引文格式：周友祝,赵灵琳. 喀斯特地区土壤保持及其生态价值空间分布特征分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):49-53. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.011

喀斯特地区土壤保持及其生态价值空间分布特征分析

周友祝[1]，赵灵琳[2*]
（1. 遵义市自然资源调查与国土空间规划研究院，贵州 遵义 563000；2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院，贵州 贵阳 550025）

摘　要：以DEM数据、降雨数据、土壤数据和NDVI数据等为研究数据，采用RUSLE模型对研究区森林生态系统土壤保持量进行模拟，系统分析了其在水平空间和海拔高度上的空间分布特征，区域生态保护和土地合理利用具有重要意义。结果表明：①研究区森林生态系统土壤保持总量达到22.78万t，价值量为292.77万元；②土壤保持价值高值集中在西南部和南部边缘区域，低值分布在中部和北部区域；③冷热点分析显示土壤保持价值呈现出南“热”北“冷”、东西分化的空间格局；④单位面积土壤保持量和单位面积土壤保持价值量呈先随海拔升高而波动下降的趋势，但单位面积土壤保持价值整体变化趋势更为缓和。

关键词：土壤保持；RUSLE模型；生态价值；喀斯特地区
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0049-05

Spatial Differentiation Characteristic Analysis of Soil Conservation and Its Ecological Value in Karst Areas

ZHOU Youzhu[1], ZHAO Linglin[2]
(1. Zunyi Institute of Natural Resources Survey and Land Space Planning, Zunyi 563000, China;
2. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Taking DEM data, rainfall data, soil data, and NDVI data as the research data, we used the RUSLE model to simulate the soil conservation of forest ecosystem in the study area, and systematically analyzed the spatial distribution characteristics in both horizontal space and altitude, which could provide significant guidance for regional sustainable development, ecological protection, and land-use planning. The findings show that ①the total soil conservation of forest ecosystem in the study area reaches 227 800 t, with a value of 2.927 7 million RMB. ②High soil conservation values are concentrated in the southwestern and southern edge regions, while low values are distributed in the central and northern regions. ③The cold-hot spot analysis result shows that soil conservation values exhibit a spatial pattern of “hot spot in the south and cold spot in the north” with east-west differentiation. ④The soil conservation per unit area and its value per unit area initially fluctuate and decrease with increasing altitude, but the overall trend of value per unit area remains more stable.

Key words: soil conservation, RUSLE model, ecological value, Karst region

目前对于喀斯特地区土壤保持的研究在空间尺度上多聚焦于小流域或县级行政区[1-4]；从生态系统类型看，喀斯特地区森林生态系统和流域生态系统[5-6]是主要的研究对象；研究方法上则普遍运用物质量和价值量评价法[7]。经过梳理发现，喀斯特地区土壤保持服务价值的研究主要聚焦于水平空间的分布特征，往往忽视了垂直方向的空间变化[8-9]。因此本研究以典型的山地喀斯特地区仁怀市11个乡镇作为研究区，在保证数据权威性和可量化性的前提下，借鉴我国发布《陆地生态系统生产总值核算技术指南》中的评估方法[10]，计算土壤保持量及其服务价值，揭示其在水平空间和海拔高度上的分布特征，以期为促进生态系统服务功能的提升，和地区生态环境的良性发展提供科学依据和实践指导。

1　研究区概况

仁怀市位于大娄山北侧、赤水河畔，地理坐标介于27°33′~28°10′N，105°49′~106°35′E之间。该地区山峦起伏、群峰叠嶂，沟壑纵横、坡陡谷深，地势复杂，地形多样，主要以喀斯特（岩溶）地貌为主，辅以碎屑岩地貌[11]。仁怀市包含20个镇（乡、街道），结合实际情况选择坛厂镇、大坝镇、学孔乡、高大坪乡、龙井乡、后山乡、九仓镇、鲁班镇、五马镇、喜头镇、长岗镇等11个乡镇为研究区，如图1。

第一作者简介：周友祝（1987—），本科，工程师，从事土地管理、测绘地理信息工作，E-mail：601699760@qq.com。
通信作者：赵灵琳（2000—），硕士研究生，研究方向为遥感与生态系统服务价值评估，E-mail：3418161410@qq.com。

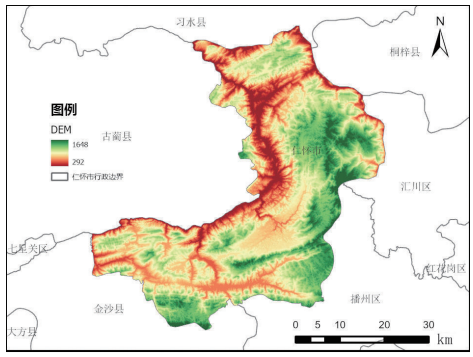


图1 研究区示意图

审图号：GS(2024)0650号

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

基于RUSLE模型进行土壤保持量模拟所使用的基础数据有数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据、降雨数据、土壤数据和植被NDVI数据等，数据来源见表1。RUSLE模型中不同指标的数据来源和分辨率各不相同，需要对数据进行标准化处理。数据处理均在ArcGIS Pro平台上完成，投影统一为WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2.2 研究方法

2.2.1 RUSLE模型

土壤保持是重要的生态系统服务功能，评估生态系统土壤保持能力，区分其重要功能区，能更好地实施相关生态保护措施。本研究将土壤保持量界定为潜在与现实土壤侵蚀二者之差值[12]。参考《陆地生态系统生产总值核算技术指南》，采用RUSLE模型进行计算，公式为：

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (1)$$

式中，Ac 为土壤保持量（t/hm²×a）；Ap 为潜在土壤侵蚀量；Ar 为实际土壤侵蚀量；R 为降雨侵蚀力因子；K 为土壤可蚀性因子；L、S 为地形因子；L 为坡长因子（无量纲）；S 为坡度因子（无量纲）；C 为植被覆盖因子（无量纲）；P 为水土保持措施因子（无量纲），并且由于研究区域全为林地，所以 P 赋值为1。

降雨侵蚀量因子 R：表征了降水剥离和搬运土壤的潜在能量，采用多年平均的年降雨侵蚀力进行计算，公式为：

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times \exp\left(1.5 \times \lg\left(\frac{P_i^2}{P}\right) - 0.081\ 88\right) \quad (2)$$

式中，R 月降雨量；P 为年降雨，单位为mm；土壤可蚀性因子 K，作为是衡量土壤自身抵抗径流剥离与输送能力的内在属性，K 值与土壤的结构、有机质、质地和渗透性等理化特性密切相关，公式为：

$$K = (-0.013\ 83 + 0.515\ 75K_{EPIC}) \times 0.131\ 7$$

$$K_{EPIC} = \{0.2 + 0.3\exp[0.256m_s(1 - m_{silt}/100)]\} \times [m_{silt}/(m_c + m_{silt})]^{0.3} \times \{1 - 0.25\text{org}C/[\text{org}C + \exp(3.72 - 2.95\text{org}C)]\} \times \left\{1 - 0.7(1 - \frac{m_s}{100})/\left\{(1 - \frac{m_s}{100}) + \exp\left[-5.51_22.9(1 - \frac{m_s}{100})\right]\right\}\right\} \quad (3)$$

式中，K 为修正后的土壤可蚀性因子；mc、msilt、ms和orgC分别为粘粒、粉粒、砂粒和有机碳的百分比含量（%）。

地形因子 L、S：地形对土壤侵蚀的效应主要是通过坡长（L）和坡度（S）这2个因子来体现的[8]。LS 因子的估算为：

$$\begin{cases} L = \left(\dfrac{\lambda}{22.13}\right)^m \\ m = \dfrac{\beta}{\beta + 1} \\ \beta = (\sin\theta/0.089\ 6)/\left[3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56\right] \\ S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5°) \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & (5 \leqslant \theta < 10°) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (10° \leqslant \theta) \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

植被覆盖因子 C：植被在减缓土壤流失中的积极效应。针对本研究的森林生态系统，我们根据植被覆盖度的差异对其进行赋值，详见表2。

表1 所用数据及来源

数据类型	数据描述	数据来源
土壤数据	世界土壤数据（HWSD） 分辨率 1×1 km	国家青藏高原科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn/)
数字高程模型	DEM 数据 分辨率 30×30 m	地理空间数据云 (http: //www.gscloud.cn)
降雨数据	降雨数据 分辨率 1×1 km	国家气象科学数据中心 (http://data.cma.cn)
植被数据	NDVI 数据 分辨率 1×1 km	地理空间数据云 (http: //www.gscloud.cn)

表2 C 的赋值标准

生态系统类型	植被覆盖度/%					
	<10	10~30	30~50	50~70	70~90	>90
森林	0.10	0.08	0.06	0.02	0.004	0.001

2.2.2 土壤保持服务价值核算方法

气候、土壤条件、地形地貌与植被状况是共同决定土壤保持功能的四大核心要素。而这项功能所产生的生态效益，则主要体现在对泥沙淤积和面源污染的有效控制上[13]。

减少泥沙淤积是通过减缓泥沙在湖泊、河流和水库中的堆积，有助于减少干旱和洪涝灾害的风险。通

过替代成本法，可以将这种生态效益转化为进行人工清淤所需的成本[14]。

减少面源污染指的是土壤中的营养物质（主要是氮和磷）在水蚀冲刷作用下流失到受纳水体中，导致广泛的面源污染。采用机会成本法，将其效益换算为通过工程措施移除水体中过量氮、磷营养盐的治理费用[14]。因此，土壤保持价值通过核算上述2个指标的贡献来计算。

$$\begin{cases} V_{sr} = V_{sd} + V_{dpd} \\ V_{sd} = \lambda \times \left(Q_{sr}/\rho\right) \times c \\ V_{dpd} = \sum_{i=1}^{n} Q_{sr} \times C_i \times P_i \end{cases} \tag{5}$$

式中，V_{sr} 为土壤保持价值（元/a）；V_{sd} 为减少泥沙淤积价值（元/a）；V_{dpd} 为减少面源污染价值（元/a）；Q_{sr} 为土壤保持量（t/a）；c 为单位水库清淤工程费用（元/m³）；ρ 为土壤容重（t/m³）；λ 为泥沙淤积系数；i 为土壤中氮、磷等营养物质数量，i = 1，2，…，n；C_i 为土壤中氮、磷等营养物质的纯含量（%）；P_i 为处理成本。

2.2.3　探索性空间数据分析

探索性空间数据分析是一种侧重于揭示地理数据空间特征的分析方法。其核心在于量化事件间的空间关联性，从而有效地评估空间变量的集聚或离散模式，并揭示地理实体间的相互依赖关系[15]。可以根据研究区域的范围分为全局分析方法和局部分析方法。利用Moran's I指数和Getis-Ord Gi热点分析模型，研究了仁怀市土壤保持量的空间分布特征。

Moran's I指数是衡量空间集聚或离散模式的常用指标，无法精确确定具体的聚集区域和位置；相比之下，Getis-Ord Gi能够精确识别空间分布中的聚集区域，从而弥补了Moran's I指数在空间位置识别上的不足。　具体计算公式为：

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{6}$$

式中，n 为要素总数；x_i，x_j 分别为位置 i，j 的土壤保持量值，为土壤保持量的平均值；$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为基于固定距离范围建立的空间权重矩阵。Moran's I的值域为[-1，1]。当该值大于0时，表明土壤保持量在空间上呈集聚分布；小于0时，则呈离散分布，其绝对值越大表示空间异质性越强；等于0时，则意味着空间上不存在关联，呈现出随机模式。

热点分析是一种基于Getis-Ord General G*指数的映射技术，专注于识别空间聚集现象，用于空间聚类，可以分析仁怀市生态系统土壤保持量的空间分布异质性。其数学模型可以表示为：

$$G_i \times (d) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{W}_{ij}(d) X_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为 i，j 之间的空间权重矩阵；X_i 为 i 的土壤保持量值；n 为要素总数；G_i*(d)为正则表示土壤保持量高值聚集的热点区域；G_i*(d)为负则表示低值聚集的冷点区域，而不显著的值则表明为随机分布模式

2.2.4　海拔等级划分

本研究区的海拔范围从最低海拔292 m到最高海拔1 648 m，海拔落差达1 356，地形起伏显著。为保证统计分析的便利与图件表达的清晰，对研究区的海拔进行梯度划分，设为10个等级，高差约为100 m。详细的分级情况请参见表3，其中海拔梯度的定义为小于等于该级别的最大值但不包括下一个级别的最小值，例如海拔梯度1涵盖461~600 m的范围，包含461 m但不包含600 m。

表3　研究区海拔分级及各个海拔面积占比

海拔梯度	海拔/m	面积占比%
1	292~600	2.80
2	600~700	4.60
3	700~800	8.61
4	800~900	11.55
5	900~1 000	13.51
6	1 000~1 100	12.52
7	1 100~1 200	14.58
8	1 200~1 300	16.16
9	1 300~1 400	11.69
10	1 400~1 648	4.00

3　结果分析

3.1　森林生态系统土壤保持量现状

仁怀市是贵州省重要的林业区域，其森林资源的土壤保持能力对保障水资源安全、维护区域生态平衡以及促进农业可持续发展具有重要意义。借助ArcGIS Pro和Excel软件，RUSLE的土壤保持服务模型进行计算，仁怀市11个乡镇森林生态系统土壤保持总量高达22.78万t。

经统计，五马镇土壤保持量高达3.19万t，位列第一。坛厂镇和后山乡土壤保持量为3.06万t和2.47万t。

同时，用土壤保持总量除以地块总面积，得出单位面积土壤保持量。其中学孔乡、喜头镇和坛厂镇位列前三，分别为17.83、13.90和13.17 t/亩。可以发现地块面积与土壤保持量存在一定的相关性，但并非简单的线性相关，可能会受到地形地貌、气候、树种、种植年限等相关因素的影响。

3.2 森林生态系统土壤保持服务价值水平空间格局特征

3.2.1 森林生态系统土壤保持服务价值

从空间分布上看（图2），土壤保持价值高值区主要集中在研究区西南部和南部边缘区域，尤其是在海拔较高、坡度较大的山区地带。这些高值区呈现出明显的空间聚集特征，主要沿西南—东北方向分布，且土壤保持价值数值较为显著，然而其数量占比较少。低值区则广泛分布在中部和北部的低海拔区，呈连片分布，土壤保持价值相对较低，且面积占比相对较大。该空间分布模式表明，仁怀市的土壤保持价值受地形地貌和植被覆盖度的影响较大，高海拔区域由于植被较好、人类活动较少，因而具备较高的生态服务价值，而低值区则往往由于人类活动频繁、植被破坏严重，导致土壤保持服务功能较弱。

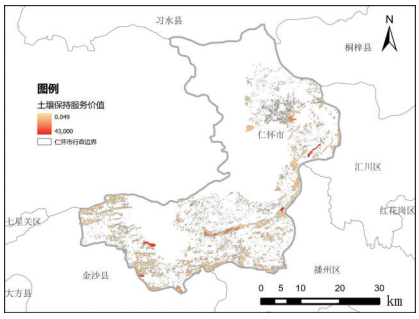


图2 仁怀市土壤保持价值量图

审图号:GS(2024)0650号

3.2.2 森林生态系统土壤保持价值量全局空间自相关分析

采用ArcGIS Pro软件中的空间统计模块对研究区森林土壤保持价值进行空间关联性分析，得到其空间自相关结果。在本研究中，仁怀市林地土壤保持价值量的莫兰指数为0.367 47，z得分为26.104 245，p值为0，因此仁怀市的林地土壤保持量存在明显的空间正相关性。

为探究土壤保持服务价值的空间集聚特征，本文引入了冷热点分析。根据冷热点分析指数值，通过自然断点法分为5级，如图3

从图中可以看出，森林土壤保持价值量的空间分布以热点区为主，面积占比达到50.31%，多分布在研究区的西南部以及中部区域，在空间上具有较强的聚集性，形成了显著的高值区。这些地区林块较大、地势较为陡峭、人类活动较少，创造了森林长期生长的条件，形成良好的森林生态系统，具有较高的土壤保持价值。冷点区则广泛分布于东北部和中部区域，呈现出分散、片状的空间分布格局，面积占比17.14%。冷点区在空间上较为零散，未呈现出明显的聚集特征。这些区域的土壤保持服务价值较低，形成了显著的低值区。次热点区分布在热点区外围，面积占比11.46%，呈现出热点和冷点区之间的过渡带特点。而不明显区则较为分散，占17.45%的面积，没有形成明确的高低值聚集趋势。次冷点区的分布区域最小，仅占总面积的3.64%，零星分布于研究区北部和西北部。这类区域土壤保持价值最低，分布格局较为零散，未形成集中连片的低值区。总体来看，土壤保持价值的冷热点分布呈现出明显的南“热”北“冷”、东西分化的空间格局，为区域生态保护和土地利用规划提供了清晰的空间指引。

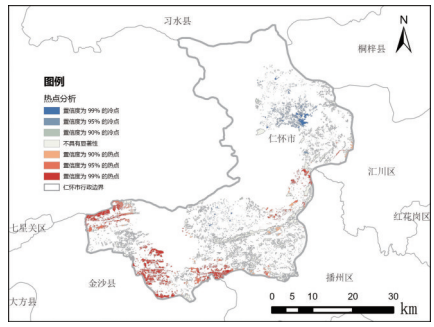


图3 仁怀市土壤保持价值量热点分析图

审图号:GS(2024)0650号

3.3 不同海拔等级森林生态系统土壤保持空间分布特征

研究区域内不同海拔梯度的面积分布情况如下：海拔梯度4~9共计6个梯度，各自占据全域面积比例均超过10%，合计达到研究区域总面积的80%。研究区约80%的森林资源分布在800~1 400 m的海拔范围内，其中海拔梯度8的面积优势最为显著，占全区总面积的16.16%。如图4所示。

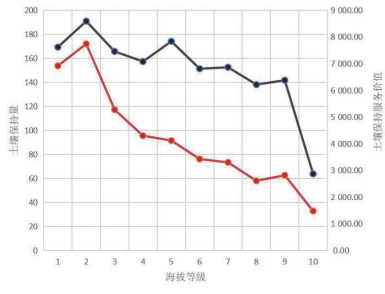


图4 仁怀市不同海拔等级单位面积土壤保持量及其土壤保持服务价值

从图中可以看出，森林生态系统的土壤保持量和土壤保持服务价值在不同海拔等级之间呈现出明显的

变化趋势。

单位面积价值量与实物量表现出相似的分布模式，即随着海拔上升，其价值也呈现出在波动中下降的总体趋势。不同海拔梯度中，土壤保持服务价值的最高和最低点同样出现在海拔等级2和10。

从总体趋势来看，低海拔区域的森林生态系统土壤保持量和土壤保持服务价值均显著高于高海拔区域，这可能与森林的分布格局和土壤侵蚀的特征密切相关。随着海拔的升高，土壤保持功能逐渐减弱。

4 讨 论

本文运用RUSLE模型，对贵州省仁怀市森林生态系统的土壤保持状况及其生态价值进行了详细分析。研究结果表明，研究区森林生态系统土壤保持总量达到22.78万t，价值量为292.77万元。尽管研究区只占仁怀市国土面积的10.86%，但其土壤保持服务对当地经济和生态环境具有重要贡献。研究区森林土壤保持价值量分布在研究区西南部和南部边缘区域，具有显著的冷热点分布。从水平空间和海拔高度对森林生态系统土壤保持服务价值进行空间分布特征分析，加深对特殊区域的的生态系统的空间分布规律的了解，更为立体的了解了山地岩溶生态系统服务变化特点。

未来的研究可以进一步扩展到贵州省其他典型喀斯特地区，开展更大范围的土壤保持研究。并且，本研究只是分析了研究区的土壤保持价值量的空间分布特征，并未对其空间分布差异的原因进行探索，尤其是从海拔高度方面进行分析，后续可从该方面进行更加深入的研究。同时，应加强对保护区的管理和资源利用，通过将生态服务转化为绿色GDP，促进经济、社会及生态的协调发展。此外，科学合理地制定保护区发展的决策，提升居民环保意识，增强区域生态系统服务功能价值，将有助于实现可持续发展目标。

5 结 论

本文利用RUSLE模型、GIS技术和土壤保持量价值量核算等方法，对仁怀市11个乡镇森林生态系统的土壤保持量及其价值进行探索性的研究，得到结论如下：

1）研究区森林生态系统土壤保持总量达到22.78万t，价值量为292.77万元。从空间分布上看，研究区土壤保持价值高值分布在西南部和南部边缘区域，低值分布在中部和北部区域。

2）通过冷热点分析，整体上，土壤保持价值呈现出南“热”北“冷”、东西分化的空间格局。其中，森林土壤保持价值主要集中在研究区的西南部和中部，热点区占50.31%。冷点区则主要分布在东北部和中部，面积占17.14%，呈现出分散、片状的低值分布。其余区域面积占比较小，没有形成特别明显的聚集趋势。

3）随着海拔的升高，单位面积土壤保持量呈现波动下降的趋势；单位面积土壤保持价值于土壤保持量变化趋势基本一致，整体趋势更为缓和，在海拔等级10时出现显著的下降。

参考文献

[1] 徐烨. 云南小江流域生态系统服务功能评估和影响因子分析[D]. 北京:中国地质科学院,2019

[2] 徐建宁. 基于InVEST模型的小江流域生态系统服务评估[D]. 兰州:兰州交通大学,2017

[3] 张明阳,王克林,刘会玉,等. 桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征[J]. 生态学报,2011,31(14):3 947-3 955

[4] 王翠,周忠发,李永柳,等. 喀斯特流域水土流失对水库碳汇效应的影响[J]. 水土保持通报,2021,41(6):1-7

[5] 李亦秋,邓欧,李若霜,等. 黔中喀斯特城市新区森林生态系统水土保持及其生态效益[J]. 水土保持通报,2022,42(4):244-250

[6] 李阳兵,王世杰,周德全. 茂兰岩溶森林的生态服务研究[J]. 地球与环境,2005,32(2):39-44

[7] 李晋,熊康宁. 我国喀斯特地区水土流失研究进展[J]. 土壤通报,2012,43(4):1 001- 1 007

[8] Wu K Y. Ecosystem Service Value of Restored Secondary Forest in the Karstic-rocky Hills:Ecosystem Service Value of Restored Secondary Forest in the Karstic-rocky Hills[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture,2009,16(4):1 011-1 014

[9] Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. Increased VegetationG-growth and Carbon Stock in China Karst Via Ecological Engineering[J]. Nature Sustainability,2018,1(1):44-50

[10] 赵金龙,王泺鑫,韩海荣,等. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势[J]. 生态学杂志,2013,32(8):2 229-2 237

[11] 刘思佳,常森,吴红梅,等. 仁怀市地质多样性特征及价值分析[J]. 山地农业生物学报,2023,42(6):1-8

[12] 谭永滨,谢剑亮,冉江华,等. 基于RUSLE的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2023,45(9):46-56

[13] 李和平,郭海祥. 贵州省生态系统土壤保持功能时空分布演变研究[J]. 地理空间信息,2014,12(4):81-84

[14] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探:以海南岛尖峰岭热带森林为例[C]// 中国生态学学会,2000

[15] 李子辉,张亚,巴永,等. 云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别[J]. 中国环境科学,2024,44(2):1 007-1 019