

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.013

论文标题： 丹霞山世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的效应研究

作　　者： 汤 辉，郭 意，陈梦玥

收稿日期： 2026-01-28

引文格式： 汤辉,郭意,陈梦玥.丹霞山世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的效应研究[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):140-152.

Tang H, Guo Y, Chen M Y. Effects of ecosystem services on regional sustainable development in the Danxiashan world natural heritage site[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):140-152.

相关论文推荐

Recommended articles

长株潭城市群新型城镇化对生态系统服务价值空间分异的影响

The impact of new urbanization of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration on the spatial differentiation of ecosystem service values

基于生态系统健康指数的宁波四明山区域森林服务功能价值评估

Evaluation of forest service function at the Siming mountain area in Ningbo based on ecosystem health index

长株潭城市群生态系统服务价值与人类活动强度时空关联分析

Temporal and spatial correlation analysis of ecosystem service value and human activity intensity in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

四川省生态系统服务时空异质性及权衡协同关系

Spatiotemporal heterogeneity and trade-offs and synergies of ecosystem services in Sichuan Province

基于供需匹配的洞庭湖区生态保护利用空间识别

Spatial identification of ecological protection and utilization in Dongting lake area based on supply and demand matching

基于生态系统服务功能的国家湿地公园景观质量评价——以黑龙江大兴安岭地区为例

Landscape quality evaluation of national wetland parks based on ecosystem service function: a case study of Daxing'anling area in Heilongjiang Province

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.013 http: //qks.csuft.edu.cn

丹霞山世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的效应研究

汤 辉，郭 意，陈梦玥

（华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642）

摘 要：【目的】揭示世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的影响、异质性特征与效应转化规律，破解遗产保护与区域高质量发展的协调难题，为世界自然遗产地可持续治理与生态产品价值实现提供科学依据。【方法】以丹霞山世界自然遗产地核心区及其所在的仁化县、浈江区为研究单元，基于 2000—2020 年 5 个关键时间节点的多源数据，采用 InVEST 模型测算 4 类调节与支撑服务，构建长时序游憩服务潜在供给能力评估体系与五维区域可持续发展综合指数，通过 Spearman 相关分析、多变量控制回归模型与稳健性检验，识别不同类型、不同尺度生态系统服务对区域可持续发展的效应。【结果】1）丹霞山核心区生态系统服务整体表现优于县域平均水平，调节与支撑服务长期维持稳定，核心区游憩服务潜在供给能力增幅达 10.89%，高于县域的 8.53%，碳储存、生境质量退化幅度亦低于县域；2）区域可持续发展水平呈显著上升趋势，综合指数由 2000 年的 0.093 提升至 2020 年的 0.903，绝对增幅为 0.810，2010 年申遗成功后进入快速跃升阶段，2010—2015 年 5 年增幅为前 10 年增幅的 3.7 倍；3）不同类型生态系统服务对区域可持续发展的效应存在显著异质性，游憩服务呈稳健正向效应，调节服务呈显著负向约束效应，产水量、土壤保持服务的效应无稳定统计显著性；4）生态系统服务对区域可持续发展的效应存在明显空间尺度差异，申遗政策对生态系统服务与区域可持续发展的耦合关系具有显著调节作用。【结论】世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的效应存在显著的类型异质性与尺度差异，需针对不同服务类型、不同空间单元制定差异化管理策略，完善生态价值向区域可持续发展的效应转化机制，推动遗产保护与区域可持续发展协同提升。

关键词：生态系统服务；自然遗产地；可持续发展；InVEST 模型；丹霞山

中图分类号：S759.9；X171.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)09-0140-13

Effects of ecosystem services on regional sustainable development in the Danxiashan world natural heritage site

Tang Hui, Guo Yi, Chen Mengyue

(School of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】To reveal the effects and heterogeneity of ecosystem services (ES) on regional sustainable development (RSD) in world natural heritage sites, address the challenges of coordinating heritage conservation and regional high-quality development, and to provide a scientific basis for sustainable management.【Method】Taking the core zone of the Danxiashan world natural heritage site (a component of the China Danxia world heritage site) and its hosting Renhua County and Zhenjiang district as study units, this research utilized multi-source data across five key time points from 2000 to 2020. The InVEST model was employed to quantify four types of regulating and supporting services. Furthermore, an assessment framework for long-term time-series potential supply of recreational services and a five-dimensional comprehensive RSD index were constructed. Spearman correlation analysis, multivariate controlled regression models, and robustness tests were applied to identify the effects of different types of ES on RSD at different spatial scales.【Result】1) The ES performance of the Danxiashan core zone is generally better than the county-level average. Regulating and supporting services remain stable, while recreational service potential increases by 10.89% in the core zone, higher than the 8.53% at the county scale. Declines in carbon storage and habitat quality are also lower in the core zone; 2) The RSD level increases

收稿日期（Received）：2026-01-28 **修订日期**（Revised）：2026-04-24

基金项目：国家自然科学基金面上项目（42271237）；教育部人文社会科学研究规划基金项目（23YJAZH131）。

第一作者：汤辉（baketys@163.com），副教授，博士，硕士研究生导师。**通信作者：**郭意（selene390@scau.edu.cn），硕士，科研助理。

引文格式：汤辉 , 郭意 , 陈梦玥 . 丹霞山世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的效应研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(9):140-152.

Tang H, Guo Y, Chen M Y. Effects of ecosystem services on regional sustainable development in the Danxiashan world natural heritage site[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):140-152.

significantly, with the composite index rising from 0.093 (Year 2000) to 0.903 (Year 2020), an absolute increase of 0.810. After the 2010 world heritage inscription, the region enters a rapid growth stage, and the increase from 2010 to 2015 is 3.7 times that of the previous decade; 3) The effects of different ES on RSD are significantly heterogeneous. Recreational services show a robust positive effect, while regulating services show a significant negative constraining effect. The effects of water yield and soil conservation show no stable statistical significance on RSD; 4) Pronounced spatial scale differences exist in the effects of ES on RSD, and the world heritage inscription policy plays a significant moderating role in the coupling relationship between ES and RSD.【Conclusion】The effects of ES on RSD in world natural heritage sites are characterized by significant type-specific heterogeneity and spatial scale dependencies. Differentiated management strategies should be formulated according to different service types and spatial units. Improving the transformation mechanism from ecological value to RSD is essential to promote the synergistic enhancement of heritage protection and regional sustainable development.

Keywords: ecosystem services; world natural heritage site; sustainable development; InVEST model; Danxiashan

自然生态系统为人类生存发展提供核心资源支撑与环境保障，生态系统服务与区域可持续发展存在本质关联，其供给能力与结构特征直接影响区域生态安全、经济转型与社会民生改善的协同水平[1]。2005 年千年生态系统评估（Millennium ecosystem assessment，MA）明确指出，生态系统服务的持续退化是制约人类福祉与可持续发展目标实现的核心障碍[2]。世界自然遗产地作为承载全球突出普遍价值的保护地单元，其严格的保护制度深刻改变了区域生态系统结构与人类活动模式，对生态系统服务供给与区域可持续发展产生双重影响[3]。联合国《世界遗产公约》与 2030 年可持续发展议程均强调，世界遗产保护需兼顾生态完整性与社区发展需求，推动遗产保护与区域可持续发展协同增效[4-5]。中国作为世界遗产大国，出台了《世界自然遗产、自然与文化双遗产申报和保护管理办法》等核心政策，强调科学规划、统一管理、严格保护与永续利用，统筹推进世界遗产地生态系统保护、资源利用、社区参与与协调发展[6]。因此，系统识别世界自然遗产地生态系统服务对区域可持续发展的效应与作用机制，对实现遗产地可持续治理、促进人与自然和谐共生具有重要的科学与现实意义。

生态系统服务定量评估是区域可持续发展效应研究的基础，主流方法包括模型模拟法和当量因子法[7]，其中 InVEST 模型因其较强的空间分异刻画能力和多尺度、长时序适配性而被广泛应用[8]。自 Daily 等[9]、Costanza 等[10] 奠定生态系统服务价值核算理论基础以来，谢高地等[11] 结合中国生态系统特征，修订当量因子体系，国内学者围绕不同生态系统服务开展了大量核算并形成成熟评估范式[12-14]。区域可持续发展具有经济、社会、生态多维耦合特征，社会民生改善是其重要表征，其量化评估分主观感知评价与客观指标体系评价两类[15]。MA 将人类福祉划为安全、基本物质、健康、社会关系、选择与行动自由五个维度[2]。但现有评估面临长时序动态刻画不足、跨期可比性偏弱、多尺度统筹欠缺等问题，且大多未能剥离宏观社会经济因素干扰，难以精准识别生态系统服务对区域可持续发展的净效应。国内外对二者关系的实证研究较丰富，如巩芳等[16] 分析了内蒙古草原生态系统服务、草牧产业与牧区可持续发展的耦合，Maharja 等[17] 梳理了海洋塑料污染损害热带沿海生态系统服务，进而影响人类健康与可持续发展的路径。在效应识别上，多用回归或相关分析[18-19]、结构方程模型[20-21] 等方法，揭示影响的区域异质性、非线性与非均衡性，部分研究还关注保护政策冲击，包括可持续发展贡献评估、约束机制识别与政策优化[22-24]。针对世界自然遗产地，现有研究多侧重旅游生态系统能值核算、文化服务空间格局、利益相关者感知及保护与开发互动，如胡继然等[25] 探究了喀拉峻天山草地生态系统服务认知对牧民生计的影响，廖雨辰等[26] 评估了九寨沟灾害冲击下服务价值动态变化，隋春花等[27-28] 围绕丹霞山开展了价值量化与保护开发互动的系列研究，但既有研究多停留在静态耦合特征分析，缺少对申遗前后全周期的长时序动态追踪，且普遍默认二者线性关联，对严格保护制度下不同生态系统服务影响区域可持续发展的异质性与尺度差异识别不足，难以解释遗产地“生态保护强化与民生发展约束并存”的现实悖论。

丹霞山世界自然遗产地作为“中国丹霞”系列遗产的核心组成部分，是我国丹霞地貌的命名地与典型发育区，地处南岭山脉中段生态屏障核心区域，在我国世界遗产保护体系与粤北生态安全格局中具有不可替代的地位。2010 年申遗成功后，丹霞山生态保护管控强度显著提升，依托遗产资源发展的生态旅游推动了周边仁化县、浈江区的经济社会转型，形成了“严格生态保护 + 旅游产业带动”的人地互动格局，其保护与发展的

协同路径对我国同类型世界遗产地具有重要的借鉴意义。基于此，本研究以丹霞山世界自然遗产地核心区及其所在的仁化县、浈江区为研究单元，以 2000、2005、2010、2015 及 2020 年 5 个时间节点为研究时序，采用 InVEST 模型测算四类调节与支撑服务，从供给侧构建长时序游憩服务潜在供给评估体系，以 MA 五维指标表征区域可持续发展的社会维度，通过 Spearman 分析、多变量控制回归及稳健性检验，识别不同类型、不同尺度生态系统服务的净效应与异质性。研究覆盖申遗前后全周期，揭示严格保护制度下的效应异质性规律，完善长时序游憩服务评估方法，为丹霞山及同类遗产地保护与发展协同提供科学参考。

1　研究区概况与数据来源

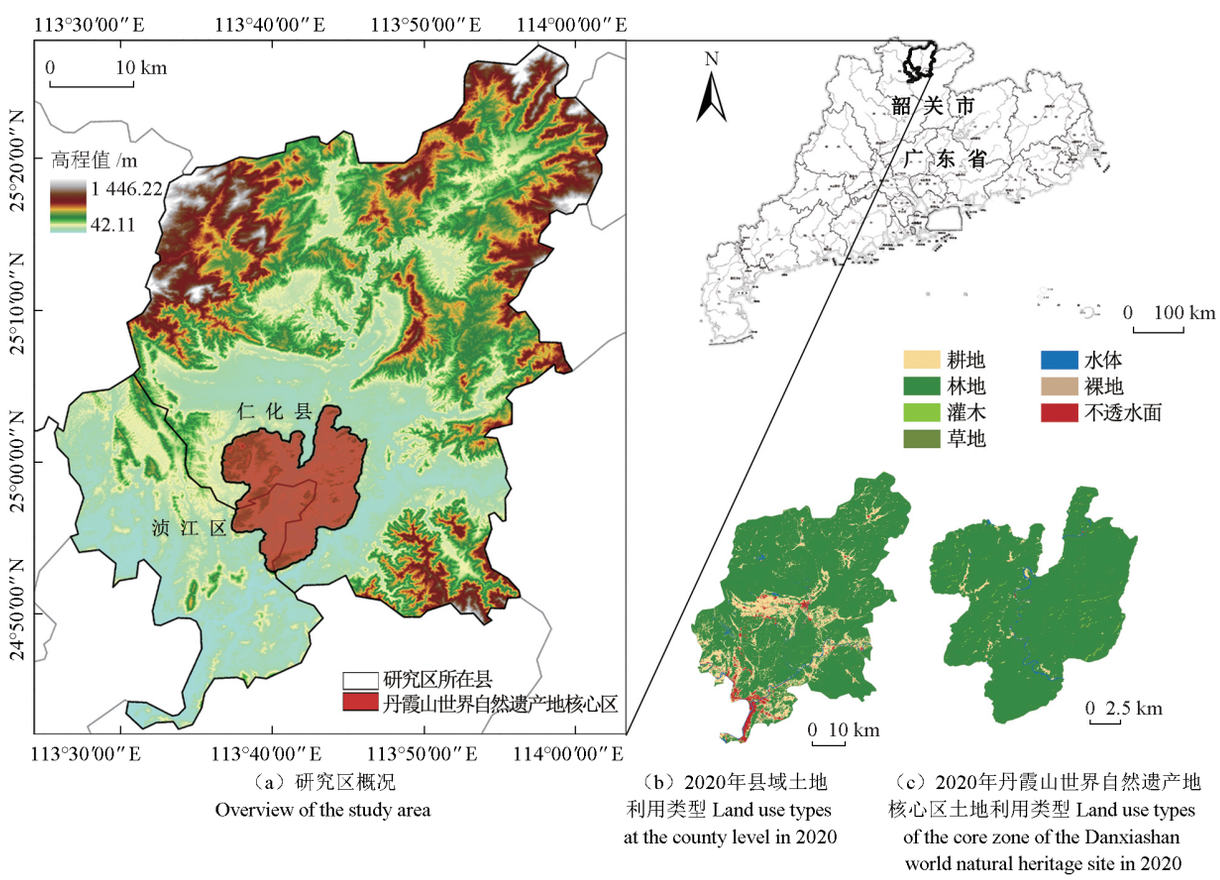
1.1　研究区概况

丹霞山世界自然遗产地位于广东省韶关市，核心区跨仁化县与浈江区（图 1），地处南岭山脉中段。区域以红色砂岩和砾岩构成的峰林、峰丛、峡谷与陡崖地貌为主要特征，地形起伏显著，水热条件优越，森林植被覆盖率较高，是南岭地区重要的水源涵养地和生态安全屏障。2010 年，丹霞山作为“中国丹霞”重要组成部分被列入《世界自然遗产名录》，生态保护制度不断完善，管理强度大幅加强，持续优化了区域土地利用格局与生态系统结构。

1.2　数据来源和处理

研究数据主要包括三大类：1）研究区空间基础数据，包括自然遗产地核心区边界以及县域行政区划边界，用于空间裁剪与分区统计；2）生态系统服务供给侧数据，包括土地覆被、数字高程模型、气象数据、土壤数据以及植被总初级生产力数据，用于 InVEST 模型运行与游憩服务潜在供给能力构建；3）县域社会经济统计数据，用于构建区域可持续发展指标体系，并开展生态系统服务对区域可持续发展的效应分析（表 1）。

为保证多源数据的空间一致性与时序可比性，所有空间数据统一投影至 CGCS2000 坐标系统，并依据模型运行需求统一栅格空间分辨率与空间范围。植被总初级生产力（Gross primary productivity，GPP）采用 MOD17A3HGF V6.1 产品，其有效时序始于 2001 年，无 2000 年有效观测数据。



（a）研究区概况
Overview of the study area

（b）2020年县域土地利用类型 Land use types at the county level in 2020

（c）2020年丹霞山世界自然遗产地核心区土地利用类型 Land use types of the core zone of the Danxiashan world natural heritage site in 2020

图 1　研究区概况
Fig. 1　Overview of the study area

表 1　数据来源及描述
Table 1　Data source and description

数据类别 Data categories	具体数据项 Specific data items	空间分辨率 Spatial resolution	获取来源 Source
研究区基础数据 Basic data of the study area	丹霞山遗产地核心区边界		World Database on Protected and Conserved Areas (WDPA)（https：//www.protectedplanet.net/en）
	行政区划边界		国家基础地理信息中心行政区划可视化（https：//cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision）
生态系统服务供给侧数据 Ecosystem services supply-side data	土地覆被（CLCD）	30 m	IRSIP（https：//irsip.whu.edu.cn/resv2/CLCD.php#）
	数字高程模型（SRTM）	30 m	国家地球系统科学数据中心（https：//www.geodata.cn/main/）
	气象数据（PRE、EVP）	1 000 m	中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/）
	土壤数据（θfc、θwp、DTB）	250 m、100 m	ISRIC–World Soil Information（https：//soilgrids.org）和科学数据（http：//globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp）
	植被总初级生产力（MOD17A3HGF V6.1）	500 m	NASA（https://search.earthdata.nasa.gov/）
区域可持续发展代理侧数据 Regional sustainable development proxy data	县域社会经济统计数据		《中国县域统计年鉴》《韶关统计年鉴》

为保证时序完整，以 2001 年 GPP 数据替代 2000 年数据；因短时间内植被生产力年际波动较小，研究区同期无极端事件，该处理不影响结果稳健性。县域社会经济统计数据中存在个别年份缺失值，采用线性插值法进行补齐处理。

2　研究方法

2.1　生态系统服务评估方法

2.1.1　基于 InVEST 模型的生态系统服务计算

采用 InVEST 模型对丹霞山世界自然遗产地及其所在县域（所在县区合并区域）在 2000、2005、2010、2015 与 2020 年的生态系统服务进行定量评估，选取碳储存（Carbon storage，CS）、产水量（Water yield，WY）、土壤保持（Soil conservation，SC）与生境质量（Habitat quality，HQ）作为核心指标，以刻画遗产地生态系统的调节与支撑功能。模型运行所需的输入数据及计算流程均严格遵循 InVEST 模型用户指南，各模块参数设置则结合模型推荐值、FAO56 作物蒸散发计算指南、IPCC 碳密度参数体系以及 RUSLE 土壤侵蚀模型进行确定。

2.1.2　游憩服务指数计算

考虑到研究时间跨度较长，历史时期景点 POI、游客轨迹与到访规模等行为数据难以完整获取，且不同时期旅游设施与信息记录方式存在显著差异，直接引入 POI 或行为数据容易造成跨期不可比与系统性偏差。基于此，从生态系统供给视角出发，将游憩服务界定为自然景观所提供的潜在游憩吸引与体验基础，重点评估丹霞山世界自然遗产地的游憩服务潜在供给能力。该潜在能力主要由区域自然景观的生态活力与景观吸引力决定。本研究以 GPP 为核心表征变量，并结合植被覆盖状况及水体等自然要素的综合作用进行解释，从而在缺乏长期一致的游客行为数据条件下，保持指标体系在 2000—2020 年期间的可比性与稳健性。

2.2　区域可持续发展指标构建方法

区域可持续发展具有经济、社会、生态多维耦合特征，其社会民生维度的核心体现为区域内居民在既定社会经济条件下，获得健康生活、社会参与与自主发展的综合能力状态 [2,5]。本研究基于 MA 构建的经典五维民生发展评估框架，并结合县域尺度数据可得性，构建对应区域可持续发展社会民生维度的五维指标体系 [29]（表 2）。为确保跨指标可比性，先将总量型指标转化为人均或万人强度指标。

丹霞山世界自然遗产地横跨两个县级行政单元。由于遗产地未作空间拆分，整体作为一个研究对象，为保持研究尺度一致性，采用基于人口规模的县域加权整合方法对两个县的统计年鉴数据进行合并处理。其中，总量型指标按年份汇总，人均型指标采用常住人口加权平均。随后对各指标进行极值标准化以消除量纲差异：

$$Z_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_j)}{\max(X_j)-\min(X_j)}。\quad（1）$$

式中：Z_{ij} 为标准化后的指标值；X_{ij} 表示第 i 年第 j 个区域可持续发展指标的原始值；X_j 指代第 j 项指标的全时间序列原始值集合，$\max(X_j)$、$\min(X_j)$ 分别为第 j 项指标在整个研究时序（2000—2020 年）

表 2 区域可持续发展五维指标体系及指标层权重 †

Table 2 Five-dimensional indicator system and indicator-level weights of regional sustainable development

指标 Indicator	因子 Factor	单位 Unit	计算方法 Calculation method	指标性质 Indicator type	权重 Weight
安全 Security	各种社会福利收养性单位床位数	张 / 万人	福利床位总数 ÷ 常住人口 ×10 000	+	0.179
基本物质需求 Basic material need	地区生产总值	元 / 人	县域 GDP÷ 年末总人口	+	0.105
	社会消费品零售总额	元 / 人	社会消费品零售总额 ÷ 常住人口	+	0.166
健康 Health	医疗卫生机构床位数	张 / 万人	医疗床位总数 ÷ 常住人口 ×10 000	+	0.165
良好的社会关系 Good social relation	普通中学在校学生数	人 / 万人	普通中学在校学生数 ÷ 常住人口 ×10 000	+	0.083
	小学在校学生数	人 / 万人	小学在校学生数 ÷ 常住人口 ×10 000	+	0.091
选择与行动的自由 Freedom of choice and action	人均可支配收入	元	统计年鉴公布的人均可支配收入	+	0.211

† “+”表示正向指标，即指标值越大，区域可持续发展水平越优。

“+” indicates a positive indicator, that is, the higher the indicator value, the better the level of regional sustainable development.

内的最大值与最小值。

为规避主观赋权的人为偏差，采用熵值法确定 7 项基础指标权重。熵值法以指标数据的客观离散程度为赋权依据，可在一定程度上减少主观赋权偏差，并以此构建区域可持续发展综合指数（Regional sustainable development，RSD）：

$$R_i = \sum_{i=1}^{7} w_j Z_{ij} \text{ 。} \quad (2)$$

式中：R_i 为第 i 年区域可持续发展综合指数；w_j 为第 j 项基础指标的熵值权重；Z_{ij} 为公式（1）计算得到的第 i 年第 j 项基础指标标准化值。

2.3 生态系统服务对区域可持续发展的效应分析方法

2.3.1 相关性检验

鉴于生态系统服务指标与区域可持续发展综合指数在小样本年份（2000、2005、2010、2015、2020 年）下可能存在非正态分布及非线性单调关系，采用 Spearman 相关系数对生态系统服务与区域可持续发展综合指数（五维分项指数）之间的相关性进行检验。

2.3.2 回归模型

1）回归模型的构建。

为进一步识别生态系统服务对区域可持续发展的净效应，在相关性检验基础上构建控制变量回归模型。考虑到宏观社会经济条件可能同时影响生态系统服务与区域可持续发展水平，从而造成遗漏变量偏误，因此模型中引入社会经济控制变量，并通过标准化回归系数（β）刻画不同生态系统服务对区域可持续发展影响的相对强度。模型形式如下：

$$Y_i = \alpha + \beta e_i + \sum_{k=1}^{m} \gamma_k x_{ki} + \varepsilon_i \text{ 。} \quad (3)$$

式中：Y_i 为回归分析中的被解释变量，其观测值来源于公式（2）计算得到的区域可持续发展综合指数；e_i 为第 i 年生态系统服务指标；x_{ki} 为第 i 年第 k 个控制变量的取值；α 为常数项；β 和 γ_k 为待估计系数；ε_i 为随机误差项。

2）控制变量的选择。

为减少遗漏变量偏误干扰生态系统服务对区域可持续发展的效应估计，在模型中引入若干控制变量，以控制宏观经济发展与人口规模变化对区域可持续发展水平的潜在影响。首先，选取固定资产投资总额作为区域发展强度的代理变量。固定资产投资能够反映区域基础设施建设、产业扩张与公共投入水平，其变化可通过改善生产条件与公共服务供给间接影响区域可持续发展水平。为缓解尺度差异与异方差问题，对该变量进行自然对数转换处理。其次，引入地区总人口规模作为人口控制变量。人口规模变化可影响资源配置效率、公共服务承载压力及社会结构特征，从而对区域可持续发展综合水平产生结构性影响。同样，为降低数据波动性并提高模型稳定性，对人口变量取自然对数形式。最后，两类控制变量均与核心被解释变量保持一致的统计口径与时间跨度，以保障估计结果的稳健性。

2.3.3 稳健性模型设定

为检验基准回归结论的稳健性，进一步构建两类稳健性模型。

1）遗产政策阶段模型。

考虑 2010 年丹霞山列入世界自然遗产名录可能带来的治理与保护强度变化，引入政策阶段虚拟变量（2010 年及以前为 0，2015 年及以后为 1），构建阶段控制模型：

$$Y_i = \alpha + \beta e_i + \sum_{k=1}^{m} \gamma_k x_{ki} + \delta d_i + \varepsilon_i \text{ 。} \quad (4)$$

式中：δ 为政策阶段虚拟变量的回归系数；d_i 为遗产政策阶段虚拟变量；其余变量含义同公式（3）。

2）时间趋势模型。

为控制宏观时间变化趋势对区域可持续发展序列的系统性影响，引入时间趋势项，构建趋势稳健性模型：

$$Y_i = \alpha + \beta e_i + \sum_{k=1}^{m} \gamma_k x_{ki} + \theta q_i + \varepsilon_i \text{。} \quad (5)$$

式中：θ 为时间趋势变量的回归系数；q_i 为时间趋势变量；其余变量含义同公式（3）。

若核心解释系数 β 的符号方向与显著性水平在不同模型中保持一致，则认为生态系统服务对区域可持续发展的影响结论具有较强稳健性。

3　结果与分析

3.1　生态系统服务时序变化特征

2000—2020 年，丹霞山核心区生态系统服务呈现“调节支撑服务稳定、游憩服务总体提升”的演化特征。基于 InVEST 模型的测算结果表明，丹霞山核心区生态系统服务整体表现优于县域平均水平（表 3）。从具体服务的时序变化来看，碳储存总量在研究期内略有下降，县域尺度下的碳储存下降幅度（约 3.48%）高于核心区（约 0.47%）。产水量表现出较强的阶段性波动，核心区由 2000 年的 0.965×10^8 m^3 增至 2015 年的 1.794×10^8 m^3，随后在 2020 年下降至 1.287×10^8 m^3；县域产水量同期由 17.076×10^8 m^3 增至 30.123×10^8 m^3 后下降至 22.330×10^8 m^3。水土保持与生境质量指数整体保持在较高水平，变化幅度相对有限。作为游憩服务潜在供给能力的表征指标，GPP 在研究期内总体呈上升趋势，核心区由 2000 年的 3.685×10^8 gC 增长至 2020 年的 4.086×10^8 gC，增幅为 10.89%；县域 GPP 同期由 61.767×10^8 gC 增至 67.038×10^8 gC，增幅为 8.53%。

从空间分布特征（图 2）来看，丹霞山生态系统服务存在明显的空间异质性，整体表现为核心区向周边梯度递减、自然生态系统服务价值高于人工生态系统的空间分异特征。丹霞山世界自然遗产地各类生态系统服务高值区主要集中分布于核心区及县域北部、东部的连片山地林地分布区，而县域范围内低值区则多分布于县域西南部的城镇建成区、河谷平原的耕地集中分布区。整体而言，丹霞山核心区生态系统服务供给水平显著高于县域平均水平，其在县域生态系统服务供给中属于高值核心区域。

3.2　区域可持续发展水平变化特征

2000—2020 年，研究区可持续发展能力持续增强，整体呈阶梯式上升的时序演化特征。2000、2005、2010、2015 和 2020 年 5 个时间剖面的区域可持续发展综合指数（表 4、图 3）显示，RSD 由 2000 年的 0.093 提升至 2020 年的 0.903，绝对增幅为 0.810，约为基期水平的 9.7 倍，说明研究期内区域可持续发展水平持续提升。分阶段看，2000—2010 年 RSD 处于低位缓慢增长阶段；2010—2015 年增速明显加快，RSD 由 0.199 提升至 0.590，为区域可持续发展水平跃升的关键阶段；2015—2020 年 RSD 在较高基数上继续增长，至 2020 年达到 0.903，表明区域可持续发展已由“快速增长”转向“稳步优化”。

表 3　2000—2020 年生态系统服务时序变化

Table 3　Temporal changes of ecosystem services from 2000 to 2020

年份 Year	评价尺度 Evaluation scale	碳储存 CS /(10^7 t)	产水量 WY /(10^8 m^3)	土壤保持 SC /(10^7 t)	生境质量 HQ	植被总初级生产力 GPP /(10^8 g)
2000	丹霞核心区	4.068	0.965	2.024	0.862	3.685
	县域	57.695	17.076	27.453	0.881	61.767
2005	丹霞核心区	4.069	1.251	2.146	0.863	3.492
	县域	57.613	19.695	29.297	0.883	58.313
2010	丹霞核心区	4.068	1.346	2.117	0.862	3.346
	县域	57.055	20.907	27.860	0.881	58.154
2015	丹霞核心区	4.054	1.794	2.137	0.860	3.837
	县域	55.898	30.123	28.286	0.879	62.734
2020	丹霞核心区	4.049	1.287	2.005	0.857	4.086
	县域	55.689	22.330	27.756	0.876	67.038
变化率 Changing rate /%	丹霞核心区	−0.470	33.370	−0.960	−0.480	10.890
	县域	−3.480	30.770	1.100	−0.570	8.530

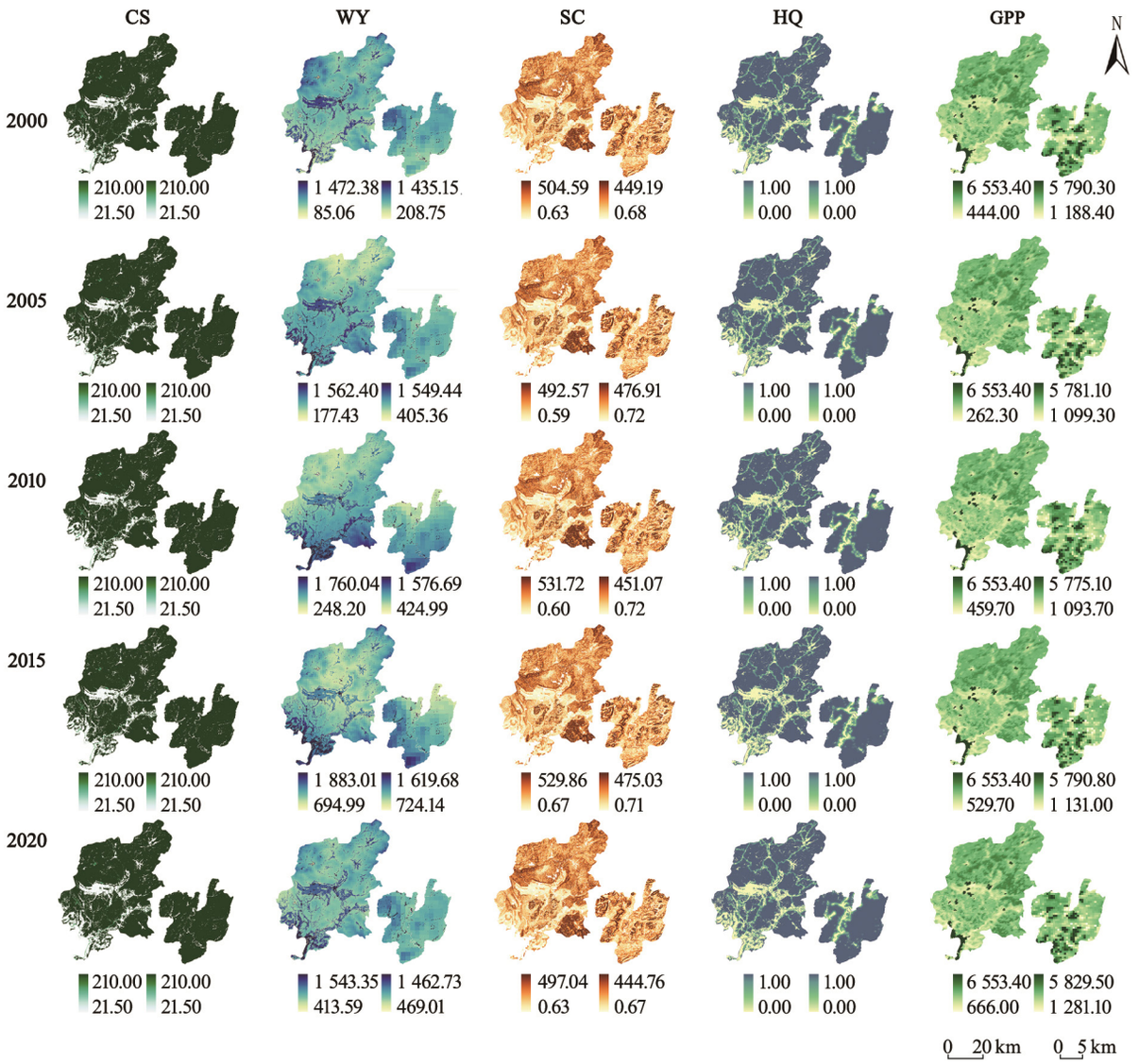


图 2　2000—2020 年生态系统服务的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of ecosystem services from 2000 to 2020

表 4　2000—2020 年区域可持续发展各维度及综合指数

Table 4　Regional sustainable development by dimension and composite index from 2000 to 2020

年份 Year	安全 Security	基本物质需求 Basic material need	健康 Health	良好的社会关系 Good social relation	选择与行动的自由 Freedom of choice and action	区域可持续发展综合指数 Regional sustainable development
2000	0.268	0	0.003	0.410	0	0.093
2005	0.101	0.159	0.104	0.620	0.049	0.158
2010	0.000	0.422	0.292	0.266	0.252	0.199
2015	0.826	0.731	0.585	0.273	0.602	0.590
2020	1.000	0.960	1.000	0.500	1.000	0.903
绝对增幅 Absolute increase	0.732	0.960	0.997	0.090	1.000	0.810

从维度构成看，不同维度的提升幅度与节奏存在差异。健康、选择与行动的自由以及基本物质需求提升最为显著，其中健康由 0.003 上升至 1.000，选择与行动的自由由基期低值提升至 1.000，基本物质需求由基期低值提高至 0.960，构成 RSD 提升的主要来源。安全在前期波动调整后，于 2015 年进入明显上升通道并达到较高水平。相比之下，良好的社会关系波动幅度相对较小，长期维持在 0.266 ～ 0.620，呈现较强的稳定性。

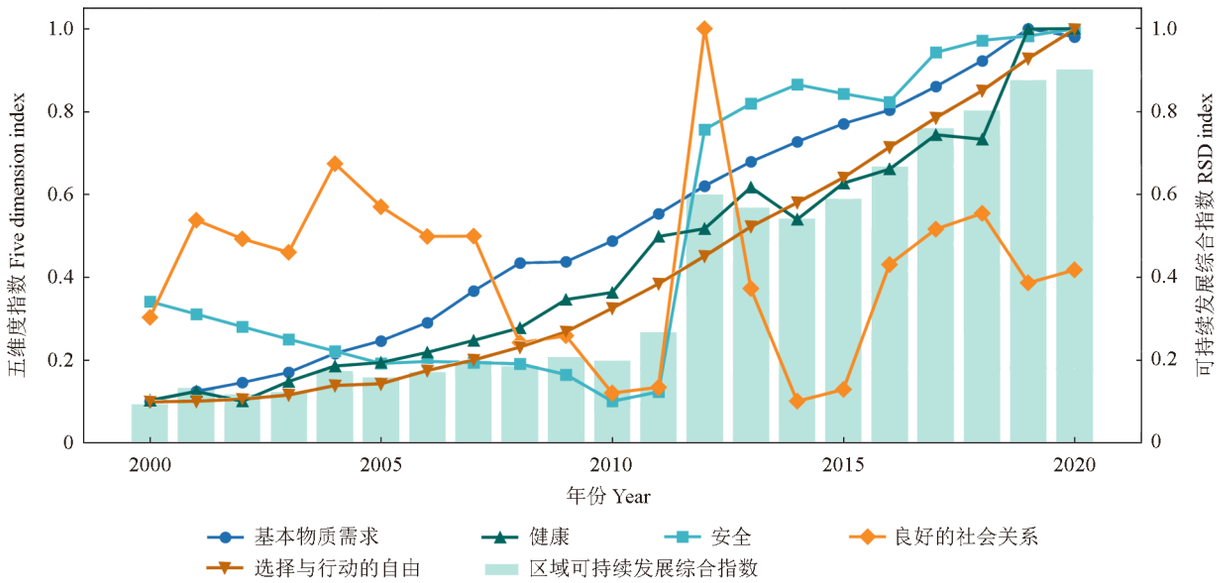


图 3　2000—2020 年区域可持续发展分维度与综合指数时序演变趋势

Fig. 3　Temporal evolution trends of regional sustainable development by dimension and composite index from 2000 to 2020

参照 UNDP 相关研究中常用的综合发展层级划分思路，将研究区的区域可持续发展水平划分为低水平（RSD ＜ 0.55）、中等水平（0.55 ≤ RSD ＜ 0.70）、高水平（0.70 ≤ RSD ＜ 0.80）和极高水平（RSD ≥ 0.80）4 个层级 [30]。结果显示，在研究期内区域可持续发展水平发生了显著的层级跃迁：2000—2010 年总体处于低水平阶段；2015 年 RSD 达到 0.590，进入中等水平阶段；至 2020 年 RSD 达到 0.903，进入极高水平阶段。总体而言，各维度由低水平向高水平的跃升主要集中在 2010 年以后，尤其是健康、选择与行动的自由等相关维度的显著提升，印证了研究区可持续发展由低水平基础保障型向中高水平多维协同提升的转变。

3.3　生态系统服务对区域可持续发展的效应分析

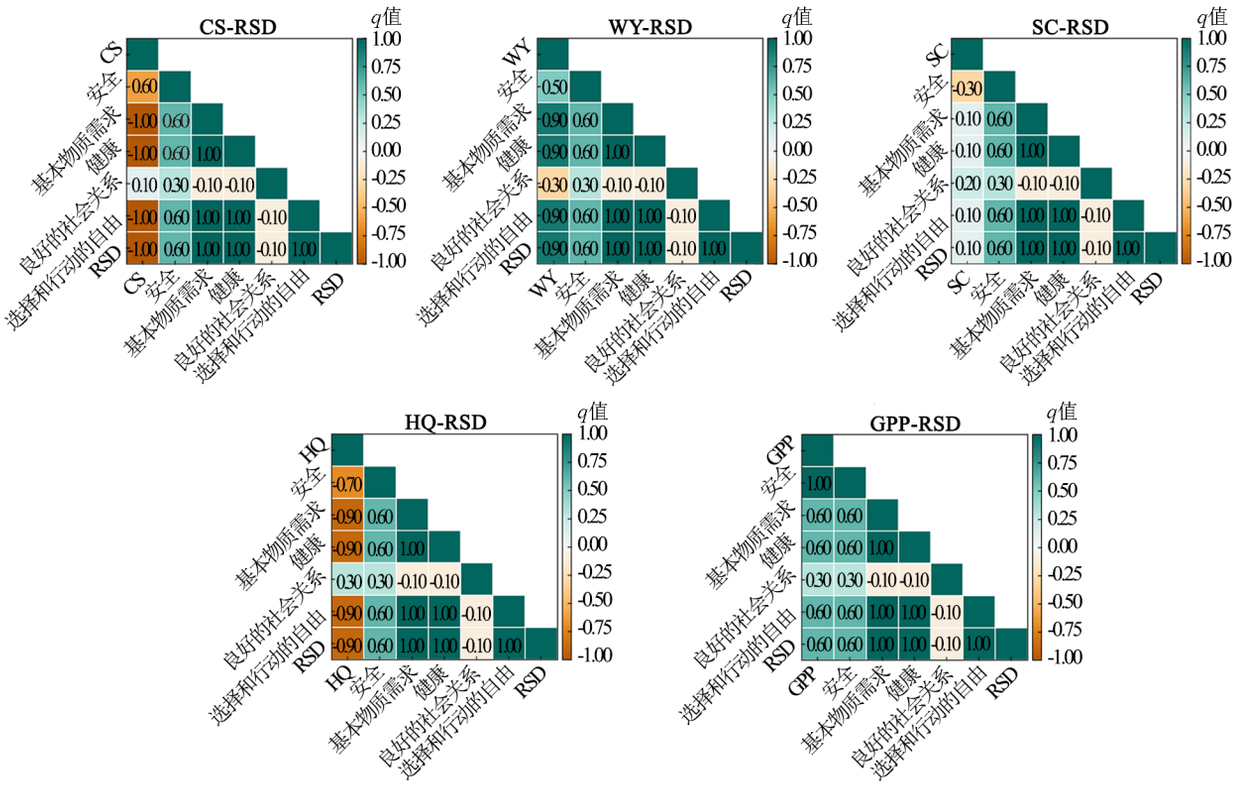
生态系统服务对区域可持续发展的影响具有显著的类型异质性与尺度差异。Spearman 相关分析结果（图 4）表明，GPP 与 RSD 呈稳定的正向关联，而生境质量与碳储存则表现为稳定的负向关联。产水量与土壤保持的相关性整体偏弱或方向不稳定，且在不同空间尺度下表现出一定差异。县域尺度与核心区尺度的相关方向总体一致，但相关强度存在差别，核心区尺度下 GPP 与产水量对 RSD 的正向关联程度整体高于县域尺度，而碳储存与生境质量的负向关联在县域尺度上表现更为突出。

在控制固定资产投资、人口规模及制度变迁因素后，回归结果进一步揭示了生态系统服务对区域可持续发展的净效应（图 5）。总体而言，GPP 在县域与核心区均呈显著的正向影响，且核心区的正向效应幅度与县域相当。碳储存与生境质量在两种尺度下均为显著负向，其中县域尺度上对碳储存的负向效应更强。产水量与土壤保持在控制模型中表现出更明显的尺度差异，产水量在县域为正向但不显著，在核心区接近于零且不显著；土壤保持在县域不显著，在核心区呈边际负向。与相关性分析结果相比，回归系数方向总体保持一致，即主要影响关系具有一定稳定性。在替换时间变量设定后，核心结论未发生实质性改变。当以 Year 趋势项替代 Post2010 后，GPP 的正向效应在县域与核心区仍保持高度显著，生境质量与碳储存的显著负向效应也持续存在。与此同时，尺度差异进一步凸显，核心区的土壤保持在稳健性模型中转为显著负向，而县域土壤保持仍不显著；县域产水量呈边际正向，但核心区产水量依旧不显著。整体而言，GPP 对 RSD 的正向效应在两类尺度下均表现稳健；而产水量与土壤保持对区域可持续发展的影响在不同尺度下存在差异。

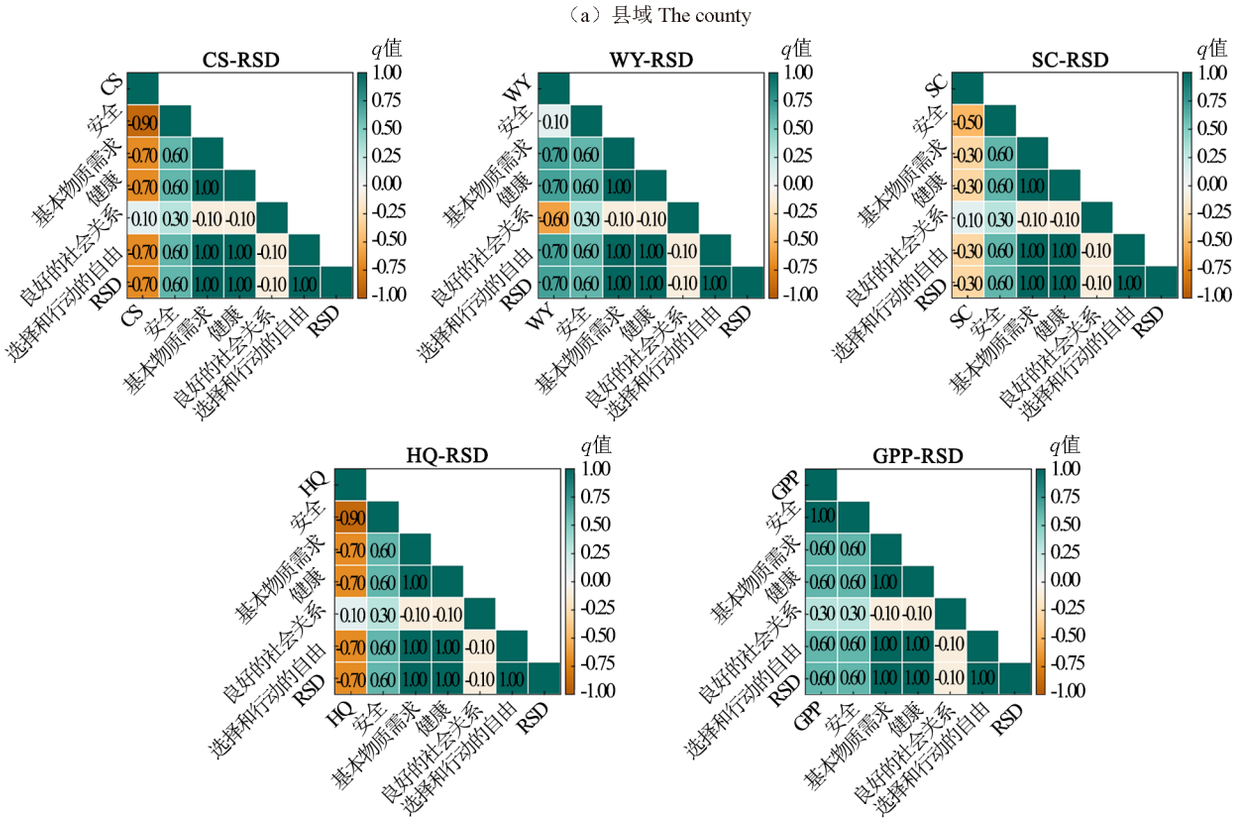
4　讨　论

4.1　生态系统服务与区域可持续发展时序演化的驱动机制

研究区生态系统服务供给与区域可持续发展的时序演化，是自然本底条件、遗产保护政策与区域社会经济发展共同作用的结果，其演化轨迹与研究区关键制度变迁、宏观发展背景高度吻合。自然本



（a）县域 The county

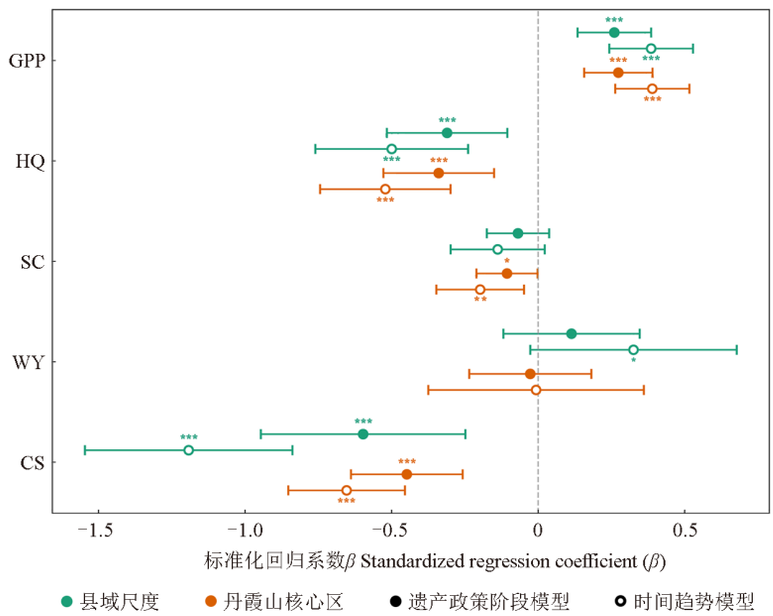


（b）丹霞山世界自然遗产地核心区 Core zone of the Danxiashan world natural heritage site

图 4 Spearman 热力图

Fig. 4 Spearman heatmap

底的先天禀赋是生态系统服务稳定供给的基础，丹霞山核心区优越的水热条件与原生植被格局，使得碳储存、生境质量、土壤保持等调节与支撑服务长期维持高位稳态，为生态系统服务稳定供给提供了先天保障。遗产保护的刚性管控是生态系统服务保育的核心机制，2010 年申遗后实施的严格保护制度，有效遏制了核心区生态破坏，成为支撑生态系统服务稳定、提升游憩服务供给潜力的关键制度动



***, $P < 0.01$; **, $P < 0.05$; *, $P < 0.1$.

图 5　标准化回归系数森林图

Fig. 5　Forest plot of standardized regression coefficients

力。县域城镇化进程中的用地挤占效应是导致县域碳储存小幅下降的核心因素，城镇扩张侵占生态用地，造成县域调节服务出现轻度退化，这一变化特征与南岭生态屏障区同类区域保持一致。区域可持续发展的阶段性跃升，可能源于申遗成功的品牌效应与生态旅游产业的联动发展，进而带动区域经济社会水平整体提升，后续可通过中介效应模型进一步验证该传导路径。

4.2　生态系统服务对区域可持续发展效应的异质性规律与理论启示

不同类型生态系统服务对区域可持续发展的影响存在显著的异质性特征，丰富了对生态系统服务供给与区域可持续发展非线性、异质性关系的认知，为世界遗产地人地系统耦合研究提供了新的区域经验证据。以植被总初级生产力表征的游憩服务，在核心区与县域均呈现出稳健的显著正向效应，表明该服务潜力可通过生态旅游转化为居民经济收益与就业机会，实现了生态供给向区域可持续发展效应的直接转化，该转化路径与千年生态系统评估中文化服务与民生发展直接关联的理论框架高度契合。相比之下，碳储存、生境质量等调节服务则呈现出显著的负向影响，且县域尺度的负向效应更为突出。结合研究区生态系统服务的空间分异特征——碳储存、生境质量高值区多集中于远离城镇的山地生态保护区，这类区域经济发展基础薄弱、公共服务供给不足，同时严格的遗产保护制度进一步限制了区域的开发建设活动，若跨区域生态补偿机制未能充分覆盖保护的机会成本，便可能出现“生态价值外溢 - 保护成本本地承担”的现象，进而导致调节服务供给与本地区域可持续发展水平呈现负向关联。核心区与县域的尺度差异，源于空间功能定位与管控强度的差异：核心区作为遗产保护的核心单元，实施最严格的生态管控，保障了景观资源的完整性与游憩服务供给能力，游憩价值的转化效率被最大化释放；而县域范围同时承担了生态保护与城镇化、产业发展的双重功能，生态保护的机会成本在县域范围体现得更为充分，因此碳储存与生境质量的负向效应在县域尺度更为显著。遗产保护制度通过情境调节机制，重塑生态系统服务与可持续发展的耦合关系：申遗带来的管控升级与品牌赋能，既强化了游憩服务的价值转化能力，也加剧了调节服务的成本内化矛盾，是驱动效应异质性的关键制度因素。此外，产水量与土壤保持的可持续发展效应在多数模型设定下未达到统计显著水平，且结果稳定性较差。一方面，区域可持续发展指标体系未纳入供水安全、防灾减灾等对应维度，难以捕捉这类调节服务对区域可持续发展的支撑作用；另一方面，这类服务对区域可持续发展的作用可能存在更复杂的空间溢出与滞后效应，有待未来在更精细尺度下结合更丰富的指标进行深入探究。

4.3　遗产地管理启示

丹霞山世界自然遗产地正处于严格生态保护

与区域高质量发展协同推进的关键阶段。基于植被总初级生产力表征的游憩服务潜在供给能力呈稳定正向效应、碳储存与生境质量等调节与支撑服务呈负向关联的结果，说明丹霞山生态系统服务对区域可持续发展的效应存在显著类型异质性，可为遗产地差异化管理与生态价值转化机制优化提供实证依据。针对游憩服务的正向可持续发展效应，应重点优化其向区域发展收益与民生改善的转化路径，探索通过完善生态旅游的社区参与和收益分配机制，让周边居民更充分地分享遗产旅游发展的红利。针对调节服务的负向约束效应，应高度关注保护成本在当地的分配问题，积极探索建立跨区域生态保护补偿机制等政策工具，以破解遗产保护与民生发展之间的潜在矛盾。基于核心区与县域的尺度差异，应充分考虑不同空间单元在管控强度与发展功能上的差异，实施分区差异化的管理与补偿策略：核心区以严格维持生态系统完整性、保障核心生态系统服务供给能力为核心，县域范围则需更精细地统筹协调生态保护与城镇化发展的关系。

5 结 论

1）丹霞山世界自然遗产地生态系统服务呈显著的空间分异特征，核心区生态系统服务整体表现优于县域平均水平；研究期内调节与支撑服务长期维持稳定，以植被总初级生产力表征的游憩服务潜在供给能力总体呈上升趋势。

2）研究区的区域可持续发展水平呈持续跃升趋势，2010年申遗成功后进入快速增长阶段，健康、选择与行动的自由、基本物质需求三个维度是区域可持续发展综合指数提升的核心贡献来源。

3）不同类型生态系统服务对区域可持续发展的效应存在显著异质性，游憩服务是唯一对区域可持续发展具有稳定显著正向影响的服务类型，碳储存、生境质量等调节服务呈显著负向效应，产水量、土壤保持服务对区域可持续发展的效应未表现出稳定的统计显著性。

4）生态系统服务对区域可持续发展的效应存在明显的空间尺度差异，调节服务的负向效应在县域尺度更为突出，申遗政策对生态系统服务与区域可持续发展的耦合关系具有显著调节作用，是影响遗产地人地系统耦合关系的关键情境因素。

当前研究仍存在可优化的空间。现有分析主要聚焦县域与遗产核心区双尺度，且产水量、土壤保持等服务对区域可持续发展的效应尚不明确，后续可下沉至乡镇、栅格尺度，并结合更长时间序列、更高频率的数据，进一步揭示生态系统服务对区域可持续发展效应的微观空间分异机制。现有区域可持续发展指标体系仅采用客观统计数据构建，未能涵盖居民的主观感受，后续可结合问卷调查、空间感知数据与行为数据，进一步完善对世界自然遗产地区域可持续发展效应的综合测度，更全面地解析生态系统服务向区域可持续发展转化的深层路径与制约因素。

参考文献：

[1] Yao X R, Fang S J. Exploring the coupling of ecosystem services and human well-being: evidence from Chinese cities through interpretable machine learning[J]. Ecological Indicators,2025, 180:114315.

[2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis[M]. Washington DC: Island Press,2005:11-19.

[3] Gui Y L, Ma Y W, Chen Y M, et al. Ecosystem services in UNESCO World Heritage sites: a review of research trends and future directions[J]. npj Heritage Science,2026,14:115.

[4] UNESCO World Heritage Centre. Operational guidelines for the implementation of the world heritage convention[M]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization,2023:125-137.

[5] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development[EB/OL]. [2026-03-06]. https://docs.un.org/ en/A/RES/70/1.

[6] 住房和城乡建设部 . 住房和城乡建设部关于印发世界自然遗产、自然与文化双遗产申报和保护管理办法（试行）的通知 [EB/OL]. [2026-04-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5054751.htm.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Notice on issuing the measures for the application and protection administration of world natural heritage and mixed cultural and natural heritage (Trial)[EB/OL]. [2026-04-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5054751.htm.

[7] 陈东军 , 钟林生 . 生态系统服务价值评估与实现机制研究综述 [J]. 中国农业资源与区划 ,2023,44(1):84-94.
Chen D J, Zhong L S. Review of the value evaluation and realization mechanism of ecosystem services[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2023,44(1): 84-94.

[8] 李丽 , 王心源 , 骆磊 , 等 . 生态系统服务价值评估方法综述 [J]. 生态学杂志 ,2018,37(4):1233-1245.
Li L, Wang X Y, Luo L, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. Chinese Journal of Ecology,

2018,37(4):1233-1245.

[9] Daily G C, Postel S, Carpenter S R, et al. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C: Island Press,1997:65-71.

[10] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature,1997,387: 253-260.

[11] 谢高地 , 张彩霞 , 张雷明 , 等 . 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报 ,2015,30(8): 1243-1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8):1243-1254.

[12] 欧阳志云 , 朱春全 , 杨广斌 , 等 . 生态系统生产总值核算 : 概念、核算方法与案例研究 [J]. 生态学报 ,2013,33(21):6747-6761.
Ouyang Z Y, Zhu C Q, Yang G B, et al. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(21):6747-6761.

[13] 傅伯杰 , 于丹丹 , 吕楠 . 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系 [J]. 生态学报 ,2017,37(2):341-348.
Fu B J, Yu D D, Lü N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):341-348.

[14] 游惠明 , 黄思忠 , 谭芳林 , 等 . 福建泉州湾自然保护区生态系统服务价值评估 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2018,38(7): 83-88.
You H M, Huang S Z, Tan F L, et al. Values of ecosystem services at Quanzhou bay nature reserve of Fujian Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2018,38(7): 83-88.

[15] 李昂 , 杨琰瑛 , 师荣光 , 等 . 居民福祉及其与生态系统服务的关系研究进展 [J]. 农业资源与环境学报 ,2022,39(5):948-957.
Li A, Yang Y Y, Shi R G, et al. Research progress on human well-being and its relationship with ecosystem services[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2022,39(5):948-957.

[16] 巩芳 , 王玉文 , 马云翔 . 草原生态系统服务价值、草牧产业与居民福祉耦合协调关系时空演变研究 : 草原生态补奖视角下 [J]. 内蒙古科技与经济 ,2025(19):1-13,33.
Gong F, Wang Y W, Ma Y X. Research on the spatial and temporal evolution of the coupling and coordination relationship between grassland ecosystem service value, grassland animal husbandry industry and residents' well-being: from the perspective of grassland ecological compensation and subsidy[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy,2025(19):1-13,33.

[17] Maharja C, Praptiwi R A, Sainal S, et al. Multiple negative impacts of marine plastic pollution on tropical coastal ecosystem services, and human health and well-being[J]. Ocean & Coastal Management,2024,258:107423.

[18] 武燕 , 吴映梅 , 高彬嫔 , 等 . 滇中城市群生态系统服务与人类福祉时空耦合及影响因素研究 [J]. 地域研究与开发 ,2025, 44(3):135-145,174.
Wu Y, Wu Y M, Gao B P, et al. Spatio-temporal coupling and influencing factors of ecosystem services and human well-being in the central Yunnan urban agglomeration[J]. Areal Research and Development,2025,44(3):135-145,174.

[19] 刘迪 , 郭琳 , 陈海 , 等 . 黄河流域生态系统服务与居民福祉的多类型关系及驱动因素 [J]. 水土保持研究 ,2026,33(1):372-382,391.
Liu D, Guo L, Chen H, et al. Multi-type relationships between ecosystem services and resident well-being and their driving factors in Yellow River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026,33(1):372-382,391.

[20] Bai Y S, Chen P Y, Ma Q, et al. Do perceived and calculated ecosystem services affect residents' human well-being differently?: a comparison study in the Guanting reservoir basin, China[J]. Applied Geography,2025,184:103765.

[21] Yang L, Zhou X P, Gu X K, et al. Impact mechanism of ecosystem services on resident well-being under sustainable development goals: a case study of the Shanghai metropolitan area[J]. Environmental Impact Assessment Review,2023,103:107262.

[22] 徐建英 , 王清 , 魏建瑛 . 卧龙自然保护区生态系统服务福祉贡献评估 : 当地居民的视角 [J]. 生态学报 ,2018,38(20): 7348-7358.
Xu J Y, Wang Q, Wei J Y. Assessment of the contribution to human well-being by ecosystem services in Wolong natural reserve from the perspective of local communities[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(20):7348-7358.

[23] 张成虎 , 刘菊 , 苏宏新 , 等 . 自然保护区农户生态系统服务依赖度及其影响因素 : 基于形成型指标的结构方程模型分析 [J]. 生态学报 ,2024,44(17):7417-7430.
Zhang C H, Liu J, Su H X, et al. Farmers' dependency index of ecosystem services and influencing factors in nature reserves based on the structural equation model with formative indicators[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(17):7417-7430.

[24] 闫晨雨 , 张妍妍 , 王耀铭 , 等 . 森林生态系统文化服务功能评价与发展对策 : 以老君山自然保护区为例 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版),2021,15(1):110-116.
Yan C Y, Zhang Y Y, Wang Y M, et al. Evaluation and development countermeasure of forest ecosystem cultural service function: a case study of Laojun mountain nature reserve[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences), 2021,15(1):110-116.

[25] 胡继然 , 姚娟 . 基于草地生态系统服务认知的牧民生计选择 : 以新疆喀拉峻天山世界自然遗产地为例 [J]. 生态学报 , 2022,42(16):6534-6542.
Hu J R, Yao J. Choice of herders' livelihood based on the perception of grassland ecosystem services: taking Xinjiang Kalajun Tianshan world natural heritage site as an example[J]. Acta Ecologica

Sinica,2022,42(16):6534-6542.

[26] 廖雨辰 , 史雪威 , 刘俊雁 , 等 . 九寨沟国家级自然保护区地震前后生态系统服务价值评估 [J]. 生态学报 ,2022,42(6):2063-2073.
Liao Y C, Shi X W, Liu J Y, et al. Ecosystem service values assessment before and after earthquake in Jiuzhaigou national nature reserve[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(6):2063-2073.

[27] 隋春花 , 罗秋雨 , 邹钰洁 , 等 . 利益相关者视角下世界自然遗产地生态系统文化服务的社会价值评估 : 以丹霞山为例 [J]. 地理研究 ,2025,44(11):3147-3164.
Sui C H, Luo Q Y, Zou Y J, et al. Evaluating the social value of cultural ecosystem services in a world natural heritage site: perspectives of different stakeholders at Danxiashan[J]. Geographical Research,2025,44(11):3147-3164.

[28] 隋春花 , 陆宏芳 . 丹霞山世界自然遗产地旅游生态系统能值分析 [J]. 生态环境学报 ,2019,28(7):1297-1306.
Sui C H, Lu H F. An emergy analysis of the tourism ecosystem of Danxia mountain world natural heritage[J]. Ecology and Environmental Sciences,2019,28(7):1297-1306.

[29] 廖祥 , 杨鑫 , 郭社平 , 等 . 生态系统服务与人类福祉的交互作用及其驱动因素 : 以成渝城市群为例 [J]. 环境科学 ,2025,46(11):7298-7315.
Liao X, Yang X, Guo S P, et al. Interactions and driving factors of ecosystem services and human well-being: a case study of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2025,46(11):7298-7315.

[30] United Nations Development Programme. Human Development Report 2014 sustaining human progress: reducing vulnerabilities and building resilience[EB/OL]. [2026-03-06]. https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2014.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 139 页）

[19] 孟军 , 陈温福 , 徐正进 , 等 . 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报 [J]. 沈阳农业大学学报 ,2001,32(4):247-249.
Meng J, Chen W F, Xu Z J, et al. Study on photosynthetic rate and chlorophyll content[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2001,32(4):247-249.

[20] 李敏 . 外生菌根菌增强马尾松苗木抗旱性的生理和分子机理研究 [D]. 贵阳 : 贵州大学 ,2021:8-16.
Li M. Physiological and molecular mechanism of ectomycorrhizal fungi enhancing drought resistance of *Pinus massoniana* seedlings[D]. Guiyang: Guizhou University,2021:8-16.

[21] 王秀 . 糖基转移酶 MhGolS2 和 MhGATL1 介导细胞壁多糖合成提高苹果抗盐碱的机制研究 [D]. 兰州 : 甘肃农业大学 ,2024:10-21.
Wang X. Glycosyltransferases MhGolS2 and MhGATL1 mediate the mechanism by which cell wall polysaccharide synthesis improve saline-alkali resistance in apple[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University,2024:10-21.

[22] Noor I, Sohail H, Sun J X, et al. Heavy metal and metalloid toxicity in horticultural plants: tolerance mechanism and remediation strategies[J]. Chemosphere,2022,303:135196.

[23] Wang X, Wei H, Wang K T, et al. MYB transcription factors: acting as molecular switches to regulate different signaling pathways to modulate plant responses to drought stress[J]. Industrial Crops and Products,2025,226:120676.

[24] 谢凤 , 郝乐 , 王振杰 , 等 . 苯丙烷代谢途径分支对生物胁迫响应的研究进展 [J]. 中国植保导刊 ,2023,43(2):23-30.
Xie F, Hao L, Wang Z J, et al. Advances in understanding how branches of the phenylpropanoid pathway respond to biotic stress[J]. China Plant Protection,2023,43(2):23-30.

[25] 冯军 . 水杨酸介导的草莓抗白粉病的分子调控机制 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2020:15-29.
Feng J. The molecular regulatory mechanism of salicylic acid-primed strawberry resistance against *Podosphaera aphanis*[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2020:15-29.

[26] Hou J X, Liu X Z, Zhang J R, et al. Combined application of biochar and partial root-zone drying irrigation improves water relations and water use efficiency of cotton plants under salt stress[J]. Agricultural Water Management,2023,290:108584.

[27] Nidhi, Iqbal N, Khan N A. Synergistic effects of phytohormones and membrane transporters in plant salt stress mitigation[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2025,221:109685.

[28] 刘润进 , 陈应龙 . 菌根学 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2007:16-17.
Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology[M]. Beijing: Science Press, 2007:16-17.

[29] 张扬 , 曾丽琼 , 叶建仁 , 等 . 接种外生菌根真菌对湿地松林促生效应及根际微生物数量的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2014,38(5):57-61.
Zhang Y, Zeng L Q, Ye J R, et al. Effects of ectomycorrhizal fungi inoculation on growth and rhizosphere microorganisms of *Pinus elliottii* seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2014,38(5):57-61.

[本文编校：谢荣秀]