

# 滇东南喀斯特山区生态系统服务 时空格局及功能分区

赵筱青<sup>1</sup>, 石小倩<sup>1</sup>, 李驭豪<sup>1</sup>, 李益敏<sup>1</sup>, 黄 佩<sup>1,2</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:** 明晰生态系统服务时空格局, 划分生态系统服务功能区, 将有助于实现土地资源精细化管理。本文以滇东南喀斯特山区典型区域文山市为例, 分析2000—2017年食物供给、产水量、植被净初级生产力、土壤保持、生境质量和旅游文化6项生态系统服务的时空格局及其分异特征; 运用K-means聚类法识别生态系统服务簇, 划分生态系统服务功能区, 并提出差异化生态管控措施。结果表明: ① 2000—2017年间, 除生境质量服务下降外, 文山市其他5项服务均呈上升趋势。② 空间分布上, 文山市6项生态系统服务高值区集中分布在西部和南部, 低值区集中分布在北部和中部; 6项服务的冷热点区域空间分布有差异, 但整体上具有重叠性。除旅游文化服务的热点和冷点区分布面积占比分别为2.56%和0以外, 其他5项服务的冷热点区面积占比均在21%~32%; 能够同时提供3项及以上高值生态系统服务功能的区域较少, 85.50%的区域只能同时提供2项及以下高值服务功能。③ 根据服务簇聚类结果, 文山市划分为生态保护区、生态过渡区、农业主产区和人类生产生活区4类功能区, 针对各分区提出差异化生态管控建议。研究结果可为喀斯特山区城市资源利用和国土空间管控提供参考。

**关键词:** 生态系统服务; 时空分异; K-means聚类分析; 功能区; 喀斯特山区

DOI: 10.11821/dlxb202203016

## 1 引言

生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统中获得的所有惠益<sup>[1-2]</sup>。随着社会经济的发展 and 人类活动的增强, 区域自然生态系统受到人类干扰的影响越来越大, 让原本脆弱的生态环境愈加恶化<sup>[3-4]</sup>。2005年联合国发布的千年生态系统评估(the Millennium Ecosystem Assessment, MA) 报告表明, 过去半个世纪内全球24项生态系统服务已有15项发生了退化<sup>[5]</sup>。因此, 在人类社会快速发展过程中, 如何有效评估和管理生态系统服务已成为可持续发展的关键<sup>[6-7]</sup>。依据生态系统服务的空间分异规律对区域生态功能进行地理分区, 划定生态系统服务功能区, 有利于促进生态系统政策制定和管理, 对于提升人类福祉具有重要的现实意义<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2022-01-04

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42061052, 41361020, 40961031); 云南省科技厅—云南大学联合基金(2018FY001(-017); 云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.42061052, No.41361020, No.40961031; Joint Fund of Yunnan University, Department of Science and Technology of Yunnan Province, No.2018FY001(-017); Graduate Innovative Talents Training Program of Yunnan University, No.C176230200]

**作者简介:** 赵筱青(1969-), 女, 云南大理人, 博士, 教授, 主要从事土地生态学及国土空间研究。

E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

**通讯作者:** 李益敏(1965-), 女, 云南昆明人, 硕士, 研究员, 主要从事3S技术在土壤侵蚀与地质灾害中的应用研究。

E-mail: liyimin1965@163.com

随着生物物理模型的发展和高空间分辨率数据集的应用,国内外学者采用能值法、价值量法和物质量法,研究了基于不同样本区<sup>[8]</sup>、景观类型<sup>[9]</sup>、区域尺度<sup>[10]</sup>和全球规模<sup>[11-12]</sup>的生态系统服务,这些方法各有优缺点<sup>[13-14]</sup>。研究内容多涉及生态系统服务价值评估、作用关系和优化管理等方面,其中价值评估已成为研究热点之一<sup>[15]</sup>。除了静态评估以外<sup>[16]</sup>,生态系统服务价值的时空分异特征也受到了人们的广泛关注<sup>[17]</sup>,但基于空间统计分析,从空间视角对长时间跨度、多种生态系统服务类型的时空格局动态演变过程分析较少。

1976年Bailey从生态系统角度提出了首个真正意义上的生态区划<sup>[18]</sup>。此后,各国学者加强了生态区划相关研究<sup>[19]</sup>,使其理论与方法都取得了快速发展。近年来国际上对于生态系统服务的制图和区划也逐渐重视起来<sup>[20]</sup>,但是国内起步较晚,生态系统服务分区的研究方法还不成熟,与之相类似的区域多称之为“生态功能区”<sup>[21]</sup>。20世纪末傅伯杰等建立了中国生态环境综合区划的原则、方法和指标体系<sup>[22]</sup>,并提出了中国生态区划方案,为进一步在全国范围内开展生态功能区划奠定了坚实基础<sup>[23]</sup>。在此基础上,国家环保部和中国科学院于2008年和2015年先后发布了《全国生态功能区划》<sup>[24]</sup>和《全国生态功能区划(修编版)》<sup>[25]</sup>,明确了不同区域生态系统的主导服务类型及生态保护目标。此后,学者们对生态功能区划开展了大量的研究工作,取得了丰富的研究成果<sup>[26-29]</sup>。评估方法上,除通过构建生态服务功能重要性指数<sup>[30]</sup>、综合指标法<sup>[31]</sup>进行生态功能分区外,常采用自组织特征映射网络(SOFM)<sup>[21, 32]</sup>或K-means聚类分析法<sup>[33]</sup>识别生态系统服务簇,在分类基础上对研究区进行生态功能分区。其中学者们通过识别生态系统服务簇,进行了城市地区<sup>[34]</sup>、山区<sup>[35]</sup>和流域<sup>[36]</sup>等不同尺度的生态功能区的划定,但针对特定的地质条件和地貌特征区域的生态系统服务功能分区研究较少,尤其在喀斯特山区则更为鲜见。

中国是世界上喀斯特地貌分布最广的国家之一,喀斯特地区约占国土面积的15%<sup>[37]</sup>。喀斯特地区生态系统类型多样<sup>[38]</sup>,为人类提供了多项生态系统服务<sup>[39-40]</sup>。但该地区生态系统具有低环境容量和低抗干扰能力的特征<sup>[41]</sup>。随着城镇化的快速推进和不合理的土地利用方式的转变,自然资源消耗日益严重,石漠化和水土流失等地质灾害加剧,破坏了喀斯特生态系统的内部结构,生态系统退化加剧<sup>[42]</sup>。研究喀斯特地区生态系统服务时空格局特征及其功能分区对于维护区域生态安全、国土空间开发保护及促进区域可持续发展具有重要意义。然而,目前针对喀斯特山区生态系统服务格局的研究多从静态的、单一的生态系统服务的维度开展<sup>[43-45]</sup>,动态的、多种生态系统服务价值的研究较少。特别是基于多种生态系统服务价值评估结果开展喀斯特山区生态系统服务功能分区的研究更加缺乏<sup>[46]</sup>。

因此,本文以地处滇东南喀斯特山区的典型区域——文山市为例,选择食物供给、产水量、植被净初级生产力(NPP)、土壤保持、生境质量和旅游文化6项生态系统服务,定量估算2000—2017年各项生态系统服务价值,分析各项生态系统服务时空格局特征,揭示其动态演化规律;识别生态系统服务簇,划分喀斯特山区生态系统服务功能区,并针对各功能区不同的主导服务类型提出差异化的生态系统管控建议。研究结果可为其他喀斯特山区城市生态保护及土地管理提供参考,对复杂的喀斯特生态系统科学制定和实施生态系统服务管理政策具有重要的意义。

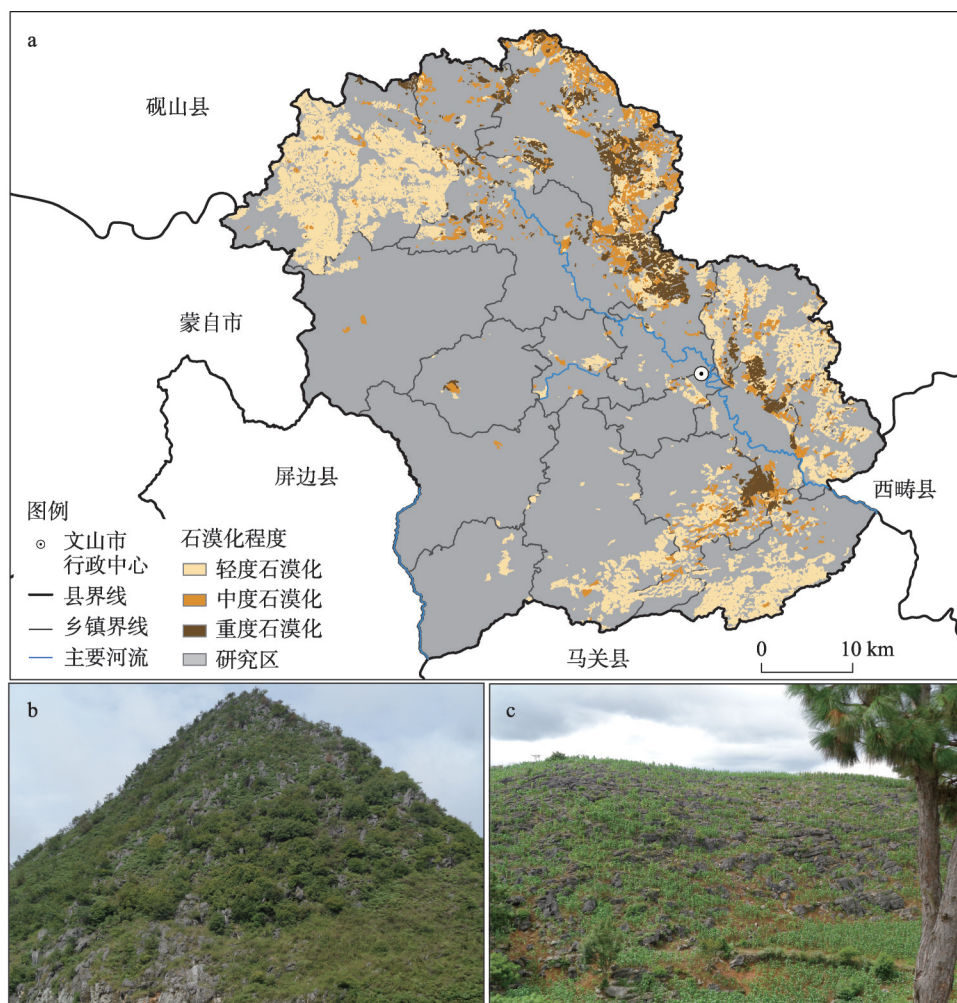
## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

云南省是中国三大喀斯特中心之一,以文山州石漠化土地分布面积最广,发生区域

相对集中。该州8县均被列为国家石漠化综合治理试点县(市),其中文山市地处文山州西部( $23^{\circ}06'N\sim 23^{\circ}44'N$ ,  $103^{\circ}43'E\sim 104^{\circ}27'E$ )(图1a),国土面积2977.19 km<sup>2</sup>。据中国第三次石漠化监测结果,截至2016年底,文山市喀斯特土地面积共2335.22 km<sup>2</sup>,占国土面积的78.44%,石漠化土地面积939.90 km<sup>2</sup>,占全市喀斯特土地面积的40.29%,喀斯特地貌广布,石漠化较为严重(图1b)。总体地势西北高、东南低,地形复杂,境内峰谷相间,山峦连绵起伏,岩溶发育,是典型的峰从洼地分布区,最高海拔2991.2 m,最低海拔618 m,高差大,山区、半山区面积占全市总面积的90%,平坝区域仅占10%,属典型的高原喀斯特山区城市。

文山市生态环境脆弱,土壤以红壤、石灰岩土和黄棕壤土为主,土壤肥力较低,岩石裸露率高,石漠化程度严重,土层浅薄,土地生产力较低。境内纬度低,属亚热带季风气候,2017年年均降水量为1152.4 mm,降雨时空分布不均,全年降雨量的80%来自于雨季,降水的高度集中极易发生水土流失,导致石漠化程度加深,同时自然灾害频发,生态系统遭受破坏,生态恶化。截至2017年底,文山市社会经济发展水平相对滞



注: 图b、c由赵筱青2018年分别于文山市柳井彝族乡和文山市古木镇拍摄。

图1 研究区位置示意及野外考察图

Fig. 1 Diagram of the location of the study area and field surveys



后，全市常住人口 50.10 万人，人口密度 167.15 人/km<sup>2</sup>，人均耕地面积较少。全市 1281.86 km<sup>2</sup>耕地中，25°以上坡耕地所占比重较大，已成为当地居民赖以生存的基本农业生产用地，耕地质量较差，土地利用方式粗放，山多地少的地理特征突出，人地关系紧张（图 1c）。盲目的毁林开荒、大量坡耕地开垦、乱砍滥伐、过度樵采等人类活动强烈，在这种情况下，石漠化极易发生。

文山市是喀斯特地貌发育典型、生态环境脆弱、石漠化现象严重、人地矛盾突出、社会经济发展滞后的典型喀斯特山区。因此本文选择文山市为案例研究区，能够真实反映喀斯特山区的自然环境和社会经济基本情况，具有很好的代表性和典型性。

2.2 数据来源与处理

研究数据集主要包含卫星影像数据集、土地利用/覆被数据集、气象数据集及其他相关辅助数据集。所有空间数据均统一转换为 WGS\_1984\_UTM\_48N 坐标系，具体数据信息见表 1。

表 1 数据来源及说明  
Tab. 1 Data source and description

数据类型	数据源	数据说明
Landsat-5 影像	美国地质勘探局( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )	TIF (30 m)
Sentinel-2 影像	欧洲航天局( <a href="https://scihub.copernicus.eu/">https://scihub.copernicus.eu/</a> )	TIF (10 m)
NDVI	美国国家航空航天局( <a href="https://earthdata.nasa.gov/">https://earthdata.nasa.gov/</a> )	TIF (250 m)
DEM	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )	TIF (30 m)
土地利用/覆被数据	遥感影像	Shp
土壤数据	文山市自然资源局	Shp
	中国土壤数据集(v1.1) ( <a href="http://westdc.westgis.ac.cn/">http://westdc.westgis.ac.cn/</a> )	TIF (1000 m)
气象数据	文山市气象局	2000—2017 年
统计年鉴、旅游数据	文山市统计局、旅游局	
基础地理信息数据	国家地理信息中心( <a href="http://www.ngcc.cn/ngcc/">http://www.ngcc.cn/ngcc/</a> )	

**2.2.1 土地利用/覆被数据集** 2000 年和 2010 年旱季的 Landsat-5 遥感影像来源于美国地质勘探局，2017 年旱季的 Sentinel-2 遥感影像来源于欧洲航天局，所有影像的云量均控制在 5% 以内，并通过辐射校正、几何校正、图像增强、镶嵌裁剪等预处理，采用人机交互解译获取文山市 2000 年、2010 年和 2017 年的土地利用/覆被数据。同时，采集了 203 个野外验证点对解译结果进一步修正，形成各年份土地利用/覆被数据（图 2），总体解译精度达到 88.18%，能够满足本文研究需要。

**2.2.2 卫星影像数据集** 除用于土地利用遥感解译的 Landsat 和 Sentinel 卫星影像数据外，2000—2017 年 MODIS 13Q1 产品（时间分辨率为 16 d，空间分辨率为 250 m）来源于美国国家航空航天局。通过 MRT（MODIS Reprojection Tools）软件对 NDVI 数据进行投影批处理，采用国际通用的最大合成法（Maximum Value Composites）<sup>[47]</sup>形成各年份 NDVI 数据集。

**2.2.3 气象数据集** 气象数据主要包括月平均气温、月降水量、日照时数和太阳总辐射量。通过空间插值构建区域气象数据集，分辨率为 30 m×30 m。

**2.2.4 相关辅助数据集** 其他相关辅助数据主要包括道路、河流和区县行政区域界线等数据。

2.3 研究方法

**2.3.1 生态系统服务估算** 根据 MA<sup>[5]</sup>提出的生态系统服务分类方法，立足于喀斯特山区生



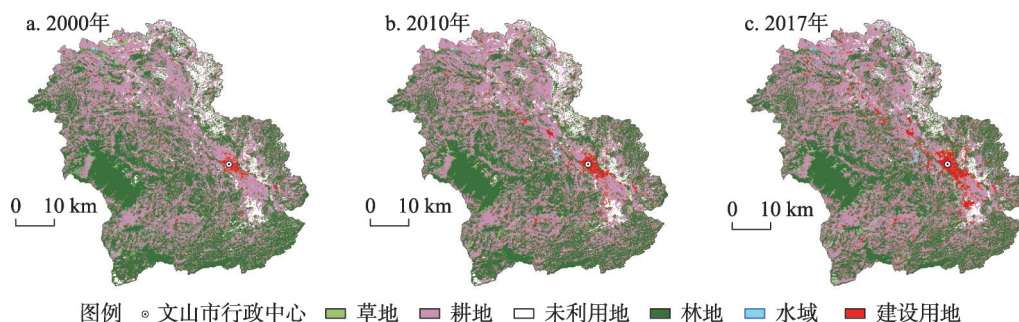


图2 2000—2017年文山市土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution of land use types in Wenshan city from 2000 to 2017

态环境脆弱、基岩裸露、土层较薄和蓄水能力差等区域实际,参考前人相关研究<sup>[44-45, 48-49]</sup>,选取了食物供给(FP)、产水量(WY)、植被净初级生产力(NPP)、土壤保持(SC)、生境质量(QH)和旅游文化(TC)6项生态系统服务,采用InVEST、CASA和RUSLE模型对此进行评估。其中食物供给与产水量代表供给服务,喀斯特山区面临耕地面积减少、质量下降等问题,近年来中国西南喀斯特山区干旱发生频率较高,对农作物生产影响较大,因此评估食物供给与产水量对地区粮食安全有重要意义;NPP与固碳释氧关系密切,在支持服务中它是区域物质与能量循环的基本来源,对调节服务中的区域气候调节也有重要贡献;喀斯特山区水土流失严重,面临石漠化、生物多样性退化等多种生态问题,故选取土壤保持和生境质量作为支持服务的研究对象;同时,喀斯特山区具有陡峰、峡谷、溶洞和瀑布等各种奇特自然景观,也是少数民族聚集区,民俗文化丰富多彩,因此选取旅游文化来表征区域的文化服务。

### (1) 食物供给

研究区食物供给主要来源于耕地,涉及粮食、豆类、油料和蔬菜等,使用以下公式<sup>[50]</sup>将质量转化为相应的能量值,各类食物能量参照《中国食物成分表(第二版)》<sup>[51]</sup>。空间可视化采用NDVI指数计算<sup>[52]</sup>:

$$c_k = \sum_{m=1}^m P_{mk} A_m \quad (1)$$

$$c_{ki} = \frac{NDVI_{ki}}{NDVI_{k,mean}} c_k \quad (2)$$

式中: $c_k$ 为区域 $k$ 内单位面积食物供给能量的平均值( $\text{kJ}/\text{km}^2$ ); $P_{mk}$ 是指区域 $k$ 内 $m$ 作物的单位面积产量( $\text{t}/\text{km}^2$ ); $A_m$ 为 $m$ 作物的能量( $\text{kJ}/\text{t}$ ); $c_{ki}$ 是区域 $k$ 内像元 $i$ 的单位面积食物供给能量( $\text{kJ}/\text{km}^2$ ); $NDVI_{ki}$ 为区域 $k$ 内像元 $i$ 的NDVI值; $NDVI_{k,mean}$ 为区域 $k$ 内耕地NDVI的平均值。

### (2) 产水量

产水量服务采用水量平衡原理进行估算,借助InVEST模型进行计算:

$$Y_{xy} = \left(1 - \frac{AET_{xy}}{P_x}\right) P_x \quad (3)$$

式中: $Y_{xy}$ 是 $j$ 类土地利用类型 $x$ 像元上的年产水量( $\text{mm}$ ); $AET_{xy}$ 是 $j$ 类土地利用类型 $x$ 像元上的年实际蒸散量( $\text{mm}$ ); $P_x$ 是 $x$ 像元上的年降雨量( $\text{mm}$ )。

### (3) 植被净初级生产力

植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)的计算采用CASA模型<sup>[53]</sup>:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (4)$$

式中： $APAR(x, t)$ 表示像元 $x$ 在第 $t$ 月的光合有效辐射 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )； $\varepsilon(x, t)$ 表示第 $t$ 个月像元 $x$ 的实际光能利用率 ( $\text{gC}/\text{MJ}$ )。

#### (4) 土壤保持

土壤保持量采用通用土壤流失方程 (RUSLE) 计算<sup>[54]</sup>：

$$A = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (5)$$

式中： $R$ 为降雨侵蚀力因子； $K$ 为土壤侵蚀力因子； $LS$ 为坡度坡长因子； $C$ 为植被覆盖管理因子； $P$ 为土壤保持措施因子， $P$ 值的选取参考曾凌云<sup>[55]</sup>在喀斯特地区的研究。

#### (5) 生境质量

生物多样性的保持与生境质量密切相关。研究采用InVEST模型的生物多样性模块来评估生境质量的大小<sup>[56-57]</sup>。公式如下：

$$Q_{xy} = H_j \left( 1 - \frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^z} \right) \quad (6)$$

式中： $Q_{xy}$ 指 $j$ 类土地利用类型中栅格 $x$ 的生境质量； $H_j$ 为土地利用/覆被类型 $j$ 的生境适宜性； $D_{xy}$ 为 $j$ 类土地利用类型中栅格单元 $x$ 所受的威胁水平；生境类型及其对威胁源的敏感程度等参数参考黄贤峰等<sup>[58]</sup>在喀斯特自然保护区的研究； $k$ 为半饱和常数，通常取 $D_{xy}$ 最大值的一半； $z$ 为归一化常量，通常取值2.5<sup>[59]</sup>。

#### (6) 旅游文化

Eade等<sup>[60]</sup>指出，在一定范围内某些特定像元的旅游服务价值要比其他像元高，而影响某一像元旅游文化服务的因素主要有两方面：景点可达性（距离）和景点可见度。旅游文化服务随着距景点的距离增大而减少，随着景点的可见性增加而升高。假定景点可达性与景点可见度所影响的旅游收入一致，通过ArcGIS软件进行缓冲区和可视性分析，计算得到各像元的旅游文化服务价值。公式如下：

$$V_t = V_t(a) + V_t(b) \quad (7)$$

$$V_t(a) = \sum_{i=1}^i P_i \quad (8)$$

$$V_t(b) = nC_i \quad (9)$$

式中： $V_t$ 表示像元 $t$ 处的旅游文化服务价值； $V_t(a)$ 表示像元 $t$ 处景点可达性影响的旅游文化服务； $V_t(b)$ 表示像元 $t$ 处景点可见性影响的旅游文化服务； $P_i$ 表示景点 $i$ 在像元 $t$ 处缓冲区的旅游收入平均值； $C_i$ 表示景点 $i$ 在所有可见像元的旅游收入平均值； $n$ 为像元 $t$ 处可见景点数量。

**2.3.2 热点分析法** 作为一种局部空间自相关指标<sup>[61]</sup>，热点分析可用于探查生态系统服务的高值或低值在空间上的聚集情况及其聚类方式。在空间统计中，通常使用ArcGIS软件中基于 $G_i^*$ 统计指数 (Getis-Ord  $G_i^*$  statistics) <sup>[61]</sup>的热点分析工具分析生态系统服务的冷热点区域。 $G_i^*$ 的统计学意义可用标准化 $Z$ 值来检验<sup>[57]</sup>， $Z$ 值为正且值越高，表明高值（热点）的聚类就越紧密， $Z$ 值为负且值越低，表明低值（冷点）的聚类就越紧密<sup>[62]</sup>。 $G_i^*$ 和 $Z$ 值的计算公式如下：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (10)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2}{n-1}}} \tag{11}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n-1} - (\bar{x})^2} \tag{12}$$

式中： $G_i^*$ 为斑块*i*的集聚指数； $W_{ij}$ 为斑块*i*与*j*之间的权重矩阵； $x_i$ 、 $x_j$ 为斑块*i*、*j*的属性值； $n$ 为斑块总个数； $\bar{x}$ 为空间内所有斑块的均值； $S$ 为所有斑块属性值的标准差。低值区（冷点）和高值区（热点）的空间集聚特征，可通过*Z*值来进行判定，参考王蓓<sup>[57]</sup>等人研究，进行生态系统服务冷热点分区（表2）。

表2 生态系统服务冷热点分区  
Tab. 2 Ecosystem service cold and hot spots

$Z(G_i^*)$ 取值范围	$\geq 2.58$	[1.96, 2.58)	[1.65, 1.96)	(-1.65, 1.65)	(-1.96, -1.65]	(-2.58, -1.96]	$\leq -2.58$
分区	极显著热点	显著热点	热点	不显著区	冷点	显著冷点	极显著冷点

**2.3.3 生态系统服务功能分区** 生态系统服务簇是通过衡量不同生态系统服务之间的相似性，把具有较高相似度的空间单元划分至同一生态系统服务簇，较高相异度的空间单元划分为不同生态系统服务簇<sup>[29]</sup>，进行生态系统服务功能分区。生态系统服务簇的聚类方法主要有层次聚类、K-means聚类、自组织特征映射网络聚类和随机森林聚类<sup>[63]</sup>。其中，K-means聚类方法具有数据处理迅速、处理结果简明清晰等特点，是处理连续性数据时最常用的一种聚类方法。本文基于R3.6.1平台，运用K-means函数实现生态系统服务簇的空间聚类，进行生态系统服务功能分区。

3 结果与分析

3.1 喀斯特山区文山市生态系统服务时间变化特征

由表3可知，2000—2017年间，生境质量服务整体呈下降趋势，波动较小。生境质量与地类自身的生境适宜性以及周边人类活动扰动关系密切。文山市建设用地的持续扩张和耕地面积的大幅增加（图2），人类活动强度加大，景观破碎化，使得研究区生境质量降低；食物供给服务在2000—2010年间增长较快，2010—2017年间增长较慢，与文山

表3 2000—2017文山市6项生态系统服务年均值  
Tab. 3 The annual average value of 6 ecosystem services in Wenshan city from 2000 to 2017

服务类型	2000年	2010年	2017年	2000—2017年变化量
食物供给(MkJ/km <sup>2</sup> )	1593.124	2010.858	2061.138	468.014
产水量(mm)	397.970	349.961	681.177	283.207
NPP(gC/(m <sup>2</sup> a))	874.210	963.202	922.829	48.619
土壤保持(t/(hm <sup>2</sup> a))	429.009	473.157	848.706	419.697
生境质量(-)	0.588	0.566	0.561	-0.027
旅游文化(元/m <sup>2</sup> )	0.002	0.024	0.080	0.078



市耕地作物从传统的粮食作物转向特色经济作物这种农业生产结构调整有关,说明居民生活质量不断改善,对食物要求更加多元化;产水服务呈先减后增趋势,其中2010—2017年变化幅度较大。产水量的年际差异主要受气温和降雨量的影响,2000—2010年文山市降雨量小幅下降,气温升高增加了植被的潜在蒸发,产水量降低,2010—2017年降雨量较往年年份显著升高,且气温降低减少了植被的潜在蒸发,使得区域整体产水量显著增加(图3);NPP呈先增后减,整体波动上升的趋势。气温的升高可以通过代谢增强光合作用以及提高营养物的分解来增加NPP服务量,反之亦然<sup>[64]</sup>,降水的增加会改善土壤水分对植被的供给,有利于光合速率增强,从而提高NPP<sup>[65]</sup>。2000—2017年文山市降水量呈增加趋势,NPP服务量整体呈上升趋势,前10年文山市气温显著升高,NPP服务量增加,后7年间气温下降,NPP服务量减少(图3);土壤保持服务呈持续增长趋势。土壤保持服务量的变化与各土壤侵蚀因子密切相关<sup>[66]</sup>,降雨是引起土壤侵蚀的主要驱动力之一,降雨量的多少直接影响降雨侵蚀力因子(即RUSLE的R因子)的大小<sup>[67]</sup>,通常降雨量越多,R越大。2000—2017年文山市年均降雨量呈上升趋势(图3),降雨侵蚀力增强,潜在土壤侵蚀量增加,加之植被覆盖度较高的林地和草地面积减少,进一步增强了土壤侵蚀,多个因子综合作用导致17a间文山市土壤保持服务量显著增加;旅游文化服务持续增长且增长幅度较大,2017年年均值达0.080。总之,2000—2017年文山市除生境质量服务年均值下降外,其他生态系统服务年均值均呈上升趋势。

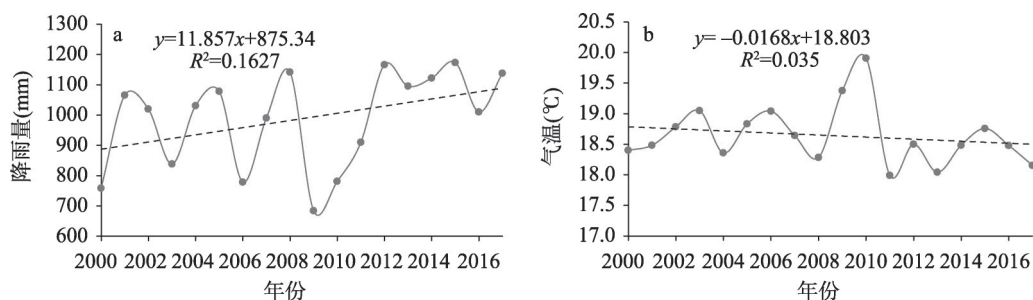


图3 2000—2017年文山市降雨量和气温变化

Fig. 3 Rainfall and temperature changes in Wenshan city from 2000 to 2017

### 3.2 喀斯特山区文山市生态系统服务空间格局变化特征

**3.2.1 生态系统服务空间分布格局** 2000—2017年,食物供给服务的高值区主要位于文山市北部、中部和东南部的平坝和河谷地区,该区域坡度较小,交通可达性高,水土资源条件良好,适宜农业生产,是耕地的主要分布区,而低值区多集中于西部和西南部的林地分布区,以及东北部和中部未利用地成片分布区(图4a~4d)。

产水服务高值区分布较为零散,北部、南部及中部均有分布,2010年和2017年高值区主要集中于中部偏东的河谷地区,而低值区在中部和中西部连片集中分布(图4e~4h)。产水量的高低与土地利用类型关系密切。中部偏东的河谷地区是产水量升高最为明显的地区,该地区也是文山市主城区所在地,即建设用地聚集区,在城区建设用地持续扩张的情况下,其他用地类型向建设用地大量转移,不透水面的增加使得该地区产水服务的增加趋势十分明显。

NPP高值区集中于文山市西部及南部,该区域林地面积广大,植被覆盖度较高,而低值区主要集中于北部平坝、中部河谷和东北部未利用地广泛分布的地区(图4i~4l),这些地区因其他地类转为建设用地,林地转向其他地类等原因导致植被覆盖度下降。

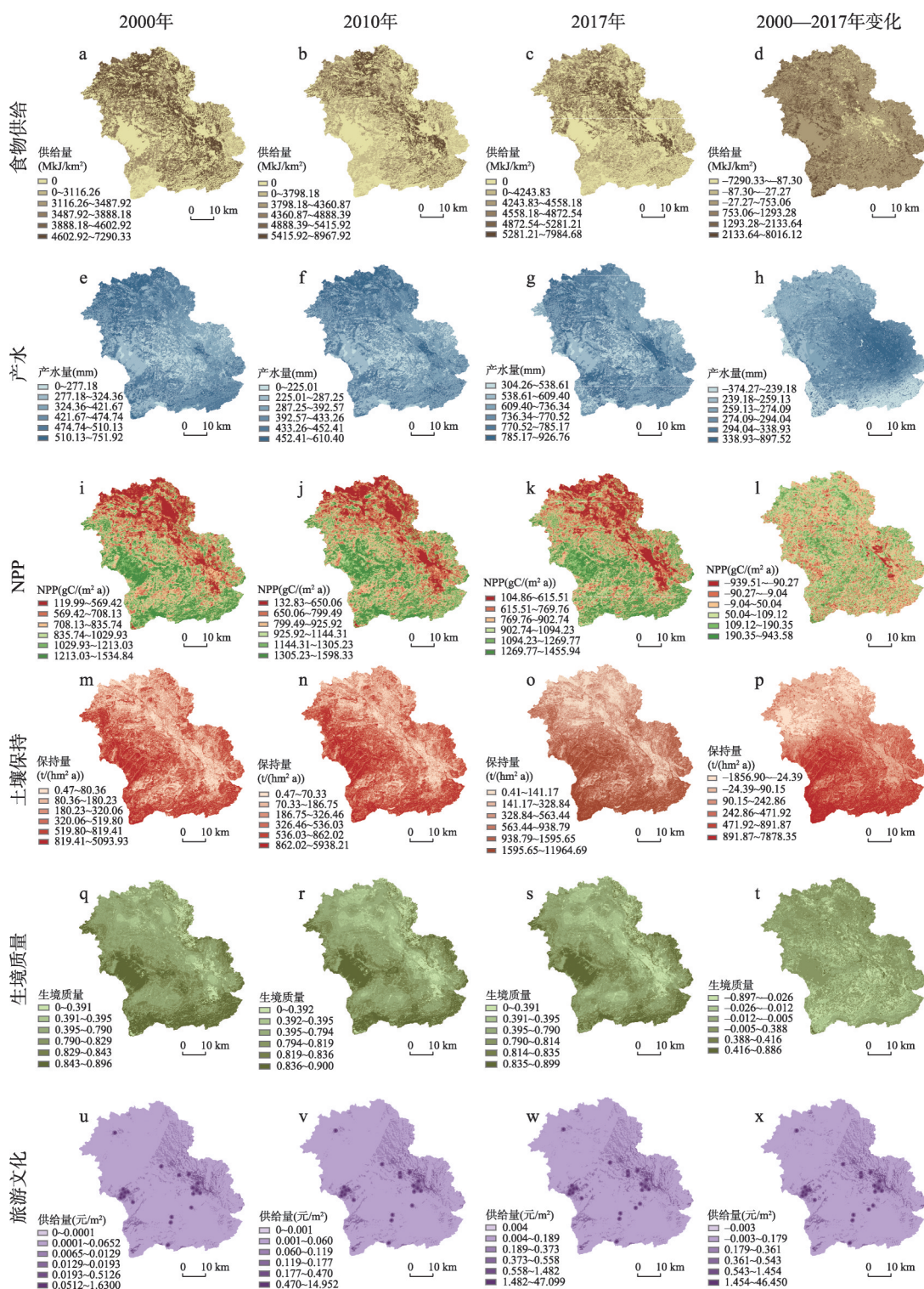


图4 2000—2017年文山市生态系统服务时空分布及变化

Fig. 4 Spatio-temporal distribution and changes of ecosystem services in Wenshan city from 2000 to 2017



土壤保持服务高值区集中于文山市西部和南部，这些地区虽然地形起伏较大，但林地和草地面积广阔（图2），植被覆盖度较高，一定程度上提高了植物根系对土壤的固结作用，降低了土壤侵蚀，有利于土壤保持，同时也增加了对降雨的截留范围和作用，土壤保持能力较强，而低值区分布面积较广，主要分布在西北部、东南部和中部地区（图4m~4p），其中部分地区为植被覆盖度低且坡度较大的未利用地、耕地和草地，它们的土壤侵蚀能力较强，水土保持能力较弱。

生境质量服务高值区主要分布于文山市北部、西部及东部，该区域林地分布面积广，生境适宜性较高，生境受到较少威胁，而低值区在中部、南部以及北部平坝区分布较为集中（图4q~4t），该区域植被覆盖度较低，说明生境质量服务的分布与植被覆盖度密切相关。

旅游文化服务的空间分布与文山市风景区的分布保持一致，高值区在研究区西部和中部城区景点附近呈点状密集分布，其他无景点区域旅游文化服务明显较低（图4u~4x）。

2000—2017年文山市6项生态系统服务高值区集中分布在西部和南部，零散分布于北部和中部，6项生态系统服务低值区集中分布在北部（包括东北部和西北部）和中部（包括中东部和中西部），少量分布于南部（包括东南部和西南部）。研究期内文山市生态系统服务具有明显的空间分异特征，主要与不同的土地利用类型、生态环境状况好坏、人类活动强弱、基础设施的建设和旅游资源是否丰富等原因密切相关。

### 3.2.2 生态系统服务空间热点分析

#### （1）单项生态系统服务冷热点空间分布

根据2000—2017年6项生态系统服务的年均值数据，利用 $G_i^*$ 热点分析工具，绘制得到文山市各项生态系统服务冷热点空间分布图（图5）。

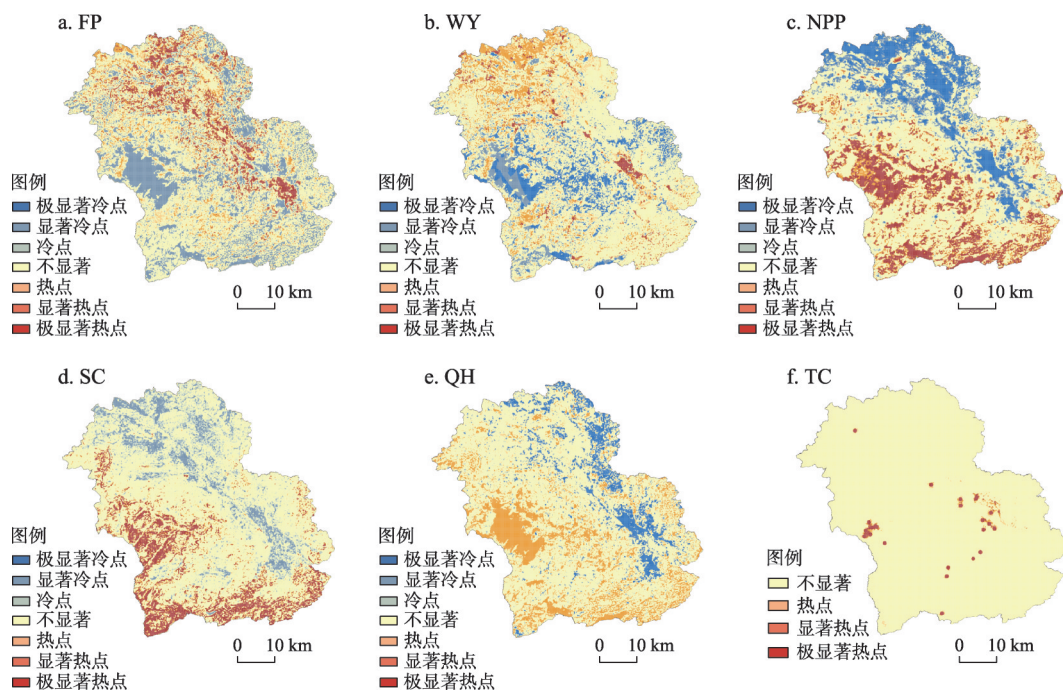


图5 文山市各项生态系统服务冷热点分布

Fig. 5 Distribution of cold and hot spots of ecosystem services in Wenshan city



由表4可知,FP与WY两者的冷热点区域在空间分布上较为相似,热点区域主要分布于北部、中部及南部地区,冷点区域主要分布于西南部和东部,但在局部地区有一定差异,如南部食物供给热点区主要分布在南部偏东,而南部产水量热点区主要分布在南部偏西;NPP、SC和QH的冷热点区域在空间分布上基本一致,热点区主要集中于西部和南部,冷点区则广泛分布于北部、中部偏东和东南部;TC因其数据本身特殊性,在空间上只有热点区与不显著区,无冷点区分布,热点区集中分布于西部风景区及中部城区景点周围,零星分布于南部地区。热点区面积占比排序为: NPP > QH > WY > FP > SC > TC,表明NPP和QH服务在空间上高值区聚集效应较为明显;冷点区面积占比排序为: SC > NPP > FP > QH > WY,表明SC和NPP服务在空间上低值区聚集效应较为显著(表4)。

表4 文山市各项生态系统服务冷热点空间分布范围及面积占比(%)  
Tab. 4 The proportion of the cold and hot spots ecosystem services in Wenshan city (%)

服务类型	热点区(热点、显著热点和极显著热点)		冷点区(冷点、显著冷点和极显著冷点)	
	空间分布	占比(%)	空间分布	占比(%)
食物供给(FP)	北部、中部、东南部	23.74	西部、南部、东北部	27.54
产水量(WY)	北部、中部偏东、西部偏南	24.19	西部、西南部、东部、中部	22.11
NPP	西部、南部、中部	30.86	北部、中部偏东、东南部	30.5
土壤保持(SC)	西部、南部	21.99	北部、中部偏东、东南部	31.56
生境质量(QH)	西部、南部、东部	26.97	东北部、中部偏东、东南部	22.51
旅游文化(TC)	西部、中部偏东、南部	2.56	无冷点分布	0

6项生态系统服务的冷热点区域空间分布有所差异,但整体上具有重叠性。除旅游文化服务的热点区和冷点区面积仅占2.56%和0%外,其他5项生态系统服务的冷热点区域面积分布占比较为接近,均在21%~32%。

(2) 生态系统服务综合热点区识别

根据以上分析,各项生态系统服务的冷热点分布区域在空间上具有重叠性,即某一区域同时是多项生态系统服务的热点区。为进一步分析研究区内各空间单元生态系统服务综合供给能力的大小,对6项生态系统服务的热点区进行叠加分析。结果表明,文山市同一空间单元内热点区重合的生态系统服务最多有4项,最少有0项(图6)。其中热点数量为2的综合生态系统服务热点区分布面积最大,占全市总面积的30.14%,主要服务类型为食物供给服务和产水服务,该区域分布广泛,集中在北部及中部城区范围;其次是无法提供综合生态系统服务(即热点数量为0)的区域占全市总面积的29.42%,主要分布在东部和南部,与未利用地的空间分布较为相似;只有1项生态系统服务呈高值的区域占总面积的25.94%,主要服务类型是产水服务,集中于文山市北部及中部,与热点重合数为2的区域交错分布;热点重合数量为3的区域较少,占总面积的13.92%,该区域主要服务类型是NPP、土壤保

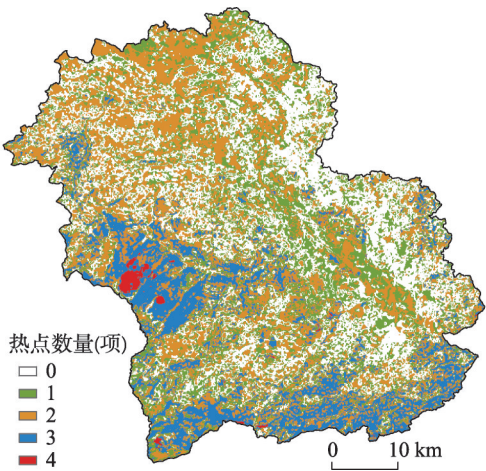


图6 文山市多重生态系统服务热点空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of multiple ecosystem service hotspots in Wenshan city

持和生境质量服务，连片分布于西部及南部，以林地为主；4项及以上高值生态系统服务重合的地区面积最少，仅占总面积的0.58%，其主要服务类型是NPP、土壤保持、生境质量和旅游文化服务，分布于文山市西部和西南部林地的核心区域。总之，文山市能够同时提供多项高值生态系统服务功能的区域较少，85.5%的区域只能提供两项及以下高值生态系统服务功能。

3.3 喀斯特山区文山市生态系统服务功能分区

3.3.1 生态系统服务簇分类结果 将文山市139个行政村的6项生态系统服务年均值进行K-means聚类分析<sup>[68]</sup>，生态系统服务簇聚类数主要由生态系统服务的组内平方和变化曲线加以确定。由图7a可知，当初始k值为4时，组内平方和曲线拐点效应较为明显。因此将研究区划分为4个聚类区，聚类结果均通过了显著性检验。通过进一步K-means聚类分析和数据标准化处理后，各类生态系统服务的平均值为0，大于0的数值表示该服务簇下相应的生态系统服务高于区域平均水平，反之则低于区域平均水平，4类生态系统服务簇差异见图7b。

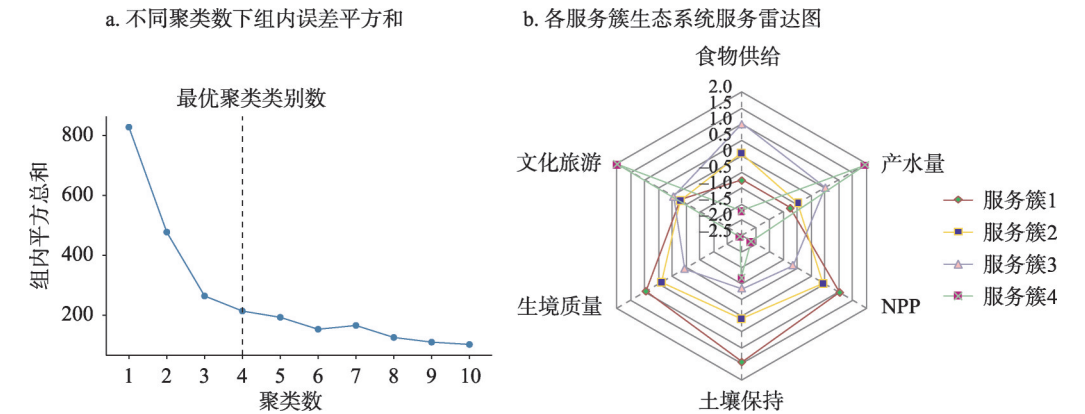


图7 文山市生态系统服务簇分类结果

Fig. 7 Classification results of ecosystem service clusters in Wenshan city

3.3.2 生态系统服务功能分区及管控建议

(1) 生态系统服务功能分区

服务簇1中土壤保持(1.4433)、NPP(1.0309)和生境质量(0.9542)均为最高值(图7b)，这些服务对于喀斯特山区生态系统保护与修复十分重要。从空间分布来看(图2、图8)，该区域主要集中于西部林地与南部丘陵地带，如区域内植被遭受破坏，会对生态系统造成难以逆转的损害，故将服务簇1划分为生态保护区；服务簇2中除旅游文化和产水服务外，其它生态系统服务均处于区域平均水平以上(图7b)，且空间分布上为服务簇1至服务簇3的过渡地带(图8)，故将服务簇2划分为生态过渡区；服务簇3中食物供给服务最高

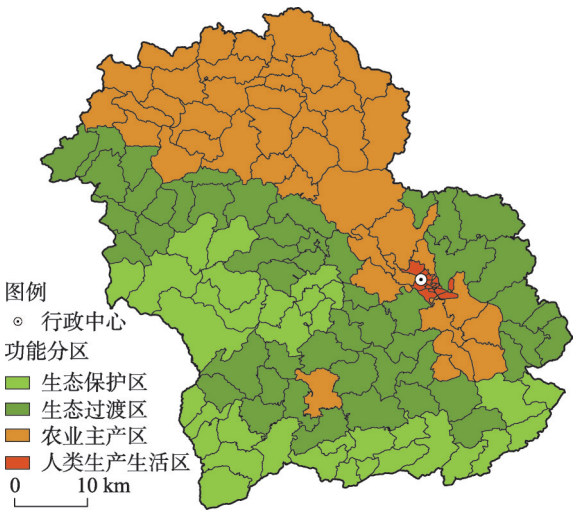


图8 文山市生态系统服务功能分区

Fig. 8 Ecosystem service function divisions in Wenshan city

(0.9997), 产水服务也较好 (0.5159) (图 7b), 且空间位于文山市粮食生产的主要集中区域, 多为平坝、河谷地形地貌 (图 2、图 8), 是确保全市粮食安全的重要区域, 故将其划分为农业主产区; 服务簇 4 中旅游文化服务最突出 (1.9834), 其次为产水量 (1.9436), 均为 4 个服务簇中的最高值, 但其他 4 项生态系统服务均为全区最低值 (图 7b), 难以发挥生态保护与粮食生产安全功能, 且在空间分布上主要集中分布于文山市城区范围 (图 2), 适宜生产生活, 故将其划分为人类生产生活区。

依据同一生态系统服务簇在地理空间上具有集聚效应的性质, 按照文山市 4 个生态系统服务簇的具体特征和主导生态系统服务功能划定区域生态系统服务功能区: 生态保护区、生态过渡区、农业主产区和人类生产生活区 (图 8)。

## (2) 生态系统服务功能分区管控建议

生态保护区包含 33 个行政村, 占文山市行政村总数的 23.74%, 集中分布于西部和南部。其中西部片区是文山市境内海拔最高的区域, 以山地地形为主, 也是土壤侵蚀的潜在高发区, 区内林地面积占比较大、完整性好, 对维持生物多样性具有重要意义; 南部片区林地则十分破碎, 人类活动较为频繁 (图 2、图 8)。该功能区的管理目标以土壤保持、调节气候和维持区域生物多样性为主。其中, 西部的生态保护片区与老君山自然保护区空间分布一致, 受人类活动干扰较小但敏感度高, 一旦受到破坏, 生态系统服务将遭受损失且恢复困难。因此西部片区应严格限制农业生产或基础设施建设活动, 减少对自然植被的破坏, 积极实施退耕还林等政策和老君山生态移民工程, 加强自然保护区的建设与管理, 完善生态补偿机制, 转变粗放型农业生产方式, 提高土壤保持、NPP 和生境质量等生态系统服务能力; 南部的生态保护片区受人为干扰较强, 应着力提升当地居民的林地保护意识, 注重生态廊道构建, 提升林地斑块的完整性和连接度, 保障区域内生物物种的扩散和交流, 维持区域生态安全。

生态过渡区规模最大, 包含 50 个行政村, 占文山市行政村总数的 35.97%, 主要集中于中南部和中北部片区, 少数分布在东部片区。区域内海拔较生态保护区低, 人类对自然生态系统的干扰增强, 形成了耕地、林地交错分布的土地利用格局。作为生态扩张与城镇建设用地扩张的交界地带, 区域内生态保护、农业生产和城镇建设矛盾较为突出 (图 2、图 8)。该功能区应以维持生态系统服务稳定为前提, 适当提升耕地生产能力为管理目标。在城镇扩张过程中, 要以保护生态用地完整性为前提, 合理控制新增建设空间, 促进建设用地的组团布局; 在生产活动中应注重水土保持, 结合退耕还林和石漠化综合治理等重点生态工程建设, 发展以核桃、油茶、八角、漆树、红豆杉等为重点的特色经济林, 合理发展林下草果和中药材种植; 根据区域农林结合的特点, 自然景观与乡村田园交错的天然优势, 因地制宜发展乡村观光农业, 研发具有文山特色的农业产品, 提高区域农民经济收入。

农业主产区包含 43 个行政村, 占文山市行政村总数的 30.94%, 主要分布于北部和中东部平坝、河谷地区, 从西北至东南呈带状分布 (图 2、图 8)。农业主产区是关系研究区粮食安全的重要区域, 区域内地形平坦, 土壤肥力高、灌溉设施较完善, 耕作条件较好。基本农田保护、保障区域粮食生产安全是农业主产区的生态系统主要管理目标。该功能区应积极推进高标准基本农田建设, 全面提升农业基础设施, 保证稳定的种植面积, 促进粮食增产增收; 严格控制建设占用, 加强耕地占补平衡管理, 建立耕地保护经济补偿机制, 增强农民耕地保护意识; 实施农田改造提质, 提升耕地生产能力和生产效率; 优化农业产业结构, 生产具有地区特色的农业产品, 挖掘喀斯特山区的地域及民族文化内涵, 推动农业有序、高效发展。



人类生产生活区包含13个行政村,在各功能区中规模最小,仅占文山市行政村总数的9.35%,集中分布于中部河谷地区,即中心城区及周边区域(图2、图8)。该区是文山市人口密集区,也是经济活动、开发建设突出地区。区内应以打造宜人景观设施,加强污染防治,改善人居环境等为管理目标。应注重土地集约利用,推行节地型和紧凑型城区建设,完善城乡公共基础设施,营造舒畅、宜人的公共开放空间;加强污染治理,实施盘龙河沿岸截污体系建设,保障流域水资源安全;推进城市生态绿化体系建设,打造城市生态绿色景观带,为区域生物流动提供支持;适当扩大绿地公园建设,打造园林城市,构建以城郊游憩带、城市公园、市民广场为主的城市休闲体系,提升游客满意度,增强其与周边旅游景区的通达度。

## 4 讨论

### 4.1 喀斯特山区生态系统服务评估结果验证

以InVEST、CASA和RUSLE为评估模型开展生态系统服务评估研究,在国内得到了广泛应用,其科学性和合理性已得到验证<sup>[39, 50, 68]</sup>,因此本文借助以上模型开展喀斯特山区文山市的生态系统服务评估。生态系统服务评估结果是热点识别和聚类分析的基础数据,其数据质量会影响后续相关分析结果的可靠性。为进一步保证生态系统服务评估结果质量和准确度,我们对各模型评估结果进行精度验证分析。目前通常采用的验证方法是与实测数据或是与其他模型的模拟结果进行对比验证<sup>[69]</sup>。考虑到研究区还未开展生态系统服务模拟研究,且实测数据较少,因此我们将评估结果与相近年份、相似喀斯特地区的相关研究结果进行对比分析。

根据以上模型,2000年、2010年和2017年研究区产水量年均值分别为397.97 mm、349.96 mm和681.18 mm, Wang等<sup>[70]</sup>采用InVEST模型计算了中国西南喀斯特地区的产水量,从其空间分布图中可知,文山市2000年和2015年产水量年均值一般低于600 mm,大致位于300~600 mm之间,与本文的产水量评估结果基本一致。

2000年、2010年和2017年研究区NPP服务年均值分别为874.21 gC/(m<sup>2</sup> a)、963.20 gC/(m<sup>2</sup> a)和922.83 gC/(m<sup>2</sup> a), Wang等<sup>[70]</sup>利用CASA模型精确计算了中国西南喀斯特地区的NPP,结果表明1982—2015年中国西南喀斯特地区NPP服务年均值为735.15 gC/(m<sup>2</sup> a);王晓峰等<sup>[71]</sup>运用CASA模型估算出1990—2015年西南喀斯特地区的NPP服务年均值介于600~700 gC/(m<sup>2</sup> a)之间,明显高于其他重点生态脆弱区,与本文的NPP评估结果略有差异,但大体一致,均属同一数值范围内。

2000年、2010年和2017年研究区土壤保持服务年均值分别为429.01 t/(hm<sup>2</sup> a)、473.16 t/(hm<sup>2</sup> a)和848.71 t/(hm<sup>2</sup> a), Zhang等<sup>[72]</sup>运用CASA模型估算桂西北喀斯特地区2000年土壤保持年均值为300.50 t/(hm<sup>2</sup> a);尚二萍等<sup>[73]</sup>引入石漠化因子并结合具体实验小区数据对RUSLE模型进行修正,量化2015年黔桂喀斯特山区的土壤保持服务年均值为885.18 t/(hm<sup>2</sup> a),与本文研究结果基本一致,相差不大。

2000年、2010年和2017年研究区生境质量年均值分别为0.58800、0.56622和0.56052, 黄金金<sup>[74]</sup>采用InVEST模型对2000—2017年贵州乌江喀斯特流域生态系统服务进行评估,结果表明2000年、2010年和2017年研究区生境质量年均值分别为0.609、0.613和0.614,与本文所获得的生境质量指数结果相差不大。

综上,采用InVEST、RUSLE和CASA模型评估的文山市产水量、NPP、土壤保持和生境质量数据结果与同在中国西南喀斯特地区的模型模拟结果基本一致,均属同一数值

范围内,说明本文采用各模型对滇东南喀斯特山区文山市的生态系统服务物质质量模拟结果具有较高的可信度,能反映研究区生态系统服务变化的实际情况。而数值上存在的差异可能与所选研究区域的时空尺度、模型参数的设置等因素相关。但是本文还存在不足之处,例如,估算的喀斯特山区文化服务价值仅从旅游景点维度去考虑文化服务功能,未对美学、游憩等文化服务功能开展全面和精确的评估;此外,模型参数主要参考相似地区的前人研究成果,在未来研究中将通过野外数据采集与观测,对生态系统服务估算所采用的模型参数进行本土化调整,提高模型评估结果的精度。

#### 4.2 喀斯特山区生态系统服务空间热点分析讨论

目前国内外对生态系统服务空间格局的研究日趋增多,亦日趋成熟。但采用空间统计方法分析生态系统服务时空分布规律的研究尚显不足<sup>[75]</sup>。研究除了采用InVEST、CASA和RUSLE模型对生态系统服务进行空间制图外,还应用空间统计方法分析各项生态系统服务的冷热点空间分布特征,进行综合热点区的识别。将综合热点区数量分布图与文山市土地利用现状图和石漠化发生区域图进行空间叠加分析(图9),发现综合热点区空间分布格局与林地和石漠化程度有很大的一致性,说明土地利用类型、石漠化程度是影响文山市生态系统服务综合供给能力的重要原因。如图9a所示,西部和南部林地主要集中区也是生态系统服务综合热点区数量为3、4的主要分布区,能够同时提供3-4项高值生态系统服务的区域与西部和南部的林地核心区高度重合,说明土地利用类型是影响区域生态系统服务功能的重要因素之一;由图9b所示,整体来看,石漠化发生区主要集中在文山市西北部、东北、东部和东南部(图1),这些地区也是生态系统服务综合热点区数量为0的主要分布地,热点数量为0的区域与石漠化发生区高度重合,说明石漠化程度与综合热点区空间分布具有一致性,在一定程度上影响区域生态系统服务的综合供给能力。

文山市综合热点区的研究结果与其他学者<sup>[52, 76]</sup>的分析结果基本一致,均以同时提供2项及以下高值服务为主,提供4项及以上高值服务区域较少。但有少数研究结果存在一定差异,其原因在于各研究区自然环境本底条件不同,评价的生态系统服务类型和参数设置方面也略有细微差异。土地利用类型、自然环境状况是造成喀斯特山区生态系统服务综合供给能力差异的主要因素,同时石漠化状况也会影响其综合服务能力。

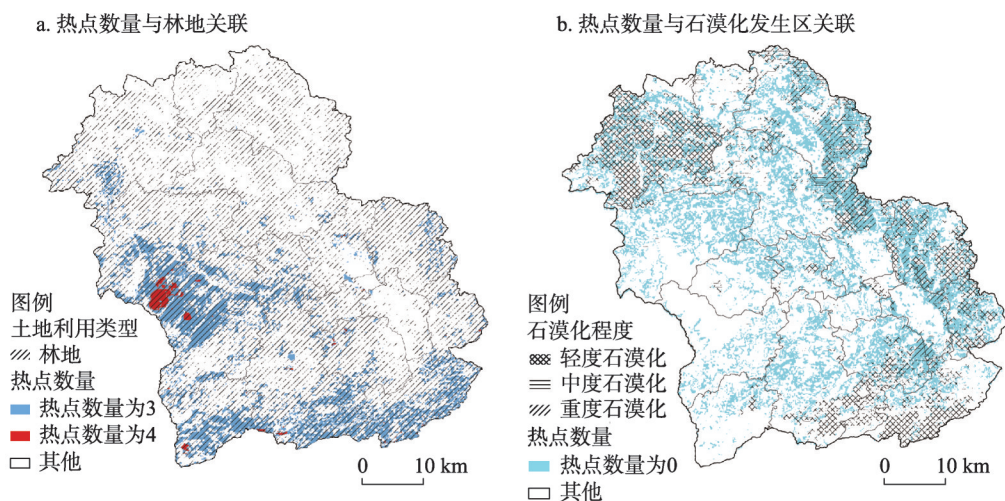


图9 生态系统服务综合热点区数量与文山市土地利用现状、石漠化程度关联图

Fig. 9 The correlation between the number of integrated hotspots of ecosystem services and the status of land use and the degree of rocky desertification in Wenshan city

### 4.3 喀斯特山区生态系统服务功能分区讨论

21世纪以来,中国经济快速发展,资源开发与生态环境保护之间的矛盾日益加剧,为缓解这些问题,政府部门和学者们开展了一系列的生态功能区划研究工作<sup>[77]</sup>。传统的生态功能分区多采用定性与定量相结合的方式,重点考虑各地理环境要素及其空间组合的相似性或相异性程度,在此基础上进行特征区划或自然区划,但对区域生态系统的完整性考虑不足。本文中的生态系统服务功能分区则是从生态系统服务功能自身规律出发,综合考虑供给、支持、调节及文化等各项服务功能,采用定量化的方式在栅格单元上形成的功能分区。该分区可多角度揭示生态系统的空间差异性,确定各分区的主导服务功能,明晰不同区域的生态保护区域和方向,对实现区域土地资源精细化管理具有重要意义。并且已有研究表明有效的功能分区能使各项生态系统服务功能效益的最优化<sup>[78]</sup>。

喀斯特生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分,在人类福祉和生计中发挥着至关重要的作用。但目前基于生态系统服务评估结果,对喀斯特地区进行生态系统服务功能分区的研究却较少<sup>[36]</sup>。因此,本文以滇东南典型喀斯特山区文山市为例,运用K-means聚类方法识别生态系统服务簇,进行生态系统服务功能分区研究,将研究区划分为生态保护区、生态过渡区、农业主产区和人类生产生活区,并针对各分区提出了空间上差异化、精细化生态管控建议。其研究方法和成果有利于促进喀斯特地区土地资源的合理配置,实现喀斯特区域的生态恢复治理和区域可持续发展,同时为国土空间开发格局优化及“三生空间”的划定等提供基础数据和一定的理论参考。

## 5 结论

本文以滇东南喀斯特山区典型区域文山市为例,综合运用InVEST、CASA、RUSLE模型和热点分析法定量评估了2000—2017年6项生态系统服务的时空格局特征,运用K-means聚类法识别了生态系统服务簇,明确了各服务簇的主导服务类型,划定了喀斯特山区生态系统服务功能区,提出了差异化的喀斯特生态系统管控建议。主要结论有:

(1) 2000—2017年除生境质量服务下降外,文山市其他5项生态系统服务年均值均有提升。

(2) 2000—2017年文山市6项生态系统服务高值区集中分布在西部和南部,少量分布于北部和中部,低值区集中分布在北部和中部,少量分布于南部。热点分析表明,食物供给与产水量服务两者的热点区主要分布在北部和中部,其他4项服务的热点区主要分布在西部和南部;食物供给与产水量服务两者的冷点区主要分布在西部、南部和东部,NPP、土壤保持和生境质量服务三者的冷点区则广泛零散分布于北部、中部偏东和东南部,旅游文化服务无冷点分布区域;除旅游文化服务的热点区面积仅占比2.56%,冷点区占比0外,其他5项生态系统服务的冷热点区域面积分布占比较为接近,均在21%~32%区间;能提供3项及以上高值生态系统服务的区域较少,仅占全市总面积14.50%。

(3) 将文山市划分为4类生态系统服务功能区。其中,生态保护区以土壤保持、气候调节和维持生物多样性为主导;生态过渡区以维持生态系统服务稳定,提升耕地生产能力为主导;农业主产区以食物供给服务为主导;人类生产生活区以改善人居环境,打造宜人景观为主导。

### 参考文献(References)

[1] Daly G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997.



- [2] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 616-626.
- [3] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [4] Fisher B, Polasky S, Sterner T. Conservation and human welfare: Economic analysis of ecosystem services. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 151-159.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [6] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [7] Burkhard B, Santos-Martin F, Nedkov S, et al. An operational framework for integrated mapping and assessment of ecosystems and their services (MAES). *One Ecosystem*, 2018, 3: e22831. DOI: 10.3897/oneeco.3.e22831.
- [8] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1250-1263.
- [9] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, et al. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [10] Jiang C, Zhang H Y, Wang X C, et al. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: Benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 135-150.
- [11] Dobbs C, Nitschke C R, Kendal D. Global drivers and tradeoffs of three urban vegetation ecosystem services. *PLOS ONE*, 2014, 9(11): e113000. DOI: 10.1371/journal.pone.0113000.
- [12] de Groot R, Brander L, van der Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.
- [13] Ulgiati S, Brown M T. Emergy and ecosystem complexity. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(1): 310-321.
- [14] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [15] Li Shuangcheng, Wang Jue, Zhu Wenbo, et al. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1628-1639. [李双成, 王珏, 朱文博, 等. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*, 2014, 69(11): 1628-1639.]
- [16] Song Xianwei, Gao Yang, Wen Xuefa, et al. Rock-weathering-related carbon sinks and associated ecosystem service functions in the Karst critical zone in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1926-1938. [宋贤威, 高扬, 温学发, 等. 中国喀斯特关键带岩石风化碳汇评估及其生态服务功能. *地理学报*, 2016, 71(11): 1926-1938.]
- [17] Chen Yang, Zhang Jianjun, Du Guoming, et al. Temporal and spatial changes in ecosystem service values in the northern Sanjiang plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6157-6164. [陈阳, 张建军, 杜国明, 等. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变. *生态学报*, 2015, 35(18): 6157-6164.]
- [18] Bailey R G. *Ecoregions of the United States (map)*. Ogden: US Department of Agriculture, Forest Service, 1976.
- [19] Bailey R G. *Ecoregions: The Ecosystem Geography of the Oceans and Continents*. 2nd ed. New York: Springer Publishing Company, 2014.
- [20] Zhu Jinfeng, Zhou Yi, Wang Shixin, et al. Ecological function evaluation and regionalization in Baiyangdian wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 459-472. [朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 白洋淀湿地生态功能评价及分区. *生态学报*, 2020, 40(2): 459-472.]
- [21] Ma Cheng, Li Shuangcheng, Liu Jinlong, et al. Regionalization of ecosystem services of Beijing-Tianjin-Hebei area based on SOFM neural network. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1383-1393. [马程, 李双成, 刘金龙, 等. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1383-1393.]
- [22] Fu Bojie, Chen Liding, Liu Guohua. The objectives, tasks and characteristics of China ecological regionalization. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 3-7. [傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. *生态学报*, 1999, 19(5): 3-7.]
- [23] Fu Bojie, Liu Guohua, Chen Liding, et al. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6. [傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.]
- [24] Ministry of Environmental Protection, Chinese Academy of Sciences. *National Ecological Function Zoning*. [http://www.gov.cn/gzdt/2008-08/02/content\\_1062543.html](http://www.gov.cn/gzdt/2008-08/02/content_1062543.html). (2008-07-18). [环境保护部, 中国科学院. 《全国生态功能区划》. [http://www.gov.cn/gzdt/2008-08/02/content\\_1062543.html](http://www.gov.cn/gzdt/2008-08/02/content_1062543.html). (2008-07-18).]

- [25] Ministry of Environmental Protection, Chinese Academy of Sciences. National Ecological Function Zoning (Revised Edition). [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126\\_317777.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm). (2015-11-13). [环境保护部, 中国科学院.《全国生态功能区划(修编版)》. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126\\_317777.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm). (2015-11-13).]
- [26] Mouchet M A, Paracchini M L, Schulp C J E, et al. Bundles of ecosystem (dis)services and multifunctionality across European landscapes. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 23-28.
- [27] Zhao M Y, Peng J, Liu Y X, et al. Mapping watershed-level ecosystem service bundles in the Pearl River Delta, China. *Ecological Economics*, 2018, 152: 106-117.
- [28] Schirpke U, Candiago S, Vigl L E, et al. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [29] Li Huilei, Peng Jian, Hu Yina, et al. Ecological function zoning in Inner Mongolia Autonomous Region based on ecosystem service bundles. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2657-2666. [李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 等. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.]
- [30] Xiang Bao, Ren Huali, Ma Guangwen, et al. Assessment of ecosystem service importance in Cheng-Yu economic zone. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(7): 722-730. [香宝, 任华丽, 马广文, 等. 成渝经济区生态系统服务功能重要性评价. *环境科学研究*, 2011, 24(7): 722-730.]
- [31] Li Yuechen, Liu Chunxia, Min Jie, et al. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 168-178. [李月臣, 刘春霞, 闵婕, 等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. *生态学报*, 2013, 33(1): 168-178.]
- [32] Mao Qi, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. An ecological function zoning approach coupling SOFM and SVM: A case study in Ordos. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 460-474. [毛祺, 彭建, 刘焱序, 等. 耦合 SOFM 与 SVM 的生态功能分区方法: 以鄂尔多斯市为例. *地理学报*, 2019, 74(3): 460-474.]
- [33] Li Shujuan, Gao Lin. Ecosystem service values for 4 periods and ecological function zoning of coastal wetlands on north shore of Jiaozhou Bay. *Wetland Science*, 2020, 18(2): 129-140. [李淑娟, 高琳. 胶州湾北岸滨海地区 4 个时期生态系统服务价值和生态功能区划分研究. *湿地科学*, 2020, 18(2): 129-140.]
- [34] Yang G F, Ge Y, Xue H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 110-121.
- [35] Lin S W, Wu R D, Yang F L, et al. Spatial trade-offs and synergies among ecosystem services within a global biodiversity hotspot. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 371-381.
- [36] Qiu J X, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *PNAS*, 2013, 110(29): 12149-12154.
- [37] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [38] Liu Congqiang. Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's Surface: Cycling of Nutrients in Soil-Plant Systems of Karstic Environments, Southwest China. Beijing: Science Press, 2009. [刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤—植被系统生源要素循环. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [39] Luo Guangjie, Wang Shijie, Li Yangbing, et al. Spatio-temporal dynamics and ecological service function assessment of slope farmland in Karst areas of Guizhou province, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11): 233-243. [罗光杰, 王世杰, 李阳兵, 等. 岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 233-243.]
- [40] Tian Y C, Wang S J, Bai X Y, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*, 2016, 566/567: 1297-1308.
- [41] Hu Z Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Changes in ecosystem service values in Karst areas of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 301: 107026. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107026.
- [42] Wang Rong, Cai Yunlong. Management modes of degraded ecosystem in southwest Karst area of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 1070-1080. [王荣, 蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 1070-1080.]
- [43] Oliver D M, Zheng Y, Naylor L A, et al. How does smallholder farming practice and environmental awareness vary across village communities in the Karst terrain of southwest China? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 288: 106715. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106715.
- [44] Wang Quan, Li Yangbing, Huang Juan, et al. Effect of land use transformation process on ecosystem service value in

- Karst trough valley area. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 192-198. [王权, 李阳兵, 黄娟, 等. 喀斯特槽谷区土地利用转型过程对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2019, 26(3): 192-198.]
- [45] Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Tong Liqiang, et al. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China. Pratacultural Science, 2008, 25(9): 40-50. [曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策. 草业科学, 2008, 25(9): 40-50.]
- [46] Qiu S J, Peng J, Dong J Q, et al. Understanding the relationships between ecosystem services and associated social-ecological drivers in a karst region: A case study of Guizhou province, China. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2021, 45(1): 98-114.
- [47] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [48] Yu Yuyang, Li Jing, Zhou Zixiang, et al. Multi-scale representation of trade-offs and synergistic relationship among ecosystem services in Qinling-Daba mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5465-5477. [余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.]
- [49] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.
- [50] Su Weici. Eco-environmental fragility in Guizhou Karst mountain region and its ecological rehabilitation. China Environmental Science, 2000, 20(6): 547-551. [苏维词. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性及其生态整治. 中国环境科学, 2000, 20(6): 547-551.]
- [51] Li Shihua, Zhou Junsong, Wang Jinliang. Spatio-temporal LUCC and driving force in Fuxian lake watershed from 1974 to 2014. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(4): 132-139. [李石华, 周峻松, 王金亮. 1974—2014年抚仙湖流域土地利用/覆盖时空变化与驱动力分析. 国土资源遥感, 2017, 29(4): 132-139.]
- [52] Peng J, Hu X X, Qiu S J, et al. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. Science of the Total Environment, 2019, 660: 765-775.
- [53] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 74-88.
- [54] Wang Baosheng, Chen Huaxiang, Dong Zheng, et al. Impact of land use change on the water conservation service of ecosystems in the urban agglomeration of the Golden Triangle of southern Fujian, China, in 2030. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 484-498. [王保盛, 陈华香, 董政, 等. 2030年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.]
- [55] Zeng Lingyun. Study on soil erosion in Karst area based on RUSLE model [D]. Beijing: Peking University, 2008. [曾凌云. 基于RUSLE模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究[D]. 北京: 北京大学, 2008.]
- [56] Bao Yubin. Temporal and spatial change of ecological services on Loess Plateau of Shaanxi by InVEST model [D]. Xi'an: Northwest University, 2015. [包玉斌. 基于InVEST模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.]
- [57] Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang river basin. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7582-7595. [王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2018, 38(21): 7582-7595.]
- [58] Huang Xianfeng, Yang Yongju, Wu Yi, et al. Land use change and its impact on habitat quality in Karst nature reserve from 1990 to 2017. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 345-351. [黄贤峰, 杨永菊, 武艺, 等. 1990—2017年喀斯特自然保护区土地利用变化对生境质量的影响. 水土保持通报, 2018, 38(6): 345-351.]
- [59] Zhang Lingling. Ecosystem services assessment and its driving forces in the Bailongjiang watershed of Gansu [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [张玲玲. 甘肃白龙江流域生态系统服务评估及影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [60] Eade J D O, Moran D. Spatial economic valuation: Benefits transfer using geographical information systems. Journal of Environmental Management, 1996, 48(2): 97-110.
- [61] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [62] Ying Kui, Li Xudong. The spatial pattern changes of population aging in township in Guiyang city. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2020, 38(5): 64-72. [应奎, 李旭东. 贵阳市人口老龄化的乡镇空间格局变化研究. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(5): 64-72.]
- [63] Ran Fengwei, Luo Zhijun, Wu Jiaping, et al. Spatiotemporal patterns of the trade-off and synergy relationship among



- ecosystem services in Poyang lake region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 995-1004. [冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 995-1004.]
- [64] Runting R K, Bryan B A, Dee L E, et al. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: A review. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 28-41.
- [65] Zhang Renping, Guo Jing, Zhang Yunling. Spatial distribution pattern of NPP of Xinjiang grassland and its response to climatic changes. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5318-5326. [张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(15): 5318-5326.]
- [66] Pan Y, Xu Z R, Wu J X. Spatial differences of the supply of multiple ecosystem services and the environmental and land use factors affecting them. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 4-10.
- [67] Wang Xiuming, Liu Xucheng, Long Yingxian, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan city based on improved InVEST. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 381-388. [王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的InVEST模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 381-388.]
- [68] Qi Ning, Zhao Jun, Yang Yanzheng, et al. Quantifying ecosystem service trade-offs and synergies in northeast China based on ecosystem service bundles. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2827-2837. [祁宁, 赵君, 杨延征, 等. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. *生态学报*, 2020, 40(9): 2827-2837.]
- [69] Xie Baoni, Qin Zhanfei, Wang Yang, et al. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11): 244-253. [谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.]
- [70] Wang X F, Zhang X R, Feng X M, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in Karst area of China driven by Grain-for-Green Program. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 101-114.
- [71] Wang Xiaofeng, Ma Xue, Feng Xiaoming, et al. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7344-7355. [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. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.]
- [72] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, et al. Effect of ecological engineering projects on ecosystem services in a Karst region: A case study of northwest Guangxi, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 831-842.
- [73] Shang Erping, Xu Erqi. Temporal and spatial variation of main ecosystem services in Guizhou and Guangxi Karst mountainous region. *Resources Science*, 2017, 39(10): 2000-2015. [尚二萍, 许尔琪. 黔桂喀斯特山地主要生态系统服务时空变化. *资源科学*, 2017, 39(10): 2000-2015.]
- [74] Huang Guojin. Evaluation of ecosystem services in Karst basin based on InVEST model [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020. [黄国金. 基于InVEST模型喀斯特流域生态系统服务功能评估[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.]
- [75] Li Tao, Gan Dexin, Yang Zhijian, et al. Spatial-temporal evolvement of ecosystem service value of Dongting lake area influenced by changes of land use. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3787-3796. [李涛, 甘德欣, 杨知建, 等. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3787-3796.]
- [76] Huang Longsheng, Wang Bing, Niu Xiang, et al. Spatial pattern of the ecosystem service function of forests in Jinan city. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6477-6486. [黄龙生, 王兵, 牛香, 等. 济南市森林生态系统服务功能空间格局研究. *生态学报*, 2019, 39(17): 6477-6486.]
- [77] Lu Chunxia, Li Yiqiu, Min Qingwen, et al. Ecological function zoning of the Capital Eco-sphere. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1520-1528. [鲁春霞, 李亦秋, 闵庆文, 等. 首都生态圈生态功能分区与评价. *资源科学*, 2015, 37(8): 1520-1528.]
- [78] Guan Qingchun, Hao Jinmin, Xu Yueqing, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1359-1373. [管青春, 郝晋珉, 许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. *资源科学*, 2019, 41(7): 1359-1373.]

## Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan

ZHAO Xiaoqing<sup>1</sup>, SHI Xiaoqian<sup>1</sup>, LI Yuhao<sup>1</sup>, LI Yimin<sup>1</sup>, HUANG Pei<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Clarifying the changes of spatio-temporal pattern of ecosystem services and dividing the ecosystem service function zoning will help to achieve the fine management of land resources. The study took Wenshan city, a typical area in the karst mountainous southeastern Yunnan, as an example. We identified six types of ecosystem services in Wenshan from 2000 to 2017, namely, the food supply, water production, net primary productivity of vegetation, soil conservation, habitat quality and tourism culture. Then we examined their spatio-temporal patterns and differentiation characteristics. In addition, we used K-means clustering method to identify ecosystem service bundles and ecosystem service functional zones, and proposed differentiated ecological management measures. The results show that: (1) From 2000 to 2017, all the ecosystem services in Wenshan showed an upward trend, with the exception of the habitat quality service. (2) In terms of spatial distribution, the high-value areas of the six types are concentrated in the west and south, while the low-value areas are concentrated in the north and central parts. There are differences in the spatial distribution of hot and cold spots of the six types of ecosystem services, but they overlap on the whole except for the hot and cold spots of tourism culture service, which account for 2.56% and 0%, respectively, the areas of cold and hot spots account for 21% to 32% for the other five types. Only a small number of regions can provide three or more high-value areas of ecosystem services at the same time, and 85.50% of the regions can only provide two or less high-value areas. (3) According to the cluster results of ecosystem service bundles, Wenshan city could be divided into four types of ecosystem service function zones: ecological protection area, ecological transition area, main agricultural production area, and human production and living area. Differentiated ecological management and control suggestions are proposed for each functional area. The research results can provide references for resource utilization and space management in other Karst mountainous cities.

**Keywords:** ecosystem service; spatio-temporal differentiation; K-means cluster analysis; functional zoning; Karst mountainous areas