

云南典型石漠化区生态系统服务权衡与协同研究

苗培培¹, 赵祖军^{1,2}, 赵筱青¹, 普军伟¹, 李思楠¹, 王茜¹, 谭琨¹

(1.云南大学 地球科学学院, 昆明 650000; 2.云南省生态环境监测中心, 昆明 650034)

摘要:为研究人类活动对喀斯特山区生态系统服务产生的影响,以滇东南典型石漠化区广南县为研究区,选取 6 种生态系统服务从空间上与石漠化强度进行对比,并运用相关系数分析其权衡协同关系,通过热点图分析了其提供能力强弱的时空变化。结果表明:(1) 2000—2018 年,研究区食物供给和文化服务与石漠化程度空间分布基本无相关性,而土壤保持、固碳、产水量和生境服务与其分布基本呈负相关关系;(2) 2000—2018 年,研究区生境支持—固碳和土壤保持—固碳等呈协同关系,而产水量—土壤保持和产水量—生境支持等呈权衡关系;(3) 2000—2018 年,研究区热点区占比为“6 类”>“5 类”>“0 类”>“1 类”>“2 类”>“3 类”>“4 类”;空间上,“0 类”为生态脆弱区且为无热点区,分布在中部和西南部的石漠化中度区域;“6 类”为供给能力最高的区域,主要分布在北部及东北部。总之,石漠化区生态系统服务功能较无石漠化区低且基本为无热点区,但权衡协同关系较为显著。因此,应继续采取相应的生态恢复措施。

关键词:广南县; 生态系统服务; 权衡与协同; 热点区

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0366-09

Study on Trade-off and Cooperation of Ecosystem Service Space in Rocky Desertification Area of Yunnan Province

MIAO Peipei¹, ZHAO Zujun^{1,2}, ZHAO Xiaoqing¹, PU Junwei¹, LI Sinan¹, WANG Qian¹, TAN Kun¹

(1.School of Geographic Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650000, China;

2.Yunnan Ecological Environment Monitoring Center, Kunming 650034, China)

Abstract: In order to study the impact of human activities on ecosystem services in karst mountainous areas, Guangnan County, a typical rocky desertification area in southeastern Yunnan Province, was selected as the research area. Six ecosystem services were selected for spatial comparison with rocky desertification intensity, and correlation coefficients were used to analyze its trade-off and synergy relationship, and the heat maps were used to analyze temporal and spatial changes of its providing capabilities. The results show that: (1) from 2000 to 2018, food supply and cultural services in the study area were basically not related to the spatial distribution of rocky desertification, while soil conservation, carbon sequestration, water production, and habitat services were basically negatively related to their distribution; (2) from 2000 to 2018, the study area had a synergistic relationship between habitat support-carbon sequestration and soil conservation-carbon sequestration, while water production-soil conservation and water production-habitat support had the trade-off relationship; (3) from 2000 to 2018, the proportion of hotspots in the study area decreased in the order: ‘category 6’>‘category 5’>‘category 0’>‘category 1’>‘category 2’>‘category 3’>‘category 4’; spatially, ‘category 0’ was the ecologically fragile area with no hotspots, and distributed in the middle and southwestern rocky desertification areas, ‘category 6’ was the area with the highest supply capacity, mainly distributed in the north and northeast. Corresponding ecological restoration measures should be continued. Priority protection is required.

Keywords: Guangnan County; ecosystem services; trade-off and synergy; hot spot

收稿日期:2020-06-09

修回日期:2020-09-06

资助项目:云南省科技厅—云南大学联合基金[2018FY001(-017)];国家自然科学基金(41361020);云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200);云南省教育厅科学研究资助项目(2018Y001)

第一作者:苗培培(1991—),男,河南永城人,硕士,研究方向为土地利用/覆被变化的生态环境效应与景观生态安全格局。E-mail:1029907902@qq.com

通信作者:赵祖军(1976—),男,云南昆明人,工程师,硕士,主要从事环境监测分析工作。E-mail:zhaozujun@ynem.com

生态系统为人类的生存、健康和福祉提供多种服务^[1],人类的生存和发展离不开生态系统提供的服务,与人类息息相关的服务类型一般可分为供给、调节、文化和支持服务 4 大类^[2-3]。随着人类不合理的行为对生态系统影响日益加剧,除部分人类活动有利于生态系统服务的提升,更多的则导致生态系统服务受到损害^[4],因此,生态系统服务已为众多学者研究对象。由于生态系统服务具有动态性、复杂性及空间分布不均衡性的特征,导致不同生态系统服务相互影响,表现为权衡与协同作用^[5-7]。国内外学者已开展对生态系统服务权衡与协同关系的大量研究,从研究内容来看,主要为生态系统服务权衡与协同的效应和驱动机理等研究^[8-9]。从研究方法来看,主要为空间分析、情景模拟和流动性分析等方法^[10-11]。尽管研究已取得了一定的成果,但是在内容上,生态系统服务分类标准存在重叠和遗漏,导致生态系统服务权衡与协同研究的不确定性^[12],方法上,缺乏研究的定量模型^[13]。研究尺度上,虽然分别从宏观和微观尺度开展了大量研究,然而研究区域和尺度的不同导致结果无法进行对比^[14]。

近年来,喀斯特山区人类不合理的行为使生态系统固碳释氧、生境、土壤保持和水源涵养等功能受到严重损害^[15],加上喀斯特山区地理环境的特殊性,水资源较为丰富但利用率较低,严重限制了喀斯特山区的经济发展。因此,对喀斯特区域各生态服务功能权衡与协同关系的分析研究,能为喀斯特山区的生态安全和生态恢复战略制定提供依据。目前学界对于喀斯特地区多集中于石漠化、生态景观格局和生态系统服务评估研究等^[16]方面,而生态系统服务与石漠化程度关系研究较少。因此,研究选取位于滇东南典型喀斯特地区、生态环境脆弱、全国 200 个石漠化重点治理县之一的广南县为研究区。选取适合喀斯特地区生态系统服务的评估体系,空间对比分析生态系统服务与石漠化程度关系,探究生态系统服务权衡与协同的关系,从而为喀斯特生态脆弱区的生态保护及恢复提出意见和建议。

1 研究区概况

广南县位于云南省东南部地理坐标为 104°31′—105°34′E,23°29′—24°28′N,属中亚、南亚热带高原季风气候,并随海拔不同而变化。年均日照 1 857.7 h,年平均气温为 16.7℃,年平均蒸散发量为 1 665.3 mm,年平均降雨量为 1 056.5 mm,早雨季明显。处于滇南及桂西过渡地带,在地质发展变化过程中,发育下泥盆系、二叠系、三叠系及第四系底层。地貌复杂,包含岩溶、山区、坝子和河谷等,贯穿全县的东西向、北西向断裂

严密控制岩性的展布,南部主要为岩溶地貌分布,北部主要为构造侵蚀地貌分布。山区和半山区面积占 94.7%,坝区占 5.3%。喀斯特地貌分布较广,主要位于在西部、南部和中南部区域,面积占 74%。全县石漠化较为严重,石漠化区生态极为脆弱,严重制约着当地社会 and 经济发展。域内主要土壤类型为红壤、石灰岩土。森林植被类型主要有温凉性针叶林、暖性针叶林、温凉性阔叶林、暖性阔叶林和暖热性阔叶林等,植被种类较为丰富。河流分属珠江和红河水系,水资源总量多年平均值为 35.43 m³,水资源较为丰富但利用率较低,严重制约当地生产和生活。2018 年全县总人口 82.26 万人,其中,农业人口占 91.29%。2018 年广南县经济一、二、三产业生产总值比重为 30.22 : 30.34 : 39.44^[17-18]。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

结合学术界研究成果,选取适合喀斯特地区生态系统服务的评估体系,把生态系统服务分为食物供给、产水量、土壤保持、固碳、生境服务和文化服务 6 种类型进行核算。

2.1.1 生态系统服务核算方法

(1) 食物供给核算。食物供给是重要的供给服务之一。将农业中粮食产量和畜牧业的肉奶类产量按照 NDVI 值分配给耕地、草地栅格上。计算公式如下^[19]:

$$G_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times G_{sum} \quad (1)$$

式中: G_i 为第 i 个栅格的粮食产量; G_{sum} 为粮食总产量; $NDVI_i$ 表示第 i 个栅格 NDVI 值; $NDVI_{sum}$ 为耕地和草地的 NDVI 总值。

(2) 产水量核算。研究基于 InVEST 模型,利用年平均降雨量和年平均蒸散发量之差,来评估年平均产水量^[20],模型公式如下:

$$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (2)$$

式中: $Y(x)$ 为像元 x 上的产水量(mm); $AET(x)$ 为像元 x 上的实际蒸散量(mm); $P(x)$ 为像元 x 上的年均降雨量(mm)。

(3) 土壤保持核算。采用 GIS 技术结合通用土壤流失方程(RUSLE)模拟土壤保持服务的物质量空间分布^[21]。

(4) 固碳价值量核算。运用 CASA 模型测算 NPP,通过 NPP 核算出固碳价值量,模型公式如下^[22-23]:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (3)$$

$$V_c = 1.63 P_c \times \sum_{i=1}^n NPP_i S_i \quad (4)$$

式中: $APAR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月吸收光合有效辐射量 (MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月实际光能利用率 ($g\ C/m^2$); V_c 为固碳价值量; NPP_i 为第 i 类土地利用类型的净初级生产力; S_i 为第 i 类土地利用类型的面积; P_c 为固定二氧化碳的价格。

(5) 生境支持核算。基于 InVEST 模型生境支持服务评估模块来确定研究区每个栅格单元 x 处土地覆被类型 j 的生境质量, 模型基本公式如下^[24]:

$$Q_{xj}=H_j[1-(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+K^2})]$$

(5)

式中: Q_{xj} 为栅格单元 x 处土地利用类型 j 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 对应生境类型得分; D_{xj} 为生境胁迫水平; z 为尺度常量; K 为半饱和常数。

(6) 文化价值核算。基于前人研究成果^[25], 本研究选用旅游价值作为生态系统文化服务评估对象, 旅游价值基于直接使用价值法, 某像元的旅游价值取决于该像元景点可达性(距离)和景点的可见度。假定可达性与可见度所衡量的旅游价值一样, 即各占一半。任意选择 100, 500, 1 000, 2 000, 5 000 m 的缓冲间隔, 分别占一半年度旅游收入的 30%, 25%, 20%, 15%, 10%。每个区间距景点的距离值表明其旅游价值。将景点视为观察点, 使用 DEM 进行可视性分析, 计算每个像元对观察点的可见度, 可见一个景点的像元赋值为 1, 可见两个像元的赋值为 2, 以此类推, 将一半年度旅游收入加权平均到各个像元, 即可见度衡量的旅游价值。公式如下:

$$V_i=V_i(a)+V_i(b)$$

(6)

$$V_i(a)=\sum A_i\times P_i$$

(7)

表 1 数据说明及来源

气象监测数据	提取温度、降雨等气象数据	广南县气象局
广南县 2000 年、2010 年和 2018 年遥感影像数	解译土地利用类型图、石漠化强度等级图等数据集	中国科学院地理空间数据云
广南县 2017 年土地利用变更调查数据	提取各级行政单元、辅助遥感解译	广南县国土局
广南县 DEM 数字高程数据	提取坡度和坡长等数据	中国科学院地理空间数据云
中国土壤数据集	提取植被根系深度等数据	世界和谐土壤数据库
广南县 2000 年、2010 年和 2018 年年旅游收入	各景区年旅游收入	广南县旅游局

3 结果与分析

3.1 生态系统服务与石漠化程度空间分布特征

2000 年、2010 年和 2018 年食物供给服务总体趋势为西部、中北部较低, 东部较高, 而 2000 年、2010 年和 2018 年石漠化重度区域主要分布在西部、中南部和东南部, 两者空间分布不一致, 说明食物供给服务与石漠化程度空间分布基本无相关(图 1—2)。

2000 年、2010 年和 2018 年土壤保持服务总体趋势为西北部、东部和西南部较高, 西部、中南部和

$$V_i(b)=\sum B_i\times P_i$$

(8)

式中: V_i 为文化服务总值; $V_i(a)$ 为景点可达性价值; $V_i(b)$ 为景点的可见度价值; A_i 为根据看得见的景点数量按可见度分组的不同像元; P_i 为单位像元的年度旅游收入(元); B_i 为根据距景区的距离按可达性分组的不同像元。

2.1.2 生态系统服务权衡与协同关系的分析方法
在生态系统服务权衡与协同研究方法上, 参考前人的做法^[26], 在 100 m×100 m, 30 m×30 m, 200 m×200 m 的像元中进行了试验分析, 发现 100 m×100 m 像元得出结果较为合理。对数据进行归一化处理。在 SPSS 20.0 软件中进行相关性分析, 用 K-S 进行检验来判断原始数据是否服从正态分布。结果显示: 除土壤保持外其余生态系统服务均不服从正态分布, 因此用 Spearman 进行数据相关性分析, 当两种服务的相关性为显著正相关时 ($p<0.05$), 则认为服务间的相互作用关系为协同^[27]; 反之, 当两种服务的相关性为显著负相关时则称为权衡 ($p<0.05$)^[28]。

在热点区研究方法上, 若 6 种生态系统服务的值区域超过各自所对应平均值区^[29], 为该生态系统服务热点区, 在 ArcGIS 软件中对 6 种生态系统服务的热点区进行叠加分析, 得出 1, 2, 3, 4, 5, 6 类服务热点区。从热点区分类来看, 6 类服务区为生态系统服务供给能力最高区域, 0 类服务区为无热点区。

2.2 数据来源与处理

通过实地数据收集及网上下载, 得到研究广南县石漠化区生态系统服务空间权衡与协同所需数据及来源(表 1)。

东南部较低。而 2000 年、2010 年和 2018 年石漠化重度、中度区域主要分布在西部、中南部和东南部, 说明土壤保持服务与石漠化程度空间分布大体呈负相关(图 3)。

2000 年、2010 年和 2018 年固碳服务总体趋势为西部、中部、中南部和东南部较低, 其他区域均较高, 其服务较低的区域均为石漠化程度较高区域, 由此得出固碳服务与石漠化程度空间分布呈负相关(图 4)。

2000 年、2010 年和 2018 年产水量总体趋势为除西部、中部、中南部和东南部较低其他区域均为较高区域, 同时西部、中南部和东南部也是石漠化重度区

域,产水量较少的区域大多为石漠化程度较重的区域。但由于产水量受降雨量、年均潜在蒸散发量影响,产水量较低的中北部区域为无石漠化区域,由此得出产水量与石漠化程度空间分布呈负相关(图 5)。

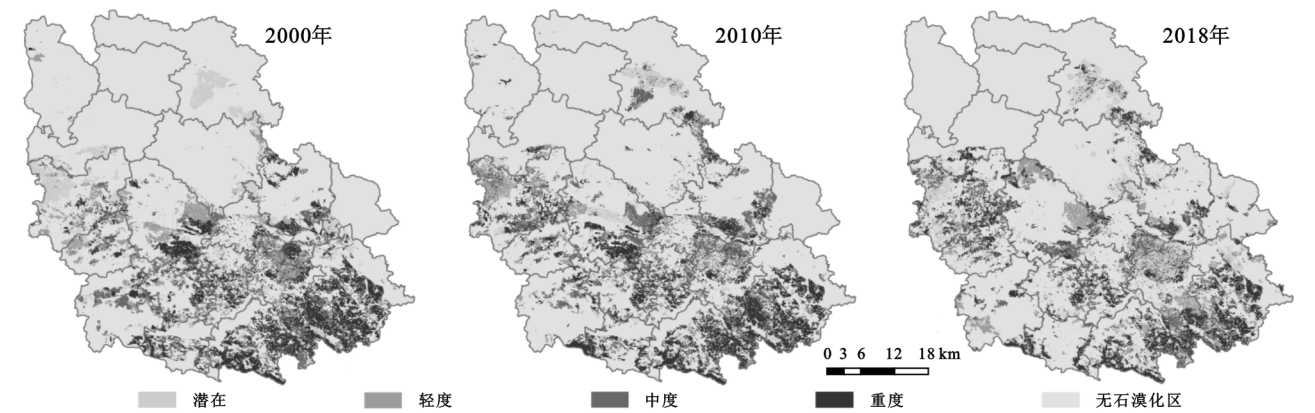


图 1 不同年份石漠化程度

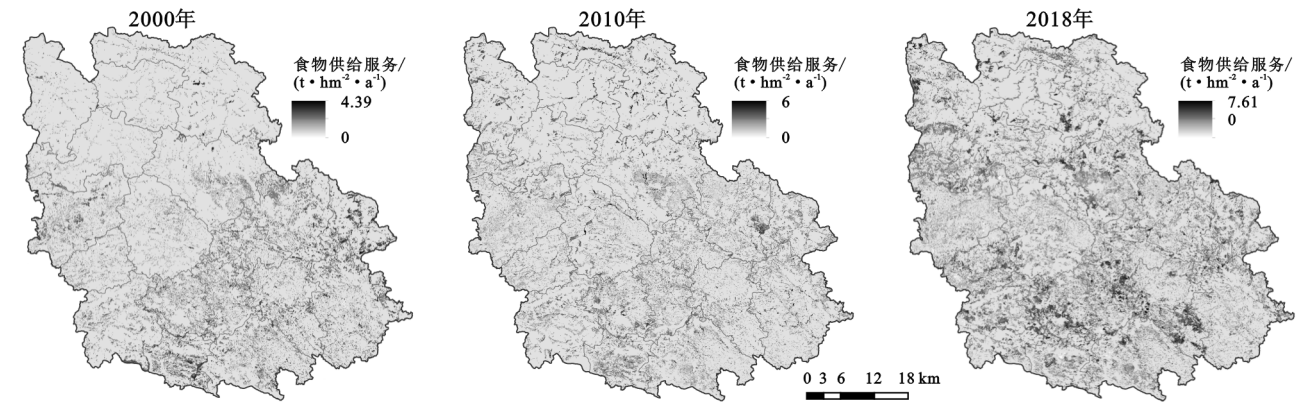


图 2 不同年份食物供给服务

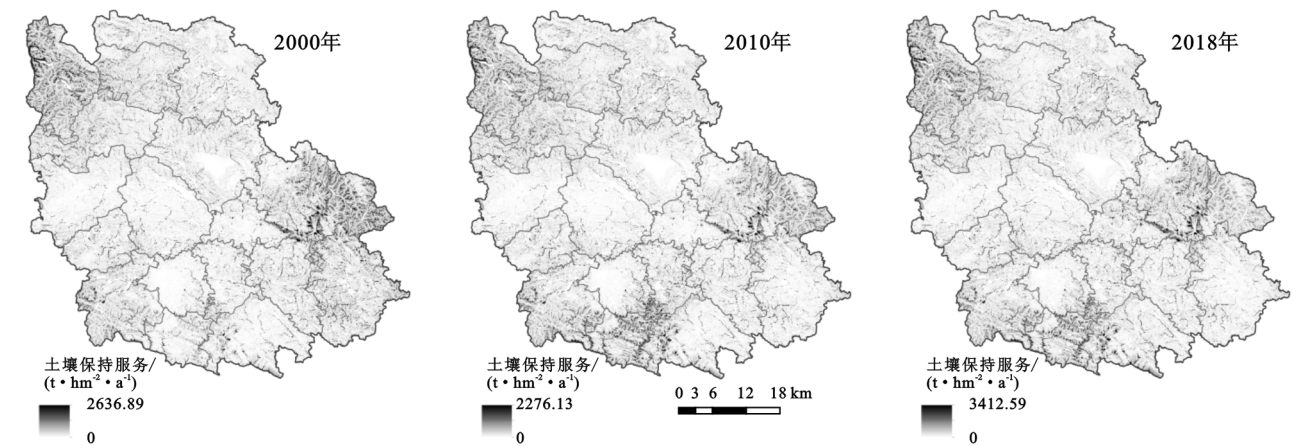


图 3 不同年份土壤保持服务

2000 年、2010 年和 2018 年生境支持服务总体趋势为西部、中部、中南部和东南部较低,其他区域均为较高区域。而 2000 年、2010 年和 2018 年石漠化重度、中度区域主要分布在西部、中部、中南部和东南部,说明生境支持与石漠化程度空间分布呈负相关(图 6)。

2000 年、2010 年和 2018 年文化服务总体趋势为西部和西北部较低,中北部为较高区域。而 2000 年、2010 年和 2018 年石漠化重度、中度区域主要分布在西部、中部、中南部和东南部,两者空间分布不一致,说明文化服务与石漠化程度空间分布基本无相关(图 7)。

3.2 生态系统服务的权衡与协同关系分析

3.2.1 生态系统服务间的权衡协同关系分析

2000 年、2010 年和 2018 年,研究区生态系统服务间的权衡协同关系为:生境支持—土壤保持、生境支持—固碳、土壤保持—固碳、文化服务—固碳和产水量—食物供给等生态系统服务呈正相关性,具有一定的协同性,且各生态系统服务协同系数总体呈不断降低趋势。其中,生境支持—固碳相关性系数分别为 0.517, 0.462, 0.469, 为 3 期中相关性系数最高。产水量—食物供给相关性系数分别为 0.008, 0.011, 0.005, 为 3

期中相关性系数最低;产水量—土壤保持、产水量—固碳、产水量—生境支持、产水量—文化服务、固碳—食物供给、土壤保持—食物供给、生境支持—食物供给和文化服务—食物供给等生态系统服务呈负相关性,具有一定的权衡性,且各生态系统服务协同系数

总体呈不断降低趋势。其中,食物供给—生境支持相关性系数分别为 -0.018 , -0.021 , -0.056 ,为 3 期中相关性系数最高。产水量—食物供给相关性系数分别为 -0.375 , -0.301 , -0.415 ,为三期中相关性系数最低(表 2)。

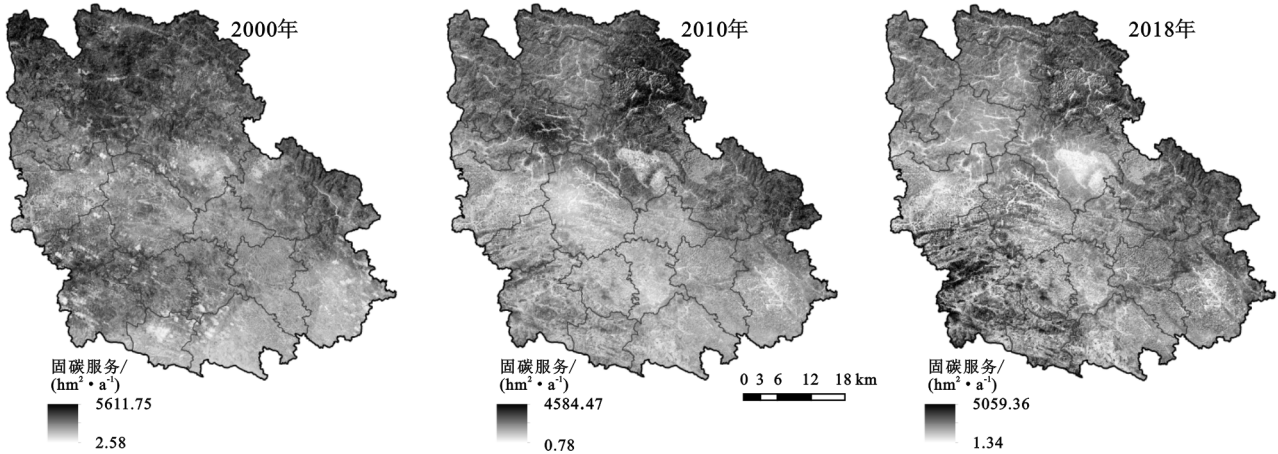


图 4 不同年份固碳服务

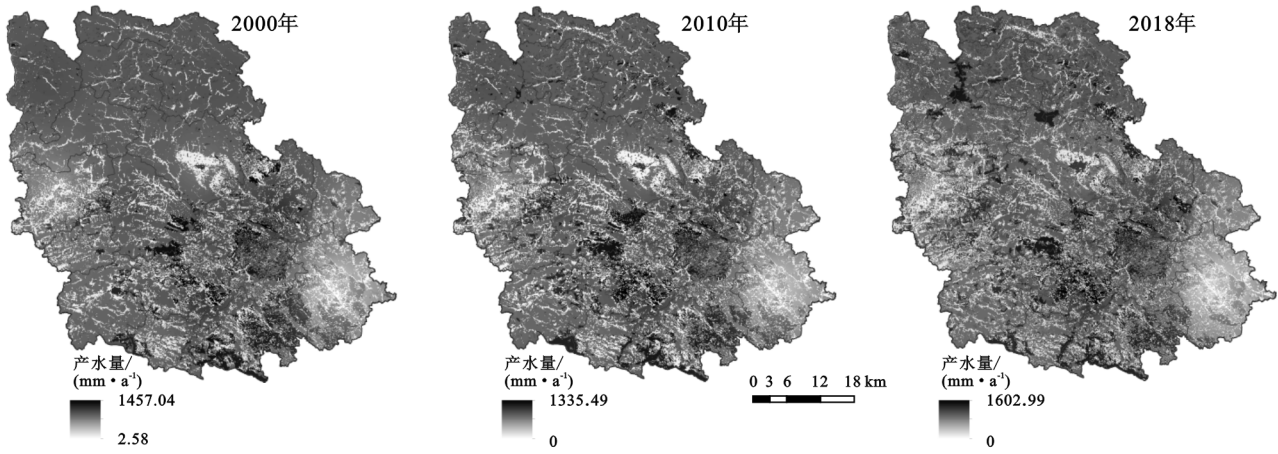


图 5 不同年份产水量

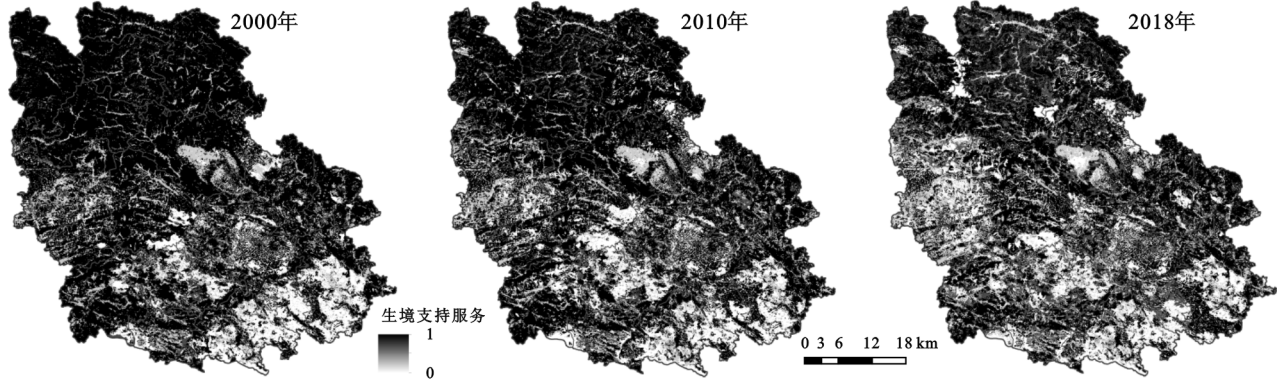


图 6 不同年份生境支持服务

3.2.2 生态系统服务冷热点分析 研究通过叠加分析法,得出 2000 年、2010 年和 2018 年 2 期多重生态系统服务热点区占比表和空间分布图。

从表 3 中可以看出,研究区 2000 年、2010 年和 2018 年 3 期热点区总体占比大小依次为:“6 类”>

“5 类”>“0 类”>“1 类”>“2 类”>“3 类”>“4 类”。其中,“0 类”和“6 类”热点区呈不断减少趋势;“1 类”和“3 类”热点区呈先减少后增加趋势;“5 类”热点区呈不断增加趋势;“2 类”热点区呈先增加后减少趋势。

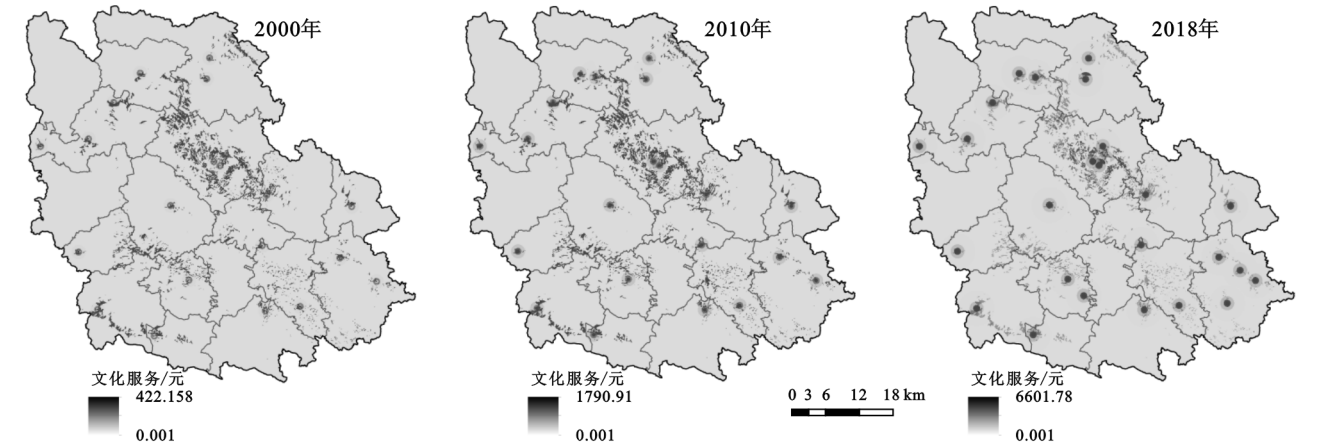


图 7 不同年份文化服务

表 2 广南县生态系统服务间的权衡协同关系

服务类型	2000 年	2010 年	2018 年
食物供给—固碳	−0.018 **	−0.012 **	−0.056 **
食物供给—土壤保持	−0.137 **	−0.118 **	−0.254 **
食物供给—产水量	0.008 *	0.011 *	0.005 *
食物供给—生境支持	−0.375 **	−0.301 **	−0.415 **
食物供给—文化服务	−0.084 **	−0.076 **	−0.101 **
土壤保持—固碳	0.301 **	0.327 **	0.253 **
土壤保持—产水量	−0.142 **	−0.137 **	−0.039 **
土壤保持—生境支持	0.468 **	0.451 **	0.430 **
土壤保持—文化服务	−0.013	−0.021	−0.017
产水量—固碳	−0.034 **	−0.026 **	−0.019 **
产水量—生境支持	−0.042 **	−0.045 **	−0.055 **
产水量—文化服务	−0.108	−0.116	−0.110
生境支持—固碳	0.517 **	0.462 **	0.469 **
生境支持—文化服务	−0.074	−0.054	−0.028
文化服务—固碳	0.019 **	0.024 **	0.012 **

注: * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的; ** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的。

根据图 8 热点分级图,从 2000 年、2010 年和 2018 年中 6 类服务区空间分布来看,0 类服务区为研

究区生态脆弱区且为无热点区,主要分布在研究区石漠化重度区域,应继续采取相应的生态恢复措施;1 类服务区为研究区生态脆弱区,主要分布在研究区中度区域,应继续采取相应的生态恢复措施;2 类和 3 类服务区分布在石漠化轻度及潜在区域,主要为研究区西南部、中部和东部;4、5 类服务区分布在基本为无石漠化区域,主要为研究区北部及东部;6 类服务区为供给能力最高的区域,但面积占比较少,且主要分布在北部及东北部,这与研究得到的生境支持服务大体一致,需优先保护。

在 2000 年和 2010 年中,6 类服务区占比从 29.53%减少到 24.47%,减少区域主要分布在研究区北部地区,为底圩乡;5 类和 4 类服务区占比从 23.55%增加到 30.12%,增加区域主要分布在研究区北部及东部,为者太乡、底圩乡北部和杨柳井乡东部;3 类和 2 类服务区占比从 17.51%减少到 17.44%,面积变化不大,减少区域主要分布在研究区西南部、中部和东部,为那洒镇、南屏镇南部和板蚌乡东部;1 类和 0 服务区占比从 29.41%减少到 27.97%,减少区域主要分布在研究区西部、南部和东南部,为珠琳镇、黑支果乡南部和八宝镇东南部。

表 3 不同年份热点区占比

年份	0 类	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类	6 类
2000	19.22	10.19	8.63	8.88	5.49	18.06	29.53
2010	18.43	9.54	12.00	5.44	6.28	23.84	24.47
2018	17.26	10.59	9.02	5.88	5.49	28.28	23.48
3 期总体	54.91	30.32	29.65	20.20	17.26	70.18	77.48

在 2010 年和 2018 年中,6 类服务区占比从 24.47%减少到 23.8%,减少区域主要分布在研究区北部和西北部地区,为底圩乡和者太乡;5 类和 4 类服务区占比从 30.12%增加到 33.77%,增加区域主要分布在研究区北部及东部,为底圩乡北部、者兔乡和板蚌乡;3 类和 2 类

服务区占比从 17.44%减少到 14.90%,减少区域主要分布在研究区西南部、中部和东部,为那洒镇、珠街镇西南部和南屏镇南部;1 类和 0 服务区占比从 27.97%减少到 27.85%,面积变化不大,减少主要分布在研究区西部、南部和东南部,为珠琳镇、黑支果乡南部和八宝镇。

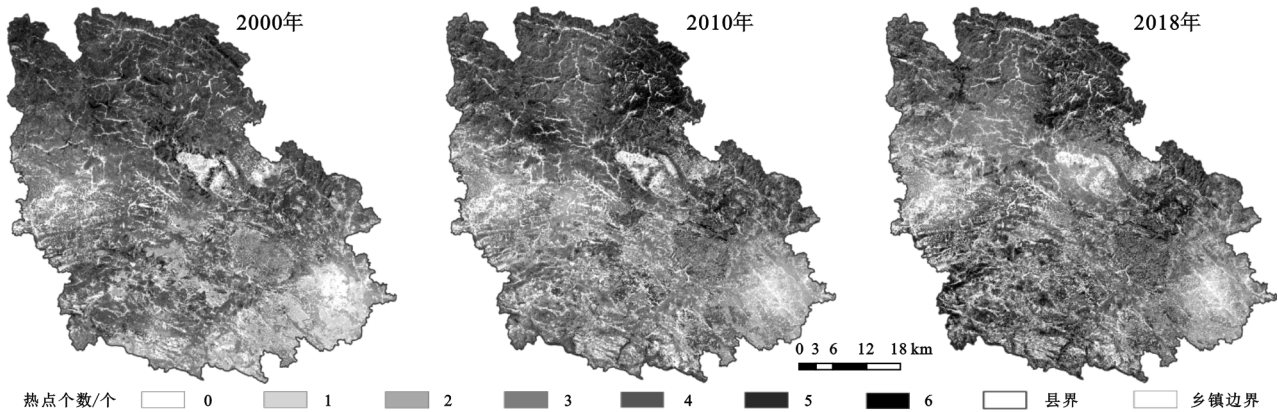


图 8 不同年份热点区分级

在 2000 年和 2018 年,6 类服务区占比从 29.53%减少到 23.48%,减少区域主要分布在研究区北部和西北部地区,主要为底圩乡和者太乡;5 类和 4 类服务区占比从 23.55%增加到 33.77%,增加范围主要分布在研究区中部和中北部,为莲城镇和者兔乡;3 类和 2 类服务区占比从 17.51%减少到 14.90%,减少区域主要分布在研究区西南部、中部和东部,为那洒镇、珠街镇、南屏镇和八宝镇;1 类和 0 服务区占比从 29.41%减少到 27.85%,减少范围主要分布在研究区西南部,为篆角乡(图 8)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 对研究方法的讨论 从生态系统服务类型分类体系来看,目前在生态系统服务的分类上仍然存在很大分歧,多数学者将生态系统服务分为供给、调节、文化和支持服务^[1-3]。由于研究目的不同,喀斯特区域生态系统服务的分类也是多样的。根据文献统计及喀斯特山区特征^[2],食物供给、产水量、土壤保持、固碳、生境支持和文化服务是当前研究喀斯特区生态系统服务较为关注的。因此,结合学界研究成果及前人研究方法^[27-29],选取符合广南县喀斯特山区实际的生态系统服务类型,以食物供给、产水量、土壤保持、固碳、生境支持和文化服务 6 种生态系统服务为研究对象,评估广南县喀斯特山区的生态系统服务。

根据案例统计及研究区特征^[27-29],目前喀斯特区域生态系统服务评估方法大多选用模型评估法,模型主要选用 InVEST、CASA 和 RUSLE 模型等。其中 InVEST 模型内涵评估模块较多,发展最为完善。总体来看,研究采用 InVEST 模型、CASA 模型和 RUSLE 模型等模型来评估生态系统服务,模型具有导入数据少、输出数据量大和复杂问题简化处理优点。

从生态系统服务权衡与协同研究方法看,多采用

定性分析法和相关分析法^[14-15]。而相关性分析是较为简单实用的方法。因此,本研究参照前人方法^[14-15]采用相关分析法分析生态系统服务权衡与协同关系,结果较为合理;从生态系统服务热点区研究方法看,生态系统服务热点区研究方法主要分为直接分类法和空间统计分析方法。研究采用直接分类法分析生态系统服务提供能力的强弱空间分布,具有简单直观的优点,能够满足研究需求。

4.1.2 对研究结果的讨论 与前人研究结果进行对比,本研究生态系统服务核算结果与其他研究结果基本处于同一数量级,因此,3 期食物供给年平均产量分别为 1.79,2.62,3.38 t/hm²,参考广南县三期统计年鉴为 1.76,2.28,3.36 t/hm²。通过对比发现,研究结果与基本情况较为符合;年平均土壤保持量为 821.92,764.31,951.59 t/hm²,Lang 等^[29]在贵州、广西两省的喀斯特山区研究中 2000 年和 2010 年平均土壤保持量分别为 1 011,1 035 t/hm²,研究结果虽然为喀斯特区域,但因与研究区自然环境存在差异,总体上结果与本研究较为符合;年均 NPP 为 781.20,715.01,739.50 g C/(m²·a)。陈峰等^[23]的研究中,年均 NPP 为 689.34 g C/(m²·a),结果与本研究较为符合;平均产水量 763.68,685.94,780.71 mm。Lang 等^[29]在贵州、广西两省的喀斯特山区研究中 2000 年和 2010 年平均产水量为 954.52,968.10 mm,因产水量受降雨量和蒸发量影响因素较大,因此,本研究结果较为合理;生境支持服务取值范围为 0~1,空间分布结果与广南县实际生态环境状况相符,研究结果较为合理;Chen 等^[25]在研究中 2008 年的文化服务价值范围为 0~1 585.3 元,而本研究 2010 年 0.001~1 790.91 元,和本研究结果较为符合。总之,由于研究区不同,研究结果会有差异,但同一纬度带西南地区的生态系统服务核算结果相差不大。因此,认为模型对喀斯特地区

广南县生态系统服务的评估是可行的。

对于生态系统服务权衡与协同关系研究,研究结果与其他研究者在相似地区的研究结果一致,如吴瑞东^[26]研究中固碳—土壤保持和固碳—生境支持生态系统服务均为协同关系,食物供给—生境支持为权衡关系,与本研究结果较为符合;郎焱卿^[27]研究中土壤保持—产水量为权衡关系,结果与本研究较为一致,研究结果较为合理。固碳—土壤保持为协同关系、与产水量为权衡关系,这是由于植被覆盖度高的地区蒸发量更高、更容易保持土壤,且上述3种关系在空间上分布差异明显。以土壤保持量与产水量为例,从约束阈值角度来分析,土壤保持量高的地区降雨量较高,降雨作为产水量的主要来源,使得土壤保持与产水呈协同关系;而土壤保持量高的地区,通常植被覆盖较好,在一定程度上对产水服务又有所抑制。当降雨量超过某一阈值时,二者间的权衡协同关系将发生转变,这可以解释为降雨量对土壤保持量的阈值效应,也是生态系统服务权衡协同关系在空间分布上出现差异的重要原因,在今后的研究中,需要对生态系统服务权衡协同关系转变的因素进行分析,同时对其内部结构与运行机理进行更加深入细致的研究。由于研究仅仅选取了6个生态系统服务进行研究,一定程度限制其他生态系统服务关系的研究。因此,在以后的研究中,应丰富喀斯特区生态系统服务研究内容。

在生态系统服务热点区研究上,本研究的热点区时间和空间特征都可以表征2000年、2010年和2018年广南县的生态系统服务,总体上研究结果与研究区基本情况较为符合。但由于热点划分时选取的标准不同,使得不同区域热点区研究结果无法进行横向和纵向的对比。因此,热点区研究方法和标准的选取问题在现阶段不易完全消除,需要在以后的研究中更加关注。

4.2 结论

(1) 2000—2018年,研究区食物供给服务和文化服务与石漠化程度空间分布基本无相关性,而土壤保持服务、固碳服务、产水量和生境支持服务与石漠化程度空间分布大体呈负相关,石漠化程度较高的区域,土壤保持、固碳、产水量和生境支持等生态系统服务功能较低,而无石漠化区域,土壤保持、固碳、产水量和生境支持等生态系统服务功能较高。

(2) 2000—2018年,研究区生境支持—土壤保持、生境支持—固碳、土壤保持—固碳、文化服务—固碳和产水量—食物供给呈协同关系,而产水量—土壤保持、产水量—固碳、产水量—生境支持、产水量—文化服务、固碳—食物供给呈权衡关系。

(3) 2000—2018年,研究区三期热点区总体占比大小依次为“6类”>“5类”>“0类”>“1类”>“2类”>“3类”>“4类”,其中,“0类”和“6类”热点区呈不断减少趋势,“1类”和“3类”热点区呈先减少后增加趋势;“5类”热点区呈不断增加趋势,“2类”热点区呈先增加后减少趋势;空间上,“0类”服务区为生态脆弱区且为无热点区,分布在石漠化重度区域,主要为分布在中部和西南部,应继续采取相应的生态恢复措施;“1类”、“2类”和“3类”服务区为热点区,分布在石漠化轻度及潜在区域,主要为在西南部、中部和东部;“4类”和“5类”为热点区,基本分布在无石漠化区域,主要为在北部及东部;“6类”服务区为热点区,该区域为供给能力最高的区域,但面积占比较少,且主要分布在北部及东北部,需优先保护。

参考文献:

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being[M]. Washington DC, USA: Island Press, 2005.
- [2] 韩会庆.喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J].中国岩溶,2017,36(3):352-358.
- [3] 王亚芳.生态系统服务及其价值评估研究进展[J].环境与发展,2019,31(7):1-3.
- [4] 傅伯杰,吕一河,高光耀.中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J].自然杂志,2012,34(5):261-272.
- [5] Li C, Zheng H, Li S, et al. Impacts of conservation and human development policy across stakeholders and scales[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(24), 7396-7401.
- [6] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [7] Firbank L, Bradbury R B, McCracken D I, et al. Delivering multiple ecosystem services from enclosed farmland in the UK[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013,166:65-75.
- [8] Yang G, Ge W, Xue H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes[J]. Landscape and Urban Planning, 2015,136:110-121.
- [9] Swallow B M, Sang J K, Nyabenge M, et al. Tradeoffs, synergies and traps among ecosystem services in the Lake Victoria basin of East Africa[J]. Environmental Science and Policy, 2008,12(4):504-519.
- [10] 王晓峰,马雪,冯晓明,等.重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].生态学报,2019,39(20):7344-7355.
- [11] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素:以延安市为例[J].生

- 态学报, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [12] Bagstad K J, Semmens D, Waage S, et al. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27-39.
- [13] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系: 以甘肃白龙江流域为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [14] 潘竞虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 280-289.
- [15] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [16] 韩会庆. 贵州省生态系统服务变化及驱动机理研究[D]. 广州: 中山大学, 2016.
- [17] 普军伟. 基于资源环境承载力的喀斯特山区土地利用优化[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [18] 广南县统计局. 广南县建州六十周年经济社会发展成就报告[R]. 云南文山: 广南统计局, 2018.
- [19] Groten S. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso[J]. *Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1495-1515.
- [20] 王亚慧, 戴尔阜, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 371-386.
- [21] 高翔宇, 王刚, 顾泽贤, 等. 基于 USLE 的西盟县土壤侵蚀特征分析[J]. *中国水土保持*, 2016(2): 52-56, 73.
- [22] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [23] 陈峰, 李红波, 刘亚静. 基于 GIS 和 CASA 的滇南山区植被 NPP 时空分异及其影响因素: 以云南省元阳县为例[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2148-2158.
- [24] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2895-2906.
- [25] Chen N, Li H, Wang L. A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(11): 2768-2776.
- [26] 吴瑞东. “三江并流”区生态系统服务空间权衡与协同关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [27] 郎焱卿. 喀斯特山区生态服务功能的权衡研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [28] 章维鑫, 吴秀芹, 于洋, 等. 2005—2015 年小江流域生态系统服务供需变化及对石漠化的响应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 139-150.
- [29] Lang Y, Song W. Trade-off analysis of ecosystem services in the karst mountainous area, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 10(3). DOI: 10.3390/w10030300.

(上接第 365 页)

- [27] 张乐勤, 陈发奎. 基于 Logistic 模型的中国城镇化演进对耕地影响前景预测及分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 1-11.
- [28] 余富祥, 胡月明, 刘振杰, 等. 基于力学平衡模型的耕地多功能演变及其协调性分析: 以珠江三角洲为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(6): 728-737.
- [29] 梁金明, 陈华毅, 陈桂贤, 等. 基于 GIS 的珠三角平原耕地地力评价: 以广东中山市为例[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(31): 43-49.
- [30] 戴文举, 刘振杰, 刘洛, 等. 近 5 年广东省耕地质量时空格局[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(24): 289-293.
- [31] 曾招兵, 曾思坚, 汤建东, 等. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 444-451.
- [32] 刘丽辉. 耕地占用对经济增长贡献的区域差异性及其耦合协调性分析: 以广东为例[J]. *宏观经济研究*, 2018(4): 110-118, 139.
- [33] 卢阳禄, 王红梅, 胡月明, 等. 新型城镇化与耕地集约利用协调发展时空演变研究: 以广东省为例[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(5): 831-839.
- [34] 王雅敬, 谢炳庚, 李晓青, 等. 喀斯特地区耕地生态承载力供需平衡[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7030-7038.
- [35] 唐丽琼, 宋维峰, 杨思林, 等. 基于全球 hm^2 和国家 hm^2 的元阳县生态足迹动态分析[J]. *亚热带水土保持*, 2018, 30(3): 24-30.
- [36] 薛若晗. 基于“国家 hm^2 ”的生态足迹模型研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(22): 7318-7320, 7322.
- [37] 邱丽娟, 杨倩, 林爱文, 等. 基于 ESDA-GIS 的湖北省耕地生态承压能力时空演变分析[J]. *生态经济*, 2015, 31(7): 85-90.
- [38] 韩韦笑. 基于 GIS 与生态足迹法的土地生态安全评价研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.