠化程度	-	0.0282	
	水环境		地表水环境质量	+	0.0199	
			人均污水排放量/(m ³ /人)	-	0.0052	
	大气环境		SO ₂ /(μg/m ³)	-	0.0190	
			NO ₂ /(μg/m ³)	-	0.0195	
			PM ₁₀ /(μg/m ³)	-	0.0193	
			CO/(μg/m ³)	-	0.0195	
			O ₃ -8h/(μg/m ³)	-	0.0193	
			PM _{2.5} /(μg/m ³)	-	0.0187	
	地质环境		地质灾害易发率/%	-	0.0188	
	社会经济承载力		社会状况	城镇化率/%	+	0.0856
				人均粮食占有量/(kg/人)	+	0.0189
				劳动力比例/%	+	0.0196
				人口密度/(人/km ²)	-	0.0196
		经济状况	GDP增长率/%	+	0.0229	
			第三产业增加值/%	+	0.0467	
			居民可支配收入/万元	+	0.0344	

土空间的功能用地发展导向和“三区三线”的内涵,结合《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》对城镇开发边界、永久基本农田和生态保护红线的界定可知,Ⅰ级承载力应纳入生态保护红线区,Ⅱ级承载力应纳入一般生态区,Ⅲ级承载力应纳入一般农业区,Ⅳ级承载力应纳入永久基本农田区,Ⅴ级承载力应纳入城镇预留区,Ⅵ级承载力应纳入城镇开发边界区。基于此,构建国土空间冲突区修正规则(表6)。

(3) 国土空间优化

把国土空间冲突区与资源环境承载力分级图进行叠加,根据国土空间冲突区修正规

表6 国土空间冲突区修正规则

Table 6 Amendment rules of territorial spatial conflict zones

序号	资源环境承载力等级	功能区定位	国土空间潜在发展类型
1	I	生态环境保护的重点区	生态保护红线区
2	II	一般生态维护区	一般生态区
3	III	一般农业生产用地和农村生活用地	一般农业区
4	IV	农业开发和种植核心区	永久基本农田区
5	V	城镇开发建设留白区	城镇预留区
6	VI	城镇开发建设核心区	城镇开发边界区

则对冲突区进行调整和修正；把基于国土空间开发适宜性评价的国土空间类型划分结果和冲突区修正结果综合起来，最终得到喀斯特山区国土空间优化分区结果。

2 结果分析

2.1 喀斯特山区国土空间优化

2.1.1 数量结构

在国土空间优化结果的数量结构中（图4），生态保护红线区面积最大，其次为一般农业区，分别为 773.32 km² 和 743.37 km²，而城镇开发边界区面积最小，仅为 112.08 km²。其他类型从大到小依次为一般生态区、永久基本农田区和城镇预留区，面积分别为 650.86 km²、552.71 km²和 132.84 km²。

从国土空间功能类型上看，与现状模式相比（表7），城镇空间（包括城镇开发边界区和城镇预留区）呈增长趋势，增加了6.04%，而农业空间（包括永久基本农田区和一般农业区）和生态空间（包括一般生态区和生态保护红线区）呈减少趋势。其中，生态空间减少最多，减少了4.25%，农业空间则减少了1.79%。在优化过程中，将国土空间开发适宜性和资源环境承载力的评价结果作为国土空间功能类型结构的主要考量标准，并将各功能类型的适宜性较高和承载力适合的区域分别划入三种国土空间功能类型区。这种优化方法使现状国土空间功能类型的数量结构发生

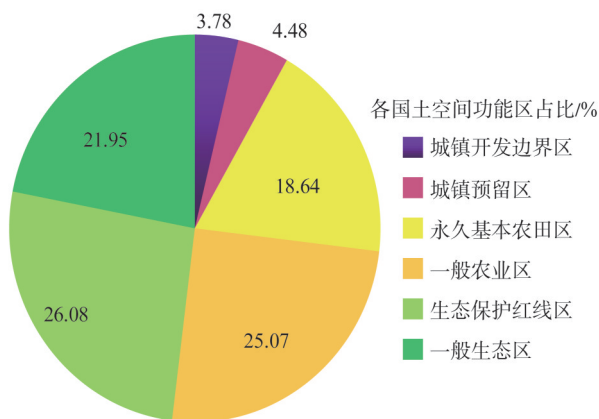


图4 喀斯特山区国土空间优化数量结构

Fig. 4 Quantity structures of territorial space optimization in karst mountainous areas

表7 喀斯特山区国土空间功能类型现状结构与优化结果对比

Table 7 Comparison of the present structures and optimization results of territorial spatial functional types in karst mountainous areas (%)

国土空间功能类型	国土空间发展模式	
	现状模式	优化模式
城镇空间	2.22	8.26
农业空间	45.50	43.71
生态空间	52.28	48.03

了较大的变化,例如,把处于城镇高适宜区和高承载力中的农业空间和生态空间优化为城镇空间,使城镇空间面积增加而农业和生态空间面积减少。通过优化,国土空间功能类型的数量结构更重视区域资源环境的承载力和国土空间的适宜性,将城镇的有序提高、农业的安全开发和生态的合理保护融为一体,有利于喀斯特山区国土空间的健康发展。

2.1.2 空间布局

在国土空间优化结果的空间布局中,不同国土空间类型有显著的分异特征(图5)。

(1) 城镇开发边界区: 主要分布于东部和东南部,在西北部和西南部有少量分布。东部和东南部的城镇开发边界区地势平坦,自然灾害影响最小,资源环境承载力最高,为城镇的繁荣与发展提供了优越的本底条件,也减少了各类灾害对人们生命安全的威胁;该区域主要位于无石漠化区,小范围区域为轻度石漠化,使城镇的发展受石漠化分布的影响较小,也防止了城镇中强烈的人类活动对石漠化严重地区生态修复的影响。

(2) 城镇预留区: 主要分布于西北部和东南部的城镇空间周围。该区域资源环境的本底条件低于城镇开发边界区,但区位条件依然较好,位于城镇空间发展的辐射圈中,社会经济发展潜力较高,为人们居住与日常活动提供预留空间。与城镇开发边界区相同,城镇预留区中仅存在轻度石漠化一种石漠化类型,且分布较少。因此,它的划定对研究区石漠化变迁的影响较小。

(3) 永久基本农田区: 主要分布于南部,在北部、东部和中部有少量连片分布。南部的永久基本农田区主要位于现状永久基本农田区及其周围,该区域土壤养分状况和理化性质最好,坡度较小,降雨量较高,且一般道路纵横交错,可达性较高,为农业的种植提供了优越的条件。永久基本农田区大部分位于无石漠化区,少量地区存在轻度石漠化的分布,这种分布模式既有效缓解了石漠化分布区中各类石漠化灾害对农业有序发展和区域粮食安全带来的负面干扰,也防止了农业活动高度密集区中各类面源污染对石漠化状况正向演替的阻碍。

(4) 一般农业区: 主要分布于北部、南部和中部的永久基本农田区周围,这些地区气候条件和立地条件较好,不仅适宜小规模农业的发展,也适宜农村居民的居住和生活,从而满足农村居民对日常粮食和生活空间的需求。与永久基本农田区相同,一般农业区主要位于无石漠化区,部分地区存在轻度和中度石漠化的分布,但分布规模极少。因此,一般农业区的农业种植与居民生活对区域石漠化状况的干扰较小。

(5) 生态保护红线区: 主要分布于西部和南部,在东部和东北部有少量连片分布。西部和南部的生态保护红线区生态环境状况整体处于全区最高水平,生态系统服务价值最高,物种群落最丰富,是全区生态环境保育和维护的重点区;东部和东北部的生态保护红线区主要位于石漠化分布范围中,石漠化类型包括轻度、中度和重度石漠化并以重

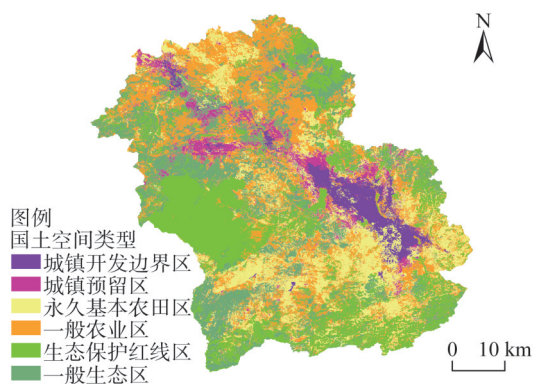


图5 喀斯特山区国土空间优化分区的空间分布
Fig. 5 Distribution of territorial spatial optimization zones in karst mountainous areas

度石漠化为主，这些地区资源环境承载力最低，生态环境压力最大，对人们日常生活的支撑能力较弱，不适宜城镇和农业的发展，划入生态保护红线区有利于促进石漠化地区生态环境的好转，加快石漠化的治理速率。

(6) 一般生态区：主要集中于西北部和西南部，在东部和东北部分布较少。西北部和西南部生态状况较好，可为区域生态环境的可持续发展提供助力；东部和东北部的一般生态区主要位于石漠化区，石漠化类型为轻度和中度石漠化，并广泛集中于重度石漠化与一般农业区的中间地带，它的存在为重度石漠化区的调节和人类活动干扰的阻断提供了生态屏障。

2.2 喀斯特地区国土空间管控

2.2.1 国土空间分区管控

基于国土空间优化结果，以生态保护和石漠化治理为目标，根据喀斯特山区各类国土空间的发展潜力和趋势，对六个国土空间优化分区分别提出管控措施。

(1) 城镇开发边界区

城镇开发边界区是社会经济发展的核心，是支撑人们生活和生产的重点区域。在该区域中，要严格控制开发利用的效率和强度，引导城镇的精细化增长，优化内部功能布局，从而提升区域经济发展能力，引导贫困地区的经济增长；然后，加强基础设施的建设和完善程度，提高人们的生活水平；最后，提升城镇绿色体系的构建^[19]，增加公园和湿地等绿色景观在城镇开发边界区中的比例，统筹布局生态廊道，缓解高强度的人类活动对石漠化变化的干扰。

(2) 城镇预留区

城镇预留区是城镇建设和产业发展的战略储备区，是防止人口需求增长和产业规模扩大造成城镇空间不足现象而设置的区域^[20]。因此，城镇预留区在原则上应按照原有土地利用类型进行相应的保护，当现有城镇开发边界区不能满足新增城镇空间的规模需求时，才可对城镇预留区进行开发。但它的开发也应根据实际的需求进行布局，在优先保障喀斯特山区生态环境质量的前提下，基于生态评估和安全评价，合理划入城镇开发边界区中，重点用于战略性和前沿性的城镇空间建设。

(3) 永久基本农田区

永久基本农田区是农业开发和种植的核心区，是保障国家粮食安全的重点区域。在该区域中，应防止非农开发的占用，确保农业功能主导始终为区域国土功能的发展方向，强化永久基本农田区的保护机制和追责机制，实施强效的监管和保护。当国家或区域的重大发展规划和大型基础设施建设方案无法避开对永久基本农田区的占用时，应严格按照“占多少、补多少”的原则，对永久基本农田区进行补充，并确保补充区域耕地质量的不降低。

(4) 一般农业区

一般农业区主要包括普通农用地和农村居民点，集农业种植和农村生活于一身。对于一般农业区中的农用地，既要使农业功能质量高的地区划入永久基本农田区，也要强化对非农建设占用耕地的引导和控制，严格限制与农业生产无关的开发与建设活动；其次，根据所处喀斯特地区的石漠化等级状况，合理引导农业结构调整，设置不同石漠化

等级的农业种植区,提高农用地产量和综合效益。对于一般农业区中的农村居民点,要有序推进破碎农村居民点的整合,加强空心村的整治,对石漠化等级较高的村落进行转移,根据石漠化程度和社会条件合理安排农村居民点的分布。

(5) 生态保护红线区

生态保护红线区是保障区域生态环境质量、维护生态环境平衡的重点区域。首先,应禁止与生态保障无关的布局和建设,并减少区域内人类活动的强度,推动人类活动高强度区的转移;然后,要明确生态保护红线区内的保护目标,针对石漠化等级较高和生态环境较好的地区实施差别化保护措施,维护生态系统的整体性、自然景观的结构性和物种群落的多样性;其次,在石漠化等级较高的地区(特别是石漠化重度区),坚持自然修复为主和人为生态工程为辅的“双效结合”方式,加强生态环境的修复速度;最后,在生态保护红线区的周边范围内,要根据石漠化等级状况和生态环境质量高低设置不同距离的安全缓冲区,在缓冲区内严禁增加与生态功能冲突的开发活动,但在不降低生态质量的前提下,可适度发展生态产业,提高喀斯特贫困地区的经济产出,缓解贫困压力。

(6) 一般生态区

一般生态区是生态保护红线区外资源环境承载能力最弱的区域。在该区域中,应限制开展人类活动强度高的开发性和生产性活动,引导与生态功能冲突较大的活动有序地退出;然后,根据石漠化等级的分布状况,通过生态安全格局的构建,设置不同的生态功能区,并针对各功能区的石漠化强弱特征制定有效的保护和保育措施,加快喀斯特地区生态功能的恢复和功能质量的提高。针对轻度石漠化或无石漠化分布的地区,在不破坏生态系统和降低生态功能的前提下,可进行土地利用结构和布局的适度调整,从而更好地发挥生态系统调节气候、调节水文、提供美学景观和维护生物多样性等多种功能,促进生态环境的可持续发展。

2.2.2 石漠化区管控

基于石漠化分区结果,对石漠化轻度区、中度区和重度区的各国土空间功能类型分别提出管控建议。

(1) 石漠化轻度区

石漠化轻度区主要分布于东部、西北部和东南部(图6)。石漠化轻度区的国土资源具有多样性,开发利用方法多样化,存在人类活动强度较高、人口密集的城镇空间,虽然有一定数量的农业空间,但人们的温饱仍依赖于对其他国土资源的开发利用。该地区的人类活动对生态环境的破坏还处于初期,生态系统功能仍然较强,但若继续不合理的利用国土资源,将加重石漠化程度的恶化。

① 在城镇空间中,应通过城镇产业结构的有序调整和国土资源的合理开发利用,建立社会经济可持续发展的生态保障

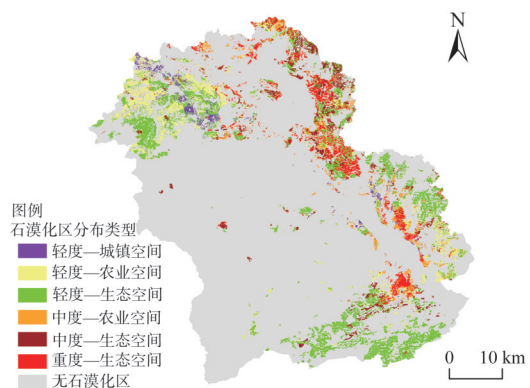


图6 石漠化区国土空间功能类型分布

Fig. 6 Distribution of territorial spatial functional types in rocky desertification areas

系统,并根据区域状况转变其发展重点,使社会经济和生态环境得以持续、稳定、绿色、协调和均衡的发展。②在农业空间中,应以规模化发展为核心,以增加农业产出为目的,以国土资源的高效配置为条件,剔除高消耗、粗放型农业耕作方式,构建绿色发展型和资源节约型的高产量、高质量和高经济效益的农业发展模式,促进石漠化轻度区的生态恢复与农业可持续发展的统一。③在生态空间中,应根据区域资源环境特点,构建防治和治理相结合的生态发展模式,有序实施林地、草地和水域等的保育和养护工程,提高生态环境的发展质量。

(2) 石漠化中度区

石漠化中度区主要分布于东北部(图6)。石漠化中度区石漠化特征显著,土壤侵蚀较重,植被覆盖度较低,且分布破碎,生态环境脆弱。石漠化状况受农业活动的干扰强烈,造成资源和生态环境的破坏以及石漠化面积的扩大。

①在农业空间中,应减少对石漠化治理影响较大的农作物种植(如“三七”),积极推进景观布局、生态系统循环、群落立体和品种搭配等生态农业发展模式的建立,以农业发展带动生态环境状况的好转;对于农业空间中的农村居民点,应进行整体地搬迁和转移,以减少人类活动对石漠化中度区的干扰。②在生态空间中,以造林、蓄水和保土为重点,开展山、水和林的综合整治,提升区域植被生长环境,提高石漠化区的生态安全水平;对于面积较小、分布破碎和功能不齐的生态空间,应对其实施面上保护,调整其生态发育过程,丰富生态系统的功能,维护生态系统的完整性,保证生态过程的连续性。

(3) 石漠化重度区

石漠化重度区主要分布于东北部(图6)。石漠化重度区是环境条件和发展态势最恶劣的地区,水土流失严重,生态系统呈现濒于崩溃或已经崩溃的局面。然而,该区域的景观已趋于稳定,生态修复的成本高且收效小,人与环境的关系严重失调,形成“贫困—资源掠夺—环境退化—贫困加剧”的恶性循环。因此,对于石漠化重度区的生态空间,首先要减轻人类活动造成的生态压力,减少人类对资源的掠夺式开发,使生态有喘息和恢复的生机;其次,通过自然恢复与生态保护区建设相结合的治理模式,大力实施生态移民、植树造林、封山育林和坡改梯工程,并采用生态工程技术推动植被顺向演替,加快生态环境恢复进程,减缓石漠化重度区的蔓延速度;最后,建立石漠化重度区保护的监测和考核考评制度,明确重度区中各乡镇和各村级单位的职责,实行严格的源头保护、损害赔偿和责任追究制度。

3 讨论

3.1 喀斯特山区国土空间优化

城镇空间中的城市扩张导致了农业景观和生态景观的丧失、破碎、转变和孤立,农业空间的农业生产可持续性遭到破坏^[33],生态空间中的气候、土壤和生物多样性也受到不利的影响^[36]。如何协调城镇空间、农业空间和生态空间的相互关系,优化国土空间结构,成为区域可持续发展中亟待解决的关键问题。

国土空间开发适宜性评价和资源环境承载力评价是国土空间规划的重要基础和核心

内容^[15]，自然资源部在2020年1月下发的《资源环境承载力和国土空间开发适宜性评价指南（试行）》和《省级国土空间规划编制指南（试行）》中，对“双评价”的评价原则、技术流程、指标选取和评价模式等内容提出了新的内涵和方向，对国土空间规划的目标与战略、开发保护格局、资源要素保护和利用、生态恢复与国土综合整治和区域协调与规划等方面的工作也做出了新的指导。但是，上述思路与方法还应根据所处区域的实际状况进行相应的调整与补充，找出区域国土空间发展的短板与优势，调整区域发展战略。并且，目前三类空间冲突区的问题一直难以解决。本文在“双评价”指南和国土空间规划指南的技术方法和规划思路的基础上，结合喀斯特山区的社会经济和生态环境状况，提出了一套适用于喀斯特山区的“双评价”国土空间优化方法和体系，并建立了冲突区修正规则，以缓解城镇空间、农业空间和生态空间的矛盾。在喀斯特山区，找到一种平衡城镇开发、农业开发和生态保护的“三赢方式”，对于可持续的国土空间开发利用至关重要。在优化过程中，除了永久基本农田和生态保护红线外，本文也将喀斯特山区某些现状用地和石漠化类型设置为限制区。例如，城镇建设用地，它是区域社会经济长期集聚的结果，若不发生大型的或人们对人们生命安全造成严重威胁的灾害、疫情和安全事故，它会长期保持现有的功能状态^[37,38]，因此，把它限制为城镇开发边界区进行建设，从而提升区域经济发展实力，改善贫困状况；再如，重度石漠化区，它的环境条件和发展态势最恶劣，要严格禁止人类活动的干扰才能让其有喘息和恢复的空间^[39]，因此，将其限制为生态保护红线区进行重点保护和治理，以此扭转喀斯特山区生态环境快速恶化的趋势。从优化结果上看，所构建的国土空间优化方法充分考虑了喀斯特山区的自然、社会和经济状况，结合区域生态和贫困问题，合理配置各国土空间类型的空间结构，为有效促进社会经济发展、粮食安全、生态保护和石漠化治理提供了基础。因此，该方法也为国土空间的决策者提供了以解决喀斯特山区生态和贫困等问题为目标的区域发展战略调整的思路与可能性。

3.2 喀斯特山区国土空间管控

在联合国可持续发展目标（SDGs 2030）中，提出了消除贫困、消除饥饿和良好健康与福祉等17类发展目标，其对象涉及城镇空间、农业空间和生态空间的方方面面，使国土空间管控问题的解决成为区域发展的关键所在^[40]，喀斯特山区特殊的生态环境和社会经济状况更令其显得迫切和重要。

本文结合国土空间优化结果，构建了以国土空间分区分区管控和石漠化区管控为核心的喀斯特山区国土空间管控途径，并探索了如何在保障生态环境的前提下实现区域社会的快速发展。在国土空间分区分区管控中，针对各国土空间类型的分区特点和石漠化等级情况，以生态质量保障和社会经济发展为目标提出了城镇开发边界区和城镇预留区的管控途径，在保障喀斯特山区生态稳定的前提下提升区域社会经济的发展水平和潜力，解决喀斯特山区经济发展能力较差和贫困程度较高的难题；以耕地质量保障、居民点整治和绿色农业推进为目标提出了永久基本农田区和一般农业区的管控方式，在提升农业空间生态质量和规避农业活动对石漠化严重地区影响的基础上，提高农村生活水准，增加粮食产量，缓解喀斯特山区农民生活的贫困和粮食收成的贫困；以生态质量提高为目标提出了生态保护红线区和一般生态区的管控模式，在保障现状生态水平较高地区的生态质量不降低且平稳增长的基础上，针对石漠化等级较高地区（主要是重度石漠化区），构

建了生态恢复和石漠化治理的方案与措施，缓解喀斯特山区巨大的生态环境压力。

不同功能的国土空间是构成喀斯特系统的基础，在石漠化区管控中，针对不同石漠化等级下的每种国土空间功能类型，构建了等级化、差异化的管控模式，从而重塑适合于所处石漠化等级的城镇开发系统、农业开发系统和生态保护系统，加快石漠化状况的修复和生态环境质量的提高。

3.3 研究不足与展望

本文从国土空间开发适宜性和资源环境承载力的角度对云南喀斯特山区国土空间进行了优化，单一的国土空间开发适宜性和资源环境承载力对国土空间的相关分析已经在许多研究中被证明是可行的，并且可以为决策者提供足够的信息^[15,26,28,41,42]。国土空间是人类经济和社会活动的基本载体，也是人类精神和文化需求的空间反映，特别是在人本城市建设背景下，越来越重视从人类的行为特征和发展意愿的角度开展相关的空间研究^[43]。但是，本文由于受到数据收集和量化方法的限制，主要从自然、社会、经济、环境和资源等区域本底情况入手，对人类的行为特征和发展意愿考虑较少，在今后研究中，将加强从这两方面对国土空间的优化和管控展开更深入的研究。

4 结论

研究以云南喀斯特山区为研究对象，基于国土空间开发适宜性评价和资源环境承载力评价，探讨了喀斯特山区国土空间优化的方法和冲突区的修正规则，识别和分析了不同的国土空间类型，并提出了以国土空间分区管控和石漠化区管控为主导的喀斯特山区国土空间管控模式。得出了以下结论：

(1) 在国土空间优化结果中，国土空间被划分为六种类型：城镇开发边界区、城镇预留区、永久基本农田区、一般农业区、一般生态区和生态保护红线区，分别占总面积的3.78%、4.48%、18.64%、25.07%、26.08%和21.95%。从国土空间的主导功能类型看，与现状相比，优化后城镇空间占全部国土面积的比例增加6.04%，农业空间减少1.79%，生态空间减少4.25%。

(2) 城镇开发边界区位于无石漠化区和轻度石漠化区，主要分布于东部和东南部；城镇预留区仅存在轻度石漠化，主要分布于西北部和东南部；永久基本农田区位于无石漠化区和轻度石漠化区，主要分布于南部；一般农业区位于无石漠化区、轻度石漠化区和中度石漠化区，主要分布于北部、南部和中部；生态保护红线区主要分布于西部和南部，在东部和东北部分布较少，其中东部和东北部为石漠化区，包含轻度、中度和重度三种石漠化类型，并以重度石漠化为主；一般生态区主要分布于西北部和西南部，在东部和东北部分布较少，其中东部和东北部为石漠化区，包含轻度和中度两种石漠化类型。

(3) 在国土空间分区管控中，城镇开发边界区以精细化增长、基础设施完善和绿色建设体系构建为核心；城镇预留区以建设开发约束、开发安全评估和开发重点明确为核心；永久基本农田区以农业功能保障、保护机制强化和负面清单制度构建为核心；一般农业区以农用地分类控制和农村居民点整治为核心；生态保护红线区以人类活动限制、自然修护、差异化保护措施构建和安全缓冲区建立为核心；一般生态区以冲突类型迁出、生态功能区划分和结构布局调整为核心。

(4) 在石漠化区管控中，构建了不同石漠化区的国土空间功能管控模式。其中，在

轻度石漠化区中, 构建了城镇空间社会经济—生态环境协调发展、农业空间规模化生产—高效化开发协同和生态空间保护—治理并行的发展途径; 在中度石漠化区中, 构建了农业空间生态农业规模增加和农业生活区域迁出的治理方式, 以及生态空间生态安全水平提升和生态发育过程调整的治理方向; 在重度石漠化区中, 构建了生态空间生态压力减轻、综合治理模式实施和生态政策约束的管控手段。

参考文献(References):

- [1] 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.]
- [2] 邹利林, 刘彦随, 王永生. 中国土地利用冲突研究进展. 地理科学进展, 2020, 40(2): 298-309. [ZOU L L, LIU Y S, WANG Y S. Research progress and prospect of land-use conflicts in China. *Progress in Geography*, 2020, 40(2): 298-309.]
- [3] 樊杰, 王亚飞, 梁博. 中国区域发展格局演变过程与调控. 地理学报, 2019, 74(12): 2437-2454. [FAN J, WANG Y F, LIANG B. The evolution process and regulation of China's regional development pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2437-2454.]
- [4] FAN J, WANG Y F, WANG C S, et al. Reshaping the sustainable geographical pattern: A major function zoning model and its applications in China. *Earth's Future*, 2019, 7(1): 25-42.
- [5] 李欣, 方斌, 殷如梦, 等. 江苏省县域“三生”功能时空变化及协同/权衡关系. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2363-2377. [LI X, FANG B, YIN R M, et al. Spatial-temporal change and collaboration/trade-off relationship of "production-living-ecological" functions in county area of Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2363-2377.]
- [6] HANSEN R, OLAFSSON A S, RALL E, et al. Planning multifunctional green infrastructure for compact cities: What is the state of practice?. *Ecological Indicators*, 2019, 96(2): 99-110.
- [7] HÖLTING L, BECKMANN M, VOLK M, et al. Multifunctionality assessments—more than assessing multiple ecosystem functions and services? A quantitative literature review. *Ecological Indicators*, 2019, 103(8): 226-235.
- [8] GALWIACZEK M S, MIKULSKA K S, RITZEMA H, et al. Integration of water management and land consolidation in rural areas to adapt to climate change: Experiences from Poland and the Netherlands. *Land Use Policy*, 2018, 77(9): 498-511.
- [9] 林锦耀, 黎夏. 基于空间自相关的东莞市主体功能区划. 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.]
- [10] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201. [FAN J. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [11] FAN Y T, JIN X B, GAN L, et al. Spatial identification and dynamic analysis of land use functions reveals distinct zones of multiple functions in eastern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 642(15): 33-44.
- [12] 安悦, 周国华, 贺艳华, 等. 基于“三生”视角的乡村功能分区及调控: 以长株潭地区为例. 地理研究, 2018, 37(4): 695-703. [AN Y, ZHOU G H, HE Y H, et al. Research on the functional zoning and regulation of rural areas based on the production-life-ecological function perspective: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Area. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 695-703.]
- [13] 张年国, 王娜, 殷健. 国土空间规划“三条控制线”划定的沈阳实践与优化探索. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2175-2185. [ZHANG N G, WANG N, YIN J. Shenyang's practice and optimizing exploration of "Three Control Lines" in territorial spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2175-2185.]
- [14] ZHAO X Q, LI S N, PU J W, et al. Optimization of the national land space based on the coordination of urban-agricultural-ecological functions in the karst areas of Southwest China. *Sustainability*, 2019, 11(23): 6752.
- [15] 王亚飞, 樊杰, 周侃. 基于“双评价”集成的国土空间地域功能优化分区. 地理研究, 2019, 38(10): 2415-2429.

- [WANG Y F, FAN J, ZHOU K. Territorial function optimization regionalization based on the integration of "double evaluation". *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2415-2429.]
- [16] 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.]
- [17] 黄征学, 蒋仁开, 吴九兴. 国土空间用途管制的演进历程、发展趋势与政策创新. *中国土地科学*, 2019, 33(6): 1-9. [HUANG Z X, JIANG R K, WU J X. Territorial space use control: Historical evolution, development trend and policy innovation. *China Land Science*, 2019, 33(6): 1-9.]
- [18] 周侃, 樊杰, 盛科荣. 国土空间管控的方法与途径. *地理研究*, 2019, 38(10): 2527-2540. [ZHOU K, FAN J, SHENG K R. Research on methods and approaches of spatial governances. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2527-2540.]
- [19] 林坚, 乔治洋, 吴宇翔. 市县“多规合一”之“一张蓝图”探析: 以山东省桓台县“多规合一”试点为例. *城市发展研究*, 2017, 24(6): 47-52. [LIN J, QIAO Z Y, WU Y X. Analysis of the "One Blueprint" of the "Multiple Plans Integration": A case study of Huantai county, Shandong province. *Urban Development Studies*, 2017, 24(6): 47-52.]
- [20] 余亮亮, 蔡银莺. 国土空间规划管制与区域经济协调发展研究: 一个分析框架. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1445-1456. [YU L L, CAI Y Y. Research on spatial regulation of land use planning and coordinated development of regional economy: An analytical framework. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1445-1456.]
- [21] 吕晓, 黄贤金, 钟太洋, 等. 土地利用规划对建设用地扩张的管控效果分析: 基于一致性与有效性的复合视角. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 177-187. [LYU X, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. The controlling effects of land-use planning on construction land expansion based on the perspective compositing consistency and effectiveness. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 177-187.]
- [22] 林坚, 吴宇翔, 吴佳雨, 等. 论空间规划体系的构建: 兼析空间规划、国土空间用途管制与自然资源监管的关系. *城市规划*, 2018, 42(5): 9-17. [LIN J, WU Y X, WU J Y, et al. Construction of the spatial planning system: With discussions on the relationship between spatial planning, territorial spatial regulation, and natural resources supervision. *City Planning Review*, 2018, 42(5): 9-17.]
- [23] 林坚, 武婷, 张叶笑, 等. 统一国土空间用途管制制度的思考. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2200-2208. [LIN J, WU T, ZHANG Y X, et al. Thoughts on unifying the regulation of territorial space use. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2200-2208.]
- [24] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因. *生态学报*, 2018, 38(24): 8774-8786. [LYU Y, ZHANG L, YAN H M, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8774-8786.]
- [25] 李玉辉, 丁智强, 吴晓月. 基于Strahler面积—高程分析的云南石林县域喀斯特地貌演化的量化研究. *地理学报*, 2018, 73(5): 973-985. [LI Y H, DING Z Q, WU X Y. A quantitative study on the karst geomorphic evolution of Shilin county in Yunnan province of China based on Strahler hypsometric analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 973-985.]
- [26] 沈春竹, 谭琦川, 王丹阳, 等. 基于资源环境承载力与开发建设适宜性的国土开发强度研究: 以江苏省为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1276-1286. [SHEN C Z, TAN Q C, WANG D Y, et al. Research on land development intensity based on carrying capacity of resources and environment and suitability of development and construction: A case study of Jiangsu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(6): 1276-1286.]
- [27] BATHRELLOS G D, SKILODIMOU H D, CHOUSIANITIS K, et al. Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Science of the Total Environment*, 2017, 575(23): 119-134.
- [28] 高晓路, 吴丹贤, 周侃, 等. 国土空间规划中城镇空间和城镇开发边界的划定. *地理研究*, 2019, 38(10): 2458-2472. [GAO X L, WU D X, ZHOU K, et al. The urban space and urban development boundary under the framework of territory spatial planning. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2458-2472.]
- [29] PAN G, XU Y, YU Z, et al. Analysis of river health variation under the background of urbanization based on entropy weight and matter-element model: A case study in Huzhou city in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Research*, 2015, 139(5): 31-35.

- [30] YANG W, XU K, LIAN J, et al. Multiple flood vulnerability assessment approach based on fuzzy comprehensive evaluation method and coordinated development degree model. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213(5): 440-450.
- [31] 许明军, 杨子生. 西南山区资源环境承载力评价及协调发展分析: 以云南省德宏州为例. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1726-1738. [XU M J, YANG Z S. The evaluation and analysis of coordinated development on resources and environment carrying capacity in southwestern mountainous area of China: A case in Dehong Dai-Jingpo Autonomous Prefecture, Yunnan province. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1726-1738.]
- [32] 许璟, 安裕伦, 胡锋, 等. 基于植被覆盖与生产力视角的亚喀斯特区域生态环境特征研究: 以黔中部分地区为例. *地理研究*, 2015, 34(4): 644-654. [XU J, AN Y L, HU F, et al. Research on characteristics of ecological environment in a semikarst region based on vegetation cover and NPP: A case study in central Guizhou province. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 644-654.]
- [33] 杨庆媛, 毕国华, 陈展图, 等. 喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究: 以贵州省晴隆县为例. *地理学报*, 2018, 73(11): 2250-2266. [YANG Q Y, BI G H, CHEN Z T, et al. Spatial allocation of fallow land in karst rocky desertification areas: A case study in Qinglong county, Guizhou province. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2250-2266.]
- [34] 郭锐, 陈东, 樊杰. 国土空间规划体系与不同层级规划间的衔接. *地理研究*, 2019, 38(10): 2518-2526. [GUO R, CHEN D, FAN J. Territory spatial planning system and the convergence between different levels. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2518-2526.]
- [35] AKDIM B. Karst landscape and hydrology in Morocco: Research trends and perspectives. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 251-265.
- [36] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测. *生态学报*, 2018, 38(5): 1650-1660. [LIU J H, LI W F, ZHOU W Q, et al. Prediction of expansion pattern and impact on regional ecological security of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1650-1660.]
- [37] 杨振, 张小雷, 李建刚, 等. 中国地级单元城镇化与经济发展关系的时空格局: 基于2000年和2010年人口普查数据的探析. *地理研究*, 2020, 39(1): 25-40. [YANG Z, ZHANG X L, LI J G, et al. The spatial-temporal pattern of the relationship between urbanization and economic development at prefecture-level units in China: A quantitative analysis based on 2000 and 2010 census data. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 25-40.]
- [38] 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.]
- [39] 姚永慧, 索南东主, 张俊瑶, 等. 2010—2015年贵州省关岭县石漠化时空演变及人类活动影响因素. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1759-1769. [YAO Y H, SUONAN D Z, ZHANG J Y, et al. Spatiotemporal characteristics of karst rocky desertification and the impact of human activities from 2010 to 2015 in Guanling county, Guizhou province. *Progress in Geography*, 2019, 38(11): 1759-1769.]
- [40] GAO L, BRYAN B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 2017, 544(7649): 217-222.
- [41] 郝庆, 邓玲, 封志明. 国土空间规划中的承载力反思: 概念、理论与实践. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2073-2086. [HAO Q, DENG L, FENG Z M. Carrying capacity reconsidered in spatial planning: Concepts, methods and applications. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2073-2086.]
- [42] 樊杰. 地域功能—结构的组织途径: 对国土空间规划实施主体功能区战略的讨论. *地理研究*, 2019, 38(10): 2373-2387. [FAN J. Spatial organization pathway for territorial function-structure: Discussion on implementation of major function zoning strategy in territorial spatial planning. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2373-2387.]
- [43] 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.]

Optimal partitions and control of territorial space in karst mountainous areas of Yunnan province

ZHAO Xiao-qing¹, LI Si-nan¹, PU Jun-wei², TAN Shu-cheng¹, CHEN Jun-xu¹

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

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

Abstract: The coordinated development of territorial space is the premise of regional sustainable development. How to optimize the territorial space structure and build a reasonable control model has become one of the important issues that need to be urgently solved. This study took Wenshan city in Yunnan province, a typical karst mountainous area, as an example. It explored the optimization method of territorial space based on the "dual evaluations" and the amendment rules of conflict areas to optimize the territorial space partitions and propose control models for territorial space partitions and rocky desertification partitions. The results showed that: (1) The territorial space of karst mountainous areas in Yunnan province could be divided into 6 types, namely, urban development boundary area, urban reserved area, permanent basic farmland area, general agricultural area, ecological protection red line area, and general ecological area. Among them, the ecological protection red line area had the largest area, while the urban development boundary area had the smallest area. (2) The urban development boundary area and the urban reserved area were mainly distributed in the east and southeast; the permanent basic farmland area and the general agricultural area were mainly distributed in the north and south; the general ecological area was in the northwest and southwest; and the ecological protection red line area was in the west, south, east, and northeast, and the east and northeast parts of the study area were mainly rocky desertification areas. (3) According to the development potential and trend of each territorial space type, the control measures and models for territorial space partitions were proposed. For the areas of mild, moderate and severe rocky desertification, the paths and methods of development and protection in rocky desertification partitions were proposed for urban space, agricultural space, and ecological space. The results of this research can provide decision support for the reasonable development of territorial space and the control of rocky desertification in karst areas, and the methods and ideas of this research can provide references for territorial spatial optimization and control.

Keywords: territorial space; "double evaluations"; optimal partitions; control approaches; karst mountainous areas in Yunnan province