

姜伏伟,董颖,陈友智,等. 酉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.
DOI: 10. 11932/karst20200613

酉水流域贵州段红色岩溶特征及成因

姜伏伟¹, 董颖², 陈友智¹, 于宁¹, 曹晓娟²

(1. 贵州理工学院, 贵阳 550003; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100083)

摘要:在酉水流域贵州段及其周围存在一套特殊的以红色为主、白色为辅、外观形态凹凸有序的独特岩溶地貌。文章将该类地貌命名为“红色岩溶”,并调查了研究区红色岩溶的分布范围、颜色特征、形态特征。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及塑性环境。进一步,总结分析了红色岩溶的成因条件及成因过程。

关键词:红色岩溶; 酉水流域; 凹凸有序; 差异溶蚀

中图分类号:P931.5 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)06-0937-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

通过野外实地调查,在酉水流域贵州段及其周围发现了一套特殊的、以红色为主、白色为辅、外观形态凹凸有序的独特岩溶地貌。有一些学者^[1-3]称其为“红石林”,但曹晓娟等^[4]明确了它与“红石林”的差异,并称其为“红色岩溶景观”,但未给出科学定义。关于这套特殊的岩溶地貌,笔者将其命名为“红色岩溶”。在红色岩溶相关研究方面,曹晓娟等^[4]依据区域地质背景、成景地层结构、岩性组合等,讨论了红色岩溶地貌景观的形成条件、演化模式。除此之外,鲜有其它方面的相关研究。

红色岩溶地貌在岩溶类型中具有独特的唯一性,丰富了岩溶资源多样性,具有较高的科学研究价值,其极具观赏性的形态特征,对促进武陵山国家级贫困区区域旅游产业发展具有巨大的开发潜力及产业经济价值。本文针对酉水流域贵州段的红色岩溶开展成因研究,为后期该类地貌景观资源开发利用提供科学依据。

1 红色岩溶分布区域

1.1 分布位置

根据野外调查,酉水流域贵州段红色岩溶发育于奥陶系大湾组紫红色泥质灰岩,整体被土层覆盖,局部裸露,部分人为剥离表土出露。研究区红色岩溶分布于鄂渝湘黔基地穹庐构造单元西侧,以大湾组为目标层位进行追踪调查,在研究区内红色岩溶出露面积约140 km²(图1)。研究区东部红色岩溶出露面积40.7 km²,主要分布于孟溪镇、九江乡、黄板乡、雅江镇一带及盘石镇,呈北北东、北东向条带状展布。中部红色岩溶零星分布,面积1.6 km²,位于乌罗镇的北东部,呈现北东向条带状分布。西部出露面积97.8 km²,主要分布于合水镇、木黄镇、天堂镇、刀坝乡、永安乡、感溪镇、晓景乡一带,呈北北东、北东向条带状展布。

1.2 区域分布预测

依据大湾组在区域上的分布规律对区域红色岩溶分布进行预测。贵州省大湾组红色岩溶发育较好

基金项目:中国地质调查局项目《全国地质遗迹立典调查与评价》(DD20190074);贵州省自然科学基金项目(黔科合基础[2020]1Z030);贵州理工学院科技专项大地论文工程项目(KJZX20-002)

第一作者简介:姜伏伟(1987-),男,博士,副教授,主要从事岩溶地质工程灾害防治及岩溶景观成因研究。E-mail:jfwei_666@126.com。

收稿日期:2019-12-23

的区域为沿河、印江、石阡、松桃,可能形成红色岩溶的区域为施秉、黄平、凯里^[5]。湖南省大湾组分布于湘北和湘西北岳阳、张家界、古丈、凤凰一线,可能形成红色岩溶的区域为吉首、古丈、张家界、永顺、桑植、龙山一带^[6]。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,可能形成红色岩溶^[7]。重庆地区大湾组主要分布于东部和东南部,仅在渝东南酉阳—秀山一带出现红色岩溶发育的紫红色瘤状灰岩与泥质灰岩^[8]。

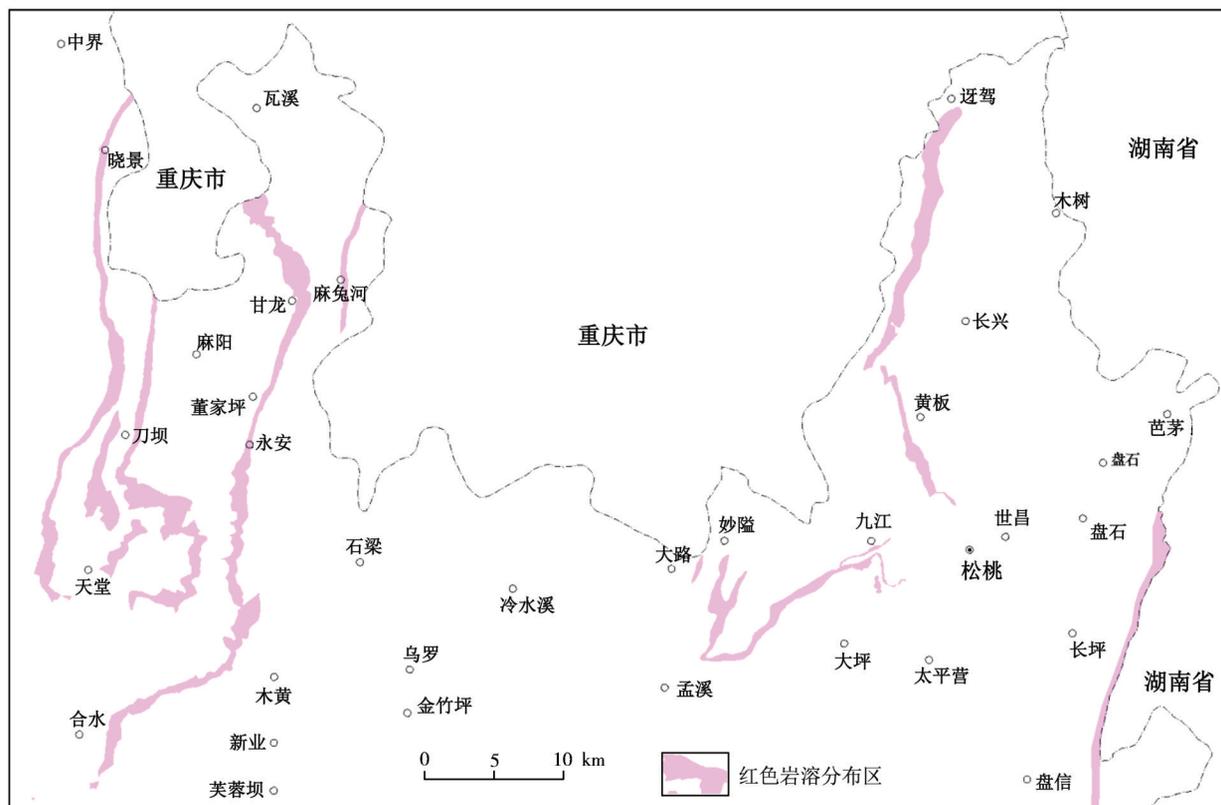


图1 酉水流域贵州段红色岩溶分布图

Fig. 1 Distribution of red karst in Guizhou section of Youshui river basin

2 红色岩溶外观特征

2.1 颜色特征

根据在松桃县磐石镇典型研究点详细调查,红色岩溶总体以红色为主、白色为辅,两者相互嵌入(图2a)。在剖面上,红色岩溶总体上颜色具有明显的分层性。如腊尔山风景区揭露的红色岩溶,从上至下依次呈现为红色—白色—红色—白色—红色五层,其中白色的岩层厚度7~8 m,约占总厚度的20%。

局部来看,红色岩溶颜色上最大特点为红白镶嵌,如白色为主的岩层嵌有红色(图2b)。从嵌入的形态可分为三种:

(1) 红白均匀互层型。红色岩层厚度与白色厚度相同,且一层白一层红相互叠加(图2c),主要分布在红白层岩面过渡区域,一般发育世界级地质遗迹。

(2) 白色条带嵌入型。厚度为1~3 cm的水平白色条带嵌入总体呈现为红色的岩层,白色面积较小,主要分布在厚层状泥质灰岩中(图2d),一般发育国家级地质遗迹。

(3) 白斑状嵌入型。白色出现在一个独立区域、空间展布面积很小,周围被红色包围,主要分布在大湾组底部(图2e),一般发育省区级地质遗迹为主,部分国家级。

2.2 形态特征

根据详细野外调查,红色岩溶形态特征为:凹凸有序、沟壑纵横及怪石林立三个典型特点。

凹凸有序是红色岩溶最大的特点,其形态体现在一层凹一层凸相互叠加。根据野外调查统计,凹层与凸层的厚度基本一致,层厚为30~40 cm,且相邻

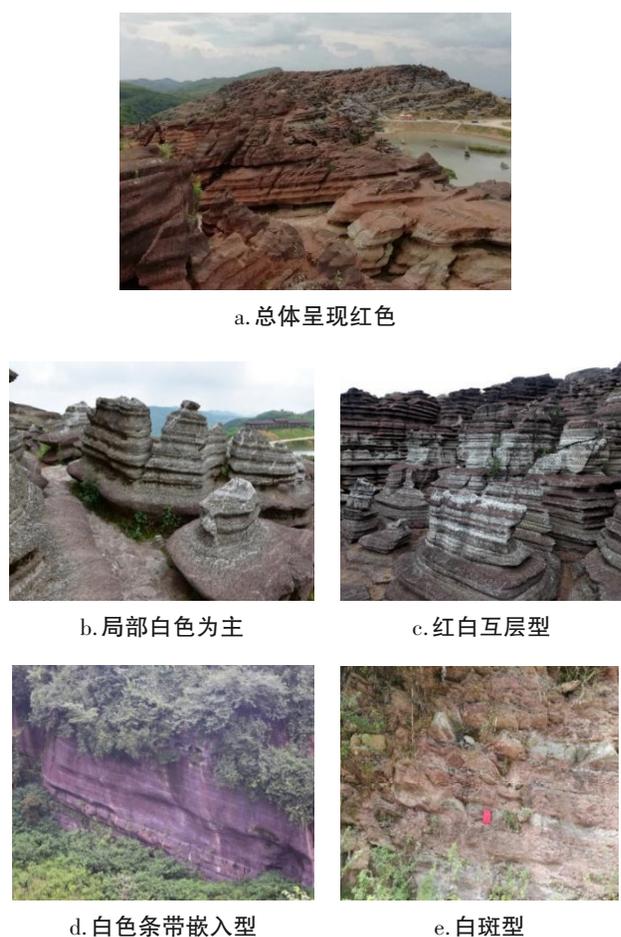


图 2 红色岩溶颜色特征

Fig. 2 Color characteristics of red karst

岩面凹凸程度非常均匀,凹凸以 20~40 cm 为主,局部可达 1~2 m(图 3a)。其中腊尔山红色岩溶可见凹凸层总数 90~100 层,具有强烈的凹凸感,视觉上给人以强烈的冲击震撼,有别于溶洞、峰丛峰林、地下河、天坑、石林等其它岩溶地貌景观。通常形态上具备凹凸有序特点的红色岩溶,其颜色基本上也具有红白互层的特点,这种形态、颜色的强烈反差主要发育于世界级地质遗迹。

沟壑纵横是红色岩溶地层受地质构造运动影响的结果。红色岩溶发育地层被构造活动切割成不同形态的块体,为后期地质营力的改造提供界面。在腊尔山红色岩溶出露区,沟壑密布,深度一般 6~8 m,局部大于 30 m,宽度几十厘米至几米不等(图 3b)。相比其他岩面,沟壑两侧界面凹凸程度高出 10%~20%,且界面相隔很近,凹凸—沟壑组合形成的形态更具有冲击力、震撼力。

怪石林立是红色岩溶另一个重要的特点,是在沟壑切割、岩面凹凸基础上,经过后期地质营力作用



图 3 红色岩溶形态特征

Fig. 3 Morphological characteristics of red karst

的结果。在红色岩溶地层表面分布很多形状不规则的突兀岩石,其形态差异较大,岩面凹凸不平,一般高度 0.5~2.0 m 不等,体积大多小于 1 m³。在腊尔山红色岩溶出露区,各种类型的怪石林立,无规则排列,组成了一道靓丽的风景(图 3c)。

3 红色岩溶成因机理

3.1 地貌作用力

研究区红色岩溶地貌呈凹凸有序的形态特征。一般情况下,岩层凹凸是地表差异风化作用的产物,体现为岩体强度低抗风化能力弱的地层相对凹进,岩体强度高抗风化能力强的地层相对凸起。根据野外实地调查及岩石薄片鉴定,红色岩溶的凸层岩性为泥质灰岩,而凹层岩性为灰岩(图 4)。

从岩体力学强度角度看,灰岩力学强度高于泥质灰岩,前者抗风化能力强,后者较弱。红色岩溶的实际情况是凹层岩体抗风化能力弱,凸层岩体抗风化强。除此之外,红色岩溶具有密集的凹凸有序形态,有别于丹霞地貌、雅丹地貌等常见地貌景观的



图4 凹凸层岩性

Fig. 4 Lithology of concave-convex layer

地表风化凹凸层,说明红色岩溶塑形的动力非地表风化作用,但不能排除其辅助作用。

根据红色岩溶岩层表面的观察,发现其溶蚀现象非常明显(图5)。岩层表面具有蜂窝状结构,紫红色的泥质构成框架结构(图6)。溶蚀洞坑呈现不规则状,一般尺寸1 cm左右,具有很好的连通性。洞坑的连通性说明溶蚀的物质具有相同性。而洞坑内部(即岩面较深位置)可见灰白色物质,现场滴酸冒泡及室内岩石薄片鉴定为碳酸盐岩,这说明洞坑是碳酸盐岩被溶蚀而形成。

根据室内岩矿鉴定结果,凹层岩石组份主要为碳酸盐,凸层岩石组份为泥质和碳酸盐混合物(图7



图5 岩层表面溶蚀现象

Fig. 5 Dissolution of rock surface



图6 岩层表面蜂窝状结构

Fig. 6 Honeycomb structure on rock surface

左)。凸层蜂窝状明显,而凹层较少,说明凹层碳酸盐物质成分溶蚀的较均匀。但凸层暴露新鲜岩面后,可见泥质成分包围着碳酸盐物质(图7下)。由于泥质不能被水溶蚀(地下水或地表水),它阻挡了水对碳酸盐的溶蚀作用。因此,凸层因含较多不溶物质导致溶蚀速度慢,凹层主要为可溶岩导致溶蚀速度快,这种因溶蚀的快慢差异形成了凹凸有序形态特征是差异溶蚀作用的结果。

3.2 地貌形成环境

水与碳酸盐物质溶蚀的发生环境是红色岩溶形成环境。水对碳酸盐的溶蚀能力与水中的 H^+ 溶度(或pH)有关,而自然条件下, H^+ 来源于 CO_2 与 H_2O (溶于水)反应形成,因此,红色岩溶塑形于酸性环境。

为了探究水对碳酸盐的溶蚀是发生在地表还是地下环境,对红色岩溶分布区(松桃县盘石镇当造村腊尔山)地表水体pH、土壤pH及土壤中 CO_2 溶度进行统测。地表水的pH共测13处,测得的pH介于6.36~8.32之间,其中7处为弱碱性,6处为弱酸性(表1),总体接近于中性。因此,地表水中局部具有较弱的酸性环境,对红色岩溶塑形具有一定的作用。

为了探究地下水的酸碱性,对5处不同高程的土壤测试pH,结果为pH介于6.1~6.8之间,总体偏向弱酸性(表2)。进一步对5处5~40 cm不等深度的土壤20处测试 CO_2 浓度,其结果介于0.09%~1.19%之间。而大气中 CO_2 浓度仅为0.03%,可见土壤中 CO_2 浓度最高达到大气中的39.7倍。其主要原因是土壤中微生物代谢作用产生大量的 CO_2 ,如表3中植被杂草等越浓密, CO_2 溶度越高。土壤中高浓度的 CO_2 为地下水中 H^+ 来源提供保障,这说明土壤中地下水呈



图 7 凹凸层物质成份

Fig. 7 Material composition of concave-convex rock layer

酸性。因此,红色岩溶的塑形环境为土壤覆盖的地下,地下水是溶蚀作用H⁺的主要来源。

根据地表水和土壤中酸碱度的对比,说明红色岩溶的塑形环境主要为土层覆盖。

3.3 形成条件

3.3.1 地形地貌

根据野外调查,在宏观地貌类型上,红色岩溶主要分布在岩溶峰丛谷地中。依据微地貌划分,红色岩溶出露于峰顶、斜坡及沟谷(现在地貌位置)。可见,红色岩溶并不是某种特殊的地貌位置产物。但

表 1 地表水体 pH

Table 1 pH value of surface water

点号	经纬坐标	高程/ m	pH 测试值				平均 值	酸碱性
P1	109°20'18.40" 28°10'31.47"	981	7.40	7.36	7.33	7.36	弱碱性	
P2	109°20'17.57" 28°10'31.00"	995	7.42	7.46	7.40	7.43	弱碱性	
P3	109°20'14.30" 28°10'27.79"	1 004	7.36	7.30	7.24	7.30	弱碱性	
P4	109°20'06.28" 28°10'23.53"	1 018	6.78	6.15	6.16	6.36	弱酸性	
P5	109°20'12.50" 28°10'15.55"	974	7.11	7.16	7.15	7.14	弱碱性	
P6	109°20'17.84" 28°10'15.09"	968	8.28	8.30	8.33	8.30	弱碱性	
P7	109°20'17.96" 28°10'15.99"	967	7.34	7.22	7.28	7.28	弱碱性	
P8	109°20'14.53" 28°10'18.02"	974	6.07	6.02	6.23	6.11	弱酸性	
P9	109°20'19.40" 28°10'30.25"	990	6.68	6.63	6.63	6.65	弱酸性	
P10	109°20'15.80" 28°10'31.70"	999	6.81	6.72	6.56	6.70	弱酸性	
P11	109°20'10.57" 28°10'32.09"	985	6.85	6.87	6.88	6.87	弱酸性	
P12	109°20'07.75" 28°10'30.55"	994	6.56	6.52	6.50	6.53	弱酸性	
P13	109°20'17.25" 28°10'22.76"	988	8.38	8.43	8.45	8.42	弱碱性	

是特殊地貌位置影响了红色岩溶形态发育的程度,这是由于所处位置决定岩层暴露的程度。若岩层面暴露程度越多,它与地下水或地表水的接触面积越大。这种情况下,它们之间发生溶蚀作用的范围及程度越大,所形成的岩层凹凸程度及面积越大。

3.3.2 地层岩性

(1)元素组成。为了分析西水流域红色岩溶物质组成、形成的沉积和构造背景,更好地解析红色岩溶景观形成过程,选取松桃县腊尔山红色岩溶典型发育区凹凸层,取 8 组岩石样品进行微量元素测试。

红色岩溶的颜色与物质组成元素相关。除 Ca、Mg 外,腊尔山碳酸盐岩中 Fe、Ti、Mn 元素含量较多(表 3),导致岩石显现红色的元素主要是 Fe 元素,并

表2 土壤pH、CO₂浓度
Table 2 pH values and CO₂ concentration of soil

序号	经纬坐标	高程/m	pH值	酸碱性	深度/cm	CO ₂ 浓度/%	备注
T ₁	109°20'19.08" 28°10'40.86"	1 024	6.5	弱酸性	T ₁₋₁₀	0.10	杂草较多
					T ₁₋₂₀	0.09	
					T ₁₋₁₅	0.11	
					T ₁₋₂₅	0.28	
T ₂	109°20'20.22" 28°10'34.77"	1 039	6.8	弱酸性	T ₂₋₅	0.06	少量杂草
					T ₂₋₁₀	0.07	
					T ₂₋₁₄	0.085	
					T ₂₋₁₅	0.085	
T ₃	109°20'19.78" 28°10'28.37"	1 004	6.1	弱酸性	T ₃₋₁₀	0.56	杂草茂盛
					T ₃₋₂₀	0.91	
					T ₃₋₃₀	1.1	
					T ₃₋₄₄	1.19	
T ₄	109°20'08.94" 28°10'21.08"	1 041	6.7	弱酸性	T ₄₋₅	0.04	无草
					T ₄₋₁₀	0.098	
					T ₄₋₁₅	0.06	
					T ₄₋₁₇	0.075	
T ₅	109°20'24.25" 28°10'0.71"	942	6.4	弱酸性	T ₅₋₁₀	0.23	杂草茂盛
					T ₅₋₁₅	0.23	
					T ₅₋₂₀	0.25	
					T ₅₋₃₀	0.299	

表3 岩石主要元素含量
Table 3 Contents of main elements in rocks

样品 编号	元素含量×10 ⁻⁶						备注
	Ca	Mg	Fe	Ti	Mn	Sr	
1-a ₁	321 000	4 260	5 413	1 127	661	239	凹层
1-T ₂	219 000	7 850	16 222	2 250	433	206	凸层
2-a ₁	421 000	4 910	4 845	865	703	302	凹层
3-a ₁	331 000	5 750	9 404	1 501	709	281	凹层
3-T ₁	174 000	8 850	24 384	2 849	669	177	凸层
4-a ₁	319 000	6 490	16 588	2 336	811	277	凹层
5-a ₁	248 000	7 850	10 513	1 367	1 005	226	凹层
5-T ₁	234 000	9 000	18 531	2 191	895	240	凸层

以赤铁矿的形式进入沉积岩,成为颜色的主要来源(图8)。

(2)灰岩—泥质灰岩互层结构。据贵州松桃县实地调查,红色岩溶成景的核心要素是岩层的凹凸有序(图9)。凹层和凸层的岩性存在差异性,一般凹层是纯碳酸盐岩,呈现灰白色,而凸层为泥质灰岩,呈现深红、暗红色。在沉积环境中,静水环境形成纯碳酸盐岩,而流水扰动静水环境且带来泥质往往形成泥质灰岩。泥质灰岩形成过程中受控于流水动力



图8 红色碳酸盐岩(泥质灰岩)

Fig. 8 Red carbonate (argillaceous limestone)

的大小及物源物质的远近,这种由沉积相控制的灰岩—泥质灰岩互层结构是本区域成景的重要要素。

3.3.3 侵蚀性地下水

由于红色岩溶形态是溶蚀作用的结果,而含有较多H⁺的侵蚀性地下水是溶蚀作用的动力来源。一般情况下,侵蚀性地下水在节理裂隙等界面上较富集,因此在界面上溶蚀形成的凹凸程度往往很强(图10)。地下水溶解CO₂的量决定了它的侵蚀性。通常



图9 灰岩—泥质灰岩互层

Fig. 9 Interbeds of limestone and argillaceous limestone

在植被(杂草)茂盛的区域,土壤中微生物含量多,其代谢作用产生的 CO_2 较多,因此杂草生长的区域 CO_2 溶度大于无草区域(表4)。



图10 地下水溶蚀成沟

Fig. 10 Ditches dissolved by groundwater

3.3.4 土层覆盖

覆盖土层是侵蚀性地下水与碳酸盐发生溶蚀作用的场所,为红色岩溶提供发育环境。相比于地表环境,由于微生物代谢作用,土层中具有高浓度的 CO_2 (表3),易形成侵蚀性地下水,这为土下溶蚀作用提供了源源不断的动力。其次,土体具有保水性,长时间储存的孔隙水具有侵蚀性,保障了溶蚀作用的长期性。因此,从动力来源和作用时间判断,覆盖土层更有利于红色岩溶发育。另外,从力学角度来看,

泥质灰岩(凸层)力学强度低于灰岩(凹层),这说明前者抗物理风化能力低于后者,而土层覆盖延缓了红色岩溶受地表物理风化作用的剥蚀,保护了红色岩溶发育的物质条件。因此,土层覆盖是差异溶蚀形成红色岩溶独特形态的重要条件。但土壤中侵蚀性地下水加速了红色岩溶的溶解。如果红色岩溶在地表受物理风化剥蚀的速度低于溶解速度,这种情况下可能剥离覆盖土层有利于红色岩溶的保护。

3.3.5 节理裂隙

节理裂隙对红色岩溶发育具有两个基本的作用。一是节理裂隙将岩体切割成形态各异的块体,塑造了红色岩溶的粗略形态。二是节理裂隙是地下水渗入的通道,地下水沿着节理裂隙面渗入过程中,对对壁灰岩、泥质灰岩进行差异溶蚀,进而发育千奇百怪的形态特征。在贵州松桃腊尔山红色岩溶发育区,测得走向分别为 20° 、 70° 、 110° 和 150° 四组陡立的平行节理。在这些节理裂隙切割及地下水溶蚀作用下,该区红色岩溶发育形态具有方柱形、圆柱形、锥形、三角形、锋刃形等形态特征。

3.4 形成过程

根据野外调查,总结出红色岩溶的形成过程见图11。红色岩溶形成的物质基础为红白互层的灰岩—泥质灰岩。其中,灰白色灰岩常形成于浅海静水环境,而泥质灰岩常形成于扰动的含泥质浑水环境中。受地质构造作用,地壳抬升使得处于浅海的灰岩—泥质灰岩出露于地表。在地表风化作用下,灰岩—泥质灰岩及其上覆地层不断地被剥蚀,生成的土体残积于原地(残积土),覆盖在母岩上。这些覆盖的残积土阻挡了地表风化对母岩的剥蚀作用。另外,土壤中微生物作用产生的高浓度 CO_2 溶于地下水中,生成的碳酸(侵蚀性地下水)对碳酸盐具有溶蚀作用。侵蚀性地下水对碳酸盐岩的溶蚀速度具有促进作用,溶蚀速度与碳酸盐含量有关,灰岩中碳酸盐含量高,溶蚀速度快,而泥质灰岩中碳酸盐含量低,且泥质阻隔了侵蚀性地下水与碳酸盐的溶蚀反应,导致泥质灰岩的溶蚀速度慢。这种土下溶蚀速度差异性,导致溶蚀快的沉积地层凹进,溶蚀慢的沉积地层凸出,形成具有凹凸有序的红色岩溶。

4 结论

(1)经实地调查,在西水流域贵州段发现红色岩溶分布面积 140 km^2 。在外观形态上,红色岩溶具有

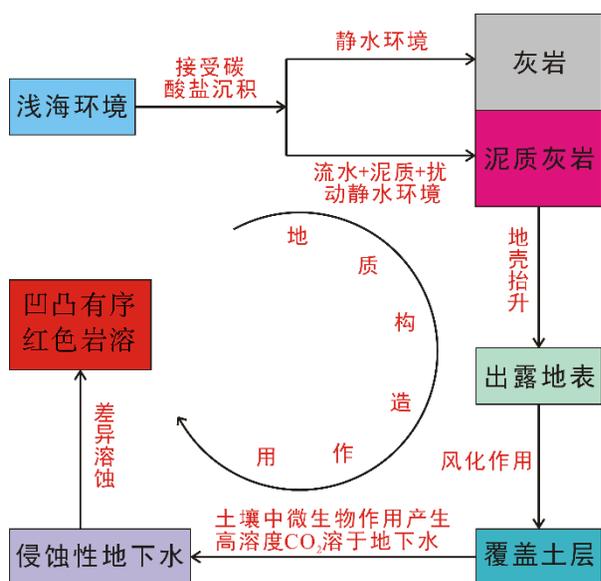


图 11 红色岩溶形成过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram of red karst formation

红色为主、白色为辅的颜色特点,及凹凸有序、沟壑纵横、怪石林立三种典型的形态特点;

(2)通过地表水体 pH、土壤 pH 和 CO_2 溶度测试及岩石薄片鉴定,红色岩溶的塑形作用力为差异溶蚀,塑性环境为土层覆盖;

(3)红色岩溶的形成条件为具有母岩出露面的地形地貌、紫红色泥质灰岩夹灰白色灰岩的岩性、存

在溶蚀作用的侵蚀性地下水以及提供溶蚀作用发育场所的覆盖土层和提供地下水渗透的节理裂隙;

(4)红色岩溶的形成过程为:浅海环境→形成灰岩—泥质灰岩→出露地表接受风化作用→风化土体残积原处形成覆盖土层→土壤中高溶度 CO_2 溶于地下水形成侵蚀性地下水→灰岩—泥质灰岩受差异溶蚀作用形成凹凸有序的红色岩溶。

参考文献

- [1] 陈建平,马文瀚.湖南古丈红石林地质遗迹形成条件及发育过程初探[J].地质灾害与环境保护,2006,17(3):83-86.
- [2] 王榛琪.古丈县红石林成因及地学价值分析[J].国土资源导刊,2014(10):100-103.
- [3] 朱怡欢,刘江龙,吴湘滨,等.湖南古丈红石林地质旅游资源发育特征分析[J].旅游纵览,2017(10):52-53.
- [4] 曹晓娟,姜伏伟,陈友智,等.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,http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20191105.0929.002.html. (in press)
- [5] 贵州省地质调查院.中国区域地质志贵州志[M].北京:地质出版社,2016.
- [6] 湖南省地质调查院.中国区域地质志湖南志[M].北京:地质出版社,2017.
- [7] 湖北省地质矿产局.湖北省区域地质志[M].北京:地质出版社,1990.
- [8] 四川省地质矿产局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.

Characteristics and genesis of red karst in Guizhou section of Youshui river basin

JIANG Fuwei¹, DONG Ying², CHEN Youzhi¹, YU Ning¹, CAO Xiaojuan²

(1. Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China; 2. China Geological Environment Monitoring Institute, Beijing 100083, China)

Abstract A special set of karst landforms is present in and around the Guizhou section of the Youshui river basin. Its color is mainly red, followed white, with shape of concave-convex. This article names this type of landforms "red karst" and examines the distribution, color characteristics, and morphological features of red karst in this area. The forming force and environment of red karst are analyzed by testing the surface water pH, and CO_2 content in soils and identifying rock flakes. Furthermore, the generation conditions and processes of red karst are summarized and analyzed in the paper.

Key words red karst, Youshui river basin, concave-convex shape, differential dissolution

(编辑 张玲)