

引用格式:彭锦臣,叶长盛,肖蔚,蔡鑫.武功山地质公园生态系统服务功能价值评估与分析[J].山地学报,2025,43(3):393-407.

PENG Jinchun, YE Changsheng, XIAO Wei, CAI Xin. Assessment of ecosystem service values in Wugongshan Geopark, China [J]. Mountain Research, 2025, 43(3): 393-407.

武功山地质公园生态系统服务功能价值评估与分析

彭锦臣,叶长盛*,肖蔚,蔡鑫

(东华理工大学地球科学学院,南昌330013)

摘要:地质公园是以地质遗迹为核心载体,兼具科学价值、美学价值与生态价值的特殊地域综合体,需要开展全要素生态系统服务价值评估与范式构建。针对小尺度特殊地域空间(如保护区、国家公园、地质公园),生态系统服务价值(ESV, ecosystem service value)的量化评估体系,在地理数据与模型的适配性以及人文功能表达上存在技术缺陷,需要构建多源数据融合的精量化评估框架。本文以武功山地质公园为案例,基于CART(Classification and Regression Tree)决策树遥感解译的土地利用数据,结合RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)和CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)等生态学模型,构建30 m × 30 m 像元尺度的生态系统服务功能价值的估算体系,解析研究区生态系统服务的价值现状及空间分布特征。结果表明:(1)武功山地质公园作为典型复合生态系统,其ESV形成机制具五维特征,包括森林生态系统、草甸生态系统、地质景观系统、人文景观系统和农田生态系统。其中,森林生态系统贡献最为突出(占67.98%),其次为草甸生态系统(占19.14%),农田生态系统、地质景观系统和人文景观系统分别占2.68%、5.64%、4.56%。(2)武功山地质公园生态系统服务价值空间异质性显著,高价值区集中于中南部草甸片区及中部的地质人文景点,其空间格局特征受旅游资源、人类活动及植被覆盖、地形、气候等自然因素共同驱动。(3)草甸生态系统单位面积服务价值最高(169.39万元/hm²),常绿阔叶林贡献率最大(41.42%),揭示了地质遗迹通过微地形塑造提升生态服务价值的机制,为高价值区保护提供依据。(4)武功山地质公园2020年生态系统服务功能总价值达175.61亿元,其中水源涵养(23.09%)、固碳释氧(18.97%)、土壤保持(16.86%)和美学游憩(18.81%)四项核心功能占比77.72%,在江西省生态安全格局中发挥着关键作用。研究结果可为地质公园的地质遗迹保护、生态功能优化和生态补偿提供参考依据。

关键词:生态系统服务功能;价值评估;武功山地质公园

中图分类号: F062.2

文献标志码: A

地质公园以珍稀地质遗迹为核心载体^[1],其内部地质-生态-人文景观要素通过复杂的互馈关系,构成兼具科学价值、美学价值与生态价值的特殊地域综合体。这种多维耦合特性要求地质公园的建设、管理和开发必须突破单一要素保护模式,转向基于生态系统完整性的协同治理,通过优化生态系统结构与生态服务功能,进而支撑地质公园生态文明

范式构建。

生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)的量化评估^[2-4]是生态系统区划与功能优化的基础。该评估体系源于20世纪90年代联合国千年生态系统评估组对生态系统分类体系的构建^[4],其评估范式经历了学术变迁:在空间尺度上,主要以行政单元(省域/市域)与典型生态系统

收稿日期(Received date):2025-01-12;改回日期(Accepted date):2025-05-04

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(42061041)。[National Natural Science Foundation of China(42061041)]

作者简介(Biography):彭锦臣(1998-),男,江西萍乡人,硕士研究生,主要研究方向:区域发展与土地利用。[PENG Jinchun(1998-), male, born in Pingxiang, Jiangxi Province, M. Sc. candidate, research on regional development and land use] E-mail: 869394757@qq.com

*通讯作者(Corresponding author):叶长盛(1977-),男,博士,教授,主要研究方向:城市发展、土地资源利用与保护。[YE Changsheng(1977-), male, Ph. D., professor, research on urban development, land resource utilization and protection] E-mail: ycs519@163.com

(森林/草地/农田)为研究对象^[5-11];在评估方法上,经历了从静态统计模型^[12](当量因子法/功能价值法)向融合动态遥感监测数据的研究精度提升。例如,基于土地利用遥感数据构建的 Costanza 价值系数或当量因子模型^[13-14]与生态参数耦合评估体系^[15-17],可解决传统方法在空间分辨率的瓶颈与适用性局限,为小尺度生态功能解析提供技术路径。

针对小尺度(如保护区、国家公园、地质公园等^[14,18-19])特殊区域的生态功能评估,前期研究仍存在明显的不足:数据源方面,过度依赖全球公开数据集导致在小尺度空间其异质性表征不足;模型适配性层面,通用价值系数对小尺度地理单元的敏感性低,难以反映区域生态功能的独特性;价值维度层面,文化服务功能的量化研究明显滞后于供给/调节/支持服务。

武功山地质公园地处罗霄山脉北段,以地质景观-草甸-森林-农田-人文五个子系统耦合构成了垂直地带性分异的生态服务供给网络,成为全球同纬度生态服务功能最完整的地质公园之一。本研究以武功山地质公园为研究对象,综合运用遥感影像、气象数据和统计调查等多源数据,参考现有分类体系^[4,20-22],融合 CART(Classification and Regression Tree)决策树高精度土地利用解译数据与多源生态参数,构建基于像元尺度的生态系统服务功能价值估算体系,解析公园生态系统服务的多层次、多功能价值现状及空间分布特征,可为地质遗迹保护、生态功能区划与补偿机制设计提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

武功山地质公园为山岳型地质公园,位于江西省西部、罗霄山脉北段的湘赣交界地带(27°18'~27°45'N,113°55'~114°24'E),行政区涵盖芦溪县、莲花县、袁州区和安福县(图1)。公园总面积为1470.82 km²,拥有大面积中亚热带常绿阔叶林,森林覆盖率达88.10%,同时发育着全球低纬度地区海拔最高、分布面积最大的高山草甸。公园内现存近200处地质遗迹、人文景观景点,构成了集地质遗迹、自然和人文景观于一体的大型地貌景观地质公园。该地区属亚热带季风气候区,雨量充沛、日照充

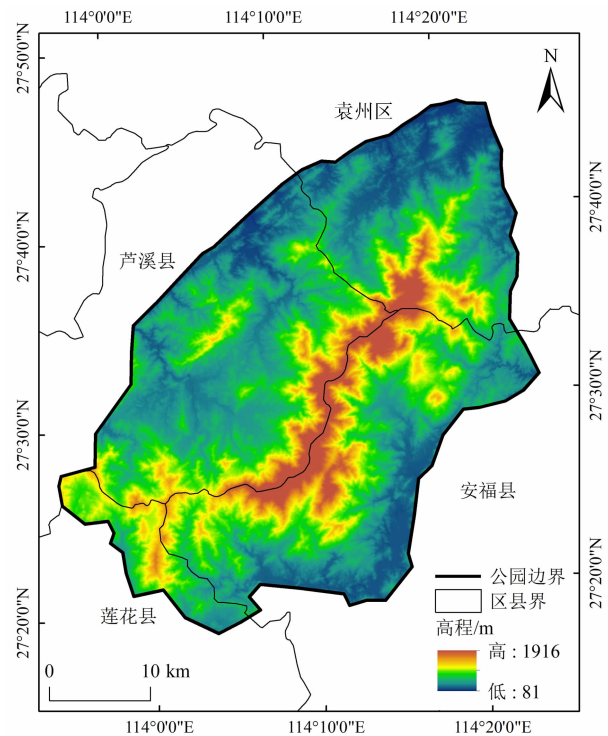


图1 研究区位置及高程

Fig. 1 Location and digital elevation model (DEM) of the study area

足、无霜期长,年均气温为15℃,年平均降雨量为1624.3~1832.6 mm。

1.2 数据来源与处理

2019年9月、2020年2月以及2021年3月的Landsat-8遥感影像均来源于美国地质勘探局,影像的云量均控制在5%以内,并通过几何校正、辐射校正、大气校正、镶嵌裁剪等预处理,采用基于CART决策树分类的遥感解译获取武功山地质公园2020年的土地利用数据;DEM数据源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn>),收集2020年1—12月份距离公园较近的区县气象站点的降水、气温数据以及城市站点逐日日照数据,经普通克里金插值构建;土壤数据来源于中国土壤数据库(<http://www.gis.soil.csdb.cn/>);NDVI来源于美国地质勘探局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),选取空间分辨率30 m的2020年1—12月份Landsat-8遥感影像,通过Google Earth Engine计算得到2020年逐月NDVI栅格数据集;森林覆盖率、植被类型、各县区所占公园面积、旅游收入等数据均来源于《江西省武功山地质公园规划专项研究报告(2022—2035)》;各县区生产总值、粮食作物占地面

积、产量来源于地统计年鉴,粮食作物均价来源于地方官网监测;景观美学游憩相关高频词汇来源于马蜂窝、大众点评和携程三个代表性旅游网站,经 Python 采集 4054 条网络文本,并使用 Rostem 6.0 提取,选取时间为 2019 年 12 月 31 日—2021 年 1 月 1 日;相关指标参数参考相关评估案例^[23-29]。所有空间数据分辨率均统一至 30 m,坐标系为 WGS_1984_Albers。

2 研究方法

2.1 CART 决策树分类

采用 CART 决策树分类方法^[30],经多次递推分割完成土地利用分类,其分类方法以基尼系数(Gini Index)为阈值分割依据,其定义为:

$$G = 1 - \sum_j P^2(j, h) \quad (1)$$

$$P(j, h) = \frac{n_i(h)}{n(h)}, \sum_j P(j, h) = 1 \quad (2)$$

式中, G 为基尼系数; $P(j, h)$ 为训练样本集中测试变量为 h 时,属于 j 类的概率; $n_i(h)$ 为样本数; j 为类别数; $n(h)$ 为训练样本中测试变量为 h 时的样本数。

根据武功山地区植被区划以及公园植被类型,将园区划分为农田、建设用地、水体、高山草甸、常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林和灌木林 8 种土地利用类型(图 2)。采用随机采样和分类检验的方法,结合 Landsat 高清影像选取样本对武功山地质公园土地利用分类结果进行验证;依据选取的样本点构建混淆矩阵,计算得 CART 分类的总体精度为 96.20%, Kappa 系数为 0.9561。各地类的生产精度和用户精度整体上较高,其中水域和森林地类的制图精度较高,灌木林、高山草甸和水域用户精度较高,可满足研究需求。

2.2 土壤保持量计算

采用修正通用土壤流失模型(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)计算土壤保持量,公式如下:

$$Q = X_2 - X_1 = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中, Q 为土壤保持量($t/(hm^2 \cdot a)$); X_2 为潜在土壤侵蚀模数($t/(hm^2 \cdot a)$); X_1 为现实土壤侵蚀

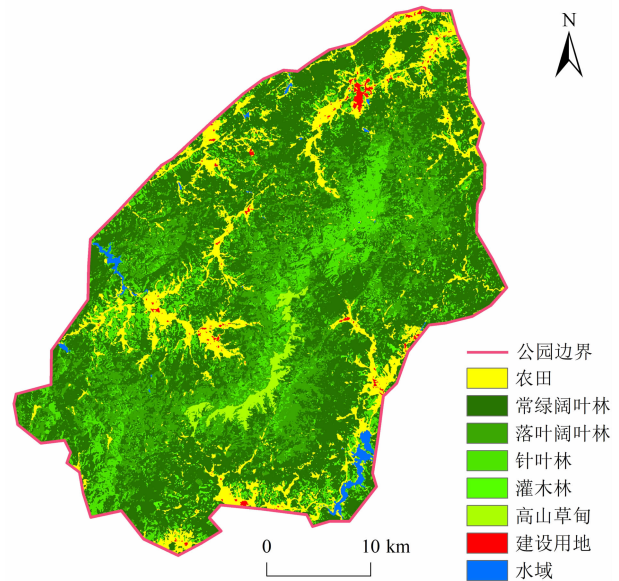


图 2 武功山地质公园土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution of land use types in Wugongshan Geopark, China

模数($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀因子($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子($t \cdot hm^2/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$); L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。 R 参考齐述华^[31]等对江西省的降雨侵蚀计算公式; K 运用 EPIC 模型^[32]计算; L 、 S 基于 DEM 提取计算; C 参考蔡崇法^[33]等的方法; P 综合借鉴陈思旭^[34]等及 Tian^[35]等在江西丘陵山区的研究。

2.3 净初级生产力计算

采用 CASA 模型^[36]估算植被净初级生产力,公式如下:

$$N(x, t) = A(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (4)$$

式中, $N(x, t)$ 为植被净初级生产力($gC/m^2 \cdot a$), $A(x, t)$ 为光合有效辐射(MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 为实际光能利用率(gC/MJ)。

2.4 文化服务功能计算

参考 Eade^[37]等的研究,将公园具有代表性的 46 个世界级和国家级地质、人文景观点绘制成单独的栅格并作为观察点,进行视域和缓冲区分析,计算地质景观和人文景观系统各像元的文化服务价值。公式如下:

$$V_t = V_i(a) + V_i(b) \quad (5)$$

$$V_i(a) = \sum_{i=1}^i P_i, V_i(b) = nC_i \quad (6)$$

式中, V_t 为像元 t 处的文化服务价值; $V_i(a)$ 为像元 t

处与景点的距离影响的文化服务价值; $V_i(b)$ 为像元 t 处景点可见性影响的文化服务价值; P_i 为景点 i 在像元 t 处缓冲区的文化服务价值; C_i 为景点 i 在所有可见像元的文化服务值; n 为像元 t 处可见景点数量。

2.5 评价体系

参考相关研究^[19-22]构建武功山地质公园生态系统服务价值评价体系(表1)。对于一些缺乏市场

统一报价的服务指标,在参考已有成果^[20]参数基础上,运用当期(2020年)和基期的居民消费价格定基指数之比进行修正。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能总价值

2020年武功山地质公园生态系统服务功能总

表1 生态系统服务价值评价体系、模型及参数
Tab.1 ESV estimation framework, models and parameters

服务功能	子系统	价值估算模型	参数说明及来源
涵养水源	森林生态系统	$W_1 = C_k \sum A_i (P_i - E_i - C)$ $W_{C1} = C_k \times W_1$ $W_{K1} = K_j \times W_1$	W_1 为森林涵养水源量; C_k 为水库建设单位库容投资; A_i 为第 i 类森林类型面积; P_i 为园区降水量; E_i 为第 i 类森林的蒸散量; C 为地表径流量; W_{C1} 为森林调节水量价值; W_{K1} 为净化水质价值; K_j 为水的净化费用。
	草甸生态系统	$W_2 = A_2 \times J_0 \times K_0 \times R_0$ $W_{C2} = C_k \times W_2$ $W_{K2} = K_j \times W_2$	W_2 为草甸生态系统涵养水源量; A_2 为草甸面积; J_0 表示降水量; K_0 为地区产流降水量和总降水量的比值; R_0 为与裸地相比,草甸生态系统截留降水、减少径流效益系数; W_{C2} 为草甸调节水量价值; W_{K2} 为净化水质价值。
	农田生态系统	$W_3 = A_3 \times J_0 \times (1 - n)$ $W_{W3} = W_3 \times C_k$	W_3 为农田生态系统涵养水源量; A_3 为园区农田生态系统面积; n 为作物蒸腾系数; W_{W3} 为农田涵养水源价值。
土壤保持	森林生态系统	$Q = X_2 - X_1 = RKLS(1 - CP)$ $U_{S1} = A_1 \times C_i \times Q / \rho_1$ $U_{S2} = 24\% A_1 Q \times C_k / \rho_1$ $U_{S3} = A_1 Q \left(\frac{N_1 C_1}{R_1} + \frac{P_1 C_2}{R_2} + \frac{K_1 C_3}{R_3} \right)$	U_{S1} 为森林固土价值; ρ_1 为森林土壤平均密度; U_{S2} 为减少泥沙淤积价值; U_{S3} 为保肥价值; N_1 为森林土壤平均含氮量; C_1 为尿素价格; R_1 为国产尿素含氮量(46%); P_1 为森林土壤平均含磷量; C_2 为钙镁磷价格; R_2 为钙镁磷含磷量(12%); K_1 为森林土壤平均含钾量; C_3 为氯化钾价格; R_3 为氯化钾含钾量(60%)。
	农田生态系统	$U_{N1} = A_3 \times Q \times C_i / \rho_3$ $U_{N2} = 24\% A_3 \times Q \times C_k / \rho_3$	U_{N1} 为农田生态系统固土价值; ρ_3 为农田土壤容重; U_{N2} 为减少泥沙淤积价值。
	草甸生态系统	$U_{C1} = A_2 \times Q \times C_i / \rho_2$ $U_{C2} = 24\% A_2 Q \times C_k / \rho_2$ $U_{C3} = A_2 Q \left(\frac{S_N C_1}{R_1} + \frac{S_P C_2}{R_2} + \frac{S_K C_3}{R_3} \right)$	U_{C1} 为草甸生态系统固土价值; U_{C2} 为减少泥沙淤积价值; U_{C3} 为保肥价值; S_N, S_P, S_K 分别为草甸土壤中 N、P、K 的土壤平均持有量。
固碳释氧	森林生态系统	$V_{C1} = 1.63A_1 \times R_c \times B_n \times P_C$ $V_{O1} = 1.19A_1 \times B_n \times P_o$	V_{C1} 为森林固碳价值; R_c 为 CO_2 中碳的含量; B_n 为植被净初级生产力; P_C 为固碳价格; V_{O1} 为森林释氧价值; P_o 为释氧价格。
	草甸生态系统	$V_{C2} = A_2 \times P_c (1.63R_c \times B_n + T_C)$ $V_{O2} = 1.19 \times A_2 \times B_n \times P_o$	V_{C2} 为草甸固碳价值; T_C 为草甸土壤固碳速率; V_{O2} 为草甸释氧价值。
	农田生态系统	$V_{C3} = 1.63A_3 \times R_c \times B_n \times P_C$ $V_{O3} = 1.19A_3 \times B_n \times P_o$	V_{C3} 为农田固碳价值; V_{O3} 为农田释氧价值。

续表 1

服务功能	子系统	价值估算模型	参数说明及来源
净化大气	森林生态系统	$V_S = \sum K_i Q_i A_i$	V_S 为净化大气价值; K_i 为有害气体治理费用; Q_i 为单位面积吸收有害气体量。
	草甸生态系统		
	农田生态系统		
营养物质保持	森林生态系统	$V_{N1} = A_1 N_2 B_1 C_1 / R_1$ $V_{P1} = A_1 P_2 B_1 C_2 / R_2$ $V_{K1} = A_1 K_2 B_1 C_3 / R_3$	V_{N1} 为森林含氮价值; N_2 为林木含氮量; V_{P1} 为森林含磷价值; P_2 为林木含磷量; V_{K1} 为森林含钾价值; K_2 为林木含钾量。
	草甸生态系统	$V_C = A_2 B_2 (C_N \times \frac{C_1}{R_1} + C_P \times \frac{C_2}{R_2})$ $M = A_2 \times H \times \rho_2$ $V_T = M (\frac{S_N C_1}{R_1} + \frac{S_P C_2}{R_2} + \frac{S_K C_3}{R_3})$	V_C 为生物体内营养物质保持价值; C_N 和 C_P 分别为草甸生物物质中含 N 和 P 的百分比; M 为草甸土壤库总量; H 为草甸土壤深度; V_T 为土壤库中营养物质保持价值。
生物多样性	森林生态系统	$V_B = (F_{C1} \times E_{FB} / F_{C0}) \times V_{BEF} \times A_1$ $V_{BEF} = V_{BEF}^* \times C_{2020} / C_{2007}$	V_B 为森林生态系统生物多样性保护价值; F_{C1} 为研究区森林覆盖率; E_{FB} 为中国森林生态系统单位面积生态服务价值当量因子; F_{C0} 为全国森林覆盖率; V_{BEF} 为修正后 1 个当量的经济价值量; V_{BEF}^* 为参考年 (2007) 1 个当量的经济价值量; C_{2020} 、 C_{2007} 分别为研究年 (2020) 和参考年 (2007) 的居民消费价格定基指数。
	农田生态系统	$Y = \sum_{i=1}^4 Y_i \times R_i$ $V_a = \frac{1}{7} \times P_c \times Y$ $V_{BIOC} = E_f \times K_1^{-1} \times \frac{1}{7} \times P_c \times Y$	Y 为单位面积农田平均粮食产量; Y_i 为各区县单位面积农田平均粮食产量; R_i 为各区县占研究区面积比例; V_a 为农田自然粮食产量的经济价值; P_c 为粮食作物平均粮食单价; V_{BIOC} 为农田生态系统生物多样性保护单位面积价值; E_f 为生物多样性保护的当量因子; K_1 为修正系数。
	草甸生态系统	$V_b = \frac{1}{7} \times P_c \times Y$ $P_i = V_a \times d_i$ $P = (b/B) \times P_i \times A_1$	V_b 为草甸生态系统当量因子的价值; P_i 为草甸生态系统服务功能基准单价; d_i 为草甸生态系统生物多样性保护当量因子; P 为草甸生物多样性保护价值; b 为园区草甸单位面积平均生物量; B 为江西省草地单位面积平均生物量。
科学研究	地质景观系统	$V_k = J_k + S_k + I_k$	V_k 为科研价值; J_k 为学术论文产出花费金额; S_k 为科研项目投入金额; I_k 为研学参观金额。
科普教育	地质景观系统		
社会保障	人文景观系统		
文化传承	人文景观系统		
美学游憩	森林生态系统	$V_M = (M_1 + M_2 + M_3) \times \omega_i$ $C_2 = 40\% C_1$ $C_3 = P \times t \times y$	V_M 为美学游憩价值; M_1 为旅游综合收入; M_2 为消费者剩余; M_3 为旅游时间价值; ω_i 为与景观相关高频词所占权重; P 为旅游人数; t 为人均停留时间; y 为机会工资成本 ^[38-39] 。
	草甸生态系统		
	地质景观系统		
	人文景观系统		

价值为 175.61 亿元 (表 2), 单位面积价值为 12.01 万元/hm²。其中, 森林生态系统贡献最为突出 (119.37 亿元, 占 67.98%), 其次为草甸生态系统 (33.62 亿元, 占 19.14%), 农田生态系统为 4.71 亿元 (占 2.68%)。地质景观系统和人文景观

系统分别贡献 9.91 亿元 (占 5.64%) 和 8.01 亿元 (占 4.56%)。各服务功能价值量最大的是森林生态系统的涵养水源功能 (38.09 亿元), 其次是它的固碳释氧 (27.29 亿元) 与土壤保持功能 (32.11 亿元), 单位面积价值最大的是草甸生态系统的营养

表 2 2020 年武功山地质公园生态系统
各项服务功能价值及构成

Tab.2 Values and compositions of ecosystem service
functions of Wugongshan Geopark in 2020

生态系统	功能	价值/亿元
森林生态 系统	涵养水源	38.09
	固碳释氧	27.29
	土壤保持	32.11
	净化大气	3.67
	营养物质保持	2.09
	生物多样性保护	14.40
	美学游憩	1.73
	小计	119.37
草甸生态 系统	涵养水源	0.29
	固碳释氧	0.23
	土壤保持	1.03
	净化大气	0.0012
	营养物质保持	16.78
	生物多样性保护	0.14
	美学游憩	15.15
	小计	33.62
农田生态 系统	涵养水源	2.17
	固碳释氧	2.07
	土壤保持	0.18
	净化大气	0.0089
	生物多样性保护	0.28
	小计	4.71
地质景观 系统	科学研究	0.52
	科普教育	0.30
	美学游憩	9.09
	小计	9.91
人文景观 系统	社会保障	0.80
	文化传承	0.15
	美学游憩	7.06
	小计	8.01
合计		175.61

物质保持功能(84.54 万元/hm²)。地质公园生态系统服务功能价值主要体现在涵养水源(23.09%)、固碳释氧(18.97%)、土壤保持(16.86%)和美学游憩(18.81%)服务功能,草甸在营养物质保持方面具有显著优势。

武功山地质公园生态系统服务价值呈现显著的空间分异特征(图 3)。栅格单元分析显示,总价值

为 0~144.21 万元,高值区集中分布于中南部高山草甸带,该区域因草甸-地质-人文景观协同作用形成核心高值区,最高值达 144.21 万元。低值区主要位于西部、北部和东南部农田及城镇周边,呈现明显的建设用地侵蚀效应。农田周边因地形平坦、植被覆盖度较低,价值量大多处于 3000 元以下,而靠近城镇建设用地的区域,受人类活动影响,价值量普遍低于 1000 元。

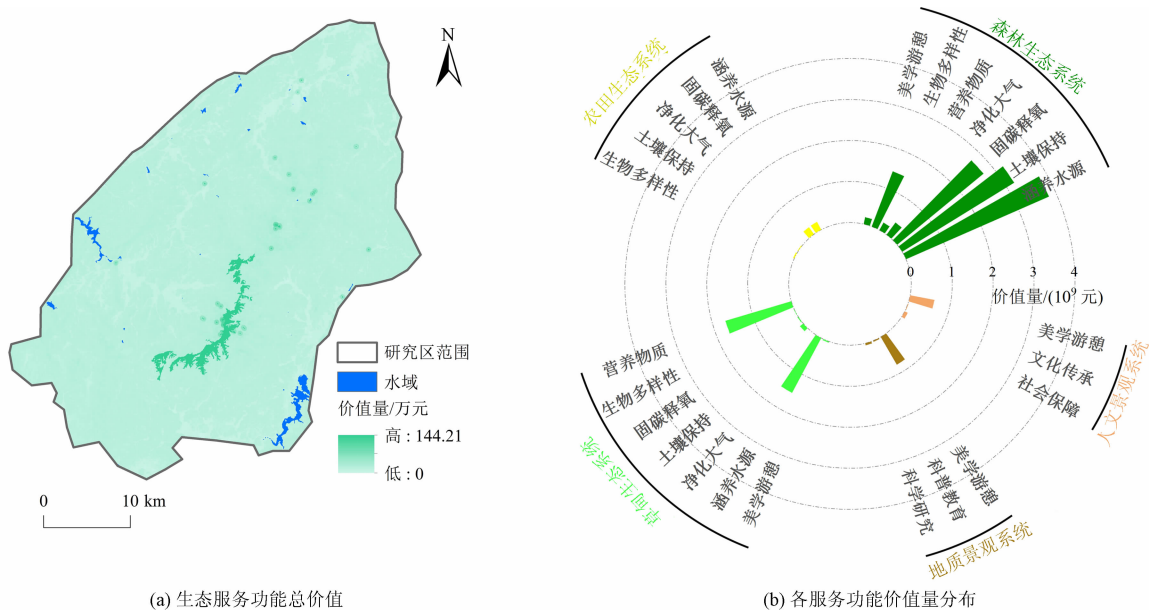
3.2 森林生态系统服务功能价值及空间格局

森林生态系统服务总价值达 119.37 亿元,单位面积价值为 95 117.15 元/hm²,其中涵养水源(38.09 亿元)、土壤保持(32.11 亿元)和固碳释氧(27.29 亿元)构成三大核心功能模块。高值区主要集聚于公园西南部山区和中部的武功山脉地带,呈条带状展布(图 4)。林分类型分析表明:常绿阔叶林作为优势植被类型贡献最大(72.74 亿元,占比 60.94%),其高净生产力特征显著;落叶阔叶林次之(27.36 亿元,22.92%);灌木林虽面积较小但单位价值最高(10.22 万元/hm²),展现出突出的大气净化功能;而针叶林则在土壤保持方面表现优异。这种功能分异格局主要受土壤侵蚀因子、净初级生产力和降水等环境因子的综合调控。

武功山森林生态系统服务功能价值空间异质性显著(图 4)。涵养水源与净化大气均呈“中西部高、四周低”的特征,这与林分类型密切相关。针叶林的涵养水源和净化大气的单位栅格价值(分别为 3000 元、600 元)均高于阔叶林(2564.17 元、194.59 元)与灌木林(2900 元、411.43 元),这主要归因于其较低的蒸散率和独特的污染物吸收能力,叠加西北—东南降水梯度的影响。土壤保持高值区集中分布于西南部山区及中部武功山脉,呈条带状展布,主要受高植被覆盖度及大地形起伏驱动;中西部、中东部邻近耕地与建设用地区域以及东南部、西部水域附近因人为干扰和自然侵蚀作用形成明显低值区。固碳释氧与营养物质保持功能在海拔 200~800 m 的缓坡丘陵地带形成连片高值区,该区域作为常绿阔叶林主要分布区,具有较高的植被覆盖度和净生产力。

3.3 农田生态系统服务功能价值及空间格局

农田生态系统服务功能总价值为 4.71 亿元,单位面积价值为 27 847.56 元/hm²,主要功能贡献在于涵养水源和固碳释氧,价值量分别为 2.17 亿元和



(a) 生态服务功能总价值 (b) 各服务功能价值量分布

图3 武功山地质公园生态系统服务功能总价值及分布

Fig. 3 Total value and distribution of ecosystem service functions in Wugongshan Geopark, China

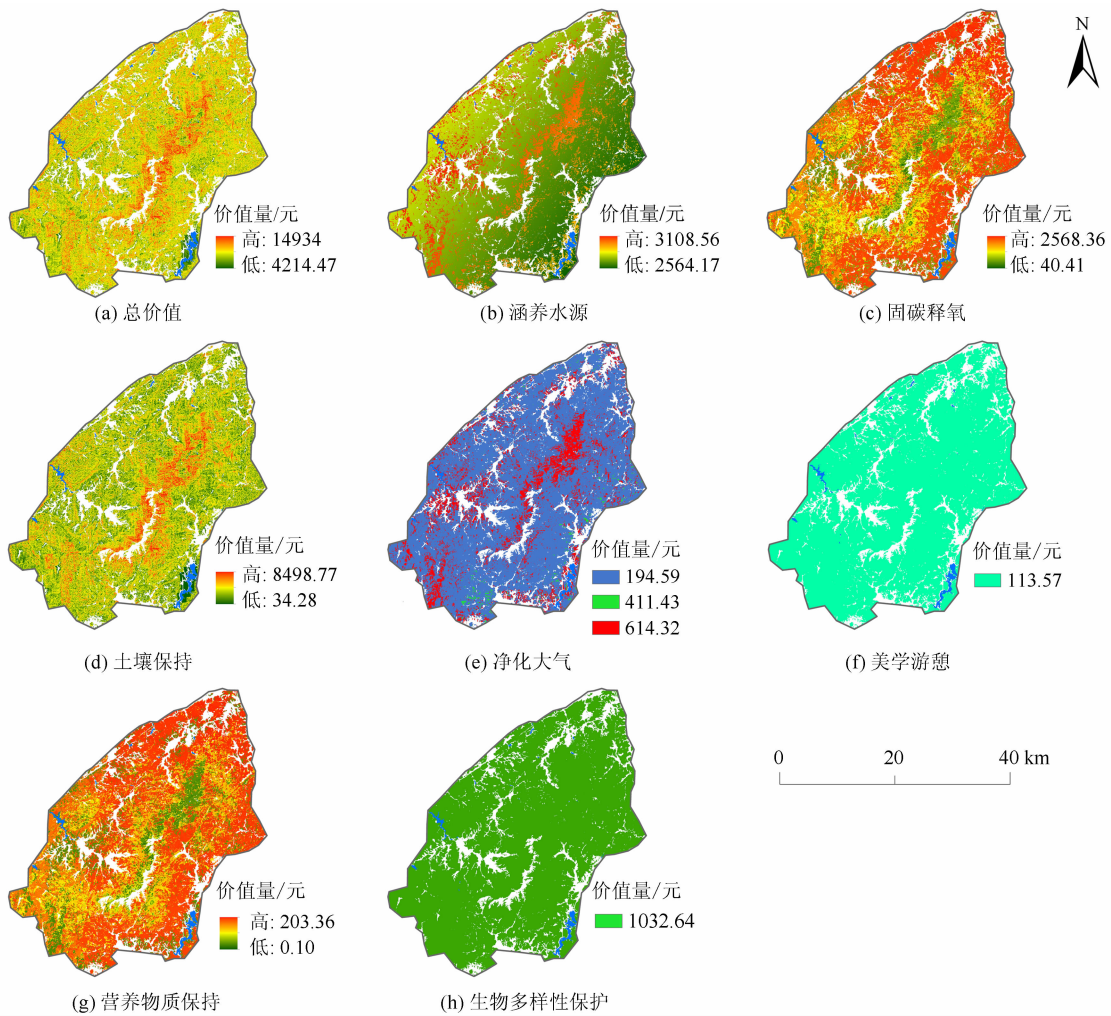


图4 武功山地质公园森林生态系统服务功能总价值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of total value of forest ecosystem service function in Wugongshan Geopark, China

2.07 亿元, 占总价值的 46.08% 和 44.08%。高值区零星分布于北部、西部及东南部农田与森林接壤的边缘地带(图 5)。农田生态系统服务价值空间分布主要受植被净生产力驱动。农田-森林交错带因更高的植被生产力成为服务价值高值区, 而降水量(1940.37 ~ 1793.74mm)的空间均质性使其对服务价值分布影响较小。这一特征揭示了植被生产力是农田生态系统服务价值空间分异的主导因子。

农田生态系统的各项服务功能价值整体呈均质化分布(图 5)。涵养水源价值高低值分布与降雨量空间态势相吻合: 自西北向东南梯式递减。固碳释氧价值高低值分布与净生产力密切相关, 高值区分布广泛, 城镇建设用地周边因人为干扰形成低值区。土壤保持价值呈现相反格局, 高值区(>600 元/栅格)集中在植被覆盖度较高(C 因子较小)的农田-林地边缘带。净化大气和生物多样性保护价值的空间异质性均不显著。

3.4 草甸生态系统服务功能价值及空间格局

草甸生态系统服务功能总价值为 33.62 亿元, 单位面积价值为 169.39 万元/hm²。在功能构成上呈现出明显的双主导特征, 其中营养物质保持功能

贡献 16.78 亿元(占比 49.91%), 美学游憩功能贡献 15.15 亿元(占比 45.07%); 空间分布整体较为均匀, 但在草甸边缘地带因较大的坡长、坡度因子(L、S 因子)导致土壤侵蚀模数较小, 形成零星的高值区。草甸生态系统的高服务价值主要源于两个关键因素, 即其特有的高营养元素含量(均值 84.54 万元/hm²)和特殊的土壤侵蚀特征。

草甸生态系统服务功能价值整体上空间异质性特征不显著(图 6)。固碳释氧与营养物质保持功能价值均呈现中部高、两翼低的分布态势。固碳释氧功能(326.59 ~ 1393.83 元/栅格)与净生产力空间分布高度一致, 主要受气候、海拔梯度及人为干扰导致的草甸退化程度调控; 营养物质保持功能(76 044.1 ~ 76 107.9 元/栅格)则主要来源于土壤库, 受土壤营养元素空间分布主导, 表现出较小的空间差异; 涵养水源功能与区域降水量的空间态势相吻合, 呈现中部低、两翼高的特征; 土壤保持功能高值区零散分布于草甸边缘地带, 其空间分异主要受地形因子(坡长、坡度)控制。草甸生态系统不同服务功能的价值形成机制存在显著差异: 固碳释氧等气候调节功能主要受生物过程调控, 而土壤相关功

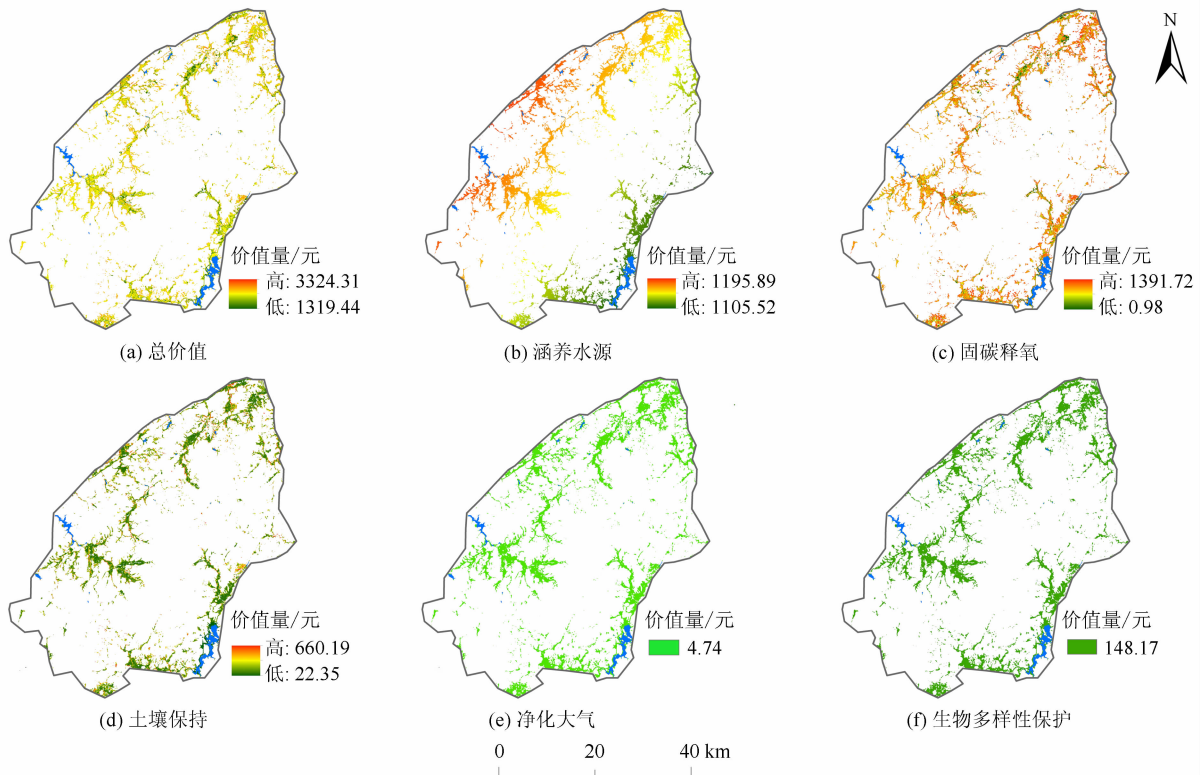


图 5 武功山地质公园农田生态系统服务功能总价值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of total value of farmland ecosystem service functions in Wugongshan Geopark, China

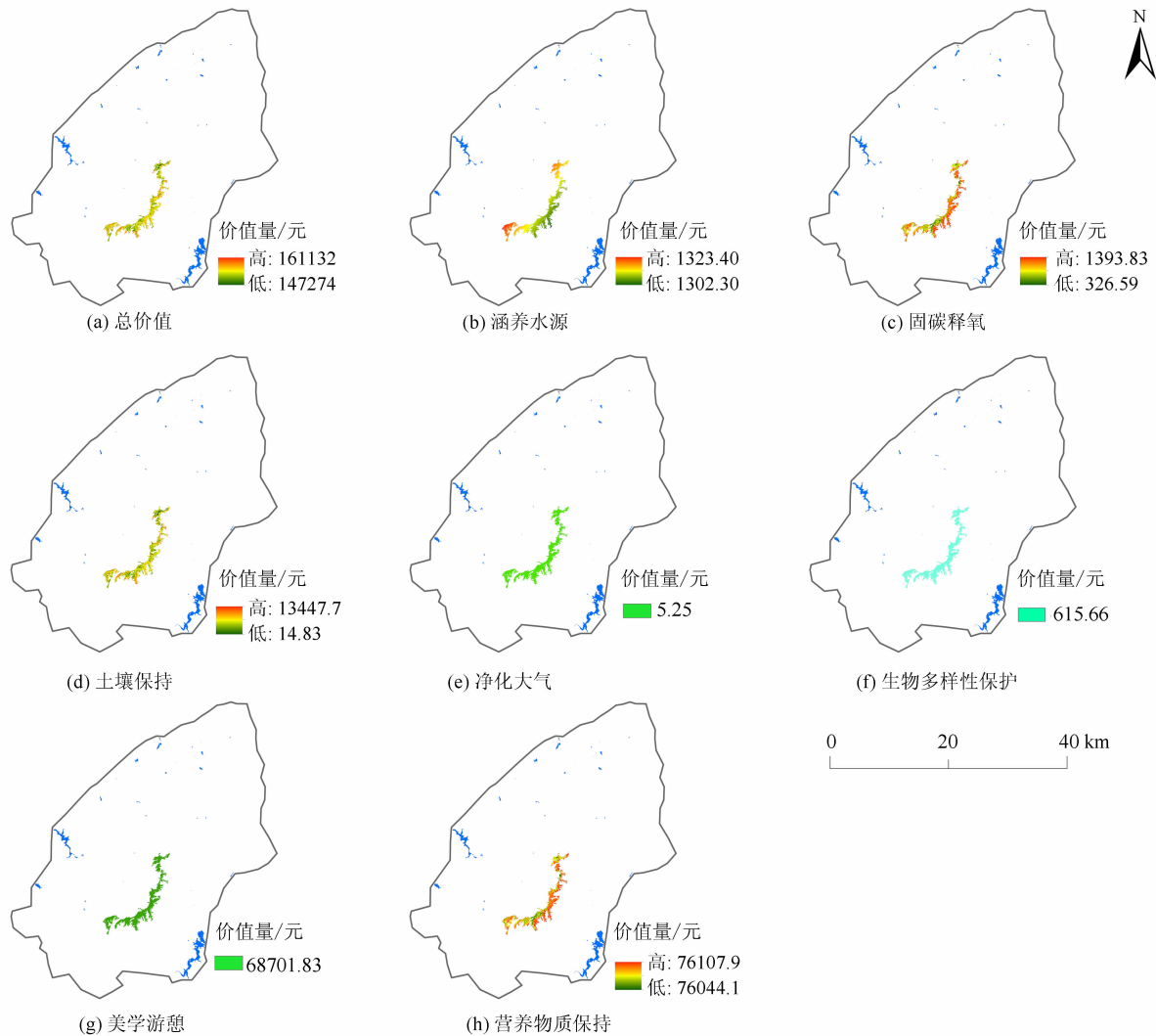


图6 武功山地质公园草甸生态系统服务功能总价值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of total value of meadow ecosystem service function in Wugongshan Geopark, China

能则更多取决于地形和土壤特性。

3.5 地质景观和人文景观系统服务功能价值及空间格局

地质景观系统服务功能价值包括科研、科普和美学游憩价值。地质景观的科研价值主要基于科研成果转化指标,包括学术论文产出、科研项目投入和研学参观三方面。根据中国知网等学术平台的搜索和统计结果,自1985年以来累计发表该区域地质学领域相关论文95篇,按每篇论文的基本费用0.2万元^[40]计算,近期实施的科学项目总投资800万元,近年园区组织开展了多种类型的中小学研学活动,人数达33454人,人均实习费用1300元,估算出地质景观系统的科研价值为5168.02万元。科普价值的估算采用费用支出法,通过统计近期实施的科普

建设工程总投资得出,具体项目包括地质博物馆升级改造、数字地质公园建设、新增地质遗迹科普解说牌及宣传册编印等。这些科普宣传系统的建设总投入为科普教育价值,经核算为3000万元。地质景观系统的美学游憩价值用地质景观词汇权重乘以公园美学游憩总价值,经核算为90894.16万元。地质景观系统服务功能总价值为9.91亿元,美学游憩价值占比最高(91.7%)。网络文本分析和游客调查^[38]发现,地质遗迹对旅游经济贡献显著:27%的游客提及率、70%游客将其列为核心游览动机、游客平均停留时间为0.8天(占40%)。情景模拟显示,若无地质遗迹将导致19%的游憩价值损失和20%的停留时间缩减。此外,地质遗迹通过塑造微地形提升生态系统功能,其区域土壤保持量较森林、草甸

高 11.1%,对地形土壤条件的贡献率达 45%,间接增强森林、草甸 5% 的土壤保持能力。这些发现证实地质遗迹兼具重要的旅游经济价值和生态服务功能。

人文景观系统服务功能价值包括社会保障、文化传承和美学游憩价值。公园人文景观系统社会保障价值为 8005.60 万元。文化传承价值运用市场价值法,对申报国家级和省级非物质文化遗产的总投入作为文化传承价值。自公园建设以来,申请重要文化遗产并采取相应的保护措施和传承活动共投资 1500 万元,即文化传承价值为 1500 万元。人文景观系统的美学游憩价值用人文景观词汇权重乘以公园美学游憩总价值,核算后为 60 557.30 万元。人文景观系统服务功能总价值为 8.01 亿元,美学游憩价值占比 75.6%。网络文本与游客调查^[38]发现,人文景观对旅游经济贡献较为突出:21% 的游客提及率,超过 40% 的游客将其列为主要动机,游客平均停留时间为 0.4 天(占 20%)。情景模拟显示,若缺乏人文景观,公园游憩价值将下降约 8.5%,游客停留时间将减少 6%,凸显人文景观对美学游憩功能的重要贡献。

地质和人文景观的服务价值分布与景观资源点位保持高度空间一致性(图 7)。地质景观系统服务高值区(≥ 79 万元/栅格)在中部武功山脉地区的地质景点附近呈点状密集分布,中东部和中南部亦有零星分布;人文景观系统高值区(≥ 69 万元/栅格)

在中部的武功山脉和北部的袁州片区人文景点附近呈点状密集分布。低值区普遍分布于景点可视范围之外,地质景观系统低值区连片分布于北部和南部,人文景观系统低值区零散分布于北部、西北部和东南部。这种空间格局严格遵循“景点中心性”衰减规律,高值区的形成必须同时满足存在实体景观资源、位于景点可视范围内、具有良好可达性的条件,而低值区则因缺乏景观实体或超出景点可视范围所致。

4 讨论

4.1 研究区选取的依据及评估体系的适用性

本研究区域聚焦“武功山地质公园”而非“武功山片区”,主要基于其作为地质遗迹主导的复合生态系统的典型性:一方面,武功山片区仅覆盖公园 40% 的地质遗迹点,影响评估的全面性;另一方面,作为联合国教科文组织候选的世界地质公园,其明确的边界和功能区划可为生态功能优化、生态补偿政策制定提供依据。

本文所构建的 30 m 像元尺度评估体系具有显著优势。首先,通过融合 CART 决策树与 RUSLE/CASA 模型,进行本土化参数校准,有效解决了全球数据集在南方小尺度山区的适用性问题;其次,创新性地采用景观视域和网络文本分析,量化地质、人文景观价值,填补了传统评估体系中文化服务功能量

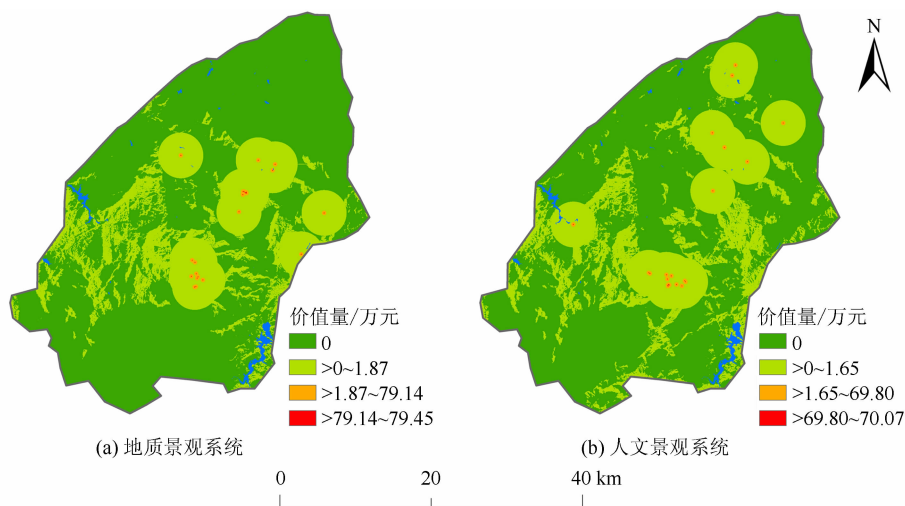


图 7 武功山地质公园地质和人文景观生态系统服务功能空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of geo-landscape and cultural landscape ecosystems service function in Wugongshan Geopark, China

化的空白。该评估体系不仅为武功山地质公园的管理提供了科学依据,其“遥感解译-模型计算-文化服务空间化”的技术路径也可为同类型地质公园的生态系统服务评估提供范式参考。

4.2 生态系统服务功能价值的量化方法

生态系统服务功能价值量化通常涵盖供给、支持、调节和文化四类功能,其中文化服务因主观性和非消耗性常被忽视。现有研究对森林、草甸等生态系统的静态或空间动态评估较为成熟,但文化服务功能的价值评估仍显不足。地质公园区别于其他自然保护地,兼顾供给、支持、调节、文化等多元服务内容。本研究通过遥感、空间叠置等方法对森林、农田、草甸的常态服务功能以及地质景观、人文景观的文化服务功能进行货币化估值,将文化服务功能纳入评价体系。采用旅行费用法,结合景观可达性与可见度量化地质、人文景观各文化服务功能的空间分布。基于单位面积的当量因子法广泛应用于生态服务价值评估领域,但因其参数变量少、计算过程简便、主观性强,难以适用于结构复杂、功能多样的小尺度区域。本文主要通过建立数学模型量化单向服务功能,提高评估结果的适用性与精确性,最后将各服务功能进行统一货币化估值,以直观反映生态系统服务功能价值,支持各服务功能之间的比较与权衡分析。

公园评估结果可为生态产品开发和生态补偿提供实践决策。2020年武功山地质公园生态系统服务功能价值高达175.61亿元,占四个县区生产总值(646.01亿元)的27.18%,其单位面积价值与GDP比值大于1,表明公园生态补偿需求迫切,未来需建立基于生态系统服务价值的生态补偿机制,包括纵向补偿(申请国家及省级专项资金、科研基金、职工技能培训)和横向补偿(产业转移、森林指标交易等),形成输血与造血并行的长效机制。同时,实施生态资产精细化管理,细化森林资源调查(树种、林龄、面积),开展长期生态监测(负离子浓度、污染物吸收、农田产量、土壤理化性质等),根据监测结果动态调整保护措施,确保生态系统服务价值稳步上升,实现公园社会效益、经济效益、环境效益的同步提高,促进公园的可持续发展。

4.3 研究不足与展望

首先,研究时间跨度较小,由于武功山地质公园边界范围拟划于2019年,出于数据的可获取性和精

确性考虑,故仅采取了2020年一年作为研究年限。另外,随着生态保护力度不断增强,降水、植被和土壤等因子也难以在较小时间段有明显变化,使得生态功能价值年际变化不显著。未来研究中,可以在更长的时间跨度或针对突发性事件的基础上,进行生态系统服务功能的时间动态评估,以更全面地了解武功山地质公园生态系统服务的变化和演化过程。其次,文化服务价值评估仅基于景观维度,未来可引入景观指数、生态足迹等方法,多维度量化文化遗产、美学游憩、科普教育等功能潜力,提升评估的全面性与精确性。最后,受限于当地生态环境质量监测数据水平,部分参数主要参考相近地区的前人研究成果,在未来的研究中需通过野外数据采集与观测,对生态系统服务功能估算所采用的参数进行本土化调整,提高评估结果的精度。

5 结论

(1)武功山地质公园的生态系统服务价值形成机制具有多维特征,包括森林生态系统、草甸生态系统、地质景观系统、人文景观系统和农田生态系统。其中,森林生态系统贡献最为突出(占67.98%),其次为草甸生态系统(占19.14%),地质景观系统、人文景观系统和农田生态系统分别占5.64%、4.56%、2.68%。

(2)武功山地质公园生态系统服务功能价值具有较明显的空间异质性,其中森林服务功能高值区集聚于公园西南部山区和中部的武功山脉地带,呈条带状展布,农田服务功能高值区沿森林-农田交错带呈边缘分布,草甸服务功能高值区位于草甸边缘地带,地质人文景观服务功能高值区则集中于景点周边。单位面积生态价值高值区集中在公园中南部草甸片区及中部的地质人文景点,同时在北部和东部地质人文景点周边亦有零星分布,主要受地形、海拔以及景观资源分布等因素共同作用,而西部、北部和东南部周边地区由于植被覆盖度低、人为干扰较大,单位面积生态价值较低。草甸生态系统表现出最高的单位面积服务价值(169.39万元/hm²),其突出的营养物质保持功能(16.78亿元)与特殊的花岗岩地貌基底密切相关;而常绿阔叶林则因其广泛分布面积(占总面积58%)和较高的净生产力,对全域生态系统服务功能价值的贡献率最大(41.42%)。

这揭示了地质遗迹通过塑造微地形间接提升生态系统服务价值的机制,对高价值森林、草甸区的保护具有重要指导意义。

(3)2020年武功山地质公园生态系统服务功能价值为175.61亿元,公园生态系统服务价值主要体现在水源涵养(23.09%)、固碳释氧(18.97%)、土壤保持(16.86%)和美学游憩(18.81%)服务方面,四项核心功能占比77.72%,因此,无论是保育土壤、水源涵养、营养物质储存等生态服务价值,亦或是景观美学价值方面,武功山地质公园对整个江西省的自然生态环境都有着重要的作用与意义。

参考文献(References)

- [1] 张建平. 世界地质公园的前世今生[J]. 地质论评, 2020, **66**(6): 1710-1718. [ZHANG Jianping. History of UNESCO Global Geopark [J]. Geological Review, 2020, **66**(6): 1710-1718] DOI: 10.16509/j.georeview.2020.06.019
- [2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, **387**: 253-260. DOI: 10.1038/387253a0
- [3] BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem services in urban areas [J]. Ecological Economics, 1999, **29**: 293-301. DOI: 10.1016/S0921-8009(99)00013-0
- [4] REID W V, MOONEY H A, CROPPER A, et al. Millennium ecosystem assessment [G]// Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington: Island Press, 2005: 1-137.
- [5] HEIN L. Economic benefits generated by protected areas: The case of the Hoge Veluwe forest, the Netherlands [J]. Ecology & Society, 2011, **16**(2): 13. DOI: 10.3354/meps09165
- [6] NINAN K N, KONTOLEON A. Valuing forest ecosystem services and disservices: Case study of a protected area in India [J]. Ecosystem Services, 2016, **20**: 1-14. DOI: 10.1016/j.ecoser.2016.05.001
- [7] 刘永杰, 王世畅, 彭皓, 等. 神农架自然保护区森林生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(5): 1431-1438. [LIU Yongjie, WANG Shichang, PENG Hao, et al. Evaluation of ecosystem service values of the forests of Shennongjia nature reserve [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(5): 1431-1438] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2014.0023
- [8] 王娇月, 邴龙飞, 尹岩, 等. 湿地生态系统服务功能及其价值核算——以福州市为例[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(11): 3824-3834. [WANG Jiaoyue, BING Longfei, YIN Yan, et al. Wetland ecosystem service function and its value accounting: A case study of Fuzhou city, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(11): 3824-3834] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.017
- [9] 缪建群, 王志强, 杨文亭, 等. 崇义客家梯田生态系统服务功能[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(5): 1642-1652. [MIAO Jianqun, WANG Zhiqiang, YANG Wenting, et al. Ecosystem services of Chongyi Hakka Terraces [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(5): 1642-1652] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201705.015
- [10] 普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 等. 洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估[J]. 农业资源与环境学报, 2022, **39**(5): 958-966. [PU Yanshuang, CHEN Jianjun, ZU Yanqun, et al. Evaluation of the service function value of rice field ecosystem with different planting patterns in Erhai Lake basin [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, **39**(5): 958-966] DOI: 10.13254/j.jare.2021.0237
- [11] 潘冬荣, 闫浩文, 韩天虎, 等. 基于当量因子法的甘肃省草原生态系统服务价值评估[J]. 草业科学, 2021, **38**(9): 1860-1868. [PAN Dongrong, YAN Haowen, HAN Tianhu, et al. Evaluation of the service function value of grassland ecosystems in Gansu province using the equivalence factor method [J]. Pratacultural Science, 2021, **38**(9): 1860-1868] DOI: 10.11829/i.issn.1001-0629.2021-0186
- [12] XIE Gaodi, ZHEN Lin, LU Chunxia, et al. Applying value transfer method for eco-service valuation in China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, **1**(1): 51-59. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2010.01.007
- [13] YIN Dengyu, LI Xiaoshun, LI Guie, et al. Spatio-temporal evolution of land use transition and its eco-environmental effects: A case study of the Yellow River basin, China [J]. Land, 2020, **9**(12): 514. DOI: 10.3390/land9120514
- [14] 孙张涛, 余正伟, 舒思齐, 等. 北京延庆世界地质公园生态系统服务价值评价和生态地质调查工作建议[J]. 地质通报, 2023, **42**(4): 657-667. [SUN Zhangtao, YU Zhengwei, SHU Siqi, et al. The evaluation of ecosystem service of Yanqing Global Geopark in Beijing and the suggestions for ecological geology [J]. Geological Bulletin of China, 2023, **42**(4): 657-667] DOI: 10.12097/i.issn.1671-2552.2023.04.014
- [15] 脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 等. 中国北方草地生态系统服务评估[J]. 生态学报, 2024, **44**(2): 455-462. [TUO Dengfeng, LU Qi, QUE Xiaoe, et al. Evaluation of grassland ecosystem services in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(2): 455-462] DOI: 10.20103/j.stxb.202302260341
- [16] 肖骁, 李京忠, 杨新军, 等. 黄河流域中上游林草生态调节服务功能价值核算[J]. 生态学报, 2022, **42**(19): 7830-7844. [XIAO Xiao, LI Jingzhong, YANG Xinjun, et al. Evaluation of forest-grassland ecosystem services value in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(19): 7830-7844] DOI: 10.5846/stxb202002220305
- [17] 王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 等. 东北天然林资源保护工程成效评估及热点区域识别[J]. 生态学报, 2024, **44**(3): 1231-1241. [WANG Jiaqi, XING Yanqiu, CHANG Xiaoping, et al. Assessment of the effectiveness of the Northeast Natural Forest

- Protection Project and identification of hot spot areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(3): 1231 – 1241] DOI: 10.20103/j.stxb.202303010375
- [18] 冉璇, 李渊, 郭宇龙, 等. 基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, **32**(9): 1932 – 1948. [RAN Xuan, LI Yuan, GUO Yulong, et al. Ecosystem services assessment and trade-off synergy relationships in Qianjiangyuan National Park based on InVEST model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(9): 1932 – 1948] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202309014
- [19] 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 Yuchen, SHI Xuewei, LIU Junyan, et al. Ecosystem service values assessment before and after earthquake in Jiuzhaigou National Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(6): 2063 – 2073] DOI: 10.5846/stxb202102270547
- [20] LY/T 1721 – 2008. 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [LY/T 1721 – 2008. Specifications for assessment of forest ecosystem services in China [S]. Beijing: China Standards Press, 2008]
- [21] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. *生态学报*, 2004, **24**(6): 1101 – 1110. [ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyun, JIA Liangqing, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(6): 1101 – 1110] DOI: 10.3321/j.issn:1000 – 0933.2004.06.002
- [22] 胡晓燕, 于法稳, 徐湘博, 等. 农田生态系统服务价值核算: 指标体系构建及应用研究[J]. *生态经济*, 2023, **39**(4): 111 – 121. [HU Xiaoyan, YU Fawen, XU Xiangbo, et al. Accounting of cropland ecosystem services: Indicator system construction and its application [J]. *Ecological Economy*, 2023, **39**(4): 111 – 121]
- [23] 李少宁. 江西省暨大岗山森林生态系统服务功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007: 1 – 166. [LI Shaoning. Study on forest ecosystem services in Jiangxi province and Dagangshan [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007: 1 – 166]
- [24] 彭子恒, 王怀领, 王宇欣. 井冈山国家级自然保护区森林生态系统服务功能价值测度[J]. *林业经济问题*, 2008, **28**(6): 512 – 516. [PENG Ziheng, WANG Huailing, WANG Yuxin. The evaluation of forest ecosystem services value in Jinggangshan National Nature Reserve [J]. 2008, **28**(6): 512 – 516] DOI: 10.16832/j.cnki.1005 – 9709.2008.06.009
- [25] 缪建群, 孙松, 王志强, 等. 江西高天岩自然保护区生态系统服务功能价值评估[J]. *生态学报*, 2017, **37**(19): 6422 – 6430. [MIAO Jianqun, SUN Song, WANG Zhiqiang, et al. Evaluating the ecosystem services of Gaotianyan Nature Reserve in Lianhua county, Jiangxi province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(19): 6422 – 6430] DOI: 10.5846/stxb201607091410
- [26] 焦玉海, 王钰, 蒯哲. 全国森林面积 2.08 亿公顷森林覆盖率 21.63% [N]. *中国绿色时报*, 2014-02-26(1). [JIAO Yuhai, WANG Yu, LIN Xi. National forest area amounts to 2.08 million hectares and the coverage rate of forest is of 21.63% [N]. *Chinese Green Times*, 2014-02-26(1)]
- [27] 袁知洋, 邓邦良, 郭晓敏, 等. 武功山山地草甸土壤全量氮磷钾分布格局及对不同退化程度的响应[J]. *西北林学院学报*, 2015, **30**(3): 14 – 20. [YUAN Zhiyang, DENG Bangliang, GUO Xiaomin, et al. Soil total NPK's distribution pattern and response to different degradation degrees in Wugong Mountain meadow [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, **30**(3): 14 – 20] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 7461.2015.03.03
- [28] 于徐根, 徐桂花, 戴征煌, 等. 江西省林草地牧草资源与生产力调查及评价[J]. *草业科学*, 2019, **36**(6): 1479 – 1489. [YU Xugen, XU Guihua, DAI Zhenghuang, et al. Forage resources and productivity of forest grassland in Jiangxi province [J]. *Pratacultural Science*, 2019, **36**(6): 1479 – 1489] DOI: 10.11829/i.issn.1001 – 0629.2018 – 0427
- [29] 郭然, 王效科, 逯非, 等. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 862 – 867. [GUO Ran, WANG Xiaoke, LU Fei, et al. Soil carbon sequestration and its potential by grassland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(2): 862 – 867] DOI: 10.3321/j.issn:1000 – 0933.2008.02.051
- [30] 陈云, 戴锦芳, 李俊杰. 基于影像多种特征的 CART 决策树分类方法及其应用[J]. *地理与地理信息科学*, 2008, **24**(2): 33 – 36. [CHEN Yun, DAI Jinfang, LI Junjie. CART-based decision tree classifier using multi-feature of image and its application [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008, **24**(2): 33 – 36]
- [31] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和 USLE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(7): 1197 – 1203. [QI Shuhua, JIANG Meixin, YU Xiubo. Evaluating soil erosion in Jiangxi province with USLE model and remote sensing technology during 1995 – 2005 [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(7): 1197 – 1203]
- [32] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, **38**(5): 381. DOI: 10.1016/0016 – 7061(83)90021 – 6
- [33] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, **14**(2): 19 – 24. [CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **14**(2): 19 – 24] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2000.02.005
- [34] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. *资源科学*, 2014, **36**(6): 1288 – 1297.

- [CHEN Sixu, YANG Xiaohuan, XIAO Linlin, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model [J]. *Resources Science*, 2014, **36**(6): 1288 – 1297]
- [35] TIAN Pei, ZHU Zhanliang, YUE Qimeng, et al. Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on mountainous and hilly areas of Hubei province, China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, **9**(3): 433 – 444. DOI: 10.1016/j.iswcr.2021.04.007
- [36] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 413 – 424. [ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(3): 413 – 424] DOI: 10.17521/cjpe.2007.0050
- [37] EADE J D O, MORAN D. Spatial economic valuation: Benefits transfer using geographical information systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 1996, **48**(2): 97 – 110. DOI: 10.1006/jema.1996.9990
- [38] 李达立. 基于两步路平台的武功山旅游者时空行为研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 1 – 65. [LI Dali. The research on Wugong Mountain tourists' spatiotemporal behavior based on two-step platform [D]. Changsha: Central South University of Forestry Technology, 2018: 1 – 65]
- [39] 李永涛, 杜振宇, 王霞, 等. 黄河三角洲自然保护区湿地生态服务功能价值评估[J]. *海洋环境科学*, 2019, **38**(5): 761 – 768. [LI Yongtao, DU Zhenyu, WANG Xia, et al. Evaluation of wetland ecosystem services in Yellow River Delta Nature Reserve [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, **38**(5): 761 – 768] DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2019.05.017
- [40] 赵欣, 张杰, 钟林东. 黑龙江丰林国家级自然保护区生态系统服务价值评估与分析[J]. *北京林业大学学报*, 2021, **43**(7): 100 – 110. [ZHAO Xin, ZHANG Jie, ZHONG Lindong. Evaluation and analysis on ecosystem service value of Fenglin National Nature Reserve in Heilongjiang province of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(7): 100 – 110] DOI: 10.12171/j.1000 – 1522.20210041

Assessment of Ecosystem Service Values in Wugongshan Geopark, China

PENG Jinchen, YE Changsheng*, XIAO Wei, CAI Xin

(College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Geoparks constitute unique territorial complexes centered on geoheritage assets with significant scientific, aesthetic, and ecological value, necessitating comprehensive ecosystem service value (ESV) assessment and methodological standardization. Current ESV quantification frameworks for small-scale protected areas (e. g., nature reserves, national parks, geoparks) exhibit technical limitations in geodata-model compatibility and cultural service representation, thereby demanding granular assessment frameworks with integrated multi-source data fusion.

In this study it established a 30 m × 30 m pixel-scale ESV estimation framework for Wugongshan Geopark by integrating CART decision tree-classified land-use data and ecological process models (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE; Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA), followed by comprehensive analysis of the status and spatial distribution patterns of ecosystem services of the Geopark.

(1) As a typical complex ecosystem, Wugongshan Geopark exhibited multidimensional ESV mechanisms across five subsystems: forest, meadow, geo-landscape, cultural landscape, and farmland ecosystems, of which forest ecosystems contributed most prominently (67.98%), followed by meadow ecosystems (19.14%). Farmland, geo-landscape, and cultural landscape system accounted for 2.68%, 5.64%, and 4.56% respectively.

(2) Wugongshan Geopark had spatial heterogeneity with high-value clusters concentrating in central-southern meadows and central geo-cultural attractions, jointly driven by tourism resources, human activities, and natural

drivers (vegetation coverage, topography, climate).

(3) Meadow ecosystems yielded peak per-unit-area ESV (1.6939 million CNY/ha), while evergreen broadleaf forests contributed maximal proportion (41.42%), revealing how geological heritage enhanced ecological service value through microtopography shaping, providing a basis for high-value zone conservation.

(4) In 2020, the total ESV of Wugongshan Geopark reached 17.561 billion CNY, with its 77.2% from four core functions: water conservation (23.09%), carbon sequestration/oxygen release (18.97%), soil retention (16.86%), and aesthetic recreation accounting (18.81%), underscoring its critical role in Jiangxi Province's ecological security pattern.

These findings provide a scientific basis for geological heritage protection, ecological function optimization, and ecological compensation for geoparks.

Key words: ecosystem service value (ESV); value assessment; Wugongshan Geopark

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)

喀纳斯山区道路雪崩灾害

(强小文,新疆大学)

喀纳斯景区位于新疆北部的阿尔泰山中段,是一处集冰川、雪原、高山、河流、湖泊、森林、草原等自然景观于一体的综合性生态旅游区。这里保存着完整的自然生态系统,素有“人类净土”的美誉,每年吸引着大量游客前来观光。冬季的喀纳斯银装素裹,独特的冰雪景观更是成为滑雪爱好者和摄影师的理想目的地。

2024年1月初,阿勒泰地区遭遇持续强降雪天气。自1月6日起,新疆迎来2024年首场持续时间最长的降雪过程,其中北疆北部的阿勒泰地区降雪尤为显著。持续的强降雪导致山区雪崩灾害频发,多处交通要道被阻断,对当地交通出行和旅游活动造成严重影响。针对山区特殊的地形气候条件,系统研究雪崩灾害的时空分布规律与成灾机制,是提升灾害防控能力的迫切需求。对喀纳斯山区道路雪崩事件的科学解译与动力学定量评估,不仅为区域雪崩风险识别、道路防灾布设与应急响应提供科学支撑,更为高寒山区雪崩模拟与管理提供了重要参考范式。

详见本期《新疆阿勒泰喀纳斯山区道路雪崩灾害特征及致灾机制》一文。