



广东韶关丹霞山生态系统多样性及其空间定位*

周婷^{1,2}, 周若琪^{1,2}, 赵文胜^{1,2}, 郭剑强³, 陈再雄³, 陈昉³, 彭少麟^{1,2}

1. 中山大学国家公园与自然教育研究院, 广东 广州 510275
2. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275
3. 韶关市丹霞山管理委员会, 广东 韶关 512300

摘要: 丹霞山复杂地形地貌塑造了很高的生态系统多样性和复杂的景观多样性, 全面的系统分类、空间定位和生态系统类型描述对该区域的生态特征研究具有重要意义。本研究基于IUCN全球生态系统分类框架, 结合植被类型和特殊地形地貌特征, 对韶关丹霞山国家级自然保护区全境的生态系统类型进行研究, 并利用遥感数据与实地调查数据, 对各级生态系统进行空间定位和可视化制图。结果显示: (1) 该保护区生态系统类型可划分为81类, 包括3个I级类型、6个II级类型、12个III级类型、28个IV级类型和81个V级类型; (2) 除空间定位与格局分析外, 特别对丹霞山的4个大类的特色生态系统进行了单独的空间展示, 包括用面来展示的山顶生态系统23类和沟谷生态系统13类, 用点来代表的洞穴生态系统4类, 用线来代表崖壁生态系统4类。本研究关于生态系统类型的划分及空间定位, 揭示了丹霞山地区的独特地形地貌特征和生态系统多样性特征, 深化了丹霞山生态系统多样性和形成机制的理解, 结果可为开展生态系统保护和管理提供重要的参考。

关键词: 丹霞地貌; 生态系统分类; 空间定位; 制图

中图分类号: Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)06-0104-10

Ecosystem biodiversity and spatial location of Mountain Danxiashan in Shaoguan, Guangdong

ZHOU Ting^{1,2}, ZHOU Ruoqi^{1,2}, CHIO Manseng^{1,2},
GUO Jianqiang³, CHEN Zaixiong³, CHEN Fang³, PENG Shaolin^{1,2}

1. National Park and Nature Education Research Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
3. Administrative Commission of Danxiashan National Park, Shaoguan 512300, China

Abstract: The sophisticated topography and geomorphology of the Danxia landscape shaped high ecosystem diversity, but it has not been systematically classified, and its spatial location and the characteristics of the main ecosystem types have also not been well investigated. This study focuses on the Danxiashan National Park in Shaoguan and proposes an ecosystem classification system for Danxia geomorphic types under the IUCN global ecosystem classification framework, together with the vegetation types and special topographic and geomorphic characteristics of Mt. Danxiashan. Through

* 收稿日期: 2024-05-17 录用日期: 2024-06-13 网络首发日期: 2024-07-23

基金项目: 国家公园建设专项(2021GJGY034)

作者简介: 周婷(1984年生), 女; 研究方向: 恢复生态学, 景观生态学;

E-mail: zhout32@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 彭少麟(1956年生), 男; 研究方向: 恢复生态学;

E-mail: lsspsl@mail.sysu.edu.cn

论文视频摘要见增强出版



ZR20240163



ZR20240163

remote sensing data and field survey work, the ecosystems were spatially positioned and visualized mapping was implemented. The results show that there are 81 different ecosystem types within the reserve, including 3 types of level I, 6 types of level II, 12 types of level III, 28 types of level IV, and 81 types level V. In addition, the spatial positioning and pattern analysis of various levels of ecosystems were conducted, with special attention given to the 4 characteristic ecosystems of Mt. Danxiashan, including 23 categories of mountaintop ecosystems, 13 categories of valley ecosystems, 4 categories of cave ecosystems, and 4 categories of cliff ecosystems, each of which was displayed separately and spatially. This study has revealed the unique topographic and geomorphic characteristics and ecosystem diversity features of the Mt. Danxiashan area, deepened the understanding of the ecosystem diversity and formation mechanism of Mt. Danxiashan. The data can serve as an important reference for the protection and management of ecosystems in protected areas.

Key words: Danxia landform; ecosystem classification; visualization; mapping

生态系统多样性是生物多样性的最高层次,主要由生物群落、生态过程以及在不同时空尺度上的分布和变化构成(马克平等,1995),对维持多样的栖息地、群落的复杂性和生态系统服务等方面具有重要的意义。生态系统多样性的判定和保护首先依赖于生态系统的类型划分,也就是根据其生物群落和环境要素的差异,将陆地表层划分为具有一定结构和功能同质的单元,其内部特征具有相对的一致性(孙鸿烈,2005)。目前,根据不同的研究对象提出了不同的分类原则,构建了不同的分类体系,如以植被类型研究为重点的分类体系(Faber-Langendoen et al., 2014)、以面向生态系统服务的生态系统分类(吕昌河等,2020),以土地利用/覆被视角分类(Islam et al., 2018),也有基于多源遥感数据、综合气候、地形等要素提出的全国生态系统分类方案(欧阳志云等,2015)。另外,国际自然保护联盟(IUCN, International Union for Conservation of Nature)将全球生态系统分成的六大类引发了学术界对生态系统类型划分的广泛关注(Keith et al., 2022)。特别是对于保护区来说,对生态系统进行详细的分类和划分,进而绘制生态系统分布图进行准确的空间定位,可以全面评估生态系统的健康状况,有助于制定有效的保护和管理计划,确保生物多样性的有效保护和资源的可持续利用。然而,关于保护地的生态系统类型划分,尤其是空间定位,尚处于探索阶段。

丹霞地貌是由第三纪红层沉积形成的红层地貌,特点是陡崖坡面广泛发育,形成独立的孤岛状山峰或悬崖围闭的沟谷,其极具观赏价值和科学考察价值。中国丹霞地貌是世界丹霞地貌区的主要组成部分,广泛分布于我国28个省市自治区

的1000多处。丹霞地貌内部的自然生境高度分化,形成诸多不同尺度的独特小生境,其蕴含极为复杂独特的生态系统,不仅拥有丰富的生物多样性,而且也成为许多濒危生物的栖息地。丹霞山国家级自然保护区是丹霞地貌的命名地,也是中国丹霞世界自然遗产的重要组成部分。丹霞山一直是备受学者关注与研究的热点地区,主要研究方向包括生物区系(梁胜等,2022;刘蔚秋等,1999)、物种演化(何向阳等,2019;武星彤等,2018)、微生物(Wang et al., 2022; Zheng et al., 2023)、植物群落研究(旷建军等,2009;梁胜等,2022;欧阳杰等,2021;彭华等,2018)、生态系统服务评估(刘俊松,2022;隋春花等,2019)等,但结合地形地貌特点进行生态系统分类及可视化制图的研究尚未涉及。

本文以丹霞山国家级自然保护区为研究对象,通过广泛的实地考察和数据收集,深入探究了丹霞山的主要生态系统的结构和特征。在充分理解生态系统的结构、格局和特征的基础上,参考IUCN全球生态系统分类,并结合丹霞山的特殊地形地貌和小生境等特征对丹霞山生态系统进行类型划分。这一研究能够填补生物多样性科考在生态系统层次上的空白,以便全面认识丹霞地貌不同生物群落的组成、结构和功能,为实现可持续发展的生态系统管理和生物多样性保护实践奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择丹霞山国家级自然保护区(以下简称“丹霞山”)作为研究区域,位于广东省韶关

市东北部(113°36'25"~113°47'53"E, 24°51'48"~25°04'12"N), 地跨仁化县和浈江区, 总面积为 292 km²。是丹霞地貌中发育最典型、类型最齐全、造型最丰富的丹霞地貌集中分布区。丹霞山气候属亚热带季风气候, 年平均气温 19.7 °C, 年均降雨量为 1 715 mm。

1.2 生态系统分类体系构建

在 IUCN 全球生态系统分类(IUCN Global Ecosystem Typology 2.0)框架下, 结合丹霞山植被分类系统, 并综合考虑丹霞山特殊地形地貌特征将丹霞山分成五级生态系统。前三级是基于生态系统功能分类, 通过参考已经开发的组装模型, 将丹霞山自上而下地划分出前三级生态系统的类型。后两级自下而上划分并归类于第三级功能组, 第四级具有相似的生态过程, 但在生物组成上表现出差异性, 第五级的生态系统类型之间的生物组成最相似。

根据总结前人的理论和方法(孙鸿烈, 2005; 师庆东等, 2014; 杨光能, 2018), 结合本研究分类的指导思想, 本次生态系统分类遵循等级性、气候植被一致性、主导因素及人为干扰等原则。

1.3 基础数据收集

丹霞山植被类型要来源于丹霞山生物多样性科考专项的项目成果, TM 遥感数据和 DEM 数据主要来源于地理空间数据云(地理空间数据云: gscloud.cn), 土地利用图来源于广东高分中心高分 2 号(高分广东中心: dgd.gov.cn), 分辨率为 0.8 m。

1.4 野外考察及制图

根据不同的类型采用不同的调查方法, 主要采用样方法和样线法。实地考察沿主要线路对沿途生态系统进行观测, 并运用无人机和相机记录生境特征。在 GPS 数据采集过程中, 对沿线自然生态系统类型进行全面记录, 特别是对遥感影像难以识别的小面积区域, 如洞穴和崖壁, 进行详尽的实地考察。同时对遥感解译过程中易混淆的地物类型, 如旱地、果园、草地等, 进行细致的记录, 并对光谱特征显著的地物类型, 如水体、建设用地等, 进行类型记录。现场调查所采集的 GPS 点位主要用于对解译结果进行目视校正与验证。

在 ArcGIS 10.8 中综合土地利用图、植被图和实地数据, 以图层叠加和拓扑校正进行空间分析, 从而分类并量化不同类型生态系统。通过精细配置, 完成生态系统边界的准确绘制和属性分析。

在对特殊生态系统空间定位时, 采集了洞穴中心点的地理坐标, 通过 ArcGIS 软件以点状标识的方式, 在地图上精确地指示了洞穴的具体位置。崖壁调查需要确定的起始与终止位置, 采用 ArcGIS 中的线绘功能, 描绘界线和延伸方向。山顶和沟谷首先需要垂直地面的角度连续拍摄照片山顶和沟谷边缘正上方的照片, 结合照片中记录的经纬度信息, 来界定这些地形特征的边界范围。

2 结果

2.1 生态系统分类

依据 IUCN 全球生态系统分类方案, 建立丹霞山生态系统五级分类体系, 即 I 级是域(realm)、II 级为功能群(biome)、III 级为生态系统功能组(ecosystem functional group)、IV 级为生态系统类型(global ecosystem types)、V 级为生态系统亚类型(subglobal ecosystem types)。总体上, 丹霞山生态系统可划分为 3 个 I 级类型, 6 个 II 级类型, 12 个 III 级类型, 28 个 IV 级类型和 81 个 V 级类型(增强出版:附表 1)。

2.2 丹霞山生态系统空间分布特征

丹霞山的生态系统类型主要集中在陆地域, 占总面积的 93.7%。其次是淡水域生态系统, 占比为 6.10%, 而水陆交错域生态系统的面积比例则小于 1% (图 1)。丹霞山以中部的锦江为界, 东部主要为丹霞山各类特色生态系统, 整体上地势起伏较大, 山块数量丰富, 山体在受到流水侵蚀、风化等外力作用下可能会发生坍塌等现象, 因此该区域崖壁、洞穴、山顶、沟谷生态系统类型较为丰富。演替早期的马尾松混交林是丹霞山面积最大的生态系统类型, 占总面积的 30.33%, 其主要分布在东部和西南部。西部主要是演替中后期的木荷林生态系统, 占丹霞山总面积的 13.50%。在地势平坦和海拔较低约 60~170 m 的区域, 主要分布有淡水域生态系统和集约利用土地生物群区, 这些区域比较有利于人们开展各种生活 and 生产活动, 以满足交通运输、农业耕作、水资源利用等基本要求。

2.3 丹霞特色生态系统结构和空间格局

2.3.1 山顶生态系统

丹霞地貌较典型的类型是山顶平缓呈锥状山峰, 四壁陡立。其陡坡上基本无水分和无土壤层, 一般无大型植物生长, 造成山顶植物和山脚植物群落差异较大, 呈现明显的隔离状态。在丹霞山顶生态系统分布图上可以看

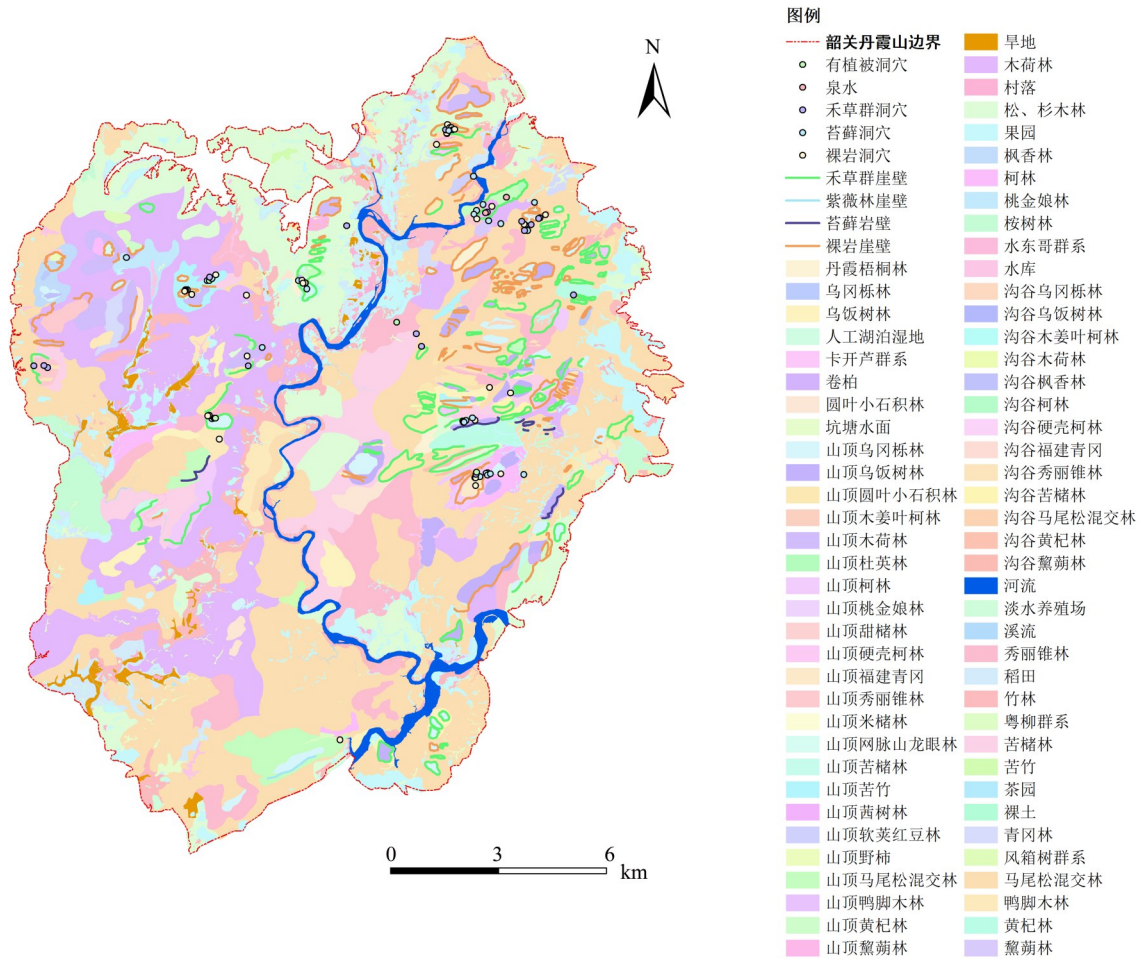


图1 生态系统空间分布图

Fig. 1 Ecosystem spatial distribution map

出, 山顶生态系统主要分布在东侧地势起伏较大的区域, 而西部比较平坦山顶的生境条件受到周围环境影响更大, 其山顶生境条件较为单一, 山顶的物种数量也较少, 相较于丹霞山东部而言适宜生长的植物多样性更少。山顶生态系统类型被分为23种类型, 共有189个斑块(图2)。

山顶生态系统的分布和斑块数量统计: (1)山顶马尾松林, 49个斑块, 主要分布在仙人迹、金龟岩、韶石山、蜡烛寨、韭菜寨、田螺寨附近的山峰上。(2)山顶野柿林, 1个斑块, 分布在海拔587.48 m的平头寨山顶;(3)山顶硬壳柯林, 2个斑块, 分布在阳元山和白寨顶附近的山顶;(4)山顶甜楮林, 4个斑块, 分布在白寨顶附近、平头寨附近的山顶;(5)山顶杜英林, 1个斑块, 分布在丹霞山主峰中的长老峰;(6)山顶乌冈栎林, 数量比较多, 40个斑块, 主要分布于白寨顶附近、瑶婆寨、斧头寨、犁头寨附近区域;(7)山顶网脉山龙眼林, 1个斑块, 分布在米筛岩;(8)山顶福建青冈林, 3个斑块, 分布在白寨顶南部的山峰、蜡

烛寨东部的山峰;(9)山顶秀丽锥林, 7个斑块, 主要集中于金龟岩北部山峰、穿岩;(10)山顶苦楮林, 5个斑块, 集中分布在犁头寨、瑶婆岩北部山峰;(11)山顶木荷林, 9个斑块, 广泛分布于丹霞山的西北部、米筛岩附近;(12)山顶软荚红豆林, 2个斑块, 集中在群象出山附近;(13)山顶米楮林, 1个斑块, 分布在巴黎;(14)山顶黧蒴林, 1个斑块, 分布在拇指峰;(15)山顶鸭脚木林, 1个斑块, 分布于亚婆岩;(16)山顶黄杞林, 7个斑块, 分布在白寨顶附近山峰、朝石顶;(17)山顶柯林, 7个斑块, 分布在矮寨、白菜寨、韭菜寨山顶;(18)山顶茜树林, 1个斑块, 分布在丹霞山主山峰;(19)山顶木姜叶柯林, 1个斑块, 分布在蜡烛寨的北部;(20)山顶苦竹林, 1个斑块。(20)山顶乌饭树林, 20个斑块, 主要分布于白寨顶附近的山峰(20)山顶圆叶小石积林, 21个斑块, 广泛分布在韶石山附近的山峰;(21)山顶桃金娘林, 3个斑块, 分布在板坑尾附近山峰。

2.3.2 沟谷生态系统 沟谷生态系统面积一般呈

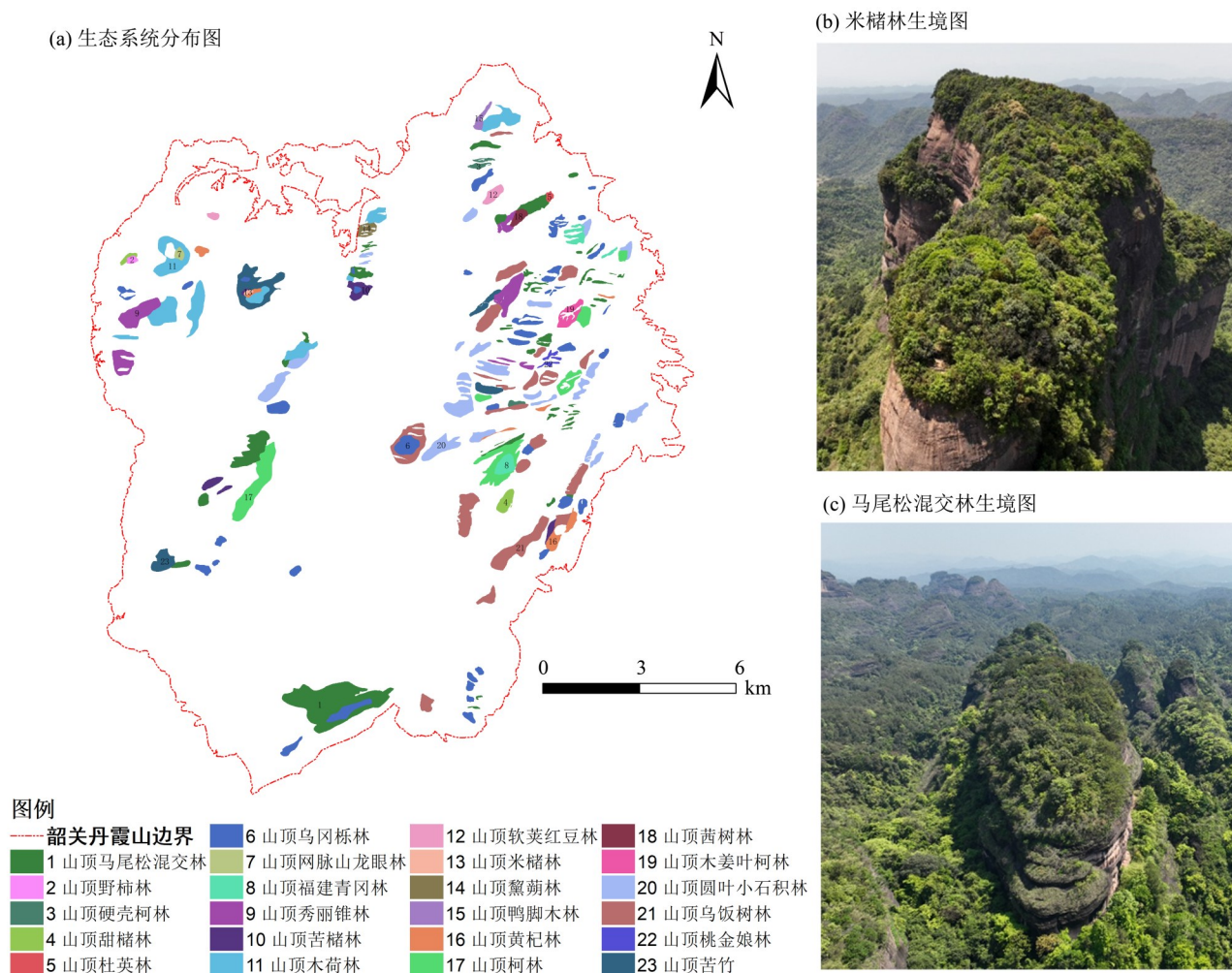


图2 山顶生态系统分布图及生境图

Fig. 2 Distribution map of mountain top ecosystem and habitat diagrams

狭长状,地貌内通风条件较差,形成了封闭小气候和优越水湿条件,显著增强了植物区系的热带性,主要是喜湿类的植物,如藤本、蕨类等植物,为热带物种提供了理想的生存环境(彭少麟等,2008)。丹霞山沟谷生态系统主要分布在东部,共有13类,有46个斑块(图3)。

沟谷生态系统的分布和斑块数量统计:(1)沟谷马尾松混交林,4个斑块,主要分布在僧帽峰附近的沟谷处;(2)沟谷枫香林,1个斑块,集中在丹霞山西部的蜡烛寨的沟谷处;(3)沟谷硬壳柯林,1个斑块,分布于阳元山沟谷处;(4)沟谷乌冈栎林,4个斑块,分布在丹霞山东部的蜡烛寨;(5)沟谷福建青冈林,3个斑块,生长于蜡烛寨东部的沟谷;(6)沟谷秀丽锥林,6个斑块,分布在白寨顶北部的沟谷、斧头寨、穿岩南部的沟谷处;(7)沟谷苦楮林,8个斑块,分布在白寨顶附近的沟谷、金龟岩西部的沟谷处;(8)沟谷黧蒴林,4个斑块,分布在拇指峰的凹处;(9)沟谷黄杞林,

3个斑块,分布在白寨顶附近;(10)沟谷木荷林,5个斑块,在金龟岩附近;(11)沟谷木姜叶柯林,1个斑块,分布在蜡烛寨附近;(12)沟谷乌饭树,3个斑块,分布在板坑尾附近;(13)沟谷柯林,1个斑块,生长于蜡烛寨附近。

2.3.3 崖壁生态系统 丹霞山境内有多处红色岩壁,因缺乏土壤层,一般情况下,大乔木很难在此生境生长。崖壁生态系统类型的群落主要在海拔171~600 m的岩壁处,分布于丹霞山的东部和西部。一些草本植物的绝佳生境,生长于贫瘠的砂砾岩层和缺水的岩壁上,如萱草(*Hemerocallis fulva*)、苦苣苔(*Conandron ramondioides*)、石蒜(*Lycoris radiata*)等。当砂砾岩土壤层较厚且积累到一定程度的营养元素以后,灌木就可以陆续进入这一区域,如稀有且特有物种丹霞梧桐(*Firmiana danxiaensis*)和紫薇(*Lagerstroemia indica*)。丹霞山崖壁生态系统被分为4种类型,共有180个斑块(图4)。

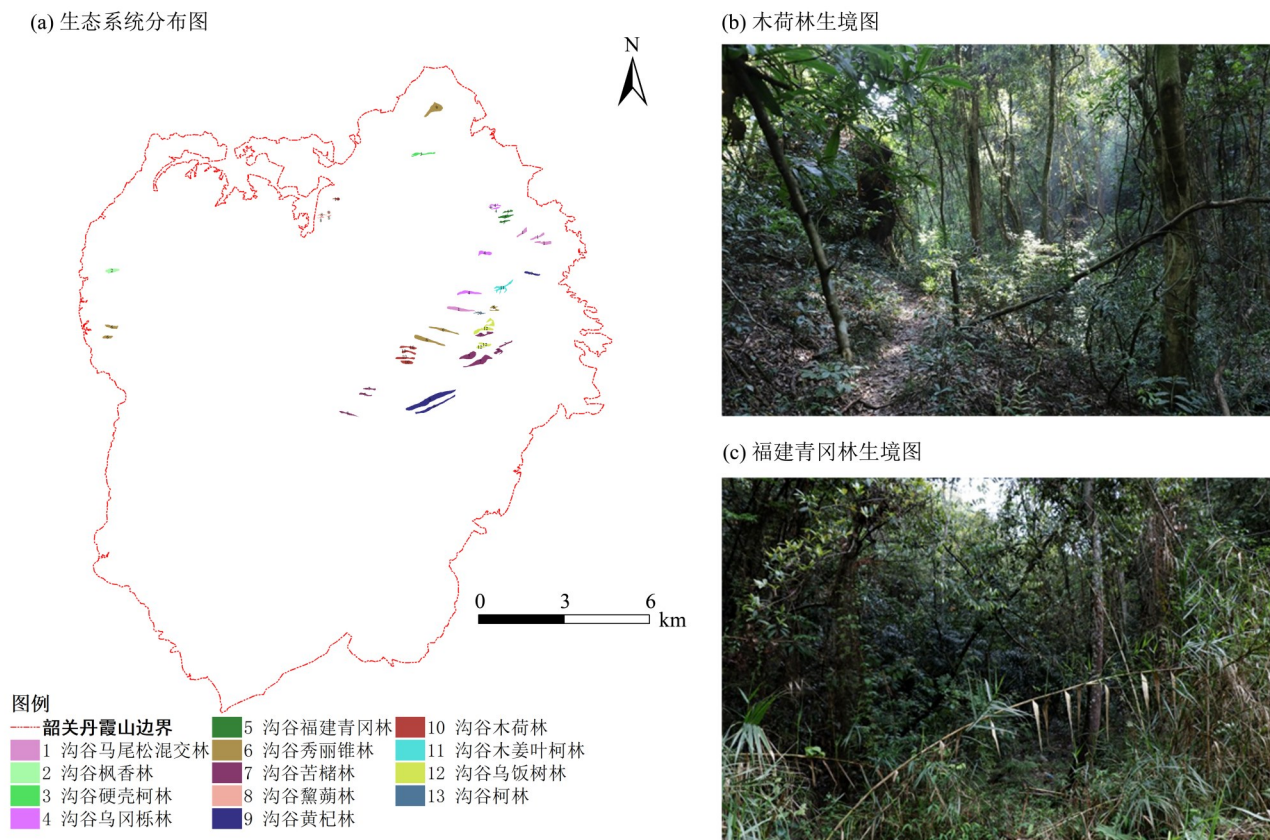


图3 沟谷生态系统分布图及生境图

Fig. 3 Valley ecosystem distribution map and habitat diagrams

崖壁生态系统的分布和斑块数量统计: (1) 裸岩崖壁, 90个斑块, 主要分布在北部的斧头寨、东部黄沙坑和西部平头寨的崖壁处; (2) 苔藓崖壁, 8个斑块, 集中在东部的朝石顶的岩壁; (3) 禾草群崖壁, 81个斑块, 主要分布于韭菜寨、韶石山、白寨顶附近的崖壁处; (4) 紫薇林崖壁, 1个斑块, 分布在丹霞山南部的狗狮滩的崖壁。

2.3.4 洞穴生态系统 丹霞山洞穴发育于崖壁, 源于雨水对丹霞崖壁的间断冲刷, 与一般洞穴生态系统如喀斯特溶洞生态系统相比, 其含氧量高和湿度低、系统结构更简单、封闭性更差, 主要生长草本和藤本植物, 如厚果崖豆藤(*Derris taiwaniana*)、酸叶胶藤(*Urceola rosea*)等。洞穴的数量众多且形状多样, 主要是特有的扁平洞, 洞顶平缓, 长度可达数十米到数百米。丹霞山的洞穴生态系统主要分布于丹霞山东部, 划分为4类, 共有91处(图5)。

洞穴生态系统的分布和斑块数量统计: (1) 裸岩洞穴, 39个斑块, 主要分布在丹霞山东部的长老峰、蜡烛寨、韭菜寨、僧帽峰、韶石山、金龟岩等地的岩壁上, 丹霞山中部如上天龙、田螺寨

的岩壁上; (2) 苔藓洞穴, 28个斑块, 集中在东部的阳元山、白寨顶、僧帽峰的岩壁, 丹霞山西部的扁寨和巴寨的崖壁处; (3) 禾草群洞穴, 20个斑块, 主要分布于东部的白寨顶、僧帽峰、鹅婆寨的岩壁, 丹霞山西部的穿岩、燕岩和九仙岩的崖壁处; (4) 有植被洞穴, 主要是被竹林且少量的乔灌木幼苗覆盖, 4个斑块, 分布在五仙岩、白寨顶、巴寨、蜡烛寨的崖壁附近。

3 讨论

3.1 构建丹霞山生态系统分类系统指标的合理性

本文通过选取植被和地貌类型作为后两级主要指标的分类方法, 丹霞山的植被类型丰富(杜志等, 2019; 胡晓杰等, 2023)和如崖壁、洞穴等小生境的特殊性。生态系统分类指标需要根据研究区域的特点和调查结果选择(Hein et al., 2016)。如Murray et al.(2020)在对整个缅甸的生态系统类型进行划分时, 采用了生物地理指标如海拔阈值作为第IV级生态系统的分类依据, 从而划分出52种不同的陆地生态系统类型。同样地, 位于云贵高原与四川盆地过渡地带的典型山地城市仁怀市

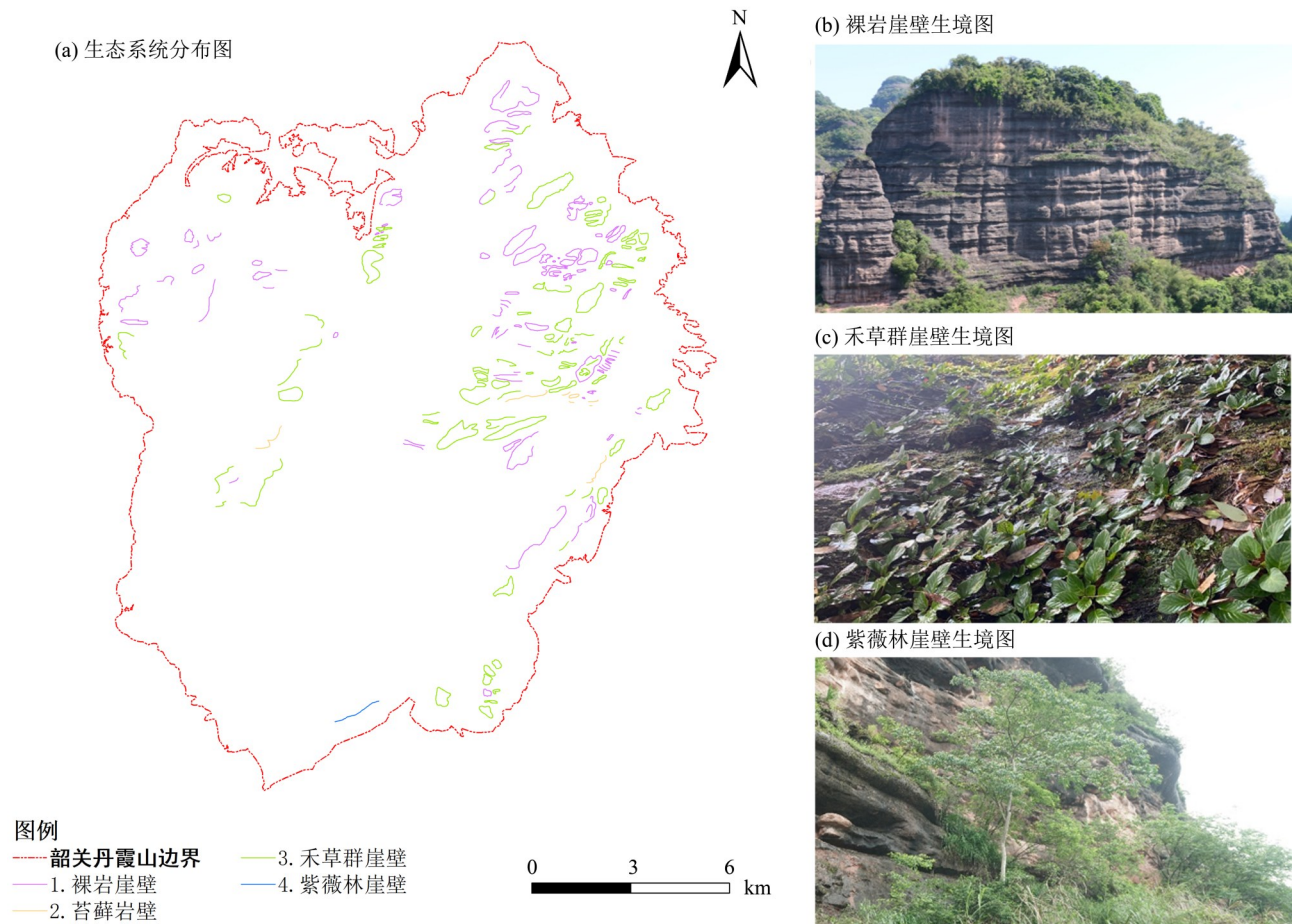


图4 崖壁生态系统分布图及生境图

Fig. 4 Cliff ecosystem distribution map and habitat diagrams

(李登泰等, 2023), 森林生态系统的分类则是基于植被类型和群系来进行的, 通过这种方式, 共识别出 35 个不同的森林生态系统类型。

植被是自然环境中的重要指示器, 可以综合反映包括气候条件、土壤特性等多方面的环境信息 (Bertollo, 1998), 根据最新的丹霞山生物多样性科考调查发现有 9 个植被型, 40 个群系, 因此选取植被类型为第 IV 级指标有合理的依据。第 V 级的生态系统类型通过实地调查获得的数据进行拟合, 使得类型内的生物组成保持最大的相似性。丹霞山有 400 多座孤峰, 山峰上有崖壁和洞穴, 山峰之间存在沟谷, 会产生不同大小和形态的小生境, 会产生多种生态效应, 如山顶生态效应 (吴瑾等, 2008)、沟谷生态效应 (彭少麟等, 2008) 和边缘效应 (彭华等, 2018) 等。第 V 级生态系统类型详细地反映了丹霞植被和特殊生态系统的特征。

结合国际标准和实际调查的五级生态系统类型, 能够更准确地识别和保护丹霞山的关键生态区域, 同时也为该地区的生态保护和可持续管理

提供了科学依据。这种生态系统方法的应用不仅有助于提升丹霞山的生态系统分类的精确性, 也为其他具有独特地貌和生态系统的地区提供了一种可行的分类框架。

3.2 丹霞山生态系统多样性成因和表现

生态系统多样性表现在生境、生物群落和生态过程的多样化以及生态系统内生境差异、生态过程变化的多样性 (马克平, 1993)。丹霞山由于红色沉积岩经过长期的风化、剥蚀和重力作用 (黄进, 1991), 不断的隆起、下沉和崩塌, 造就了多样的生境。崩塌可能在沟谷堆积, 逐步形成崩积缓坡 (彭华, 2000)。丹霞红层主要是陆相碎屑岩系, 存在着多种不同硬度的岩性 (彭华等, 2013)。泥质或粉砂岩等软岩层由于受到风化作用不断向内凹, 逐渐形成洞穴。除此以外, 丹霞山水文条件丰富, 沟谷溪流、水坑众多, 孤立的山峰、沟谷数量多 (彭少麟等, 2011)。同一山体也可能分布多种不同的生境类型, 如在崖壁上的存在着不同类型的洞穴、阶梯、新的崩塌面、凹槽等。因此,

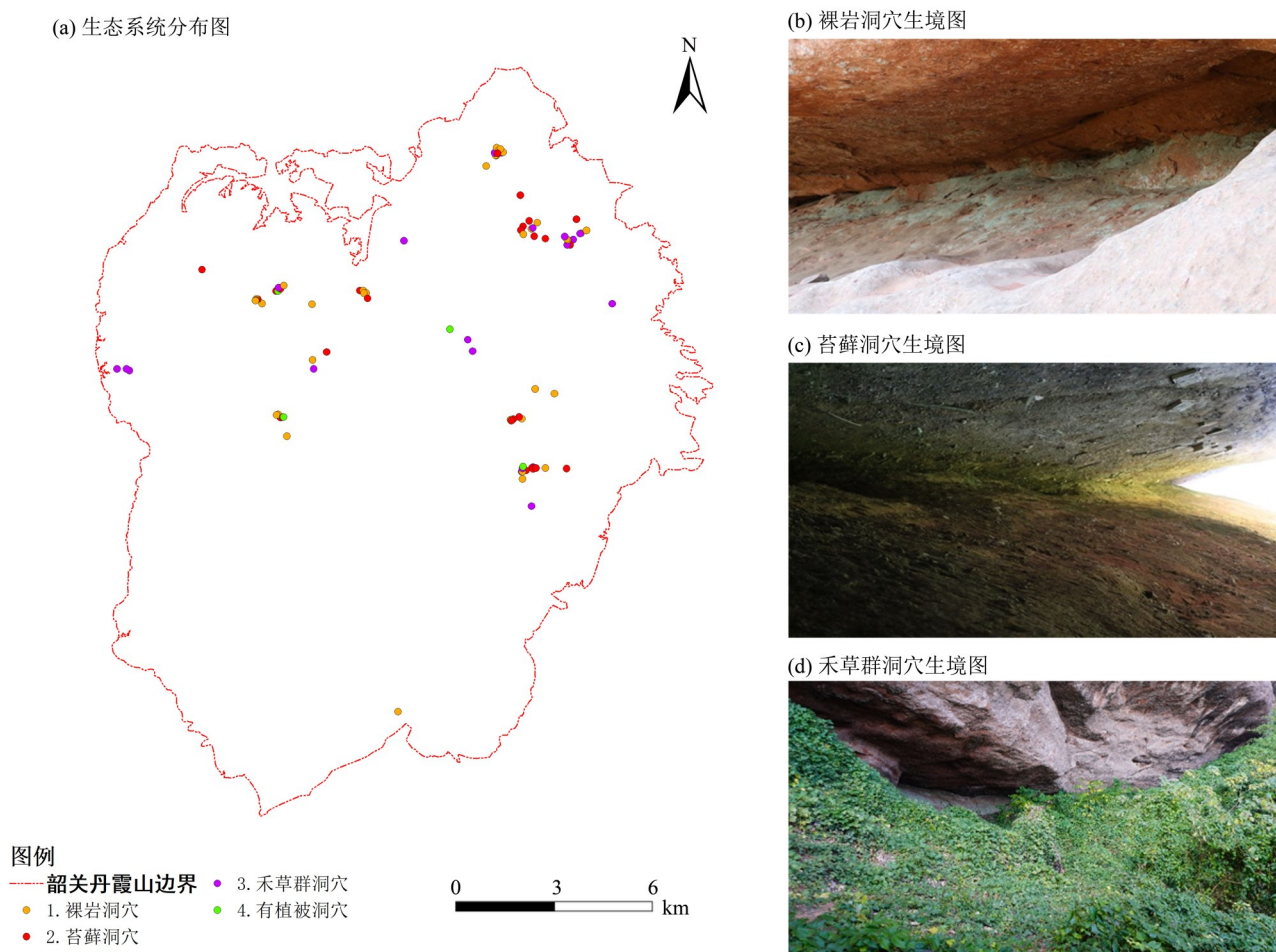


图5 洞穴生态系统分布图及生境图

Fig. 5 Cave ecosystem distribution map and habitat diagrams

丹霞山的生境类型众多,每一种生境都拥有其特定的植物群落。这是丹霞山具有高的生态系统多样性的重要原因之一。

丹霞山生态系统多样性与生态过程多样性相关。在丹霞山地质地貌的形成过程中,有多种的生态过程发生。如丹霞地貌中存在着多种不同时期的演替阶段,有些演替刚开始于裸露岩面,如崩塌的岩壁;有些是处于苔藓、地衣演替阶段,如苔藓地衣崖壁、洞穴;有些处于矮灌木阶段;有些处于顶级群落演替阶段,且会不断的随着时间推进演替方向山顶和山脊的原生群落将会往顶级群落方向演替(侯玉平等,2008)。因此,预测暖性针阔叶混交林生态系统的面积逐渐减小,而亚热带常绿阔叶林生态系统的面积会不断增大。不同的演替阶段同时共存塑造了丹霞山高的生态系统多样性。

3.3 丹霞山特殊生态系统的特点分析及展示

本次制图着重突出以特殊生境类型的生态系统,如山顶生态系统、沟谷生态系统、崖壁生态系

统和洞穴生态系统类型等。首先,丹霞山是以陡崖坡为主要坡面特征的一类特殊红层,在这些陡峭斜坡上,由于坡度接近 90° ,土壤层较薄和水分含量低,这些区域几乎没有植被。部分少量崖壁植物仅适应于丹霞地貌以粉砂岩、砂岩、砾岩为主的崖壁环境,且仅分布于丹霞山,表现出特别突出的狭窄生境特有现象(陈京锐,2023),反映了丹霞山崖壁的独特性。本文用线条来反映崖壁生态系统的定位和长度,不同的颜色代表不同的崖壁生态系统类型。发现崖壁生态系统类型主要分布在丹霞山的东部,即为韶石山核心区域,该区域地势起伏较大,孤立山峰多,与李燕文等(2023)对丹霞山崖壁的空间分布特征得出的结果类似。

此外,另一个重要的小微生境——丹霞崖壁上的洞穴,也是学者们在丹霞地貌研究中比较关注的区域,主要是崖壁上风化洞穴(史月欣等,2023)、蜂窝洞穴(陈留勤等,2018)等。丹霞洞穴的形成主要受控制于水流侵蚀作用、风蚀作用、微气候等多因素的共同作用的结果(丁宏,2020),

洞穴面积大小不一,有时特别小,整体不适合用线和面积展示,因此在地图上用点的形式展示不同洞穴类型。

丹霞地貌另一个突出的特点是山块离散,风化壳较薄,土壤养分较少,而其顶平、身陡的奇特地质特征,为旱生植物的生长创造了条件,丹霞山孤立山峰的海拔主要分布 100~200 m 之间,因此会有许多如山顶和沟谷微生境的产生。沟谷生态系统和山顶生态系统的面积是不可以忽略的,是研究生态过程的重要指标(翁时秀等, 2018)。为了展示山顶和沟谷面积斑块大小、类型和位置,沟谷生态系统和山顶生态系统类型可以用面来表示。因此,本研究用点、线、面这 3 种元素来展示丹霞山 4 类特色生态系统,可以有效地提供丰富、准确的地理信息。

4 结 论

丹霞山的生态系统分类是结合丹霞山的植被类型、地形地貌,在 IUCN 全球生态系统分类框架下,

将植被类型归纳在生态系统功能组之下,建立了丹霞山生态系统的五级分类体系,丹霞山生态系统可划分为 3 个 I 级类型, 6 个 II 级类型, 12 个 III 级类型, 28 个 IV 级类型和 81 个 V 级类型。对各级生态系统进行了空间定位与格局分析,丹霞山的生态系统主要集中在陆地地域,其中面积最大的生态系统类型是演替早期的马尾松混交林,其次是演替中后期的木荷林生态系统主要分布在西部。丹霞山特色生态系统主要分布在东部,其中山顶生态系统共有 23 类,沟谷生态系统共有 13 类,洞穴生态系统有 4 类,崖壁生态系统有 4 类,每一类特色生态系统类型单独进行了空间展示。本研究关于生态系统类型的划分及空间定位,深化了丹霞山生态系统多样性和形成机制的理解,同时可以作为保护地进行生态系统保护和管理的重要参考。

致谢 在中山大学百年校庆之际,谨以此文向在丹霞山科学研究中做出重大贡献的中山大学历代学者前辈致敬!也感谢广东省林业局和丹霞山国家级自然保护区管理局在野外调查和数据收集等工作中的大力支持!

参考文献:

- 陈京锐, 2023. 广东丹霞山及丹霞地貌种子植物区系研究 [D]. 广州: 中山大学: 1-85.
- 陈留勤, 李馨敏, 郭福生, 等, 2018. 丹霞山世界地质公园蜂窝状洞穴特征及成因分析 [J]. 地质论评, 64(4): 895-904.
- 丁宏, 2020. 广东丹霞山微洞穴景观成因 [J]. 冶金管理, (9): 94-95+97.
- 杜志, 甘世书, 郭韦韦, 2019. 丹霞山风景名胜区森林景观格局分析 [J]. 中南林业调查规划, 38(4): 26-29, 34.
- 何向阳, 彭兴文, 梁捷, 等, 2019. 广东丹霞山国家级自然保护区蝙蝠物种多样性调查 [J]. 动物学杂志, 54(6): 810-814.
- 侯玉平, 彭少麟, 李富荣, 等, 2008. 论丹霞地貌区生态演替特征及其科学价值 [J]. 生态学报, 28(7): 3384-3389.
- 胡晓杰, 陈灼康, 莫罗坚, 等, 2023. 基于遥感影像的丹霞山国家级自然保护区森林景观格局分析 [J]. 生态科学, 42(2): 155-163.
- 黄进, 1991. 中国丹霞地貌类型的初步研究 [J]. 热带地貌, (S1): 69-81.
- 旷建军, 旷柏根, 彭珍宝, 等, 2009. 万佛山丹霞地貌区湿地植被特性研究 [J]. 现代农业科技, (19): 210-214.
- 李登泰, 余江洪, 唐昶, 等, 2023. 仁怀市森林生态系统多样性研究 [J]. 山地农业生物学报, 42(6): 24-31.
- 李燕文, 李宏卫, 程亮开, 等, 2023. 丹霞崖壁的形成机制初探——以丹霞山为例 [J]. 地质论评, 69(S1): 113-116.
- 梁胜, 王梦楠, 韦宝婧, 等, 2022. 丹霞地貌石松类和蕨类植物区系比较研究 [J]. 生态科学, 41(2): 166-173.
- 刘俊松, 2022. 韶关丹霞山生态保护与旅游开发互动模式研究 [J]. 西部旅游, (20): 64-66.
- 刘蔚秋, 李植华, 刘兰芳, 1999. 丹霞山风景地貌的植物区系研究 [J]. 广西植物, 19(1): 15-21.
- 吕昌河, 刘亚群, 傅伯杰, 等, 2020. 面向生态系统服务的生态系统分类方案研发与应用 [J]. 中国科技成果, 21(18): 18-19.
- 马克平, 1993. 试论生物多样性的概念 [J]. 生物多样性, 1(1): 20-22.
- 马克平, 钱迎倩, 王晨, 1995. 生物多样性研究的现状与发展趋势 [J]. 科技导报, 13(1): 27-30.
- 欧阳杰, 张云鹏, 庄长伟, 等, 2021. 丹霞山阳元石景区丹霞梧桐地理数据库的构建 [J]. 地理空间信息, 19(7): 71-74+7.
- 欧阳志云, 张路, 吴炳方, 等, 2015. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系 [J]. 生态学报, 35(2): 219-226.
- 彭华, 2000. 中国丹霞地貌研究进展 [J]. 地理科学, 20(3): 203-211.
- 彭华, 刘盼, 张桂花, 2018. 中国东南部丹霞地貌区小尺度植被分异结构研究 [J]. 地理科学, 38(6): 944-953.
- 彭华, 潘志新, 闫罗彬, 等, 2013. 国内外红层与丹霞地貌研

- 究述评[J]. 地理学报, 68(9): 1170-1181.
- 彭少麟, 李富荣, 周婷, 等, 2008. 丹霞地貌沟谷生态效应[J]. 生态学报, 28(7): 2947-2953.
- 彭少麟, 廖文波, 李贞, 等, 2011. 广东丹霞山动植物资源综合科学考察[M]. 北京: 科学出版社: 1-235.
- 师庆东, 王智, 贺龙梅, 等, 2014. 基于气候、地貌、生态系统的景观分类体系——以新疆地区为例[J]. 生态学报, 34(12): 3359-3367.
- 史月欣, 陈留勤, 杜丁丁, 等, 2023. 丹霞山陡坡上风化洞穴的基本特征及成因探讨[J]. 热带地理, 43(1): 103-114.
- 隋春花, 陆宏芳, 2019. 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, 28(7): 1297-1306.
- 孙鸿烈, 2005. 中国生态系统[M]. 北京: 科学出版社.
- 翁时秀, 闫罗彬, 王华, 2018. 以综合思维引领丹霞地貌与旅游地理研究创新——彭华先生的地理学思想与学术贡献[J]. 地理研究, 37(12): 2411-2419.
- 吴瑾, 彭少麟, 林真光, 等, 2008. 丹霞地貌山顶生态效应[J]. 生态学报, 28(7): 3390-3400.
- 武星彤, 陈璐, 王敏求, 等, 2018. 丹霞梧桐群体遗传结构及其遗传分化[J]. 生物多样性, 26(11): 1168-1179.
- 杨光能, 2018. 基于遥感的昆明市生态系统格局及动态研究[D]. 昆明: 云南大学.
- BERTOLLO P, 1998. Assessing ecosystem health in governed landscapes: A framework for developing core indicators [J]. *Ecosyst Health*, 4(1): 33-51.
- FABER-LANGENDOEN D, KEELER-WOLF T, MEIDINGER D, et al, 2014. EcoVeg: A new approach to vegetation description and classification [J]. *Ecol Monogr*, 84(4): 533-561.
- HEIN L, BAGSTAD K, EDENS B, et al, 2016. Defining ecosystem assets for natural capital accounting [J]. *PLoS One*, 11(11): e0164460.
- ISLAM K, JASHIMUDDIN M, NATH B, et al, 2018. Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh [J]. *Egypt J Remote Sens Space Sci*, 21(1): 37-47.
- KEITH D A, FERRER-PARIS J R, NICHOLSON E, et al, 2022. A function-based typology for Earth's ecosystems [J]. *Nature*, 610(7932): 513-518.
- MURRAY N J, KEITH D A, DUNCAN A, et al, 2020. Myanmar's terrestrial ecosystems: Status, threats and conservation opportunities [J]. *Biol Conserv*, 252: 108834.
- WANG H, LI J, LIANG X, et al, 2022. Taxonomic and functional diversity of *Dendrobium officinale* microbiome in Danxia habitat [J]. *J Appl Microbiol*, 132(5): 3758-3770.
- ZHENG Z H, LU C Y, LIAN W H, et al, 2023. Danxiaibacter flavus gen. nov., sp. nov., a novel bacterium of the family Chitinophagaceae isolated from forest soil on Danxia Mountain [J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 73(10).

(责任编辑 张冰)