

# 四川天府新区 BGI 复合功能空间分异 特征及其景观格局驱动机制研究

罗言云<sup>1</sup>, 郭淑婷<sup>1</sup>, 王倩娜<sup>1</sup>, 王诗源<sup>2</sup>

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065;  
2. 广东省城乡规划设计研究院有限责任公司, 广州 510290)

**摘要:** 蓝绿基础设施(Blue-Green Infrastructure, BGI)是实现适应气候变化战略目标的重要工具. 研究 BGI 景观格局和功能的空间关系,旨在为城市气候适应性建设提供依据. 以四川天府新区(含协调管控区)为例,基于遥感影像数据,从气候适应性视角出发,进行 BGI 复合功能评价和空间分异特征分析,并运用地理探测器进一步揭示景观格局主要驱动因子及驱动机制. 结果表明:(1)复合功能等级整体呈现从龙泉山脉向东西两侧递减趋势,高服务功能集中分布在龙泉山脉、彭祖山景区和三岔湖景区东南方向的协调管控区域.(2)复合功能等级空间分布格局整体呈显著空间正向自相关关系,具有显著高高(HH)、低低(LL)、高低(HL)聚集特征.(3)景观组成类型、网络结构要素类型、斑块密度指数(PD)和面积加权平均形状指数(AWMSI)是复合功能空间分异的主要驱动因子;景观组成类型、网络结构要素类型是复合功能空间分异的主要交互驱动因子. 研究探明了景观格局对 BGI 复合功能空间分异的驱动机制,可用于指导研究区城市气候适应性建设.

**关键词:** 蓝绿基础设施; 复合功能; 景观格局; 空间分异性; 驱动机制

**中图分类号:** TU985.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2024.016004

## Study on the spatial differentiation characteristics of BGI multi-function and its landscape pattern driving mechanism in Sichuan Tianfu New Area

LUO Yan-Yun<sup>1</sup>, GUO Shu-Ting<sup>1</sup>, WANG Qian-Na<sup>1</sup>, WANG Shi-Yuan<sup>2</sup>

(1. Institut of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Guangdong Urban and Rural Planning and Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** Blue Green Infrastructure (BGI) is an important tool to achieve the strategic goal of climate change adaptation. The purpose of studying the spatial relationship between BGI landscape pattern and function is to provide a basis for urban climate adaptability construction. Taking the Sichuan Tianfu New Area (including the coordinated control area) as an example, based on remote sensing image data and from the perspective of climate adaptability, the BGI multi-function evaluation and spatial differentiation feature analysis were carried out, and further revealed the main driving factors and driving mechanism of landscape pattern of BGI multi-function by using geographical detectors. The results showed that: (1) The overall multi-function level showed a decreasing trend from Longquan Mountain to the

收稿日期: 2023-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(31500581)

作者简介: 罗言云(1969-), 男, 四川大竹人, 副教授, 研究方向为风景园林规划与设计、城乡生态与生态修复.

E-mail: luoyanyun3966@163.com

通讯作者: 王诗源. E-mail: wangshiyuan1997@qq.com

east and west sides, with high-service functions concentrated in the Longquan Mountains, Pengzu Mountain Scenic Area and coordinated control area in the southeast direction of Sancha Lake Scenic Area. (2) The overall spatial distribution pattern of the multi-function level showed a significant spatial positive autocorrelation relationship, with significant high (HH), low (LL), and high (HL) clustering characteristics. (3) Landscape composition type, network structure element type, patch density index (PD) and area weight average shape index (AWMSI) were the main driving factors for spatial differentiation of multi-function; landscape composition type and network structure element type were the main interactive driving factors for spatial differentiation of multi-function. The study has identified the driving mechanism of landscape pattern on the spatial differentiation of BGI multi-function, which can be used to guide the construction of urban climate adaptability in the study area.

**Keywords:** Blue green infrastructure; Multi-function; Landscape pattern; Spatial differentiation; Driving mechanism

## 1 引言

在国际气候制度经历 30 余年不断发展与演变的进程中,气候适应已经成为全球共识<sup>[1]</sup>。《国家适应气候变化战略 2035》将适应气候变化纳入国土空间规划,提出在国土空间规划中充分考虑气候要素<sup>[2]</sup>。蓝绿基础设施(Blue-Green Infrastructure, BGI)是由自然、半自然和人工绿地植被、水体为一体的生物栖息地网络体系<sup>[3]</sup>,具有调蓄雨洪、管理河流、制造冷岛、缓解热岛、固碳、改善空气流通和休闲娱乐等生态系统服务功能<sup>[4]</sup>。在调节城市气候和协助城市应对未来气候变化方面扮演着极为重要的角色<sup>[5]</sup>。本研究中气候适应性指 BGI 对于不利气候环境条件的适应属性。在国土空间规划的重要时期,研究具有气候适应性的 BGI 功能,有利于提高区域适应极端气候事件的能力,缓解气候变化造成的不良影响,对我国城乡蓝绿空间系统专项规划建设和实现气候适应性目标具有重要意义。

目前,生态系统服务(Ecosystem Service, ES)功能评价和景观格局分析是 BGI 领域研究热点。ES 功能评价以水资源调节<sup>[6,7]</sup>、气候调节<sup>[8,9]</sup>、空气质量调节<sup>[7,10]</sup>和休闲娱乐调节功能<sup>[11]</sup>为主要评价对象,模型大致分为经济计量、空间计量两大类<sup>[7]</sup>。生态系统服务和权衡综合评估(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)模型是目前比较成熟的多功能 ES 评价模型,其中的固碳、城市降温、城市内涝风险削减、生物多样性指数、生境质量和休闲娱乐等模块应用较为广泛<sup>[9,12-14]</sup>,但其内置评价模型有限,部分模块并不以 ES 为直接输出对象,结果数据还需进一

步处理。城市生态智慧管理系统(Intelligent Urban Ecosystem Management System, IUEMS)的引入可补充 InVEST 模型在此方面存在的不足<sup>[15]</sup>。景观格局分析以景观格局指数和形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)为主,二者分别侧重于景观组成和景观结构连通性,结合移动窗口法(Moving window method)可实现景观格局的空间可视化<sup>[16]</sup>。近年来,部分学者通过将景观格局指数和 MSPA 结合深入分析 BGI 景观格局特征<sup>[17,18]</sup>。

人类活动造成 BGI 景观格局的改变,从而驱动 ES 供给发生显著变化。研究景观格局和 ES 功能的关系,有利于完善景观格局现状,提高 ES 功能,增强 BGI 应对气候风险的能力。目前相关研究较少,且往往忽视了景观格局驱动因子与 ES 功能在地理空间上的差异性<sup>[19,20]</sup>。地理探测器(GeoDetector)作为一种检验地理事物现象是否存在空间分异性的工具,能够揭示空间分异背后的驱动力以及探测两因子交互作用对要素的解释力<sup>[21]</sup>,已被广泛应用于自然地理<sup>[22]</sup>、人文经济<sup>[23]</sup>、生态学<sup>[24]</sup>等领域。鉴于此,选取国家级新区——四川天府新区(含协调管控区)为研究区,展开 BGI 复合功能评价,并运用地理探测器探测 BGI 景观格局对复合功能空间分异的驱动机制。以期为未来气候变化背景下的 BGI 复合功能评估及其规划设计实践提供依据与参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

2.1.1 研究区概况 四川天府新区及协调管控区位于成都市中心城区以南( $103^{\circ}47' \sim 104^{\circ}35' E$ ,

30°4′~30°37′N), 总面积约 2678 km<sup>2</sup>. 根据相关规划<sup>[25]</sup>, 研究区被划分为: 直管区、高新片区、龙泉片区、双流片区、新津片区、简阳片区、青龙片区、视高片区、协调管控区 9 个片区(图 1), 其中协调管控区为成都市和眉山市协同管辖. 研究区属亚热带季风气候, 多为低山丘陵, 东部龙泉山脉和南部彭祖山形成重要生态屏障. 近年来, 研究区气象灾害主要包括: 暴雨、高温、雾、雷暴、大风、寒潮、低温、干旱、冰雹, 以及主汛期引发的洪涝、内涝、滑坡等次生灾害<sup>[26]</sup>.

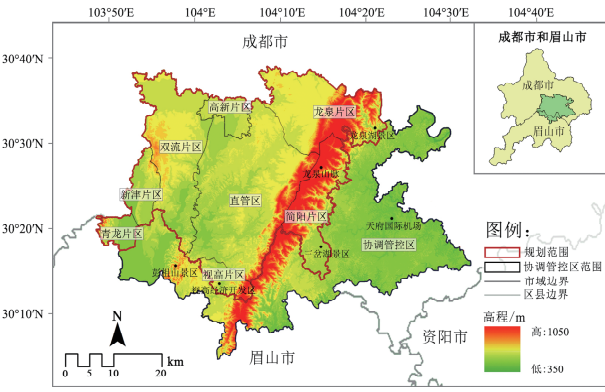


图 1 研究区区位及高程图

Fig. 1 Location and elevation map of the study area

2.1.2 数据来源及预处理 基于云量少、无遮挡的原则, 选取研究区 2020 年 7 月的 Landsat 8 遥

感影像数据, 并在 ENVI 5.3 中完成辐射定标、大气校正、镶嵌、裁剪等预处理. 通过波段运算提取 BGI 要素(包括植被与水体), 结合高精度卫星影像及实地调研对运算结果进行目视解译和修正, 得到 30 m×30 m 精度的 BGI 栅格数据. 将所有采用数据(表 1)进行地理坐标空间系统配准、重采样至 30 m 栅格并统一到 WGS\_1984 坐标系统.

2.2 研究方法

2.2.1 BGI 复合功能评价 研究基于气候适应性视角, 并结合四川天府新区气候环境现状, 选取雨洪管理、缓解热岛、空气净化、固碳、休闲娱乐 5 项功能指标进行单项功能定量评价(表 2)<sup>[27-31]</sup>. 然后, 借助层次分析-变异系数法确定各项功能权重, 通过归一化处理与叠加分析完成 BGI 复合功能评价. 运用 ArcGIS 中的自然断点法(Natural breaks), 将各评价结果重分类为 5 类, 依据结果由高到低分别赋值整数 5~1, 得到复合功能等级空间分布图.

2.2.2 空间自相关分析 空间自相关是用来检验某一要素的属性值是否与其相邻空间位置上的属性值相关联的方法<sup>[32]</sup>, 考虑到全局空间自相关无法判读属性值在局域的空间自相关情况, 而局部空间自相关可以获知属性值的聚集模式和分布格局. 因此, 研究选取全局空间自相关和局部空间自相关两个指标参数综合分析 BGI 复合功能空间自相关情况.

表 1 数据类型及来源统计表

Tab. 1 Statistical table of data types and sources

数据类型	数据来源	数据用途
遥感数据	中国科学院资源环境科学数据中心 <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> USGS(美国地质勘探局) <a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a> 地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a>	计算归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、归一化水指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)、地表温度反演(Land Surface Temperature, LST)、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)
土地利用数据	地理国情监测云平台 <a href="http://www.dsac.cn">http://www.dsac.cn</a>	提取景观组成类型(LUCC/中科院土地利用覆盖分类体系)
气象数据	中国气象科学数据共享服务网 <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> NCDC(美国国家气候数据中心) <a href="ftp://ftp.ncdc.noaa.gov">ftp://ftp.ncdc.noaa.gov</a>	获取 2020 年各站点逐日降雨数据
土壤数据	城市生态智慧管理系统 <a href="http://www.iuems.ac.cn">http://www.iuems.ac.cn</a>	获取研究区土壤粘粒、砂砾、有机质含量百分比, 用于计算土壤水文分组
空气质量数据	全国空气质量实时发布平台 <a href="http://www.cnemc.cn">http://www.cnemc.cn</a> 中国空气质量在线监测分析平台 <a href="https://www.aqistudy.cn">https://www.aqistudy.cn</a>	获取 2020 年各站点空气质量 AQI 数据
地图数据	OpenStreetMap <a href="https://www.openhistoricalmap.org">https://www.openhistoricalmap.org</a> 高德开放平台 <a href="https://lbs.amap.com">https://lbs.amap.com</a> 百度地图开放平台 <a href="https://lbsyun.baidu.com">https://lbsyun.baidu.com</a>	获取街道数据如高速公路、国道、省道、县道、乡道、城市道路等路网数据; 城市面状数据如公园、风景区、水库等

表 2 各单项功能评价指标和方法

Tab. 2 Evaluation indicators and methods of individual functions

BGI 功能	评价指标	评价方法
雨洪管理	洪涝削减量	基于天府新区各气象站站点 2020 年 7、8 月逐日降雨数据、水库矢量文件及库容量字段、土地利用数据和土壤数据,运用 IUEMS 平台的径流分析模型、城市内涝削减模型计算得到洪涝削减量。其中,径流分析模型参数矩阵采用 SCS-CN 模型手册中的标准 CN 值参数表 <sup>[27]</sup> 。
缓解热岛	缓解热岛效应服务量	采用大气校正法定量反演地表真实温度,基于 IUEMS 平台内置热岛缓解模型模拟无 BGI 空间情景下的温度,二者的差值为缓解热岛效应服务量。
空气净化	空气质量指数和货币价值	运用克里金法(Kriging)构建半差函数,对天府新区各监测点年度逐月空气质量指数(Air Quality Index, AQI)最高值和当月 AQI 指数日均值进行空间插值,同时进行货币价值评价计算,并将二者结果进行空间叠加,得到研究区空气质量。
固碳	碳储量	结合《中国陆地生态系统碳密度数据集》对碳密度进行修正,将水域和建设用地的地上与地下生物量碳密度均设为 0。运用 InVEST 模型的碳储存模块计算得到碳储量。
休闲娱乐	景观游憩价值指数和交通可达性 <sup>[28-29]</sup>	景观游憩价值指数以美学景观 ES 功能价值当量作为参考,对土地利用类型进行赋值 <sup>[30]</sup> ,并依据景观游憩类型予以修正 <sup>[31]</sup> 。交通可达性基于道路交通数据建立网络交通数据集,利用网络分析(Network Analyst)工具计算 OD 成本矩阵,通过反距离权重插值工具生成交通可达性空间分布图,将二者进行空间叠加得到休闲娱乐功能栅格图。

全局空间自相关是探究研究区域中相邻网格属性值在全局空间上关联度和相似性的指标参数,研究选用全局 Moran  $I$  进行分析。其中, $I$  取值范围为 $[-1, 1]$ ,大于 1 为正相关,小于 1 为负相关,绝对值越大说明空间相关性越强。计算公式如下:

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

式中, $I$  为全局莫兰指数; $n$  为网格单元总数; $x_i(x_j)$  为网格单元  $i(j)$  的测度值; $(x_i - \bar{x})$  为第  $i$  个网格单元上测度值与平均值的偏差; $\omega_{ij}$  为标准化的空间权重矩阵; $S^2$  为方差; $\bar{x}$  是网格单元的平均值。

局部空间自相关可以测度每个网格与周边网格之间的局部空间关联度和空间分异性<sup>[33]</sup>,研究选用 LISA 指数进行分析,得到 LISA 指数空间分布图。计算公式如下:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

式中, $I_i$  为局部莫兰指数; $n$  为网格单元总数; $x_i(x_j)$  为网格单元  $i(j)$  的测度值; $(x_i - \bar{x})$  为第  $i$  个网格单元上测度值与平均值的偏差; $\omega_{ij}$  为标准化的空间权重矩阵; $S^2$  为方差; $\bar{x}$  是网格单元的平均值。

2.2.3 景观组成类型分析 依据中科院土地利用/覆被类型(LUCC)分类体系,在 ArcGIS 中将预处理后的土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地利用类型,得

到研究区景观组成类型栅格图及数据。

2.2.4 形态学空间格局分析 基于预处理得到的  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  精度的 BGI 二值栅格图,利用 Guidos Toolbox 软件进行 MSPA 分析,采用八邻域规则,边缘宽度取值 60 m,将栅格图像识别分割成核心、孤岛、穿孔、边缘、连接桥、环和分支 7 个互斥类别,得到 BGI 网络结构要素栅格图。其中核心和孤岛为生境斑块,穿孔和边缘为具有边缘效应的过渡地带,连接桥、环和分支则为生物迁徙提供生态廊道。

2.2.5 景观格局指数分析 从分析 BGI 景观破碎化与多样性特征角度出发,选择表征面积、形状、聚散性和多样性的 4 类 5 个景观格局指数,分析研究区 BGI 景观格局空间分异情况。选取的面积指数为斑块面积指数(PD)和最大斑块面积指数(LPI),形状指数为面积加权平均形状指数(AWMSI),聚散性指数为蔓延度指数(CONT-AG),多样性指数为香农多样性指数(SHDI)。首先,在 ArcGIS 中对 BGI 网络结构要素栅格图进行重分类,将核心、孤岛、穿孔、边缘等块状景观类型归类为前景,连接桥、环和分支等线性景观和非 BGI 归类为背景,再应用 Fragstats 4.2 软件中的标准法和移动窗口法,选取 900 m 为移动窗口分析尺度,计算得到全局尺度景观格局指数栅格图。

2.2.6 空间分异性分析 地理探测器是一种探索空间分异并揭示其背后驱动机制的统计方法。其核心思想是根据空间异质性,分析自变量与因变量分布格局的一致性,探测自变量对因变量的解释程度,主要包括:因子探测器、生态探测器、交互作用

探测器和风险探测器 4 大模块<sup>[23]</sup>. 研究运用地理探测器, 以 BGI 复合功能等级为数值量因变量, 景观组成、网络结构要素、景观格局指数 PD、LPI、AWMSI、CONTAG、SHDI 为类型量自变量, 运用因子探测器、交互作用探测器和风险探测器综合探测 BGI 复合功能的景观格局主要驱动因子及驱动机制.

### 3 结果分析

#### 3.1 BGI 复合功能评价

对各单项功能进行综合赋权(表 3), 得到复合功能评价等级空间分布(图 2). 其中, 高服务功能等级区主要集中分布在以龙泉山脉为主的龙泉山区域, 其次是以彭祖山景区为主的彭祖山区域和三岔湖景区东南方向的协调管控区域, 以公园绿地为主的若干小型自然板块分散分布在各个片区. 低服务功能等级区主要分布在北部区域和各片区城市建设程度较高的区域, 如协调管控区的天府国际机场区域、视高片区的视高经济开发区区域. 总体来看, 复合功能等级整体呈现出从龙泉山脉向两侧递减的趋势, 表明龙泉山脉区域具有良好的生态功能, 对于研究区适应气候变化发挥着重要作用.

表 3 层次分析-变异系数法综合赋权

Tab. 3 Comprehensive weighting by AHP-coefficient of Variation method

	雨洪管理功能	缓解热岛功能	空气净化功能	固碳功能	休闲娱乐功能
层次分析法权重	0.16	0.22	0.18	0.16	0.28
变异系数法权重	0.16	0.21	0.22	0.15	0.26
综合权重	0.16	0.21	0.20	0.16	0.27

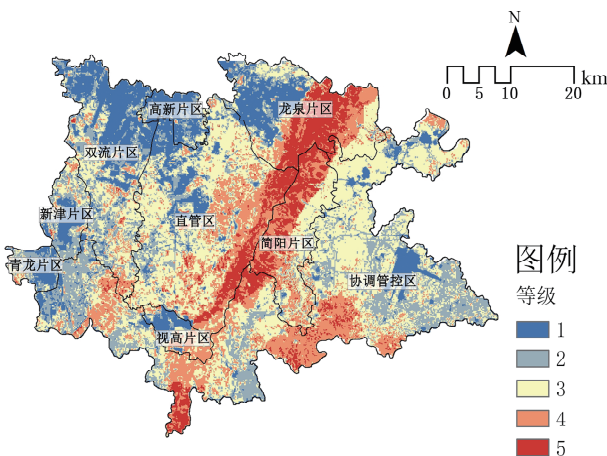


图 2 BGI 复合功能评价等级图

Fig. 2 BGI multi-function evaluation grade diagram

#### 3.2 BGI 复合功能空间分异特征

根据功能全局空间自相关分析结果(表 4), 各单项及复合功能的全局 Moran I 均大于 0, P 值均为 0, 表明研究区区域内各单项及复合功能服务等级空间分布格局整体上都呈显著的空间正向自相关关系, 功能单元之间聚集分布. 其中, 空气净化功能全局 Moran I 值为 0.60, 具有最高的显著性, 空间聚集程度最大; 固碳、雨洪管理、缓解热岛、休闲娱乐功能的全局 Moran I 分别为 0.36、0.29、0.27 和 0.20, 空间聚集程度依次降低; 复合功能与缓解热岛功能的 Moran I 值一致; 休闲娱乐功能在空间上聚集程度最小, 空间分布更趋于随机.

LISA 聚集图可以反映空间单元的属性值同其邻近空间单元的局部空间关系, 分为 4 种空间相关类型, 即高高(HH)聚集、高低(HL)聚集、低高(LH)聚集、低低(LL)聚集. 根据 BGI 复合功能 LISA 聚集结果(图 3), 复合功能空间格局呈现显著的 HH、LL、HL 聚集. HH 聚集主要集中分布在龙泉山脉、三岔湖景区及其东南方向的协调管控区域, LL 聚集主要分布在龙泉山脉西部区域, 以高新、双流、龙泉视高片区区域为主, 均表现为较强的空间正相关聚集. HL“组团”聚集镶嵌分布在 LL 聚集向 HH 聚集过渡区域, 主要位于龙泉山脉东侧的龙泉片区、简阳片区和协调管控区和西侧的直管区, 表现为一定的空间负相关聚集. 总体来看, LISA 指数 HH 聚集空间格局和高服务等级空间分布格局、LL 聚集空间格局和低服务等级空间分布格局、HL 聚集空间格局和中等服务等级空间分布格局趋于一致.

表 4 各单项及复合功能全局空间自相关分析结果

Tab. 4 Global spatial autocorrelation analysis results of individual and multi-function

	雨洪管理功能	缓解热岛功能	空气净化功能	固碳功能	休闲娱乐功能	复合功能
Z	59.00	72.24	129.87	54.25	45.99	99.55
P	0	0	0	0	0	0
MoranI	0.29	0.27	0.60	0.36	0.20	0.27

#### 3.3 BGI 景观格局特征

研究区景观组成类型以耕地为主, 占比达 64.78%, 林地和草地占比约 15%, 水域占比为 2.09%(表 5). 耕地相对集中分布在协调管控区和直管区, 建设用地主要分布在西北部 and 成都市中心城区邻近区域及东部天府国际机场区域和南部视

高经济开发区区域,林地则主要集中在龙泉山脉和彭祖山景区(图 4a).

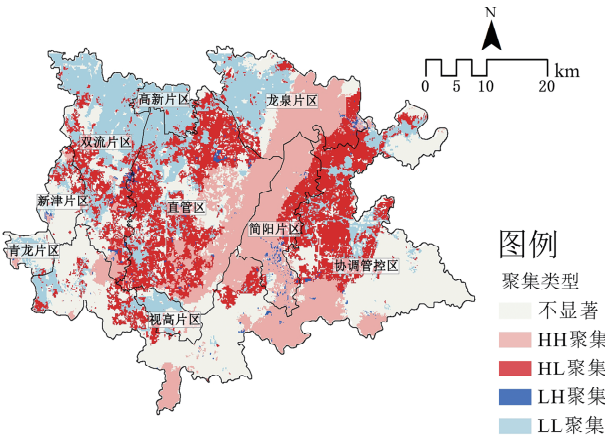


图 3 BGI 复合功能 LISA 聚集图

Fig. 3 BGI multi-function LISA aggregation diagram

研究区 BGI 总面积为 2053.07 km<sup>2</sup>, 占区域面积的 78.51%, 核心与环占总面积的 59.98%, 整体结构连通性较好(表 6). BGI 网络结构要素空间分异特征显著, 核心主要分布在简阳片区、协调管控

区和龙泉片区的东部区域, 环、连接桥和分支形成网络主要分散分布在龙泉山脉西侧的各片区, 在龙泉山脉的东侧, 连接桥集中分布在三岔湖景区和龙泉湖景区区域(图 4b).

研究区各景观格局指数空间分异特征显著. 其中, 景观格局指数 CONTAG、SHDI 空间分异最为明显, CONTAG 高值主要集中分布在龙泉山脉、彭祖山景区和协调管控区南部区域, SHDI 则完全相反, 表明东南区域景观破碎化程度较低, 景观连续性较强. 各片区 LPI 值都相对较高, 其中龙泉山脉、彭祖山景区和协调管控区东南部区域是由于受外界干扰较小, 而双流、高新、直管区、龙泉片区和天府国际机场区域是受到强烈的单一性人为干扰. PD 和 AWMSI 的空间分异特征相似, 指数值整体都较低, 高值零散分布在双流、高新、直管、龙泉片区靠近主城区的区域, 表明西北部区域景观破碎化程度较高, 景观复杂性较低. 总体上, 研究区东南部比西北部的景观连续性更强, 异质性更低(图 4c).

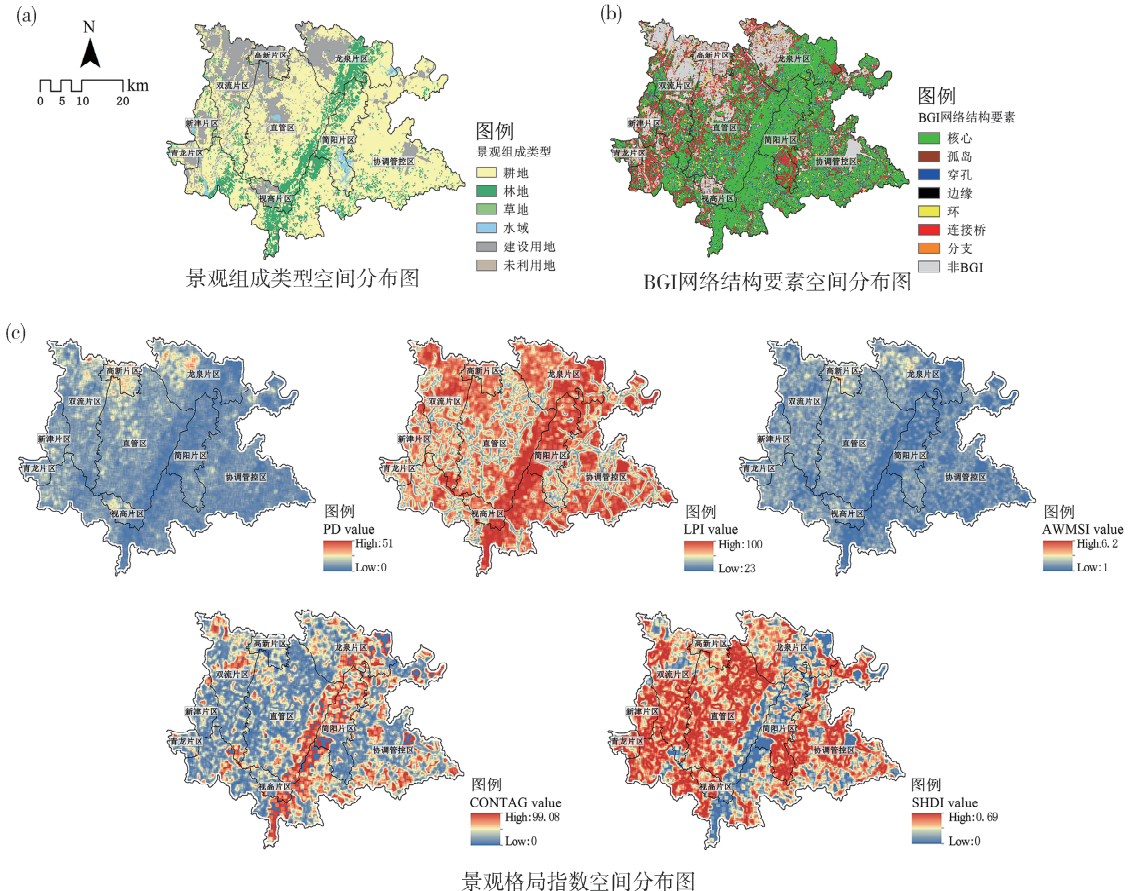


图 4 BGI 景观格局空间分布图

Fig. 4 BGI landscape pattern spatial distribution map

表 5 景观组成类型面积统计

Tab. 5 Area statistics of landscape composition type

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
S/km <sup>2</sup>	1695.81	362.62	7.98	54.60	495.61	1.32
PCT/%	64.78	13.85	0.30	2.09	18.93	0.05

注: S 表示该类型面积; PCT 表示该类型面积占总面积百分比。

表 6 网络结构要素类型面积统计

Tab. 6 Area statistics of network structure element type

	生境斑块		过渡地带		生态廊道		非 BGI
	核心	孤岛	穿孔	边缘	连接桥	环	
S/km <sup>2</sup>	1303.81	38.07	114.64	165.99	130.63	264.49	35.44
PCT/%	49.86	1.46	4.38	6.34	4.99	10.12	1.36

注: S 表示该类型面积; PCT 表示该类型面积占总面积百分比。

表 7 BGI 景观格局指数

Tab. 7 BGI landscape pattern index

PD /(n/100 hm <sup>2</sup> )	LPI /%	AWMSI	CONTAG /%	SHDI
5.106	29.509	34.185	34.185	0.663

### 3.4 BGI 复合功能空间分异的景观格局驱动机制

通过因子探测可以获得景观格局各因子对 BGI 复合功能空间分异的影响程度, 并以  $q$  值进行度量,  $q$  值越大, 说明该因子对 BGI 功能空间分异的影响程度越大。探测结果表明(表 8), 7 个因子的  $q$  值均通过了显著性检验, 作用力从大到小依次为: 景观组成类型(0.614) > 网络结构要素类型(0.439) > PD(0.303) > AWMSI(0.204) > CONTAG(0.107) > SHDI(0.092) > LPI(0.071)。由此可知, 景观组成类型是 BGI 复合功能空间分异的主导因子, 网络结构要素类型、PD、AWMSI 也发挥着关键作用, 而 CONTAG、SHDI、LPI 的影响程度最小。

表 8 BGI 复合功能空间分异因子解释度

Tab. 8 Explanatory degree of spatial differentiation factors of BGI multi-function

因子	景观组成类型	网络结构要素类型	PD	LPI	AWMSI	CONTAG	SHDI
$q$ 值	0.614	0.439	0.303	0.071	0.204	0.107	0.092

选取景观组成类型、网络结构要素、PD、

AWMSI 4 个主要因子进行交互作用探测, 4 个因子在两空间交互叠加后形成了 6 对交互作用。探测结果表明(表 9), 每一对因子交互作用的  $q$  值皆大于这对因子的任一因子的  $q$  值, 即任意两个主要驱动因子相互作用时都能显著增加对 BGI 气候适应性复合功能空间分异的解释。其中  $q$  值大小排序为: 景观组成类型  $\cap$  网络结构要素类型 > 景观组成类型  $\cap$  PD > 景观组成类型  $\cap$  AWMSI > 网络结构要素类型  $\cap$  PD > 网络结构要素类型  $\cap$  AWMSI > PD  $\cap$  AWMSI, 且前 3 对因子交互作用的  $q$  值均大于 0.5。由此可知, 特定网络结构要素、PD 和 AWMSI 下的景观组成类型对 BGI 气候适应性复合功能空间分异的驱动作用更加显著。

表 9 BGI 复合功能空间分异因子交互作用探测

Tab. 9 BGI multi-function spatial differentiation factor interaction detection

交互因子	因子解释度( $q$ 值)	
	景观组成类型	网络结构要素类型
网络结构要素类型	0.691	
PD	0.656	0.494

风险探测结果中子区域的功能等级属性值越高时其风险等级越低, 反之亦然。景观组成类型风险探测结果表明(图 5a), 景观组成类型子区域低功能等级风险排序为: 建设用地 > 水域 > 未利用地 > 耕地 > 草地 > 林地。功能等级均值最大的为林地, 其次是草地和耕地, 水域的功能等级均值甚至小于未利用地。因此, 退耕还林还草等生态保护措施对复合功能有明显的提升改善作用。

网络结构要素类型风险探测结果表明(图 5b), 网络结构要素类型子区域低功能等级风险排序为: 孤岛 > 非 BGI > 分支 > 连接桥 > 边缘 > 环 > 穿孔 > 核心。作为重要生境斑块的核心复合功能等级最高, 其次是作为过渡地带和生态廊道的穿孔、环、连接桥、边缘, 分支和孤岛的复合功能等级最低, 甚至低于非 BGI。

对主要因子 PD、AWMSI 进行景观格局指数风险探测, 结果表明(图 5c), PD、AWMSI 值越高, 即景观破碎化程度越高、景观复杂性越大时, 子区域功能等级值越低, 风险等级越高。相同风险等级下, AWMSI 子区域功能等级值均大于 PD 子区域功能等级均值, 结合因子探测结果可知, AWMSI 对于 BGI 复合功能的解释度虽不及 PD, 但其能驱动更多的高服务功能等级区。

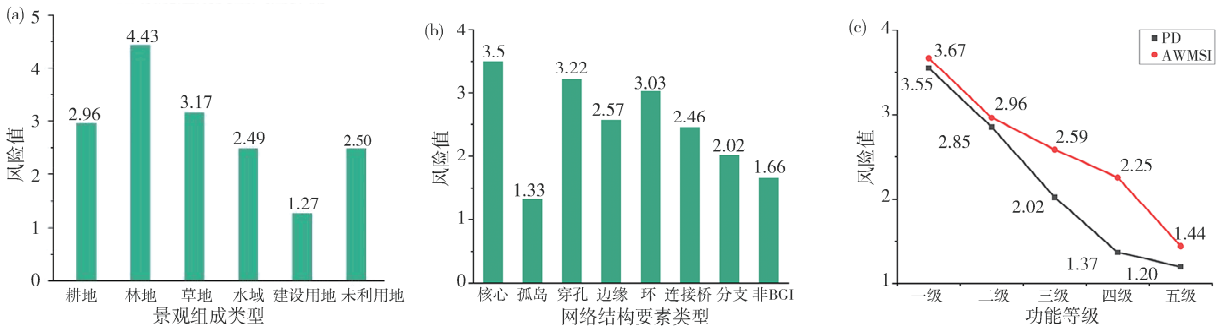


图 5 BGI 复合功能风险探测结果

Fig. 5 BGI multi-function risk detection results

## 4 讨论与结论

综合运用 IUEMS 平台、InVEST 模型、MSPA 方法、景观格局指数、空间自相关分析及地理探测器等方法,研究四川天府新区 BGI 复合功能空间分异特征及其景观格局驱动机制能够较好地反映 BGI 复合功能空间分异情况,识别景观格局主要驱动因子及驱动机制。具体地,复合功能等级整体呈现出从龙泉山向东西两侧递减趋势,高服务功能等级集中分布在龙泉山脉、彭祖山景区和三岔湖景区东南方向的协调管控区域。复合功能等级空间分布格局整体呈显著空间正向自相关关系,具有显著 HH、LL、HL 聚集特征。基于地理探测器的驱动机制结果表明,景观组成类型、网络结构要素类型、PD 和 AWMSI 是 BGI 复合功能空间分异的主要驱动因子;景观组成类型和网络结构要素类型是 BGI 气候适应性复合功能空间分异的主要交互驱动因子;景观组成类型和网络结构要素类型的 BGI 气候适应性复合功能风险排序分别为:建设用地>水域>未利用地>耕地>草地>林地,孤岛>分支>非>边缘>连接桥>环>穿孔>核心。

研究基于气候适应性视角,探讨 BGI 复合功能空间分异特征,一定程度弥补了内陆城市气候适应性研究的缺失。针对多因子交互作用识别的理论难题,引入 ArcGIS 空间叠加技术和地理探测器,探测景观格局多因子之间的交互作用和驱动机制,为研究区 BGI 规划保护和气候适应性建设提供参考依据。研究主要关注研究区的气候适应性功能研究,后续可进一步结合未来气象特征等进行相关分析研究,为未来中远期气候适应策略的制定及规划的编制等提供支撑。

### 参考文献:

[1] Bao M Z. The role and mission of landscape under

the Background of global climate change [J]. Chin Landsc Archit, 2009, 25: 4. [包满珠. 全球气候变化背景下风景园林的角色与使命[J]. 中国园林, 2009, 25: 4.]

- [2] Ministry of Ecology and Environment. Notice on Issuing, 《National Climate Change Adaptation Strategy 2035》[EB/OL]. (2022-6-7)[2022-8-8]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220613\\_985261.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220613_985261.html). [生态环境部. 关于印发《国家适应气候变化战略 2035》的通知[EB/OL]. (2022-6-7)[2022-8-8]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220613\\_985261.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220613_985261.html).]
- [3] Matthews T, Lo A Y, Byrne J A. Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners [J]. Landsc Urban Plan, 2015, 138: 155.
- [4] Ghofrani Z, Sposito V, Faggian R. A comprehensive review of blue-green Infrastructure concepts [J]. Int J Environ Sustain. 2017, 6: 15.
- [5] Voskamp I M, Van de Ven F H M. Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events [J]. Build Environ. 2015, 83: 159.
- [6] Yu B Q, Che S Q, Yan W, et al. Assessment on the capacity of rain water management by multi-disciplinary methods [J]. Chin Landsc Archit, 2017, 33: 62. [于冰沁, 车生泉, 严巍, 等. 上海城市现状绿地雨洪调蓄能力评估研究 [J]. 中国园林, 2017, 33: 62.]
- [7] Zhang W, Liu X M. Evaluation of green and blue infrastructure regulating and supporting services in Wuhan [J]. Chin Landsc Archit, 2019, 35: 51. [张炜, 刘晓明. 武汉市蓝绿基础设施调节和支持服务价值评估研究 [J]. 中国园林, 2019, 35: 51.]

- [8] Zhao Q Y, Liu J, Shan H L, *et al.* Research on layout optimization of park green space based on alleviating heat island effect [J]. *Chin Landsc Archit*, 2020, 36: 64. [赵秋月, 刘健, 单浩林, 等. 基于减缓热岛效应的公园绿地布局优化研究[J]. *中国园林*, 2020, 36: 64.]
- [9] Liu M Y, Fan J M, Yu Z R. Multifunctional green infrastructure planning: A case study of Haidian district, Beijing [J]. *Chin Landsc Archit*, 2013, 29: 61. [刘孟媛, 范金梅, 宇振荣. 多功能绿色基础设施规划——以海淀区为例[J]. *中国园林*, 2013, 29: 61.]
- [10] Mo S J, Shen S Y, Liao Q L. Landscape design strategy of ventilation corridor in the green heart of CZT urban agglomeration based on WRF model [J]. *Chin Landsc Archit*, 2021, 37: 80. [莫尚剑, 沈守云, 廖秋林. 基于 WRF 模式的长株潭城市群绿心通风廊道规划策略研究[J]. *中国园林*, 2021, 37: 80.]
- [11] Cheng D Y, Li M T, Ding Y Y, *et al.* Assessment of urban waterfront based on the social values of ecosystem services: A case study of the Huangpu River waterfront [J]. *Shanghai Urban Plan Rev*, 2018(5): 125. [程丹阳, 李梦婷, 丁杨洋, 等. 基于生态系统服务社会价值的城市滨水空间评估——以黄浦江为例[J]. *上海城市规划*, 2018(5): 125.]
- [12] Song X, Liu J, Zhao Y. Effect of design factors on the thermal environment in the waterfront area [J]. *Procedia Eng*, 2017, 205: 2677.
- [13] Hu S, Zhang X R, Guan D J. Analysis on carbon storage changes of construction land expansion in Chongqing based on InVEST model [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2018, 25: 323. [虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25: 323.]
- [14] Zou T J, Ni C, Zheng X. Study on the impact of landuse pattern changes on habitat based on CA-Markov and InVEST models—A case study of shallow mountainous areas in Beijing [J]. *Chin Landsc Archit*, 2020, 36: 139. [邹天娇, 倪畅, 郑曦. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局变化对生境的影响研究——以北京浅山区为例[J]. *中国园林*, 2020, 36: 139.]
- [15] Han B L, Ouyang Z Y. The comparing and applying Intelligent Urban Ecosystem Management System (IUEMS) on ecosystem services assessment [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41: 8697. [韩宝龙, 欧阳志云. 城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用[J]. *生态学报*, 2021, 41: 8697.]
- [16] Wang S Y, Wei Q L, Wang Q N, *et al.* Spatio-temporal differentiation of green infrastructure based on moving window method—A case study of Sichuan Tianfu new area and coordination control area [J]. *J Northwest A&F Univ*, 2021, 36: 246. [王诗源, 魏琪力, 王倩娜, 等. 基于移动窗口法的绿色基础设施时空分异研究——以四川天府新区及协调管控区为例[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36: 246.]
- [17] Wu Y P, Wang Q N, Luo Y Y. MSPA methodology based research on the green infrastructure network structure in Chengdu [J]. *J Northwest A&F Univ*, 2017, 32: 260. [吴银鹏, 王倩娜, 罗言云. 基于 MSPA 的成都市绿色基础设施网络结构特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32: 260.]
- [18] Xie Y S, Wang Q N, Luo Y Y. City-level urban green infrastructure evaluation index system based on MSPA—A case study of major cities in Sichuan Province [J]. *Chin Landsc Archit*, 2020, 36: 87. [谢于松, 王倩娜, 罗言云. 基于 MSPA 的市域尺度绿色基础设施评价指标体系构建及应用——以四川省主要城市为例[J]. *中国园林*, 2020, 36: 87.]
- [19] Zhu Y, Wang S, Feng Y Q. Response of the value of wetland ecosystem service in Taihu Basin to the change of landscape pattern in the past 30 years: based on the implementation of the project of restoring the lake from the land [J]. *Chin Landsc Archit*, 2022, 38: 88. [朱颖, 王杉, 冯育青. 近 30 年太湖流域湿地生态系统服务价值对景观格局变化的响应: 基于“退田还湖”工程的实施[J]. *中国园林*, 2022, 38: 88.]
- [20] Wang Y H, Ding J L, Li X H, *et al.* Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River Basin based on an intensity analysis model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42: 3106. [王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 等. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型[J]. *生态学报*, 2022, 42: 3106.]
- [21] Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 116. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72: 116.]
- [22] Pei Z L, Yang Q K, Wang C M, *et al.* Spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Arid Zone Res*, 2019, 36: 546. [裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2019, 36: 546.]

- [23] Xiang Y B, Wang S Y, Deng C X. Spatial differentiation and driving factor of green development efficiency of chemical industry in Yangtze River Economic Belt [J]. *Econ Geogr*, 2021, 41: 108. [向云波, 王圣云, 邓楚雄. 长江经济带化工产业绿色发展效率的空间分异及驱动因素[J]. *经济地理*, 2021, 41: 108.]
- [24] Zhang W J, Sun X Y, Shan R F, *et al.* Spatio-temporal quantification of landscape ecological risk changes and its driving forces in the Nansihu Lake basin during 1975—2018 [J]. *Ecol Sci*, 2020, 39: 172. [张文静, 孙小银, 单瑞峰, 等. 1975—2018 年南四湖流域景观生态风险时空变化及其驱动因素研究[J]. *生态科学*, 2020, 39: 172.]
- [25] Sichuan Provincial Government Office. Reply of the Sichuan Provincial People's Government on the overall plan of Sichuan Tianfu New Area (2010-2030) (2015 Edition) [EB/OL]. (2015-11-12) [2022-11-23]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10684/10694/2015/11/16/10358824.shtml>. [四川省政府办公厅. 四川省人民政府关于四川天府新区总体规划(2010—2030 年)(2015 年版)的批复[EB/OL]. (2015-11-12) [2022-11-23]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10684/10694/2015/11/16/10358824.shtml>.]
- [26] Ceng J K, Zhao J T. Analysis on the causes and countermeasures of rainstorm waterlogging in Chengdu [J]. *Eng Technol Res*, 2019, 4: 206. [曾钧柯, 赵江涛. 成都市暴雨内涝成因与防治对策分析[J]. *工程技术研究*, 2019, 4: 206.]
- [27] Li X C, He Q N, Zhang Y J. Improved SCS-CN model and its spatial scale effect analysis [J]. *South-to-North Water Transf Water Sci & Technol*, 2019, 17: 64. [李鑫川, 贺巧宁, 张友静. SCS-CN 模型的改进及其空间尺度效应[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17: 64.]
- [28] Wang D G, Sun F. Geographic patterns and coupling-coordination between urbanization and land transportation accessibility in the Yangtze River Economic Zone [J]. *Sci Geogr Sin*, 2018, 38: 1089. [汪德根, 孙枫. 长江经济带陆路交通可达性与城镇化空间耦合协调度[J]. *地理科学*, 2018, 38: 1089.]
- [29] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Plos One*, 1997, 387: 253.
- [30] Wang Z H. Study on land use change and its ecological effects in Chengdu Tianfu New District [D]. Chengdu: Sichuan Normal Univ, 2020. [王志豪. 成都天府新区土地利用变化及其生态效应研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2020.]
- [31] Zhang C. The evaluation system of forest creation resources based on GIS [D]. Shanghai: Tongji Univ, 2008. [张澈. 基于 GIS 技术的森林游憩资源评价[D]. 上海: 同济大学, 2008.]
- [32] Zhang P, Zhu X, He Q Y, *et al.* Analysis on the spatial-temporal differentiation and supply-demand balance pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Zone [J]. *Ecol Sci*, 2020, 39: 155. [张平, 朱翔, 贺清云, 等. 长江经济带生态系统服务供需时空分异与平衡格局分析[J]. *生态科学*, 2020, 39: 155.]
- [33] Hou M Y, Yao S B, Deng Y J, *et al.* Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on Sloping Land Conversion Program [J]. *J Nat Resour*, 2019, 34: 539. [侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 网格尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景[J]. *自然资源学报*, 2019, 34: 539.]