DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509260081

云南曲靖地质遗迹类型、价值及基于GIS的保护利用研究

王璐琳[1]，张建平[1]，田 楠[1*]，张少雄[2]，林秋霞[3]

（1. 中国地质大学（北京）自然文化研究院，北京 100083；2. 山西省煤炭地质勘查研究院有限公司，山西 太原 030000；
3. 曲靖市林业和草原局，云南 曲靖 655000）

摘要：拟建曲靖世界地质公园位于云南省曲靖市扬子地块，区域内地质演化历程复杂，孕育了类型多样、科学价值突出的地质遗迹资源。通过系统野外调查与综合研究，共识别7大类、17类、20亚类地质遗迹54处，其中志留纪潇湘动物群、早泥盆世西屯动物群、肯氏鱼动物群及中三叠世罗平生物群化石核心产地具有国际级科学意义。这些遗迹不仅是揭示“从鱼到人”演化关键环节及古海洋生态系统复苏的重要实证，也为喀斯特地貌形成机制研究提供了典型范例。此外，公园内独特的喀斯特地貌景观与民族文化深度融合，兼具显著的美学与人文价值。基于GIS空间分析技术，系统评价了地质遗迹的空间聚集特征、交通通达性及地质灾害易发性。基于“资源—交通—安全”多要素叠加分析，研究识别出中部麒麟—沾益片区与南部罗平片区为重点开发利用区，北部高海拔山区为严格保护区，构建了科学的地质遗迹保护与开发利用功能分区体系，为公园的可持续发展提供了定量依据。

关键词：GIS；地质遗迹；世界地质公园；云南曲靖

中图分类号：P942；P208 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)02-0575-15

Types, Values, and GIS-Based Conservation and Utilization Study of Geoheritage in Qujing, Yunnan Province

WANG Lulin[1], ZHANG Jianping[1], TIAN Nan[1*], ZHANG Shaoxiong[2], LIN Qiuxia[3]

(1. *Institute of Nature and Culture, China University of Geosciences(Beijing), Beijing* 100083, *China*;
2. *Shanxi Provincial Coal Geological Exploration Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi* 030000, *China*;
3. *Bureau of Forestry and Grassland of Qujing City, Qujing, Yunnan* 655000, *China*)

Abstract: The Qujing aspiring UNESCO Global Geopark is located in Qujing City, Yunnan Province, within the Yangtze Block. The region has undergone complex geological evolution, giving rise to diverse and scientifically significant geoheritage resources. Through systematic field investigations and comprehensive research, 54 geosites have been identified, classified into 7 major categories, 17 classes, and 20 subclasses. Among these, the core fossil sites of the Silurian Xiaoxiang fauna, Early Devonian Xitun fauna, Kenichthys fauna, and Middle Triassic Luoping biota hold international scientific importance. These geosites not only provide critical

收稿日期：2025-09-26；**修回日期：**2026-03-03；**编辑：**赵宇。

基金项目：云南曲靖世界地质公园申报和创建项目（HBC312001）。

作者简介：王璐琳，女，副研究员，1985年出生，第四纪地质学专业，主要研究方向为地质遗迹调查与评价，地质公园申报、建设和推广。Email：wangllin@cugb. edu. cn。

＊通信作者：田楠，女，助理研究员，1983年出生，主要研究方向为科普研究与推广、地质遗迹保护和规划。Email：tiannan@cugb. edu. cn。

引用格式：王璐琳，张建平，田楠，等. 云南曲靖地质遗迹类型、价值及基于GIS的保护利用研究［J］. 现代地质，2026，40（2）：575-589. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509260081.

WANG Lulin, ZHANG Jianping, TIAN Nan, et al. Types, Values, and GIS-Based Conservation and Utilization Study of Geoheritage in Qujing, Yunnan Province［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 575-589. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509260081.

evidence for key stages of the "fish-to-human" evolutionary transition and the recovery of paleo-marine ecosystems but also serve as exemplary cases for studying karst landform formation mechanisms. Additionally, the geopark features distinctive karst landscapes deeply intertwined with local ethnic culture, exhibiting remarkable aesthetic and cultural value. Based on GIS spatial analysis technology, this study systematically evaluated the spatial clustering characteristics of geoheritage, traffic accessibility, and geological hazard susceptibility. Through a multi-factor overlay analysis of "resources-traffic-safety," the central Qilin-Zhanyi area and the southern Luoping area were identified as key development and utilization zones, while the northern high-altitude mountainous region was designated as a strict protection zone. This study establishes a scientific functional zoning system for geoheritage conservation and development, providing a quantitative basis for the sustainable development of the geopark.

Key words: GIS; geoheritage; global geopark; Qujing, Yunnan

0 引 言

世界地质公园是21世纪兴起的新生事物，它将地质遗迹资源作为特殊自然资源加以保护与利用，是人类合理利用地球资源的创举，在地质遗迹保护、科学知识传播和区域可持续发展等方面意义重大[1-6]。截至到2025年12月，全球已有229处世界地质公园，分布于50个国家，覆盖面积近85.5万 km^2。我国作为世界地质公园的创始国之一，在这一领域成绩斐然。历经20年发展，我国已有49家地质公园获批列入世界地质公园网络，数量位居世界首位。我国世界地质公园建设成果显著，为践行习近平生态文明思想、构建人与自然和谐共生的现代化和美丽中国提供了成功范例，成为美丽中国建设的重要实践地[7-8]。其发展过程中积累的中国方案与经验，贡献的中国力量与智慧，也为全球世界地质公园建设提供了有益借鉴[9-11]。

拟建曲靖世界地质公园（简称"曲靖地质公园"）位于中国云南省曲靖市，具有明确边界和完整范围，地理坐标为东经103°32′19.36″～104°35′51.05″、北纬24°41′42.17″～25°58′14.26″，海拔722～2493.8 m，公园总面积为3420 km^2。该公园地处扬子地块，地质演化历史漫长且复杂，可追溯至距今约10亿年的中元古代。期间，历经了约7亿年前的雪球地球事件、5.3亿年前的寒武纪生命大爆发、4.2～3.8亿年前的志留纪—泥盆纪古鱼类辐射事件，以及2.44亿年前的三叠纪海洋生物复苏与辐射事件等重要地质时期。长期的地质作用使公园内地层发育完备、断裂构造纵横交错，孕育出丰富多样的地质遗迹。这些地质遗迹在科学价值、多样性和完整性方面，在全球范围内独具特色，为研究地球演化等相关领域提供了不可多得的样本。

本研究在梳理前人研究成果的基础上，开展野外实地考察，系统分析了曲靖地质公园的地质遗迹类型，详细阐述了具有国际意义的重点古生物化石遗迹，通过对比，论证其具备重要的地质学、教育学、美学及旅游学价值。同时，本研究将GIS技术应用到地质遗迹保护和地质公园建设中，深入分析相关数据，旨在为曲靖地质公园地质遗迹保护提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 区域自然地理概况

曲靖地质公园地处滇东高原向黔西高原过渡地带，属乌蒙山系南伸部分，地势北高南低，西高东低。西与滇中高原湖盆地区镶嵌，东部向贵州高原倾斜过渡，中部为长江、珠江两大分水岭地带，高原面保存较好，形态完整。山脉有乌蒙山系和梁王山系，多呈北东—南北向或近南北向，大致可分为西列、中列和东列3个平行岭脊。地势总体呈西北高，东南低形态（图1）。最高点是马龙区与陆良交界的牛头山，海拔2493.8 m，最低点为鲁布革乡三江口，海拔722 m，相对高差1771.8 m。地貌以高原山地为主，间有高原盆地，高山、中山、低山、河槽和湖盆多种地貌并存，山地占曲靖市域总面积的83.18%。

研究区所在地是中国境内第三大河流——珠江的发源地，区内河流发育，流域面积在100 km^2以上的河流有80条，以南盘江、牛栏江、黄泥河等为主要干流，分属长江和珠江两大水系。

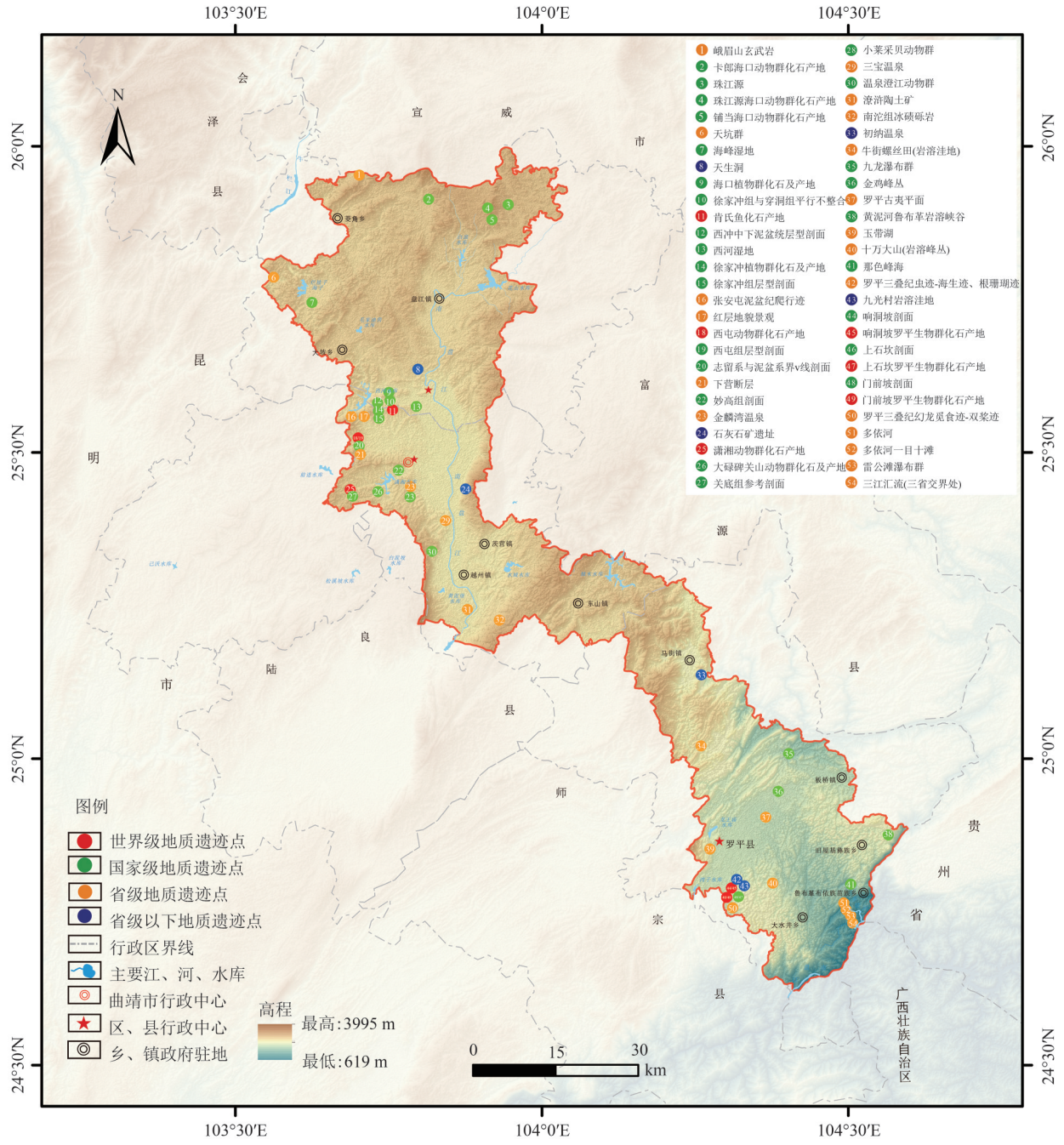


图 1　拟建曲靖世界地质公园 DEM 地貌和地质遗迹资源分布图

Fig. 1　DEM geomorphology and distribution of geoheritage resources of Qujing Aspiring Global Geopark

研究区主要为亚热带高原季风气候，独特的气候条件形成了丰富的动植物群落和自然景观。区内分布有国家重点保护野生植物共 27 种，其中国家一级保护植物 2 种，国家二级保护植物 25 种，隶属 3 纲 19 科；国家重点保护陆生野生动物共有 63 种，其中国家一级保护动物 13 种，国家二级保护动物 50 种，隶属 3 纲 17 目 25 科。同时，还拥有百万亩油菜花海和麒麟水乡千亩荷塘、马缨花、茶花等植物群落。

1.2　区域地质背景

1.2.1　地层

研究区地层隶属于华南地层大区，西北部分属扬子地层区—上扬子地层分区—曲靖地层小区，南东部分属东南地层区—个旧地层分区[12]。公园内出露的地层最老为中元古界狭带系，最新为第四系，缺失奥陶系、侏罗系及白垩系，地层由老到新概述如下（图 2）：

（1）狭带系：公园范围内最老的地层为中元

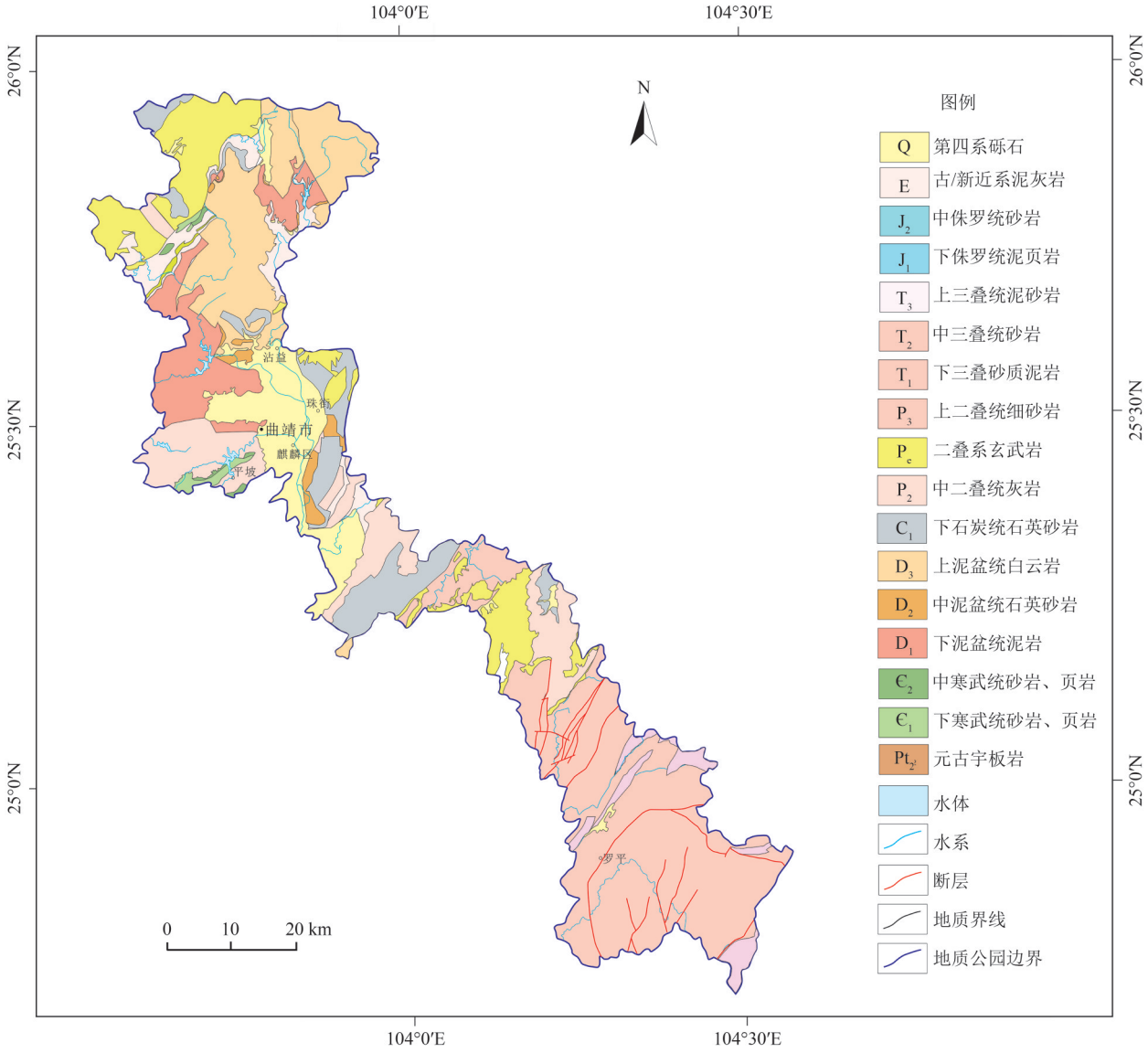


图2 拟建曲靖世界地质公园地质简图（修改自文献［12］）

Fig. 2 Geological sketch map of the Qujing Aspiring Global Geopark （modified after reference［12］）

古界昆阳群鹅头厂组，仅在沾益区德泽乡附近出露，为一套以板岩、粉砂质板岩为主，夹砂岩、粉砂岩的轻变质碎屑岩。

（2）成冰系：在地质公园内零星出露，包括陆良组、牛头山组和南沱组。陆良组仅出露于马龙区纳章镇一带，岩性为岩屑砂岩、含砾岩屑砂岩、粉砂岩、泥岩及多层凝灰岩[12]；牛头山组也在纳章镇一带出露，岩性为泥岩、粉砂岩互层，夹有硅质岩、流纹质凝灰岩、细粒长石砂岩；南沱组在沾益区的北部和马龙区的南部均有出露，岩性以页岩、泥砾岩为主，为典型的冰川堆积。

（3）埃迪卡拉系：零星分布在沾益区、马龙区和麒麟区，包括陡山沱组及灯影组。其下统陡山沱组为一套以石英砂岩、岩屑砂岩为主，局部夹砂砾岩、粉砂质页岩的滨海相碎屑岩；上统灯影组发育浅海相碳酸盐岩沉积。

（4）寒武系：主要出露于马龙区、麒麟区的南部和沾益区西部，其层序清楚、化石丰富，各组岩性及生物特征明显，从下往上分依次为渔户村组、筇竹寺组、沧浪铺组、龙王庙组、陡坡寺组及双龙潭组，缺失芙蓉统。纽芬兰统为浅海至潟湖相碳酸盐岩沉积，岩性主要为白云岩、粉砂岩、硅质岩和磷块岩；第二统和苗岭统岩性主要为页岩、砂岩、粉砂岩和白云岩。公园范围内寒武系化石以筇竹寺组澄江动物群、沧浪铺组红井哨段马龙动物群、沧浪铺组乌龙箐段关山动物群为代表。

（5）志留系：在麒麟区、马龙区、沾益区广泛出露，从下往上依次为关底组、妙高组及玉龙寺组，缺失温洛克统及以下地层。罗德洛统发育以细碎屑岩为主的滨浅海相沉积；普里道利统发育以页岩、钙质页岩、泥灰岩和瘤状灰岩为主的浅海相沉积。地层出露甚佳，化石丰富，以潇湘动物群及小莱采贝动物群为代表。

1.2.2　构造

研究区处于云南省东部地区，其西北部为扬子地块的一部分，其余属地槽褶皱区范围，大地构造复杂，尤其是断裂十分发育，可划分为经向构造体系、新华夏构造体系、沾益山字型构造体系、纬向构造体系、北东向构造带以及近南北向罗平穹窿构造[12]。

1.2.3　岩浆活动

研究区内岩浆活动以基性岩浆溢流喷发为主，主要出露于沾益区大喷水、独树梁子、大麦冲、哈马寨、喜厦，沾益区炎方乡、播乐乡、菱角乡的局部地区，以及罗平县东山镇—马街镇一带[12]。受构造控制呈带状分布，多组成向斜核部。岩性以斑状玄武岩和杏仁状玄武岩、致密状玄武岩最发育，伴以其它过渡类型夹少量火山碎屑岩。喷发活动时间为二叠纪瓜德鲁普世晚期至末期，为海西晚期构造运动的产物。局部地区见少量浅成或超浅成的侵入岩，形成二叠纪时期的各类玄武岩及少量基性侵入岩。

（1）喷出岩：地质公园内喷出岩分布广泛，主要出露于沾益区大喷水、独树梁子、大麦冲、哈马寨、喜厦，沾益区炎方乡、播乐乡、菱角乡的局部地区，以及罗平县东山镇—马街镇一带。受构造控制呈带状分布，多组成向斜核部。岩性以斑状玄武岩和杏仁状玄武岩、致密状玄武岩最发育，伴以其它过渡类型夹少量火山碎屑岩。不整合于二叠系茅口组灰岩之上，其上被乐平统平行不整合覆盖。喷发活动时间为二叠纪瓜德鲁普世晚期至末期，为海西晚期构造运动的产物。

（2）侵入岩：在马龙通泉公社文明村东有一小岩株出露，面积0.15 km^2，称为文明村基性岩体，侵入在寒武系龙王庙组泥质白云岩及砂岩中。此外，在北部沾益德泽乡的南马涉水见一条出露宽8～20 cm的基性岩脉，侵入在上泥盆统宰格组上段隐晶灰岩与下石炭统大塘组万寿山段黑色页岩之间。

2　地质遗迹资源概况

2.1　地质遗迹类型

研究区内发育化石及各类地貌景观，兼有地质剖面、地质构造、水体景观等地质遗迹，该区域地质现象丰富，空间分布高度集中，在全国乃至全世界范围内均属罕见。地质遗迹自然状态良好，科学系统完整，具有极高的科学研究、科学知识普及和旅游价值[13-16]。本文根据《国家地质公园规划编制技术要求》（2016年7月25日国土资发［2016］83号印发，2019年1月3日国家林业和草原局公告2019年第1号修改）中有关地质遗迹类型的划分原则[17]，曲靖地质公园内主要地质遗迹可划分为7大类17类20亚类，共54处地质遗迹点（图1，表1）。

表1　拟建曲靖世界地质公园地质遗迹分类表

Table 1　List of geoheritage in Qujing Aspiring Global Geopark

大类	类	亚类	地质遗迹点数量	地质遗迹点名称
地质剖面	地层剖面	区域性标准剖面	4	关底组参考剖面 西屯组层型剖面 徐家冲组层型剖面 西冲中下泥盆统层型剖面
	沉积岩相剖面	典型沉积岩相剖面	5	石燕坡剖面(图3a) 志留系与泥盆系界线剖面 上石坎剖面 门前坡剖面 响洞坡剖面
地质构造	构造形迹	中小型构造	2	下营断层 徐家冲组与穿洞组平行不整合
古生物	古动物	古脊椎动物	9	潇湘动物群化石及产地(图3b) 西屯动物群化石及产地(图3c)

（续）表1 拟建曲靖世界地质公园地质遗迹分类表

（Continued）Table 1 List of geoheritage in Qujing Aspiring Global Geopark

大类	类	亚类	地质遗迹点数量	地质遗迹点名称
				肯氏鱼化石及产地（图3d）
				珠江源海口动物群化石及产地
				卡郎海口动物群化石及产地
				铺当海口动物群化石及产地
				上石坎罗平生物群化石及产地（图3e）
				门前坡罗平生物群化石及产地
				响洞坡罗平生物群化石及产地
		古无脊椎动物	3	温泉澄江动物群化石及产地
				大碌碑关山动物群化石及产地
				陈家山小莱采贝动物群化石及产地
	古植物	古植物	2	徐家冲植物群化石及产地
				海口植物群化石及产地
	古生物遗迹	古生物活动遗迹	3	虫迹—志留纪虫管、三叠纪海生迹与根珊瑚迹
				张安屯泥盆纪爬行迹
				罗平三叠纪幻龙觅食迹—罗平双桨迹
矿物与矿床	典型矿床	典型非金属矿床	1	潦浒陶土矿
地貌景观	岩石地貌景观	碎屑岩地貌景观	1	红层地貌景观
		可溶岩地貌（喀斯特地貌）景观	7	天生洞
				沾益天坑群（图3f）
				那色峰海
				十万大山（峰丛洼地）
				金鸡峰丛（图3g）
				牛街螺丝田（岩溶洼地）
				九光村岩溶洼地
	火山地貌景观	火山熔岩地貌景观	1	峨眉山玄武岩
	冰川地貌景观	冰川堆积地貌景观	1	南沱组冰碛砾岩（三宝南）
	流水地貌景观	流水侵蚀地貌景观	1	黄泥河鲁布革岩溶峡谷
	构造地貌景观	古剥夷面	1	罗平古夷平面
水体景观	泉水景观	温（热）泉景观	3	三宝温泉
				金麟湾温泉
				初纳温泉
	湖沼景观	沼泽湿地景观	2	海峰湿地
				西河湿地
		湖泊景观	1	玉带湖
	河流景观	风景河段	4	珠江源（图3h）
				多依河
				多依河一目十滩（钙华）
				三江汇流
	瀑布景观	瀑布景观	2	九龙瀑布群（图3i）
				多依河雷公滩瀑布群
环境地质遗迹景观	采矿遗迹景观	采矿遗迹景观	1	朗目山石灰石矿遗址

2.2 具有国际意义的地质遗迹

研究区内具有国际意义的地质遗迹共4处，分别为志留纪潇湘动物群、早泥盆世西屯动物群、肯氏鱼动物群及中三叠世罗平生物群的核心产地。

2.2.1 志留纪潇湘动物群化石及产地

潇湘动物群自2007年发现以来，以其脊椎动物化石门类丰富、化石保存精美完整、数量庞大，在全球志留纪鱼类化石材料发现上奠定了举世罕

见的地位。其中，许多原始有颌类化石在深入探讨有颌类起源及其不同类群之间的亲缘关系、硬骨鱼类与肉鳍鱼类的起源与分化、乃至重建有颌类演化树等研究热点中均具有非常重要的科学研究意义与价值，其发现将地史上仅限于泥盆纪的“鱼类时代”至少可前推到4.2亿年前，并强有力地推动了古脊椎动物学的发展。

潇湘动物群化石的赋存地层包括志留系罗德洛统关底组、普里道利统妙高组和玉龙寺组下部，主体产出层位为关底组四段的下部（图3b），主要产出地点位于曲靖地质公园中部。自2009年在Nature上以长文形式发表梦幻鬼鱼的研究成果以来[18]，目前已研究并正式命名的古鱼类有16属17种，分属于无颌类的花鳞鱼亚纲与盔甲鱼亚纲以及有颌类的盾皮鱼纲、棘鱼纲与硬骨鱼纲[19-24]。

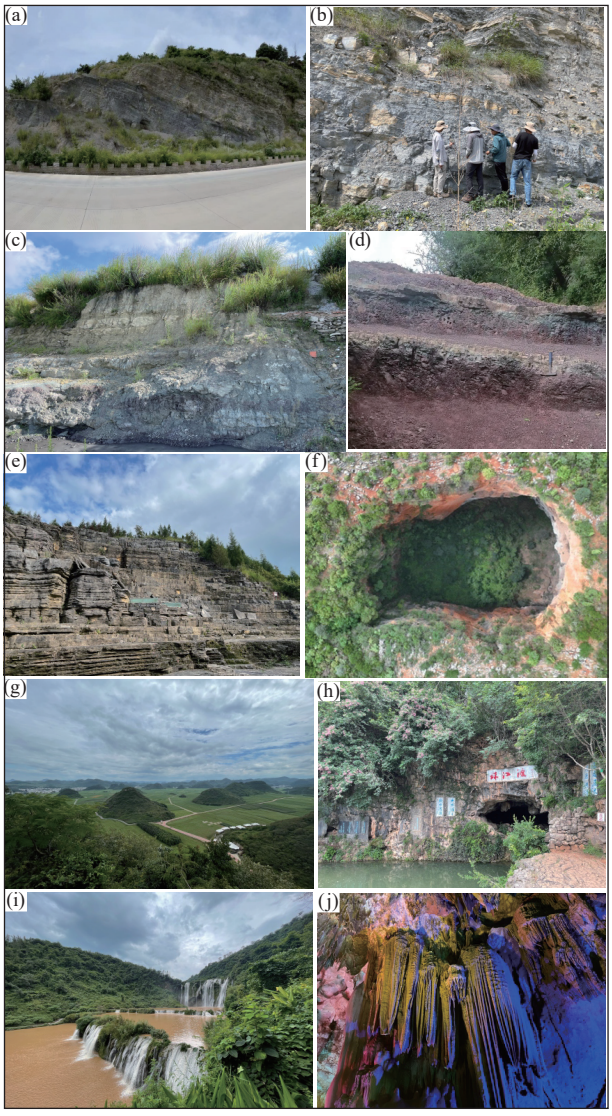


图3　拟建曲靖世界地质公园典型地质遗迹

Fig. 3　Typical geoheritage in Qujing Aspiring Global Geopark

(a)石燕坡剖面图及下部妙高组野外露头；(b)志留纪潇湘动物群化石产地；(c)早泥盆世西屯动物群化石产地；(d)早泥盆世肯氏鱼动物群化石产地；(e)中三叠世罗平生物群化石产地；(f)沾益天坑群一号天坑；(g)金鸡峰丛(岩溶峰丛、岩溶洼地)；(h)珠江源；(i)九龙瀑布群；(j)彩云洞中的次生化学沉积物

潇湘动物群是目前已知分异度最高的志留纪鱼类化石库，为了解志留纪晚期的脊椎动物特别是有颌类的面貌提供了独一无二的窗口。世界其他地方至今仍未发现可与之相比拟的志留纪鱼类化石库，甚至除潇湘动物群以外，世界范围内同时保存了无颌类和有颌类化石的志留纪动物群也寥寥无几。目前比较重要且具有代表性的志留纪鱼类动物群还有中国志留纪早期的张家界动物群和重庆生物群，以及爱沙尼亚志留纪中晚期的萨列马岛动物群（表2）[25-28]。

2.2.2　早泥盆世西屯动物群化石及产地

西屯动物群是世界上著名的早期脊椎动物化石宝库之一，涵盖了早期脊椎动物各个类群，包括盔甲鱼类、花鳞鱼类、盾皮鱼类、棘鱼类、软骨鱼类和硬骨鱼类，该动物群中的无颌类和有颌类各个类群在多样性和数量上都呈现爆发式地增长。在该动物群中发现的许多原始肉鳍鱼类和原始辐鳍鱼类丰富了志留纪—泥盆纪硬骨鱼类尤其是早期肉鳍鱼类的多样性，支持了中国南方是肉鳍鱼类起源与早期分化中心的假说，为解开硬骨鱼纲起源之谜提供了重要线索，使硬骨鱼纲起源与早期演化的研究成为当今古生物学研究领域的前沿和热点之一。

西屯动物群化石的赋存地层包括志留系普里道利统玉龙寺组顶部和泥盆系下泥盆统西山村组、西屯组、桂家屯组、徐家冲组，主体产出层位为西屯组，主要产出地点位于曲靖地质公园中部西屯村附近（图3c）。目前已研究并正式命名的古鱼类有47属75种，分属于无颌类的花鳞鱼亚纲、盔甲鱼亚纲以及有颌类的盾皮鱼纲、棘鱼纲、软骨鱼纲、硬骨鱼纲。早泥盆世西屯动物群与国内外早泥盆世鱼类动物群或鱼类化石产地的情况对比详见表3[29-34]。

2.2.3　早泥盆世肯氏鱼动物群化石及产地

原始肉鳍鱼类坎贝尔肯氏鱼产于沾益区早泥盆世埃姆斯期的穿洞组（图3d），因其具有许多与肺鱼形动物如杨氏鱼相近的形态学及解剖学特征，被认为是当时所知最早、最原始的四足形动物，

表 2 潇湘动物群与国内外志留纪鱼类动物群对比表

Table 2 Comparison of the Xiaoxiang Fauna with Silurian Fish Faunas at Home and Abroad

生物群	时代	环境	化石类型	产地	特色化石类型
潇湘动物群	罗德洛世—普里道利世	滨浅海	无颌类、盾皮鱼类、棘鱼类、肉鳍鱼类	中国曲靖市	盾皮鱼类、肉鳍鱼类
张家界动物群	特列奇期	滨浅海	盔甲鱼类、棘鱼类	中国湖南省、湖北省、江西省、安徽省、浙江省	盔甲鱼类
重庆动物群	特列奇期	滨浅海	盔甲鱼类、盾皮鱼类、软骨鱼类	中国重庆市	盔甲鱼类、盾皮鱼类、软骨鱼类
Saaremaa 动物群	温洛克世—罗德洛世	浅海潮下带、潟湖	异甲鱼类、骨甲鱼类、缺甲鱼类、花鳞鱼类、棘鱼类、辐鳍鱼类	爱沙尼亚萨列马岛	骨甲鱼类、辐鳍鱼类

表 3 西屯动物群与国内外同期鱼类动物群对比表

Table 3 Comparison of the Xitun Fauna with contemporary Fish Faunas at home and abroad

动物群	时代	环境	化石类型	产地	特色化石类型
西屯动物群	普里道利世晚期—布拉格期	滨浅海	盔甲鱼类、盾皮鱼类、硬骨鱼类、棘鱼类、软骨鱼类	中国云南省	盔甲鱼类、盾皮鱼类、硬骨鱼类
越南北部动物群	洛赫考夫期—布拉格期	滨浅海、三角洲	盔甲鱼类、盾皮鱼类、肉鳍鱼类、棘鱼类	越南北部	盔甲鱼类、盾皮鱼类
MOTH 动物群	洛赫考夫期	潟湖	棘鱼类、盾皮鱼类、花鳞鱼类、骨甲鱼类、异甲鱼类、茄甲鱼类	加拿大	棘鱼类
Belén Formation 动物群	洛赫考夫期—艾菲尔期	滨浅海	软骨鱼类、盾皮鱼类、棘鱼类	玻利维亚	软骨鱼类
Turin Hill 动物群	洛赫考夫期	潟湖	棘鱼类、骨甲鱼类、花鳞鱼类	英国	棘鱼类
Hunsrück Slate 动物群	埃姆斯期	滨浅海	异甲鱼类、盾皮鱼类、棘鱼类、硬骨鱼类	德国	无颌类、盾皮鱼类
Wee Jasper/Burrinjuck 动物群	埃姆斯期	河流	花鳞鱼类、盾皮鱼类、硬骨鱼类、棘鱼类、软骨鱼类	澳大利亚	盾皮鱼类
Spitsbergen 动物群	布拉格期—埃姆斯期	河流/湖泊	盾皮鱼类、棘鱼类、硬骨鱼类、花鳞鱼类、骨甲鱼类、异甲鱼类	英国	盾皮鱼类
Anderson River 动物群	埃姆斯期—艾菲尔期	浅海	硬骨鱼类、棘鱼类、盾皮鱼类	加拿大	硬骨鱼类

为四足动物起源的研究提供了重要化石证据[35]。据相关研究发现[36]，其上颌部虽然仍由上颌骨和前上颌骨组成，但前后并不相接，之间有个间隙，这个间隙就是肯氏鱼后外鼻孔即内鼻孔的雏形。“豁嘴”肯氏鱼的化石证据确认了内鼻孔和后外鼻孔之间的同源关系，也解开了内鼻孔起源之谜。

2.2.4 中三叠世罗平生物群化石及产地

罗平生物群发现于2007年，是我国著名的三叠纪海相化石群落。该生物群产出时代为中三叠世安尼期，距今约2.44亿年。目前已发现有海生爬行类、鱼类、节肢动物、棘皮动物、菊石、双壳类、腹足类、腕足类、植物等十多个大类的化石，体现了当时海洋生物的多样性，是世界上目前已知化石分异度最高、多样性最为丰富的三叠纪海生化石库之一，对研究地球海洋生态系统如何在二叠纪末大绝灭后逐步复苏，以及许多中生代脊椎动物门类的演化具有重要意义[37-40]。罗平生物群的化石产地主要有上石坎、门前坡及响洞坡三处，均位于曲靖地质公园南部罗平县境内，产出层位为中三叠统关岭组二段的深灰、灰黑色纹层状、瘤状泥晶灰岩、泥灰岩（图3e）。该生物群不仅处于二叠纪末生物大绝灭之后复苏到辐射主幕的关键位置，且保存了从食物链底层的双壳类、滤食生活的鱼类、虾类，到食肉的鱼类，甚

至大型的鱼龙、幻龙等凶猛的食物链顶端的爬行类，记录了当时海洋生态系统的完整面貌。

3　地质遗迹价值

3.1　科学价值

曲靖地质公园内化石丰度高、种类多，地貌景观类型丰富多样。公园内有以潇湘动物群、西屯动物群、海口动物群以及罗平生物群等为代表的古生物遗迹；以金鸡峰丛、那色峰海和天坑群等为代表的喀斯特地貌景观；以九龙瀑布群和多依河等为代表的流水地貌景观；以徐家冲组与穿洞组平行不整合接触为代表的中小型构造；以花山湖、西河水库为代表的湖泊水体景观等。在有限的区域内集中了如此重要且丰富的地质遗迹，在西南地区乃至全国都少见。

3.1.1　古生物学价值

研究区内以新元古界成冰系南沱组至三叠系火把冲组为代表的沉积地层相当发育，在志留系关底组、下泥盆统西屯组、中泥盆统海口组中分别发现了丰富的以鱼类化石为主的潇湘动物群、西屯动物群及海口动物群，在中三叠统关岭组中发现了以鱼类及海生爬行类化石为主的罗平生物群。

公园内的古生代脊椎动物群是研究“从鱼到人”演化的关键实证宝库[18]。古生代志留纪—泥盆纪的鱼类化石资源尤为突出，涵盖无颌甲胄鱼类、有颌类等多个关键演化节点的化石，如盔甲鱼类见证了无颌类的崛起与辐射，对解决有颌类关键特征起源意义重大[36]；胴甲鱼类等原始盾皮鱼类的发现，使曲靖成为盾皮鱼类的起源与辐射演化中心之一[40-41]；全颌盾皮鱼类的发现，则颠覆了传统鱼类演化关系认知，明确硬骨鱼类由盾皮鱼类直接演化而来。同时，大量珍稀早期硬骨鱼类化石的出土，推动了硬骨鱼纲起源与早期演化研究，使中国在该领域处于国际前沿[25]。肉鳍鱼类化石丰富，为“从鱼到人”演化主干研究提供关键资料，坎贝尔肯氏鱼更是为鱼类外鼻孔向内鼻孔过渡提供实证[36]。此外，志留系与泥盆系中已发现众多早期脊椎动物化石，门类齐全、特点突出，提升了曲靖在早期脊椎动物研究领域的国际影响力。

中生代三叠纪中期的罗平生物群是世界上多样性丰富的三叠纪海生化石宝库之一，完整记录了当时海洋生态系统面貌。海生爬行类、鱼类、甲壳类节肢动物等各类化石丰富多样，在三叠纪海洋生态系统演化研究中具有不可替代的价值，见证了二叠纪末生物大灭绝后海洋生态系统的复苏与发展[42]。与相邻的兴义生物群相比，罗平生物群时代更早、化石种类更丰富、生存环境相对稳定，是三叠纪生物复苏和大辐射的典型代表，得到众多古生物学家的高度评价[43-45]。

3.1.2　地貌学价值

研究区地处滇东高原向黔西高原的过渡地带，区域内喀斯特地质遗迹丰富多样，成因复杂，具有极高的科研价值。公园内喀斯特地貌以罗平的峰丛峰林地貌为主，涵盖峰丛洼地、峰丛谷地、峰丛峡谷、峰林洼地、峰林谷地、峰林盆地等多种类型，在全球范围内具有显著的典型性与代表性。与世界其他地区的峰丛峰林地貌相比，罗平峰林峰丛地貌不仅圆锥状特征明显，岩溶组合地貌丰富，而且分布面积广阔，地学意义尤为突出[45]。

从地质背景分析，曲靖罗平锥状喀斯特发育于云贵高原向广西低地过渡的斜坡地带，在西南喀斯特地貌演化进程中扮演着关键的过渡角色。在地质年代方面，罗平峰丛地貌的成景景观为中生界中三叠统关岭组，这一地层在现有中国南方喀斯特系列遗产地中尚未涵盖，因此曲靖罗平喀斯特填补了中国南方喀斯特沉积序列从古生代至中生代岩溶地貌发育的重要环节。从构造演化角度来看，罗平喀斯特的岩溶高原—峰林盆地—峰丛洼地（谷地）—岩溶峡谷地貌，是云贵高原隆升过程中喀斯特发育演化的典型模式之一。

此外，公园范围内的沾益天坑群也具有代表性的意义。沾益天坑群原生天坑与退化天坑完美共生，且规模宏大，生态系统原生性保存较好[46]，是研究天坑地下森林景观格局、天坑植物生态适应性及生物多样性的重要场所。

3.2　美学价值

曲靖地质公园区域内喀斯特地貌资源极为丰富，碳酸盐岩广泛分布，岩溶地貌特征显著。其中，金鸡峰丛凭借独特的峰林景观（图3g），素有“中国最美峰林所在地”的美誉；那色峰丛以其独特魅力享誉全球；九龙瀑布群则以其壮观景色荣获“中国最美瀑布”称号（图3i）。这些喀斯特地貌景观不仅具有极高的美学价值，还在地球科学研究领域具有重要意义。

特殊的地理环境孕育了公园别具一格的民族

文化。布依族的“二月二”对歌节、“三月三”泼水节等传统节日，充满古朴韵味，而祭山、祭水、祭“老人房”等神秘习俗，展现了当地居民与自然和谐相处的文化传统。喀斯特地貌的奇山秀水与特色民族乡村的风土人文相互交融，形成了独特的生态水乡田园景观，具有丰富的文化内涵与旅游开发潜力。

公园内山峦起伏、河流纵横，山脉与江河相互映衬，山依水、水绕山，勾勒出一幅迷人的自然画卷。其岩溶湿地生态系统融合了山、水、林、石、洞、潭及草地等多种自然要素，呈现出多姿多彩的湿地自然风貌，彰显了大自然的和谐之美，为众多生物提供了独特的栖息环境，在生态保护和生物多样性研究方面具有重要价值。

3.3 科普价值

曲靖地质公园蕴含着极为丰富的古生物化石资源，堪称大自然馈赠给人类的天然教科书，具备极高的科普价值。公园内的潇湘动物群、西屯动物群、海口动物群以及罗平生物群闻名世界，是当之无愧的化石胜地。这些动物群保存了大量珍贵的化石遗迹，为研究“从鱼到人”的早期演化历程提供了关键实证，生动地向人们展现了生命演化的奥秘。

公园内喀斯特地貌广泛分布，景观类型丰富多样，是理想的喀斯特地貌科普基地。金鸡峰丛、十万大山、那色峰海、天坑群和彩云洞（图3j）等典型喀斯特地貌景观，以其独特的形态和地质特征，构成了一座天然的喀斯特地貌博物馆。它们不仅展示了喀斯特地貌的形成与演化过程，也为地质科普和科研工作提供了丰富的素材。

此外，公园水资源丰富，河流水系发达，湿地生态系统发育良好，是生态保护、生物多样性展示以及探索人与自然和谐共生的示范基地。多样的生态环境为众多珍稀动植物提供了适宜的栖息场所，对于维护区域生态平衡、开展生态研究和科普教育意义重大。

3.4 旅游开发价值

曲靖地质公园在地质遗迹和自然生态方面优势显著，不仅拥有四处世界级地质遗迹点，其他地质遗迹资源还涵盖地质剖面、地质构造景观等类型，具有较高的地质科学意义和科普价值。公园内自然生态资源景观丰富多样，喀斯特峰林峰丛地貌、山水田园、高山草甸、峡谷溶洞、溪谷湖泊等景观交相辉映，且原生性强、观赏性高，为人们展现出一幅绚丽多彩的自然画卷。

曲靖地区历史底蕴深厚，文化资源丰富且影响力广泛。其“一水滴三江，一山隔两盘”的独特地理格局，不仅塑造了别具一格的山水景观，更串联起远古生命遗迹、人类史前文化、爨文化、红色文化、民族文化等多元文化资源。此外，曲靖特有的人文历史、传统民俗、风土人情引人入胜，传统的戏曲、手工艺制品、传统美食及制作技艺等非物质文化遗产绚烂多彩。

曲靖凭借山、水、田、林等优越的生态环境，峡谷、瀑布、峰丛等奇特的喀斯特地貌景观，以及珠江源文化、爨文化和特色乡村等独特人文资源，使得曲靖的旅游品质和科学内涵得到进一步升华。

4 基于GIS的地质遗迹保护与开发利用

4.1 地质遗迹空间分布特征

地质遗迹的空间聚集程度是划定地质公园开发利用区域的重要依据[47-48]。本文利用ArcGIS软件中的核密度分析工具，以研究区内54处地质遗迹点为基础数据，搜索半径设定为10 km，核密度分析结果显示，曲靖地质公园地质遗迹在空间分布上呈现出显著的“双核心”集聚特征（图4（a））：

（1）中部麒麟—沾益高密度核心区：该区域核密度值处于全区峰值，集中赋存了志留纪潇湘动物群、早泥盆世西屯动物群及肯氏鱼动物群等具有国际意义的古生物化石遗迹，并伴有沾益天坑群等典型喀斯特景观。该区地质记录完整，科学价值极高，是开展地质科普与科研旅游的核心承载区。

（2）南部罗平高密度核心区：该区域以罗平生物群化石产地为极核，周边集聚分布了金鸡峰丛、九龙瀑布群等典型喀斯特地貌与水体景观。区内景观类型多样，地域组合良好且美学观赏性强，具备显著的旅游规模效应。

4.2 交通通达性分析

交通通达性是衡量地质遗迹资源可进入性与开发潜力的关键指标[49]。本文基于曲靖市主要高速公路、国道、省道及县道的路网数据，运用ArcGIS缓冲区分析工具，构建了1 km、3 km及5 km道路

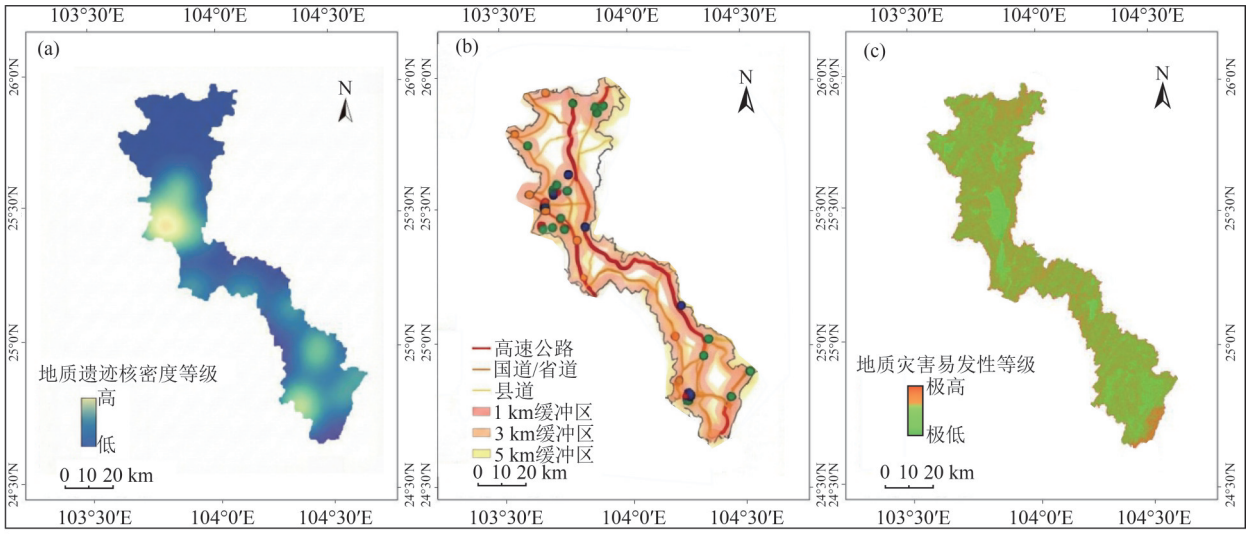


图4　曲靖地质公园地质遗迹核密度（a）与交通通达性（b）、地质灾害易发性（c）综合评价图

Fig. 4　Comprehensive evaluation maps of geoheritage kernel density （a）， traffic accessibility （b）， and geohazard susceptibility （c） in Qujing Geopark

缓冲区，对地质遗迹点的交通覆盖度进行了量化评价。空间分析结果表明，研究区交通网络发达，地质遗迹整体的交通通达性较高（图4（b））。统计显示，约85%的地质遗迹点分布于主要道路3 km缓冲区范围内，具有良好的交通邻近性。其中，中部麒麟—沾益片区与南部罗平片区的核心地质遗迹点均有高速公路和国道直达，交通便捷度极高。优越的交通区位条件为上述区域确立为重点旅游开发区提供了坚实的基础设施支撑，能够有效满足大众旅游与研学考察的通行需求。

4.3　地质灾害易发性分析

我国地质环境类型复杂多样且具有先天脆弱性特征，这使得我国成为全球地质灾害频发、灾损最为严重的国家之一[50-51]。为提升地质灾害易发性评价精度，本文基于信息量法构建了地质灾害易发性评价模型。该模型以历史地质灾害点空间分布数据为基础，通过系统分析各致灾因子信息量值，实现了区域地质灾害易发性等级的科学划分。

本文选取了高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数、水流强度指数7个关键影响因子进行地质灾害易发性评价（图5）。其中，地形湿度指数（Topographic Wetness Index，TWI）是基于坡度、坡向及汇水面积等地形参数构建的土壤湿度空间分布量化指标，其核心表征特定区域的水分滞留能力与湿润程度特征。高TWI值区（地形平坦且汇水面积大）因水分滞留显著、土壤饱和度高，易诱发涝渍和浅层滑坡等水文地质灾害；而低TWI值区（地形陡峭或汇水面积小）虽水分排泄快、土壤较干燥，但在极端降水条件下仍存在突发性灾害风险[52]。水流强度指数（Stream Power Index，SPI）是表征地表径流侵蚀潜力的重要指标，其通过量化径流动能反映水流对地表物质的侵蚀强度。高SPI值区（汇水面积大且坡度陡）因径流动能强、侵蚀作用显著，是泥石流和沟谷侵蚀等灾害的高发区；低SPI值区虽侵蚀作用较弱，但长期径流累积仍可能导致渐进性地质环境退化[53-56]。

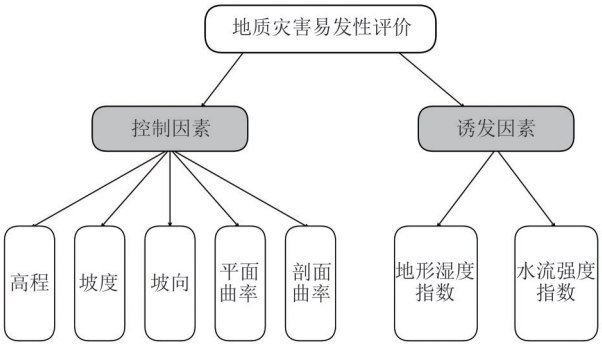


图5　地质灾害易发性分析框架

Fig. 5　Framework for geological hazard susceptibility analysis

采用信息量模型进行地质灾害易发性评价，具体步骤如下：（1）通过空间叠加分析，将历史地质灾害点与各评价因子图层进行叠加，统计各因子分类单元内的灾害点数量（N_{ij}）；（2）分别计算各因子类别的面积占比（S_{ij}/S）和灾害点占比

(N_{ij}/N)；（3）代入信息量计算公式，获得各评价因子的信息量值（表4）。基于ArcGIS 10.8平台，采用自然断点法对评价结果进行重分类，最终将研究区划分为极低风险区、低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区五个等级，其空间分布格局如图4（c）所示。

表4 各因子信息量计算统计表

Table 4 Information value statistics of evaluation factors

因子	类别	栅格数量	灾害点数量	信息量
高程(m)	761～1015	208591	12	1.6218
	1015～1232	167006	2	−0.6131
	1232～1411	512432	4	−1.0477
	1411～1574	1412768	13	−0.9128
	1574～1763	887758	10	−0.7944
	1763～1931	2241077	31	−0.6430
	1931～2040	2721730	37	−0.8110
	2040～2156	2597968	27	−1.4133
	2156～2539	1218209	0	0
坡度(°)	0～3.58	3744223	17	0.3995
	3.58～7.17	2517777	23	0.2945
	7.17～11.03	2172533	36	0.4075
	11.03～15.17	1460249	30	0.3703
	15.17～19.58	940054	17	0.2258
	19.58～24.82	596439	9	0.1147
	24.82～31.17	327249	3	0.0351
	31.17～39.72	157002	0	0
	39.72～70.35	52013	1	0.0072
坡向(°)	平面	588258	1	4.9154
	北(0～22.5)	645679	5	5.3952
	东北(22.5～67.5)	1155521	17	9.6554
	东(67.5～112.5)	1579529	18	13.1984
	东南(112.5～157.5)	1813722	21	15.1553
	南(157.5～202.5)	1320403	7	11.0331
	西南(202.5～247.5)	1262061	13	10.5456
	西(247.5～292.5)	1490580	25	12.4551
	西北(292.5～337.5)	1602886	21	13.3936
	北(337.5～360)	508900	8	4.2523
平面曲率	0～8.31	1847700	28	0.2878
	8.31～17.29.	2217581	32	−0.5133
	17.29～26.27	1889062	20	−0.9297
	26.27～35.25	1549596	16	−1.1289
	35.25～44.89	1158092	12	−1.3363
	44.89～55.20	834411	7	−1.7773
	55.20～65.84	630725	8	−1.6112
	65.84～76.49	768931	6	−2.3394
	76.49～84.80	1071441	7	−3.0169
坡面曲率	0～1.47	3195122	25	−0.3732
	1.47～3.57	3996646	40	−1.0343
	3.57～6.09	2116614	27	−1.2231
	6.09～8.82	1223771	20	−1.4211
	8.82～11.76−	697157	13	−1.7880
	11.76～15.34	411805	6	−2.6149
	15.34～19.75	208512	4	−3.1142
	19.75～26.05	92210	1	−4.6741
	26.05～53.58	25702	0	0
SPI	−8.95～−7.03	447575	4	−0.2402
	−7.03～−5.57	1921491	12	−1.3151
	−5.57～−2.86	2373559	27	−0.8521

（续）表 4　各因子信息量计算统计表

（Continued）Table 4　Information value statistics of evaluation factors

因子	类别	栅格数量	灾害点数量	信息量
	−2.86 ~ −0.21	2416325	34	−0.8120
	−0.21 ~ 0.77	2404283	24	−1.4017
	0.77 ~ 1.64	1548061	23	−1.5659
	1.64 ~ 2.56	577945	9	−2.4069
	2.56 ~ 3.69	213762	2	−3.9774
	3.69 ~ 7.99	64538	1	−4.9199
TWI	1.57 ~ 4.33	2223831	35	0.3256
	4.33 ~ 5.43	3792479	38	−0.8868
	5.43 ~ 6.53	2538650	35	−0.8859
	6.53 ~ 7.72	1268768	12	−1.6255
	7.72 ~ 9.08	613013	4	−2.3856
	9.08 ~ 12.82	775534	7	−2.3713
	12.82 ~ 16.47	612293	4	−3.3526
	16.47 ~ 17.92	107850	1	−4.6380
	17.92 ~ 23.27	35121	0	0

曲靖地质公园地质灾害易发性评价结果显示，研究区不同风险等级区域呈现明显的空间分异性。统计分析表明：极低风险区（120.3 km^2，3.04%）和低风险区（809.2 km^2，22.95%）合计占研究区总面积的25.99%；中风险区面积最大（2169 km^2，64.79%）；高风险区（271.4 km^2，7.87%）和极高风险区（50.9 km^2，1.28%）合计占比9.15%。值得注意的是，中、高及极高风险区合计占比超过70%，表明地质公园整体地质灾害易发性处于较高水平。空间分布上，高风险区主要集中分布于北部乌蒙山系马雄山区域和东南部片区，这些区域因地形陡峭、地势险峻而成为地质灾害高发区；中部则沿主要断裂带形成条带状高风险区。相对而言，低风险区主要分布于河谷平缓地带，这些区域地形平坦、植被覆盖度高，地质环境相对稳定。基于上述分析结果，建议对北部、东南部高风险集中区实施重点防治，对中部条带状高风险区加强监测预警，同时对河谷低风险区实施保护性开发策略。

4.4　地质遗迹保护与重点开发区分析

综合考虑地质遗迹空间分布特征、交通通达性及地质灾害易发性评价结果，本文利用GIS空间叠加分析技术，按照“资源富集优先、交通支撑有力、避让灾害风险”的原则[57]，对曲靖地质公园进行功能分区识别。叠加分析显示，地质遗迹的高密度聚集区与路网密集区在空间上具有高度一致性，且大部分核心地质遗迹点的地质灾害风险处于低至中等水平，具备良好的开发适宜性。

基于此，研究识别出中部麒麟—沾益片区与南部罗平片区为重点开发利用区。中部片区集中赋存了志留纪潇湘动物群、早泥盆世西屯动物群等具有国际划时代意义的古生物化石，且位于城市交通核心圈内；南部片区则以罗平生物群及金鸡峰丛为核心，资源连片分布且观赏性强。这两大片区不仅位于道路3 km缓冲区内，交通通达性极佳，且核心游览区避开了地质灾害极高易发地带。建议在此区域重点布局地质公园博物馆、科普解说系统及旅游服务设施。

相比之下，北部马雄山及乌蒙山系深处，因地势陡峭且大面积处于地质灾害高及极高易发区，加之远离主干路网，交通通达性相对较弱，因此将其划定为严格保护区。该区域应严格限制大规模商业性旅游开发，以生态保育和地质环境保护为主，重点开展必要的科学考察、地质灾害监测预警及生态修复工作，确保地质遗迹的原真性与区域地质环境的安全性。

5　结　论

（1）曲靖地质公园地质遗迹丰富，可划分为7大类17类20亚类共54处地质遗迹。其中，志留纪潇湘动物群、早泥盆世西屯动物群、肯氏鱼动物群及中三叠世罗平生物群核心产地具有国际意义。

（2）曲靖地质公园地质遗迹资源具有重要的古生物学科学价值，是研究“从鱼到人”演化及海洋生态系统复苏的关键实证。此外，公园内喀斯特地貌景观独特，美学价值高，为科普和旅游开发提供了丰富资源。

（3）基于GIS空间叠加分析，识别出中部麒麟

—沾益与南部罗平片区为“重点开发利用区”，上述区域地质遗迹资源富集、交通通达且核心地质遗迹点避开了地质灾害高易发区；而北部高风险区则被划定为“严格保护区”。该分区方案实现了“资源—交通—安全”的空间优化配置，为公园科学规划与防灾减灾提供了定量依据。

参考文献：

[1] UNESCO. Statutes of International Geoscience and Geoparks Programme[EB/OL]. (2015)[2020-05-27]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000260675.

[2] UNESCO. Operational Guidelines for UNESCO Global Geoparks (English and Chinese versions)[EB/OL]. (2015)[2020-05-27]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391354.

[3] 王璐琳,田明中,张建平等. 中国香港联合国教科文组织世界地质公园地质遗迹资源及综合利用价值评价[J]. 现代地质,2024,38(2):520-532.

[4] 马俊杰,张建平,刘晓鸿等. 中国世界地质公园管理模式与县域经济可持续发展关系研究[J]. 资源与产业,2022,24(1):1-7.

[5] 吴成基,薛滨瑞,李敏睿. 对地质文化村建设若干问题的再思考[J]. 现代地质,2024,38(6):1607-1612.

[6] 赵洪菊,王国良,拜永山,等. 地质遗迹资源和旅游地质文化内涵探析:以青藏高原东北缘东岔地质文化村构建为例[J]. 现代地质,2024,38(5):1400-1412.

[7] 马俊杰,田明中,张志光. 极美之境[M]. 北京:北京师范大学出版社,2024:1-392.

[8] 张建平. 世界地质公园的前世今生[J]. 地质论评,2020,66(6):1710-1718.

[9] 马俊杰,程捷. 自然文化概论[M]. 北京:地质出版社,2022:1-120.

[10] 魏崇辉,郑元,孙文燕,等. 龙岩世界地质公园地学旅游资源评价及开发对策[J]. 现代地质,2024,38(4):1192-1204.

[11] 石晨霞,高永利,吕国娟,等. 黄河流域高质量发展背景下河南省郑州市地质旅游资源利用新思路[J]. 现代地质,2024,38(2):533-546.

[12] 云南省地质矿产局. 云南省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996:1-366.

[13] 李成路,张绪教,武法东,等. 巴彦淖尔国家地质公园汉代黄河古河道与临戎古城位置的考证[J]. 现代地质,2024,38(3):818-831.

[14] 李昱春,肖思祺. 西藏日喀则地质遗迹特征及地质公园建设可行性分析[J]. 现代地质,2024,38(1):260-268.

[15] 杨庆坤,郭福生,罗勇,等. 彩虹地貌概念界定及其与丹霞地貌的关联性研究[J]. 现代地质,2025,39(6):1661-1672.

[16] 王一凡,张绪教,王士国,等. 晋陕峡谷山西临县“黄河浮雕”自然奇观的成因及时代约束[J]. 现代地质,2025,39(6):1673-1683.

[17] 国家林业和草原局. 国家地质公园规划编制技术要求[S]. 北京:国家林业和草原局,2019:1-10.

[18] ZHU M,ZHAO W J,JIA L T,et al. The oldest articulated osteichthyan reveals mosaic gnathostome characters [J]. Nature,2009,458:469-474.

[19] ZHU M,AHLBERG P E,PAN Z H,et al. A Silurian maxillate placoderm illuminates jaw evolution [J]. Science,2016,354(6310):334-336.

[20] ZHU M,YU X B,AHLBERG P E,et al. A Silurian placoderm with osteichthyan-like marginal jaw bones[J]. Nature,2013,502(7470):188-193.

[21] ZHU M,YU X B,CHOO B,et al. An antiarch placoderm shows that pelvic girdles arose at the root of jawed vertebrates[J]. Biology Letters,2012,8(3):453-456.

[22] ZHANG G R,WANG S T,WANG J Q,et al. A basal antiarch (placoderm fish) from the Silurian of Qujing, Yunnan, China [J]. Palaeoworld,2010,19(1-2):129-135.

[23] CHOO B,ZHU M,QU Q M,et al. A new osteichthyan from the late Silurian of Yunnan, China[J]. PLOS One,2017,12(3):1-20.

[24] CHOO B,ZHU M,ZHAO W J,et al. The largest Silurian vertebrate and its palaeoecological implications [J]. Scientific Reports, 2014,4: 5242.

[25] 赵文金,朱敏. 中国志留纪鱼化石及含鱼地层对比研究综述[J]. 地学前缘,2014,21(2):185-202.

[26] GAI Z K,LI Q,FERRÓN H G,et al. Galeaspid anatomy and the origin of vertebrate paired appendages[J]. Nature, 2022, 609:959-963.

[27] ZHU Y A,LI Q,LU J,et al. The oldest complete jawed vertebrates from the early Silurian of China[J]. Nature, 2022, 609:954-958.

[28] JANVIER P. Early Vertebrates[M]. Oxford: Clarendon Press, 1996:1-50.

[29] 朱敏. 记真盔甲鱼类两新属—兼论真盔甲鱼类系统发育关系[J]. 古脊椎动物学报,1992,30(3):169-184.

[30] JIANG W Y,ZHU M,SHI X D,et al. Qushiaspis, a new genus of gantarostrataspid fish (galeaspida, stem-gnathostomata) from the Lower Devonian of Yunnan, China[J]. Historical Biology, 2021(6):1-9.

[31] CUI X D,LI Q,QIAO T,et al. New material of thelodonts from Lochkovian (Lower Devonian) of Qujing, Yunnan, China[J]. Vertebrata PalAsiatica,2020,58(1):1-15.

[32] 王念忠. 滇东曲靖翠峰山群下部花鳞鱼类微体化石的再研究[J]. 古脊椎动物学报,1997,35(1):1-17.

[33] 王念忠,董致中. 中国志留纪鱼类微体化石的首次报道[J]. 古生物学报,1989,28(2):192-206.

[34] LI Q,CUI X D,ANDREEV P S,et al. Nostolepis scale remains (stem Chondrichthyes) from the Lower Devonian of Qujing, Yunnan, China[J]. PeerJ,2021:9e11093.

[35] CHANG M M,ZHU M. A new Middle Devonian osteolepidid from Qujing, Yunnan[J]. Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists,1993,15:183-198.

[36] ZHU M,AHLBERG P E. The origin of the internal nostril of tetrapods[J]. Nature,2004,432(7013):94-97.

[37] LIU J,MOTANI R,JIANG D Y,et al. The first specimen of the Middle Triassic Phalarodon atavus (Ichthyosauria: Mixosauridae) from South China, showing postcranial anatomy and peri-Tethyan distribution[J]. Palaeontology,2013,56(4):849-866.

[38] SHANG Q H,LI C,WANG W. Nothosaurus luopingensis sp. nov. (Sauropterygia) from the Anisian, Middle Triassic of Luop-

ing, Yunnan Province, China[J]. Vertebrata PalAsiatica, 2022, 60(4): 249 – 270.

[39] LI C. A new Triassic marine reptile from southwestern China[J]. Journal of Vertebrate Paleontology, 2011, 31(2): 303 – 312.

[40] WANG Y J, ZHU M. New Data on the headshield of Parayunnanolepis xitunensis (Placodermi, Antiarcha), with comments on nasal capsules in antiarchs[J]. Journal of Vertebrate Paleontology, 2021, 40(6): 1 – 8.

[41] WANG Y J, ZHU M. Squamation and scale morphology at the root of jawed vertebrates[J]. eLife, 2022(11): e76661.

[42] 张启跃，周长勇，吕涛，等. 云南罗平地区中三叠世龙鱼化石的发现[J]. 地质通报，2010，29(1)：26 – 30.

[43] HU S X, ZHANG Q Y, CHEN Z Q, et al. The Luoping biota: exceptional preservation, and new evidence on the Triassic recovery from end-Permian mass extinction[J]. Proceedings of the Royal Society B, 2011, 278, 2274 – 2282.

[44] 李锦玲，奥利维尔·瑞柏尔. 贵州兴义中三叠世Nothosaurus一新种[J]. 古脊椎动物学报，2004，1：1 – 12.

[45] 谢韬，甘云兰，张启跃，等. 罗平生物群国家地质公园地质遗迹特征及其综合评价[J]. 中国地质，2013，40(6)：1959 – 1967.

[46] 张永永，税伟，李慧，等. 喀斯特天坑地下森林景观格局研究—以沾益天坑群为例[J]. 西华师范大学学报(自然科学版)，2022，43(3)：245 – 252.

[47] 潘竟虎，李俊峰. 中国A级旅游景点空间结构的计量地理分析[J]. 经济地理，2013，33(9)：154 – 160.

[48] 孙智杰，黄波，何杰，等. 湖北省重要地质遗迹空间分布特征及其影响因素[J]. 现代地质，2024，38(6)：1613 – 1623.

[49] 靳诚，陆玉麒，范黎丽. 基于公路网络的长江三角洲旅游景点可达性格局研究[J]. 自然资源学报，2010，25(2)：259 – 269.

[50] 徐友宁，张江华，何芳，等. 西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J]. 西北地质，2022，55(3)：129 – 139.

[51] 高萌萌，李瑞敏，徐慧珍，等. 基于MapGIS建立的中国地质环境图系数据库[J]. 中国地质，2019，46(S2)：130 – 156.

[52] 陈思静，谢新乔，杨继周，等. 地形复杂山区相对湿度空间插值方法对比研究[J]. 山地学报，2022，40(5)：778 – 786.

[53] 王万忠，焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报，1996(5)，1 – 20.

[54] 汤国安，赵牡丹，李天文，等. DEM提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报，2003(6)：824 – 830.

[55] 丛智琦. 基于WT的高铁沿线风场模拟及站点布局优化应用研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2023.

[56] 孙丰华，王玉刚，孙金金，等. 天山北坡山地生态系统植被碳利用效率时空动态及其影响因素[J]. 生态学杂志，2024，43(10)：2923 – 2931.

[57] 董茜，李江风，方世明，等. 基于GIS的地质公园保护区划分—以湖北神农架世界地质公园为例[J]. 国土资源遥感，2016，28(3)：154 – 159.