

姜伏伟, 赖海青, 杨庆坤, 等. 湘鄂渝黔交接区隐伏型红色岩溶地貌形态成因及其区域分布[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 948-956.

DOI: 10.11932/karst20240411

湘鄂渝黔交接区隐伏型红色岩溶地貌形态成因及其区域分布

姜伏伟^{1,2}, 赖海青³, 杨庆坤^{3,4}, 陈友智⁵, 于宁⁶, 杨涛⁶

(1. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 江西南昌 330013; 2. 地下水污染成因与修复江西省重点实验室, 江西南昌 330013; 3. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013; 4. 青海民族大学旅游学院, 青海西宁 810007; 5. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院, 四川成都 610213; 6. 贵州理工学院, 贵州贵阳 550003)

摘要: 红色岩溶为新发现的隐伏型地貌, 是埋藏于地下、颜色红艳、形态奇特的岩溶地貌。目前, 红色岩溶研究主要集中于定义特征、形成条件、地质成因、演化模式等方面, 但其独特的形态的形成机制、塑形过程及隐伏的分布范围尚未深入讨论。文章从物质成分差异、节理裂隙切割及差异溶蚀作用三方面分析红色岩溶地貌形态的形成机制, 并讨论了塑形的基本过程及关键地质作用。依据红色岩溶地貌发育的判定条件及地层特征, 确定了湘鄂渝黔红色岩溶的分布范围。结果表明: (1) 岩层中可溶性物质含量差异及层状韵律层是红色岩溶地貌形态塑形的物质条件。它的动力条件是构造节理裂隙切割与岩体差异溶蚀; (2) 红色岩溶地貌形态演化经历四个基本阶段, 其中节理裂隙切割、岩土界面溶蚀及节理裂隙面溶蚀是塑形的关键地质作用; (3) 湘鄂渝黔四省红色岩溶地貌分布总面积达 3 433.83 km², 主要分布于湘北、湘西北、鄂西南、渝东南及黔东北。

关键词: 红色岩溶; 差异溶蚀; 隐伏型地貌; 凹凸互层

创新点: 从物质成分差异、节理裂隙切割及差异溶蚀作用三方面讨论隐伏型红色岩溶地貌细观形态的形成机制及其塑形过程, 并依据它的发育条件确定湘鄂渝黔红色岩溶的分布范围, 为后期红色岩溶调查及开发保护提供基础。

中图分类号: P931.5 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0948-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

红色岩溶属于隐伏型地貌之一, 广泛分布于我国湘鄂渝黔交接的武陵山区^[1]。目前, 红色岩溶的调查研究工作尚处于起步阶段。姜伏伟等^[2]采用“外观特征”加“地貌类型”的命名原则, 将它命名为“红色层状凹凸岩溶地貌”(简称“红色岩溶”), 提出了

其科学定义及界定标准, 并总结了该类型地貌具有四个基本特点: 红颜色、层状凹凸形态、泥质灰岩的成景岩性、地下环境差异溶蚀成因。曹晓娟等^[3]通过野外调查和资料收集分析了武陵山地区红色岩溶景观形成的地质条件与演化模式。姜伏伟等^[4]通过地表水体 pH、土壤 pH 和 CO₂ 溶度测试及岩石薄片鉴定, 分析了红色岩溶塑形作用力、塑性环境、成因

基金项目: 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2022015)。

第一作者简介: 姜伏伟(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩溶工程地质灾害及岩溶景观地质研究。E-mail: jfwei666@126.com。

通信作者: 杨庆坤(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事区域地质调查与旅游地学教学和科研工作。E-mail: 197267245@qq.com。

收稿日期: 2024-03-28

条件及成因过程,其中红色物质成分为 Fe_2O_3 。吴亮君等^[5-6]分析了湘西红色碳酸盐岩(红色岩溶)石林发育特征,结合剖面岩石组成、颜色、古生物丰度以及区域古地理研究,认为红色碳酸盐岩可能是暂时性相对海平面下降叠加氧化事件的产物。杨玉倩^[7]以浙江省江山市莲塘村发育的红色岩溶为研究对象,对红色岩溶的特征和成因进行分析,对其景观价值进行综合评价,提出开发策略和保护建议。陈友智等^[8]基于野外露头观测、显微结构分析和元素地球化学分析,从构造变形的角度探讨隆起与红色岩溶地貌之间的因果关系。

红色岩溶作为新发现的隐伏型地貌,其观赏性来源于鲜艳红色及独一无二的外观形态。现有研究从宏观的地质条件及构造作用力方面讨论它的形态成因,但其细观形态形成机制及塑形过程尚未深入分析。此外,作为一种隐伏型地貌,由于较难直接在地表发现,因此确定其分布范围对调查研究具有重要的意义。基于这两点,本文从细观的角度讨论隐伏型红色岩溶地貌的形态形成机制及塑形过程,并依据红色岩溶地貌发育的判定条件及地层特征,确定湘鄂渝黔红色岩溶的分布范围,为后期红色岩溶的调查及开发保护提供基础。

1 红色岩溶形态形成机制

1.1 物质成分差异

红色岩溶地貌最大特点为凹凸互层,为分析岩体的可溶性物质成分,选取一组凹凸面作为研究对象。选取外凸面(由最凹点至最凸点)岩样 $12\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 图像,通过 Photoshop 软件将样品图像由上至下分成三等分,并圈出碳酸盐岩及泥质的分布范围(图 1),

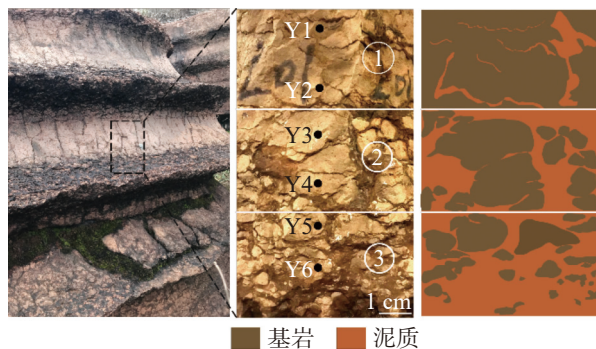


图 1 基岩及泥质分布图

Fig. 1 Distribution of bedrock and mud

计算得到第①部分碳酸盐岩表面积占比 92.47%,第②部分为 54.26%,第③部分为 37.57%。这说明外凸面岩体的可溶性碳酸盐岩的表面积占比由上至下逐渐降低,但难溶的泥质含量逐渐增高。为了查明碳酸盐岩的可溶性成分占比,选取 6 个点磨成粉末进行溶蚀试验,结果见表 1。6 个样品中溶蚀百分量最大为 83.23%,最小为 66.61%,平均为 77.76%,呈现出相对凹处碳酸盐岩中的可溶成分高的趋势。

表 1 碳酸盐岩溶蚀试验结果

Table 1 Results of the test for carbonate karst dissolution

| 编号 | 粉末量/g | 溶蚀残余量/g | 溶蚀量/g | 溶蚀百分量/% |
|----|--------|---------|--------|---------|
| Y1 | 13.589 | 2.481 | 11.108 | 81.74 |
| Y2 | 7.786 | 1.306 | 6.480 | 83.23 |
| Y3 | 11.501 | 2.388 | 9.113 | 79.24 |
| Y4 | 11.315 | 2.565 | 8.750 | 77.33 |
| Y5 | 11.710 | 3.231 | 8.479 | 72.41 |
| Y6 | 15.602 | 5.210 | 10.392 | 66.61 |

综合难溶物质的表面积占比及可溶性碳酸盐岩的溶蚀百分量,可说明红色岩溶地貌外凸面可溶物质由上而下含量逐渐增加趋势,内凹面则相反,其中最凹处可溶物质含量最高,最凸处则最低。因此,可溶物质含量差异是红色岩溶地貌凹凸形态形成的物质基础。

1.2 构造节理裂隙切割

节理裂隙切割是岩体形态初期塑造的关键因素。新近纪以来的新构造运动是形成现今全球地貌和水文网络的最重要因素。如贵州西高东低的高原地貌形成于晚上新世^[9],区域性隆升背景下的断块活动,形成一系列地垒-地堑式构造组合,其中贵州东北部红色岩溶分布区主要受 NE-NEE 向断裂作用^[10](图 2a)。在区域 NE 向构造应力作用下,松桃县腊尔山红色岩溶分布点伴生有 NW 向的次级断裂构造(图 2b)。在构造活动轻微、地壳相对稳定的阶段,岩溶演化以水平作用为主,地表水流以剥蚀夷平作用为主,在产生新岩溶剥夷面的同时,形成较成熟的岩溶形态组合。因此,构造作用是岩溶地貌景观形成的重要控制因素,主要体现在断裂-褶皱形成、势能的升降、地表风化剥蚀消减载荷以及与侵蚀基准面升降的动态关系中。节理裂隙是溶蚀作用所需侵蚀性地下水的良好运移通道,提高了岩溶地貌区的

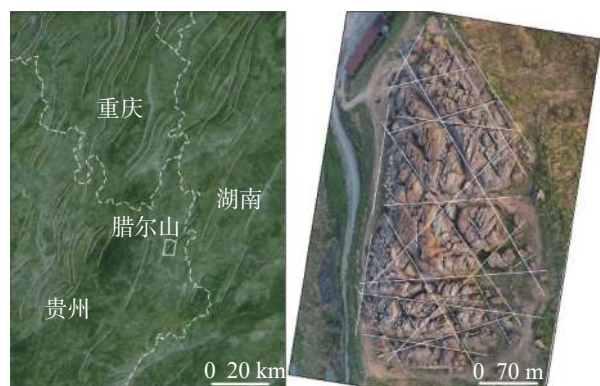


图2 节理裂隙(航拍)

Fig. 2 Joint fissures (aerial photo)

风化剥蚀效率,并为地貌形态演化奠定了雏形。

1.3 差异溶蚀作用

碳酸盐岩的溶蚀作用化学方程为: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3)^-$,其中 CO_2 主要来源于表层枯枝落叶中有机质分解以及腐殖层中大量微生物代谢生成。当母岩中可溶成分含量高时,溶蚀的速率快而内凹,反之则外凸,这就造成了差异溶蚀。由于母岩为层状结构,且泥质含量呈现周期性变化,具有一层可溶物含量高,一层含量低的特点,导致形成一层凹一层凸的独特形态(图3)。另外,含有 H^+ 离子的侵蚀性地下水沿着岩土界面及节理裂隙面(即岩面)向下入渗,渗流过程中不断消耗 H^+ 离子,使得它的侵蚀性从上至下逐渐减弱,这就导致了节理裂隙面上部溶蚀快下部慢,即呈现上宽下窄的形态(图3)。因此,红色岩溶地貌形成过程中,横向上因物质成分差异导致差异溶蚀,垂向上因侵蚀性减弱导致差异溶蚀。

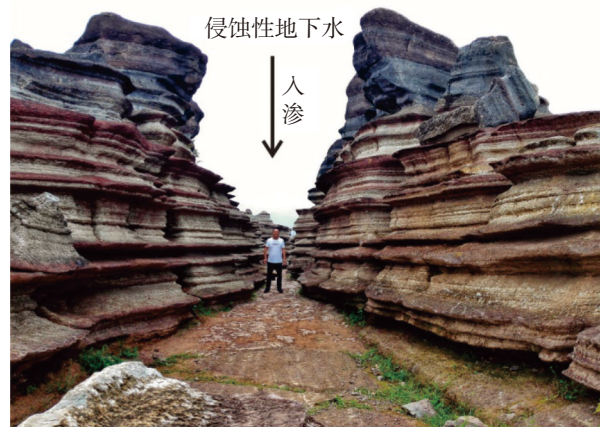


图3 裂隙面差异溶蚀形态

Fig. 3 Differential dissolution morphology of fissure surfaces

综上所述,岩层成分可溶性物质含量差异及层状的韵律层是导致红色岩溶地貌形态多样的物质条件,构造节理裂隙切割与岩体差异溶蚀是它的动力条件。

2 红色岩溶形态塑形过程

2.1 形态演化基本过程

红色岩溶形态演化主要经历4个基本阶段(图4): (1)浅海环境下红色岩溶母岩的沉积,即形态发育的物质条件形成阶段;(2)母岩形成后,在地质构造抬升和节理裂隙切割作用下,地层被抬升出露于地表,即可溶蚀的岩层出露阶段;(3)地表岩层在地质营力作用下风化成土,土中微生物代谢产生 CO_2 , CO_2 溶于水后形成含有 H^+ 离子的侵蚀性地下水,即赋存于风化土中侵蚀性地下水形成阶段;(4)土中侵蚀性地下水沿着岩面、节理裂隙面溶蚀红色岩溶母岩,形成千奇百态的形态,即土中差异溶蚀阶段。

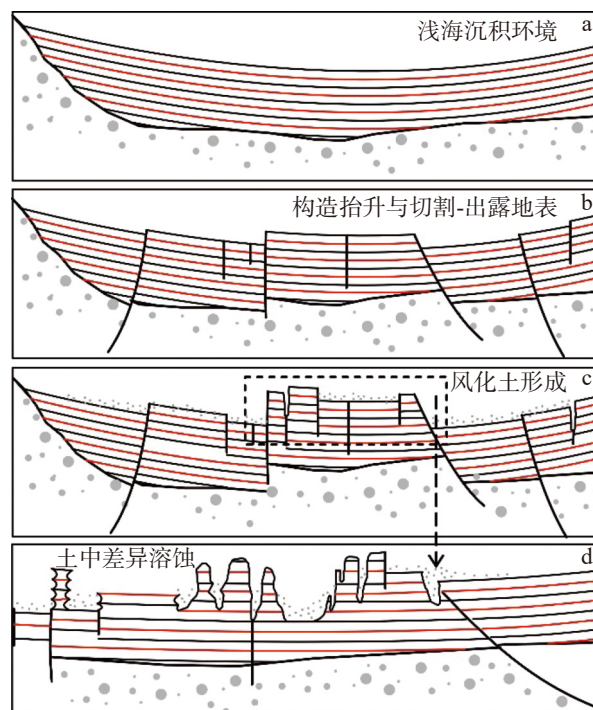


图4 红色岩溶形态演化过程

Fig. 4 Evolution of red karst morphology

2.2 塑形的关键地质作用

2.2.1 节理裂隙切割

红色岩溶形态形成的初级阶段主要以节理裂隙

切割为主要作用力,塑造了初始轮廓形态。在网格状节理裂隙的切割作用下,岩体被塑造成有棱有角的长方体,形似箱子。长方体后期在地下水溶蚀作用下,棱角逐渐被溶蚀而逐渐演变成圆弧,整体仍呈现梯形体(图5)。另外,受网格状节理切割而成的石柱,因溶蚀作用石柱棱角逐渐被溶平,逐渐演变成柱状体(图6)。因此,红色岩溶塑形的初始阶段主要形成以梯形体、柱状体为主的形态。



图5 梯形体
Fig. 5 Trapezoid

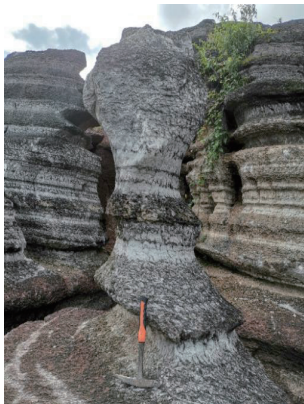


图6 柱状体
Fig. 6 Cylinder

2.2.2 岩土界面溶蚀阶段

由于侵蚀性地下水主要赋存于土层中,因此岩土界面的岩体优先受到溶蚀作用。受岩面起伏的影响,往往表面低凹处易聚集更多的侵蚀性地下水,其溶蚀速率较快,往往形成锥形、锋刃形的岩体形态。锥体主要分布于碳酸盐含量从上往下逐渐降低的凸起岩层中。在长期溶蚀作用下,上部岩体逐渐被溶蚀退化成尖锥,而下部岩体泥质成分起到了隔离或延缓了侵蚀性地下水和碳酸盐成分的接触,导致溶

解速度变慢,因此形成上尖下宽的锥形(图7)。在宽度较小(一般50 cm以内)的突兀岩体中,由于侵蚀性地下水自上向下渗流导致顶部岩体优先被溶蚀,造成从上至下岩体溶蚀速率逐渐减弱。由于顶部溶蚀快,逐渐发育成线状的锋刃口,下部溶蚀慢,相对较宽,形成锋刃形形态(图8)。因此,红色岩溶岩土界面处在溶蚀作用下主要形成以锥体、锋刃形为主的形态。

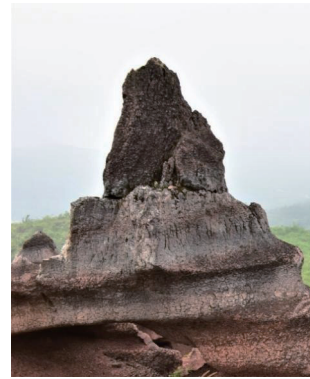


图7 锥形
Fig. 7 Cone



图8 锋刃形
Fig. 8 Sharp blade

2.2.3 节理裂隙面溶蚀

除了在岩体表面径流外,土层中一部分侵蚀性地下水将沿着节理裂隙面下渗。垂向上,由于侵蚀性 H^+ 离子被不断消耗,且补给主要来源于岩体上方的土体,因此侵蚀性 H^+ 离子浓度随着入渗深度增加而不断减小。这就造成了其溶蚀能力随深度降低而溶蚀速率慢,形成上宽下窄近似“V”字型溶沟(图3)。

同时,侵蚀性地下水在横向上对节理裂隙裂隙面两侧岩壁进行溶蚀。在同一个水平层,可以认为侵蚀性 H^+ 离子浓度相同,其溶蚀能力相同。但由于

红色岩溶的母岩为泥质灰岩韵律层,且每一层泥质含量有差异,这种物质成分的差异导致侵蚀性地下水对母岩的溶蚀速率有快有慢。可溶性成份含量高的岩层,其溶蚀速度快而凹进。反之,可溶性成份含量高的泥质灰岩受地下水的溶蚀作用弱,溶蚀速度慢而相对凸起。由于岩层产状近水平,且凹凸层延伸展布,形成凹凸互层的形态(图9)。



图9 凹凸互层

Fig. 9 Concave and convex interlayer

在一些特殊条件下,红色岩溶节理裂隙面溶蚀可发育穿洞。如当节理裂隙发育较密集,受两条平行节理切割而成薄片状的岩体,它的较薄部位容易在地下水水平上相向溶蚀往往发育成穿洞(图10)。另外,在节理裂隙闭合程度或充填的影响下,侵蚀性地下水可能沿着某个相对固定路径汇集形成优势裂隙流。这个优势裂隙流长期溶蚀岩体,最终也将演化成穿洞。



图10 穿洞

Fig. 10 Limestone cave

3 湘鄂渝黔红色岩溶地貌区域分布

3.1 红色岩溶地貌分布判定依据

3.1.1 红色岩溶地貌发育的判定标准

根据红色岩溶地貌的定义^[2]及笔者团队野外调

查的经验,选择颜色、形态、岩性、裸露情况、地貌条件等5个因素作为红色岩溶地貌的判定标准(表2)。选择上述5个因素的原因主要为:(1)颜色、形态是红色岩溶地貌的外观形态特征;(2)根据笔者团队在湘鄂渝黔红色岩溶地貌的调查情况,仅在奥陶系中下统的地层内中发现它的分布,因此判定它的岩层年代限定在奥陶系中下统;(3)由于它的形态主要受土中或气下溶蚀作用,这说明红色岩溶发育的岩体不受其它岩层覆盖,因此判定条件为岩体整体或局部裸露;(4)地貌上,红色岩溶母岩最有可能出露于山顶、沟谷、斜坡区域,因此以这三个条件作为它的判定条件。

表2 红色岩溶界定标准(修改自姜伏伟等^[2])

Table 2 Definition standard of red karst (modified from Jiang Fuwei, et al^[2])

| 依据内容 | 特点标准 |
|------|------------------------------------|
| 颜色 | 红色系,包含紫红色、深红色、鲜红色、浅红色、粉红色等。 |
| 形态 | 层面互层凹凸,凹凸层数大于10层,凹凸程度大于10 cm。 |
| 岩性 | 奥陶系中下统的泥质灰岩、泥灰岩、灰岩—泥岩互层等含一定泥质的可溶岩。 |
| 裸露情况 | 岩体整体/局部裸露。 |
| 地貌条件 | 山顶出露,沟谷出露,斜坡出露。 |

3.1.2 红色岩溶地貌发育地层特征

根据野外调查,奥陶系中下统(或者下统)牯牛潭组和十字铺组、下统大湾组紫红色瘤状泥灰岩、泥质灰岩互层发育是红色岩溶地貌形成的物质基础。牯牛潭组由张文堂等^[11]所创,建组剖面位于宜昌分乡牯牛潭,灰色、红色瘤状石灰岩,产杆状震旦角石、瓦氏长颈角石、隔板正形贝、小四齿贝等,厚20~30 m,与下伏大湾组之间有一沉积间断面。牯牛潭组主要分布于湘西北八面山,岩性为灰黄色瘤状泥质灰岩、灰绿色和紫红色瘤状泥质灰岩。

十字铺组由乐森璋^[12]所创,建组剖面位于贵州遵义董公寺与飞来石之间的十字铺,由灰绿、黄绿色钙质页岩(或泥灰岩)组成,底部常为数米厚的灰色厚层灰岩或鲕状灰岩。黔北十字铺组主要为灰绿色、黄绿色钙质页岩、灰色或浅紫灰色灰岩、鲕状灰岩或紫红色泥质灰岩,鄂西南同期沉积地层岩性则变为白云质泥灰岩、泥质生屑灰岩,分布不稳定。

大湾组由张文堂^[13]将原“大湾层”含义扩大而来,建组剖面位于宜昌分乡场女娲庙大湾村,自下而上的岩性为青灰色瘤状石灰岩夹黄绿色页岩,产扬子贝,故又称“扬子贝层”,中部红色薄层石灰岩富含头足类化石,上部灰绿色页岩夹瘤状灰岩。

因此,湘鄂渝黔红色岩溶地貌的岩石构成更多的依赖于稳定分布的大湾组紫红色瘤状灰岩和泥质灰岩,辅以牯牛潭组或十字铺组紫红色碳酸盐岩,其中大湾组露头区成为重点发育区。

3.2 红色岩溶地貌分布范围

3.2.1 湖南省分布范围

根据区域地质资料,湖南省大湾组紫红色瘤状泥灰岩、泥质灰岩分布于湘北和湘西北岳阳、张家

界、古丈、凤凰一线以北和以西的八面山(表 1),以张家界温塘剖面为代表剖面。在桃源茅草铺、石门磺厂一带该套岩石相变为灰岩、灰白色厚层含硅质团块灰岩、生物碎屑灰岩或夹青灰色页岩、钙质页岩。在永顺一带该时期地层岩性具有三分性,上部为黄绿色、青灰色薄至中层泥灰岩;中部为紫红色中层瘤状泥灰岩;下部以灰色薄至中层含白云质泥灰岩为主夹杂色泥灰岩、页岩、生物碎屑灰岩。岳阳、常德、古丈、凤凰一线以南和以东的武陵山小区大湾组以桃源县九溪白马泉—盘家咀剖面为代表,大湾组紫红色瘤状泥灰岩、泥质灰岩已相变为九溪组黄绿、灰色页岩、粉砂岩和砂质页岩(表 3)。因此,湖南大湾组在湖南省分布于吉首、古丈、张家界、永顺、桑植、龙山一带。

表 3 奥陶系大湾组、牯牛潭组和十字铺组分布区域

Table 3 Distribution area of the Ordovician Dawan Formation, Guniutan Formation and Cross Pu Formation

| 地层 | 地区 | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|------------|------------|------|-----------|-----------|------|---------|-----|--------------|-------------|-------------|----------|----------|
| | 湖北省 | | | 湖南省 | | | | 贵州省—重庆市 | | | | | | |
| | 恩施— 黄石区 | 通山— 崇阳区 | 郧西— 随州区 | 湘西北区 | | 湘中小区 | 鄂西南 | 渝黔 | | 扬子—华南 过渡区 | | | | |
| 奥陶系中统 | 庙坡组 | 大田坝组 | 胡乐组 | 两岔口组 | 八面山 小区 | 武陵山 小区 | 牯牛潭组 | 舍人湾组 | 烟溪组 | 风洞岗组 | 秀山—江 口小区 | 城口—巫 溪小区 | 湄潭 小区 | 三都 小区 |
| 奥陶系下统 | 牯牛潭组 | 大湾组 | 宁国组 | 吊麻沟组 | 牯牛潭组 | 舍人湾组 | 九溪组 | 桥亭子组 | 紫台组 | 庙坡组及 牯牛潭 | 十字铺组 | 十字铺组 | 十字铺组 | 同高组 |

3.2.2 湖北省分布范围

湖北西南部来凤—宣恩一带大湾组下部与上部为页岩与瘤状灰岩不等厚互层,中部为灰绿色、紫红色瘤状灰岩。向东至宜昌分乡大湾村该组地层上部为灰绿色页岩夹瘤状灰岩或瘤状灰岩夹页岩;中部为紫红色夹灰绿色瘤状灰岩为主,偶夹薄层页岩;下部灰绿色瘤状灰岩夹页岩。向东北至保康—南漳一带相变为灰黑色中薄层灰岩、泥质灰岩或瘤状灰岩,夹结晶灰岩及页岩。从地层岩性和叠置关系分析,来凤—宣恩一带大湾组更符合红色岩溶地貌形成条件。

3.2.3 重庆市分布范围

重庆大湾组主要分布于东部和东南部,东部城口—三峡一带大湾组下部为灰绿色瘤状灰岩、中部为紫红色夹灰绿色瘤状灰岩,上部为页岩夹瘤状灰

岩,三峡地区为鲕状灰岩、生屑灰岩。东南部彭水、黔江、武隆等地大湾组顶部为灰绿色粉砂岩、粉砂质页岩,中部为黄绿色页岩夹浅灰、紫红色厚层灰岩,底部为黄绿色、紫红色页岩夹灰色薄层灰岩。仅在渝东南酉阳—秀山一带出现紫红色瘤状灰岩与泥质灰岩。

3.2.4 贵州省分布范围

贵州奥陶系主要分布于黔东北和黔南。奥陶系下统大湾组和湄潭组为同期异相岩层(表 3),黔北沿河县城以东分布大湾组,其中部为紫红色中至厚层瘤状灰岩、泥灰岩,以西则为湄潭组灰绿色、黄绿色页岩夹灰岩和灰绿色、黄绿色砂岩、粉砂岩。沿河—印江—石阡一线为黔东北湄潭组与大湾组的相变带,相变带以东沿河县甘溪、松桃县盘石乡和印江洋溪均发育与红色岩溶地貌相同的岩石地层。黔东南施

秉—黄平—凯里一带大湾组相变为紫红色、灰绿色中厚层瘤状砂质灰岩、泥质灰岩及钙质页岩。黔东南三都一带相变为同高组粉砂岩、泥晶灰岩。因此，贵州省大湾组发育较好的区域为沿河、印江、石阡、松桃，可能形成红色岩溶地貌的区域为施秉、黄平、凯里。

3.2.5 分布面积

根据湘鄂渝黔交接区 1:20 万地质图中大湾组、牯牛潭组和十字铺组的发育岩层分布图面积进行统计，隐伏型红色岩溶地貌潜在分布面积达 3 433.83 km²(表 4)，单幅最大分布面积 511.36 km²，最小仅 5 km² 幅分布面积。空间上，总体呈 SW—NE 向的狭长条带状分布，局部呈斑状(图 11)。

表 4 湘鄂渝黔红色岩溶地貌潜在分布面积统计

Table 4 Statistics of the potential distribution area of red karst geomorphic landform in the adjoining area of Hunan-Hubei-Chongqing-Guizhou

| 序号 | 图幅名称 | 分布面积/km ² | 分布区个数 |
|----|------|----------------------|-------|
| 1 | 大庸幅 | 46.38 | 23 |
| 2 | 恩施 | 215.89 | 12 |
| 3 | 黔江 | 279.45 | 31 |
| 4 | 桑植 | 132.22 | 20 |
| 5 | 石门 | 215.31 | 7 |
| 6 | 湄潭 | 209.60 | 98 |
| 7 | 瓮安 | 193.30 | 46 |
| 8 | 咸丰 | 244.43 | 24 |
| 9 | 永顺 | 377.76 | 75 |
| 10 | 酉阳 | 511.36 | 31 |
| 11 | 吉首 | 429.26 | 19 |
| 12 | 镇远 | 92.81 | 22 |
| 13 | 芷江 | 16.81 | 5 |
| 14 | 沿河 | 155.81 | 18 |
| 15 | 江口 | 116.61 | 73 |
| 16 | 都匀 | 196.83 | 72 |
| | 合计 | 3 433.83 | 576 |

4 结论

(1) 岩层成分可溶性物质含量差异及层状的韵律层是导致红色岩溶地貌互层状凹凸的物质条件，构造节理裂隙切割与岩体差异溶蚀是其形态塑形的动力条件。

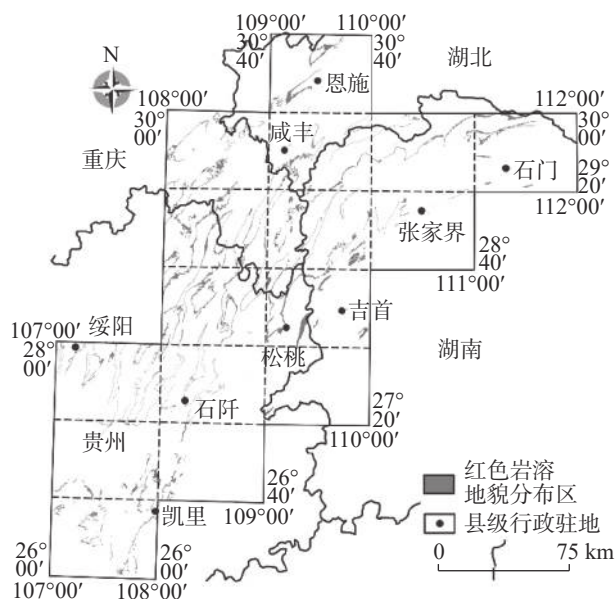


图 11 湘鄂渝黔红色岩溶地貌分布图

Fig. 11 Distribution of red karst geomorphic landscape in the adjoining area of Hunan-Hubei-Chongqing-Guizhou

(2) 红色岩溶地貌形态演化经历物质条件形成、可溶蚀岩层出露、赋存侵蚀性地下水风化土的形成及土中差异溶蚀四个基本阶段，其中塑形的关键地质作用为节理裂隙切割、岩土界面溶蚀及节理裂隙面溶蚀。

(3) 依据颜色、形态、岩性、裸露情况、地貌条件等 5 个因素作为红色岩溶地貌的判定标准，其中奥陶系中下统(或者下统)牯牛潭组和十字铺组、下统大湾组紫红色瘤状泥灰岩、泥质灰岩互层发育是红色岩溶地貌的发育层位。

(4) 湖南省隐伏型红色岩溶地貌分布于湘北和湘西北岳阳、张家界、古丈、凤凰一线以北和以西的八面山一带，湖北分布于来凤—宣恩一带，重庆分布于渝东南酉阳—秀山一带，贵州分布于黔东北的施秉、黄平、凯里、沿河、印江、石阡、松桃一带。湘鄂渝黔四省红色岩溶地貌分布总面积达 3 433.83 km²。

参考文献

- [1] 姜伏伟,董颖,杨涛.红色岩溶:从远古中醒来[J].国土资源科普与文化,2020(3):30-35.
- [2] 姜伏伟,董颖,苏孝良,陈友智,于宁,曹晓娟.试论红色岩溶概念及其科学价值[J].中国岩溶,2020,39(5):775-780.
JIANG Fuwei, DONG Ying, SU Xiaoliang, CHEN Youzhi, YU Ning, CAO Xiaojuan. Preliminary discussion on the concept of red karst and its scientific value[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 775-780.
- [3] 曹晓娟,姜伏伟,陈友智,董颖,杨宏斌.武陵山地区红色岩溶

- 景观形成地质条件与演化模式研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 945-951.
- CAO Xiaojuan, JIANG Fuwei, CHEN Youzhi, DONG Ying, YANG Hongbin. Geological conditions and evolution model of red karst landscape in the Wulingshan area, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 945-951.
- [4] 姜伏伟, 董颖, 陈友智, 于宁, 曹晓娟. 西水流域贵州段红色岩溶特征及成因[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 937-944.
- JIANG Fuwei, DONG Ying, CHEN Youzhi, YU Ning, CAO Xiaojuan. Characteristics and genesis of red karst in Guizhou section of Youshui river basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 937-944.
- [5] 吴亮君, 陈伟海, 容悦冰, 张晶, 黄超, 朱海燕, 孟庆鑫, 吴继文, 罗劬侃, 白冰, 欧梦梦. 湘西地质公园红色碳酸盐岩石林发育特征与研究价值[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 251-258.
- WU Liangjun, CHEN Weihai, RONG Yuebing, ZHANG Jing, HUANG Chao, ZHU Haiyan, MENG Qingxin, WU Jiwen, LUO Qukan, BAI Bing, OU Mengmeng. Development characteristics and research value of red carbonate stone forest in the Xiangxi geopark[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(2): 251-258.
- [6] 吴亮君, 王璞珺, 叶庆子, 黄超, 全洗强, 韦昊星, 李发源. 湘西奥陶系红色碳酸盐岩碳、氧同位素组成特征及古环境意义[J]. 地质学报, 2023, 97(4): 1245-1261.
- WU Liangjun, WANG Pujun, YE Qingzi, HUANG Chao, QUAN Xiqiang, WEI Haoxing, LI Fayuan. Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions and the palaeoenvironmental significance of Ordovician red carbonate rocks in Xiangxi, Hunan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(4): 1245-1261.
- [7] 杨玉倩. 浙江省江山市莲塘村红色岩溶景观特征及旅游开发研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- YANG Yuqian. Characteristics of red karst landform and tourism development in Liantang village, Jiangshan City, Zhejiang Province[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2022.
- [8] 陈友智, 姜伏伟, 于宁, 苏孝良, 曹晓娟. 湘渝黔红色岩溶地貌形成的地质条件及成因分析[J]. 地球化学, 2023, 52(1): 94-104.
- CHEN Youzhi, JIANG Fuwei, YU Ning, SU Xiaoliang, CAO Xiaojuan. Geological conditions and genesis of red karst landforms in Hunan-Chongqing-Guizhou[J]. *Geochimica*, 2023, 52(1): 94-104.
- [9] Liu Yu, Wang Shijie, Xu Sheng, Derek Fabel, Finlay M Stuart, Ángel Rodés, Zhang Xinbao, Luo Weijun. New chronological constraints on the Plio-Pleistocene uplift of the Guizhou plateau, SE margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, 67: 101237.
- [10] 赵磊, 安亚运, 盘应娟, 杨璐, 刘汉林, 曾禹人, 张德明. 贵安直管区岩溶管道主要发育期次: 来自沉积与构造演化的证据[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(1): 1-11.
- ZHAO Lei, AN Yayun, PAN Yingjuan, YANG Lu, LIU Hanlin, ZENG Yuren, ZHANG Deming. Main development stages of karst pipelines in Gui'an direct territory: Evidence from sedimentary and tectonic evolution[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2024, 14(1): 1-11.
- [11] 张文堂, 李积金, 钱义元, 朱兆玲, 陈楚震, 张守信. 湖北峡东寒武纪及奥陶纪地层[J]. 科学通报, 1957, 5: 145-146.
- [12] 乐森璋. 重庆贵阳间地质要略[J]. 地质汇报, 1928, 11: 39-52.
- [13] 张文堂. 中国的奥陶纪全国地层会议学术报告汇编[M]. 北京: 科学出版社, 1962.

Genesis of topography and regional distribution of the concealed red karst landform in the adjoining area of Hunan–Hubei–Chongqing–Guizhou

JIANG Fuwei^{1,2}, LAI Haiqing³, YANG Qingkun^{3,4}, CHEN Youzhi⁵, YU Ning⁶, YANG Tao⁶

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Genesis and Remediation of Groundwater Pollution, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 4. School of Tourism, Qinghai Minzu University, Xining, Qinghai 810007, China; 5. Southwest Geophysical Company of BGP, CNPC, Chengdu, Sichuan 610213, China; 6. Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract Red karst is a concealed landform that has been newly discovered and is buried beneath soil, characterized by its red color and unique shapes. It is widely distributed in the area of Wuling mountain of Hunan, Hubei, Chongqing and Guizhou in China. Compared with common karst landforms, red karst landforms have four basic characteristics: red color, stratified convex morphology, landform lithology of argillaceous limestone, and different dissolution causes in soil environment. Because of its bright red color and unique appearance, red karst is very ornamental and has great tourism economic value. The morphological origin of red karst has been discussed from the perspective of macroscopic geological conditions and tectonic forces, but its mechanism of microscopic morphological formation and shaping process have not been deeply analyzed. In addition, as a concealed landform, it is difficult to be found on the surface,

so determining its distribution is of great significance for the relevant investigation and research. Therefore, this paper discusses the formation mechanism and shaping process of the concealed red karst landform from the microscopical point of view, and determines the distribution range of the red karst in the adjoining area of Hunan, Hubei, Chongqing and Guizhou. It can provide the basis for the future investigation and development of red karst.

Material composition differences, joint fissure cutting and differential dissolution are the key factors in the formation of red karst geomorphology. The main reasons are as follows: (1) The content of soluble matter on the convex surface of red karst landform gradually increases from top to bottom, while the content of soluble matter on the concave surface is the highest and that on the convex surface is the lowest. This shows that the difference of soluble material content is the material basis for the formation of convex and convex forms of red karst landform. (2) The joint fissure is a good transport channel for water required by dissolution, which can greatly improve the weathering and denudation efficiency of karst geomorphic area and lays a prototype for the evolution of geomorphic form. (3) When the content of soluble components in the parent rock is high, the dissolution rate is fast and concave, and on the contrary, it is convex, which causes differential dissolution. During the formation of red karst landform, the difference of material composition horizontally leads to differential dissolution, and the decrease of erosion vertically leads to differential dissolution. Therefore, the difference of soluble material content in rock composition and the layered rhythmic layer are the material conditions that lead to the diversity of red karst geomorphology, and the dynamic conditions are the cleavage of structural joints and the differential dissolution of rock mass.

The evolution of red karst morphology mainly goes through four basic stages: the formation stage of material conditions for morphological development, the emergence stage of dissolved rock layers, the formation stage of erosive groundwater in weathered soil, and the stage of differential dissolution in soil. The formation of red karst mainly goes through three key geological processes: (1) joint fissure cutting; this effect has mainly shaped the outlines of trapezoids and cylinders. (2) rock and soil interface corrosion; due to the undulating rock surface, the rock and soil interface corrosion makes erosive groundwater with fast dissolution rate accumulate in the low concave of the surface, often forming a conical or sharp rock mass. (3) dissolution of joint fissure surface; vertically, due to the continuous consumption of erosive H^+ ions, both the dissolution ability and dissolution rate decrease, with the increase of depth, forming an approximate V-shaped grike; at the same time, the erosive groundwater dissolves the rock wall on both sides of the joint fissure surface in the transverse direction, and is controlled by the difference of soluble material composition, forming the concave-convex interlayer.

According to the definition of red karst geomorphology and the field investigation by the research team, five factors such as color, morphology, lithology, exposure and geomorphology conditions are selected as the criteria for determining red karst geomorphology. The rock composition of the red karst geomorphology in Hunan, Hubei, Chongqing and Guizhou is more dependent on the stable distribution of purplish red nodular limestone and argillaceous limestone in Dawan Formation, supplemented by the purplish red carbonate rock in Guniutan Formation or the Cross Pu Formation, in which the outcrop area of Dawan Formation is the key development area. According to 1 : 200,000 geological map, the potential distribution area of concealed red karst geomorphology in the adjoining area of Hunan–Hubei–Chongqing–Guizhou covers 3,433.83 km², and it is distributed in a narrow strip or partially distributed in a patch in SW–NE direction.

Key words red karst, differential dissolution, concealed landform landscape, concave-convex interlayer

(编辑 杨杨)