

引用格式: 代彬, 彭韬, 张信宝, 莫小妹, 王世杰. 高原型喀斯特主要丘陵类型、形成机制与贵州喀斯特地貌分区刍议[J]. 山地学报, 2023, 41(2): 155-168.

DAI Bin, PENG Tao, ZHANG Xinbao, MO Xiaomei, WANG Shijie. Major types and formation mechanism of karst hill in plateau and discussion on karst landform zoning in Guizhou, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 155-168.

高原型喀斯特主要丘陵类型、形成机制与 贵州喀斯特地貌分区刍议

代彬^{1, 2, 3}, 彭韬^{1, 3*}, 张信宝^{1, 3, 4}, 莫小妹^{1, 2, 3}, 王世杰^{1, 3}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 贵州普定喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 贵州 普定 562100;

4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地环境演变与调控重点实验室, 成都 610041)

摘要: 喀斯特地貌类型和分区受气候、构造、地质背景等多种因素影响, 仅以峰林、峰丛等形态组合为基础的地貌分区, 难以完全反映贵州复杂的喀斯特地貌。以往的分区工作忽略了除典型锥峰、塔峰外大量分布的“馒头山”丘陵(穹丘)的重要性, 其形态特征、空间分布以及形成演化机制等尚不清楚。本文根据贵州喀斯特地貌野外考察结果, 结合室内资料综合分析, 探讨了贵州不同喀斯特丘陵类型的空间分布规律、形成机制以及与气候、地质(岩性和岩相)等环境背景的内在联系, 并结合已有石漠化分区方案, 初步提出贵州高原喀斯特地貌分区方案。主要认识如下: (1) 锥峰、塔峰、穹丘喀斯特丘陵和常态山非喀斯特丘陵是贵州高原主要的四种丘陵类型。(2) 锥峰、塔峰的形成受表层岩溶带溶蚀机制控制, 穹丘坡地形态与土壤蠕移有关。(3) 贵州除非喀斯特区外, 喀斯特区分为锥峰、塔峰喀斯特地貌区, 穹丘喀斯特地貌区和喀斯特峡谷地貌区三个大区。(4) 锥峰、塔峰喀斯特地貌区包含黔中西北部亚热带浅碟型峰丛(锥峰)洼地区和黔南亚热带漏斗型峰丛(锥峰、塔峰)洼地区两个亚区。(5) 穹丘喀斯特地貌区包含黔东北中亚热带褶皱构造穹丘槽谷区, 黔北中亚热带不纯碳酸盐岩穹丘洼地区, 黔西北暖温带穹丘洼地、盆地区, 黔西南季风常态山、穹丘洼地、盆地区, 黔中东部亚热带不纯碳酸盐岩穹丘-常态山洼地区五个亚区。(6) 喀斯特峡谷地貌区为北盘江深切峡谷多丘陵形态立体分布区。本研究可为喀斯特地区生态建设、区域经济社会高质量发展可持续发展等提供科学依据。

关键词: 高原型喀斯特; 地貌类型; 穹丘; 分区; 贵州

中图分类号: P931.5

文献标志码: A

贵州地处中国南方喀斯特核心区, 喀斯特地貌发育、类型丰富, 碳酸盐岩集中连片出露, 约占全省

国土面积的 61.9%^[1]。中国南方喀斯特地貌的相关研究^[2-11]已在术语定义、地貌类型划分、微观岩

收稿日期(Received date): 2022-10-21; 改回日期(Accepted date): 2023-03-03

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42261144672, 42077317, 42230509); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40020201); 贵州省科技厅基础研究重点项目(黔科合基础-ZK[2022]重点048); 贵州省补助资金(GZ2020SIG); 中国科学院科技服务网络计划(STS)(KFJ-ST-S-QYZD-2021-24-001)。[National Natural Science Foundation of China(42261144672, 42077317, 42230509); Strategic Priority Research Program(B), Chinese Academy of Sciences(XDB40020201); Key Program of Basic Research, Science and Technology Department of Guizhou Province(Basic Research of Science and Technology in Guizhou-ZK[2022]Key 048); Guizhou Provincial 2020 Science and Technology Subsidies(GZ2020SIG); Science and Technology Service Network Initiative(STS)(KFJ-ST-S-QYZD-2021-24-001)]

作者简介(Biography): 代彬(1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 喀斯特地貌。[DAI Bin(1995-) male, Ph.D. candidate, research on karst geomorphology] E-mail: daibin@mail.gyig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 彭韬(1984-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 喀斯特生态环境。[PENG Tao(1984-) male, Ph.D., professor, research on karst ecosystem] E-mail: pengtao@mail.gyig.ac.cn

溶形态等方面进行了较为详尽的论述,例如:在宏观地貌上,根据气候带将中国的喀斯特地貌分为热带喀斯特、温带喀斯特和寒带喀斯特等类型^[6];在微观上,系统描述了地表、地下喀斯特类型及特征^[6, 11-13]。随着《岩溶学概论》《岩溶学词典》等专著的相继出版,如溶痕、石牙、落水洞、峰林、峰丛等典型喀斯特地貌类型的术语已经被广泛使用^[10],同时也引发了峰林、峰丛与锥峰、塔峰形成及演化机制的热烈讨论。受 Davis^[14]地貌旋回理论的影响,普遍认为喀斯特地貌演化存在峰丛(幼年期)—峰林(壮年期)—孤峰(老年期)的演化序列,分别对应贵州高原至广西盆地喀斯特地貌的发育阶段^[12]。然而有研究表明^[15-17],峰林和峰丛是同一时期不同水文地质环境下形成的喀斯特地貌,大多数峰林并不是由峰丛演化而来,峰林的形成主要与外源水作用有关。表层喀斯特带径流溶蚀动力学机制,可解释贵州高原至广西盆地的喀斯特地貌的区域差异,区域喀斯特地貌形态的差异(如锥峰、塔峰)主要受气候因素的控制^[17-18]。此外,有研究系统论述了峰林、峰丛、锥峰、塔峰喀斯特的形态特征、形成条件以及空间分布等^[4, 10],并指出锥状和塔状喀斯特分别对应峰丛和峰林。锥峰、塔峰地貌的形成主要受表层岩溶带顺坡径流溶蚀机制的控制^[18],而锥峰向塔峰的转化主要与潜流基面浅埋和强大的地表水流相结合有关^[19]。

以喀斯特地貌类型、空间分布等为基础的区划研究也逐步展开^[1, 16-17, 20-23]。2005年,以生态系统角度出发的西南岩溶生态区被首次提出,它将西南岩溶区分为构造隆起带岩溶生态区、湘桂沉降带岩溶生态区、四川盆地岩溶生态区、滇东断陷盆地及周边山地岩溶生态区、川西北中高山岩溶生态区五大岩溶生态区^[16, 20]。2008年,《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》将西南岩溶区划分为中高山、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、岩溶槽谷、溶丘洼地、峰丛洼地、峰林平原八个石漠化综合治理区^[16-17, 23]。相比岩溶生态区,石漠化治理分区注重体现喀斯特地貌形态的空间差异,出现了峰丛洼地、峰林平原等喀斯特地貌组合,然而石漠化治理分区并未认识到气候对喀斯特地貌有重要影响。根据喀斯特地貌空间分布与气候、地质、地貌等环境背景的关系,学者们将中国南方喀斯特划分为热带喀斯特地貌区和非热带喀斯特地貌区^[16-17],又基于喀斯特地貌形态组合,将热带喀斯特地貌类型区分为黔中

高原浅碟型峰丛洼地、黔—桂斜坡带漏斗型峰丛洼地和广西峰林平原三个亚区,分别对应原石漠化治理分区中的岩溶高原区、峰丛洼地区和峰林平原区^[16]。此外,有研究根据地质背景、气候分异、喀斯特地貌特征等,将原有石漠化治理分区中的峰丛洼地区进一步分为滇东南桂西南西南季风非典型峰丛洼地区、黔西南高原面浅碟型锥峰洼地区、黔南桂北大斜坡北部漏斗型锥峰洼地区、桂中大斜坡南部漏斗型锥塔峰洼地区和桂南丘陵浅碟型锥塔峰洼谷区^[22]。可见,喀斯特地貌类型和分区受到气候、构造、地质背景的显著影响,各分区方案的喀斯特主要地貌和类型组合存在较大差异。

贵州是中国唯一拥有喀斯特高原区的省份。为查明贵州喀斯特丘陵类型及贵州高原型喀斯特地貌类型分布特征,2021年10月,笔者完成了贵州喀斯特高原地貌野外考察(图1)。考察结果表明,以往研究中以峰林、峰丛等形态组合为基础的地貌分区,难以完全反映贵州复杂的喀斯特地貌,尤其是高原型喀斯特为代表的地貌类型和喀斯特地貌空间分布特点。根据野外考察结果,并结合岩性与喀斯特丘陵的空间分布特征,发现贵州喀斯特高原除了非碳酸盐岩地层组成的常态山丘陵外,碳酸盐岩地层组成的丘陵中既有锥峰、塔峰等典型热带喀斯特丘陵,同时也大量分布有穹丘(“馒头山”)等非热带喀斯特丘陵。而以往的分区工作忽略了除典型锥峰、塔峰外大量分布的“馒头山”丘陵(穹丘)的重要性,这部分丘陵的形态特征、空间分布以及形成演化机制等尚不清楚。

本文将在阐明贵州喀斯特高原主要丘陵类型的形态特征、空间分布的基础上,分析几类主要丘陵地貌的特征及形成机制,探讨不同喀斯特丘陵类型的空间分布规律及与气候、地质(岩性和岩相)等环境背景的内在联系,结合已有石漠化分区方案,初步提出贵州高原喀斯特地貌分区方案,以为喀斯特地区生态建设、区域经济社会高质量可持续发展等提供科学依据。

1 贵州四种主要丘陵形态

锥峰、塔峰、穹丘(“馒头山”)、常态山是贵州四种主要的丘陵类型,前三种为碳酸盐岩地层组成的喀斯特丘陵,常态山则是由碎屑岩等非碳酸盐岩地

层组成的非喀斯特丘陵。

锥峰和塔峰被称为热带喀斯特地貌,广泛分布在世界上中低纬度的热带、亚热带地区^[18]。在中国主要分布于西南喀斯特地区的岩溶高原区、峰丛洼地区

和石灰岩锥峰相比,白云岩锥峰顶部浑圆。锥峰由纯质、厚层、产状基本水平的碳酸盐岩组成(图2),表层岩溶带与下伏完整岩层裂隙均非常发育,但表层岩溶带裂隙发育程度较高。典型锥峰坡地整体平顺,主体坡度在37°左右,坡麓较缓,坡面冲沟不发育,溶沟、溶槽等发育。土壤多为石灰土,坡地上部

(1)锥峰:形如金字塔、圆锥状,峰顶多棱角。

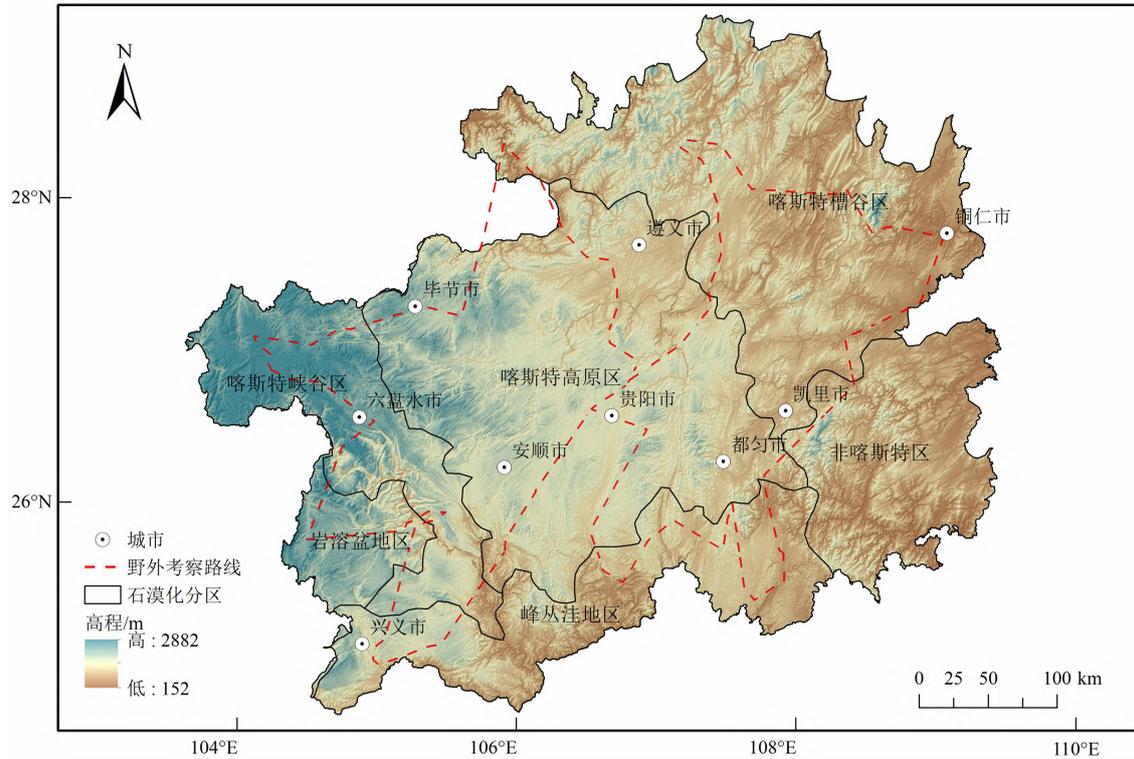


图1 贵州喀斯特高原地貌野外考察路线

Fig. 1 Field investigation routes of karst plateau landscape in Guizhou, China

注:2021年10月9日—10月14日,自贵阳向北出发,先后途经遵义、习水、大方、威宁、盘县、兴义、安龙等地;
2021年10月17日—10月20日,自贵阳出发,先后途经瓮安、湄潭、铜仁、凯里、荔波、罗甸、惠水等地。

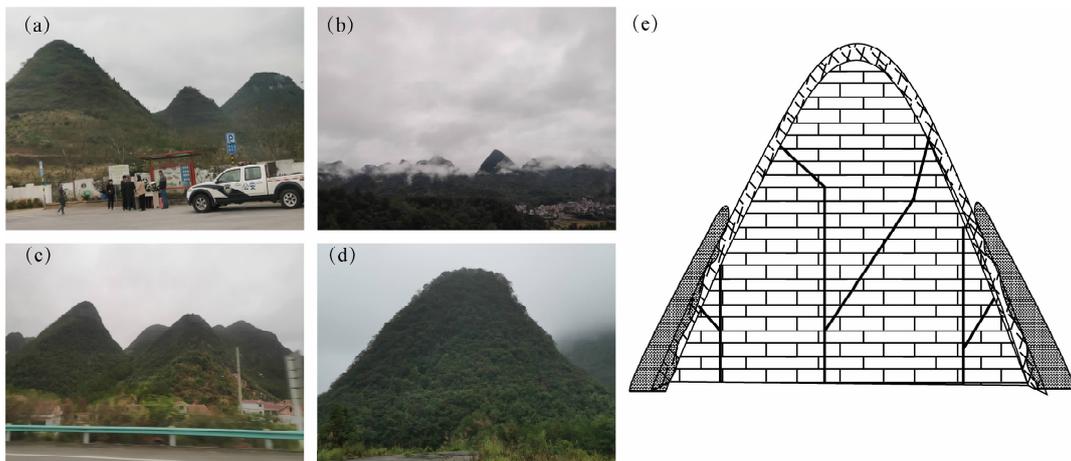


图2 锥峰形态:(a)~(d)为照片;(e)为示意图(据文献[18]修改)

Fig. 2 The shape of cone karst: (a)~(d) photos; (e) sketch (referred to reference[18])

注:(a)拍摄于田坝服务区(109°2'29"E,27°24'9"N);(b)拍摄于荔波服务区(107°57'16"E,25°28'48"N);

(c)拍摄于银百高速服务区(106°34'34"E,25°46'28"N);(d)拍摄于小七孔(107°43'33"E,25°20'7"N)。

土壤多含角砾,顺坡向下角砾含量逐渐减少,坡麓土壤常渐变为黄土。锥峰主要集中分布于黔中岩溶高原区、黔南峰丛洼地地区。黔中地区地形起伏小,多数锥峰高度小于200 m;黔南地区地形起伏大,多数锥峰高度大于200 m^[17]。

(2)塔峰:同样由纯质、厚层、产状基本水平的碳酸盐组成。上部为陡立塔柱,下部为塔裙(图3)。塔柱顶部为浑圆或平顶状,坡度多数大于60°(图3)。塔柱内部裂隙发育,但表层岩溶带不发育;塔裙表面常分布有塔柱崩塌的角砾堆积,坡地岩土结构、裂隙、土壤等发育情况同锥峰类似。塔峰在黔中高原区零星发育,黔南峰丛洼地地区至广西盆地内,塔峰逐渐增多。黔中塔峰高度多数小于200 m,而黔南向广西盆地过渡的斜坡地带内的塔峰高度多数大于200 m^[17]。

(3)穹丘(“馒头山”):由不纯的或产状倾斜的碳酸盐岩组成的喀斯特丘陵,形如馒头状、穹隆状。不同于锥峰、塔峰,穹丘顶部浑圆,坡地形态呈上凸形,

坡度小于37°(图4)。穹丘表层岩溶带和岩层内的垂向、横向和斜向裂隙很发育,坡面流水侵蚀地貌(如冲沟)不发育。坡地土壤为非地带性的石灰土,植被较锥峰、塔峰丰富(图4)。非石漠化穹丘坡地原始土壤为地带性土壤(黄壤、红壤),保存较好。石漠化穹丘坡地的土壤存在不同程度的流失,一些石漠化坡地,原始土壤流失殆尽。穹丘整体高度不高,多数小于200 m,主要集中分布于黔北、黔西北、黔东北等地。

(4)常态山:由碎屑岩(如砂岩、页岩等)等非碳酸盐岩组成,形态与喀斯特穹丘相近。不同之处在于:穹丘地下流失严重,坡地地表径流系数低^[24-26],坡面冲沟不发育;常态山不存在地下流失,坡地地表径流系数高,冲沟大量发育(图5)。

2 贵州高原喀斯特丘陵形成机制

喀斯特丘陵的表层岩溶带顺坡径流溶蚀机

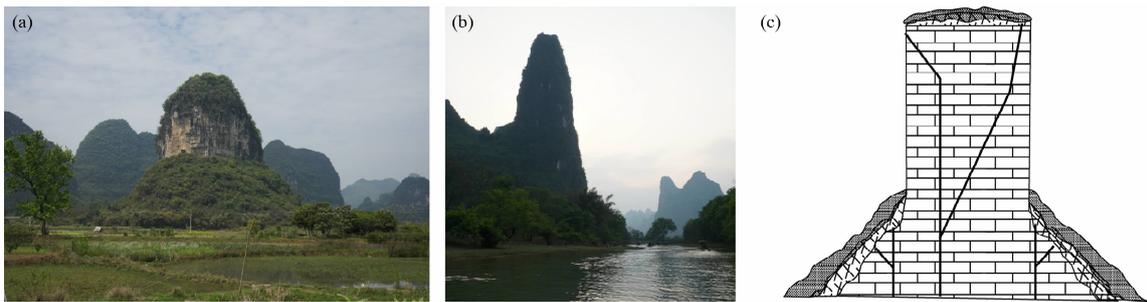


图3 塔峰形态:(a)、(b)为照片;(c)为示意图(据文献[18]修改)

Fig. 3 The shapes of tower karst: (a), (b) photos; (c) sketch (referred to reference[18])

注:(a)拍摄于小漓江(110°26'6"E,24°46'36"N);(b)拍摄于大漓江(110°27'17"E,24°59'34"N)。

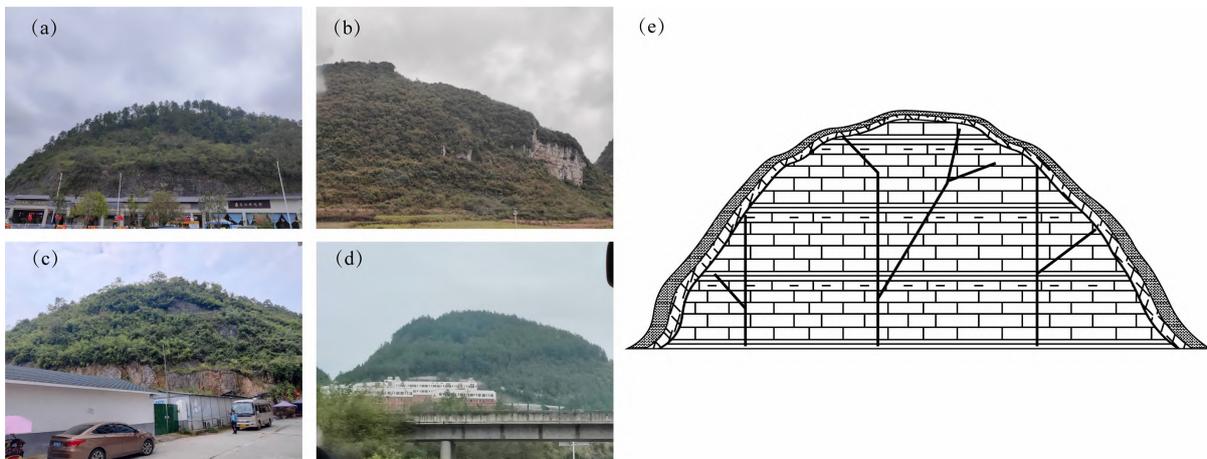


图4 穹丘形态:(a)~(d)为照片;(e)为示意图(据文献[18]修改)

Fig. 4 The shapes of dome karst: (a)~(d) photos; (e) sketch (referred to reference[18])

注:(a)拍摄于乌江服务区(106°45'47"E,27°16'25"N);(b)拍摄于瓮安县(107°13'46"E,27°2'38"N);

(c)拍摄于万山区(109°10'1"E,27°41'30"N);(d)拍摄于凤冈县(107°46'25"E,28°0'38"N)。

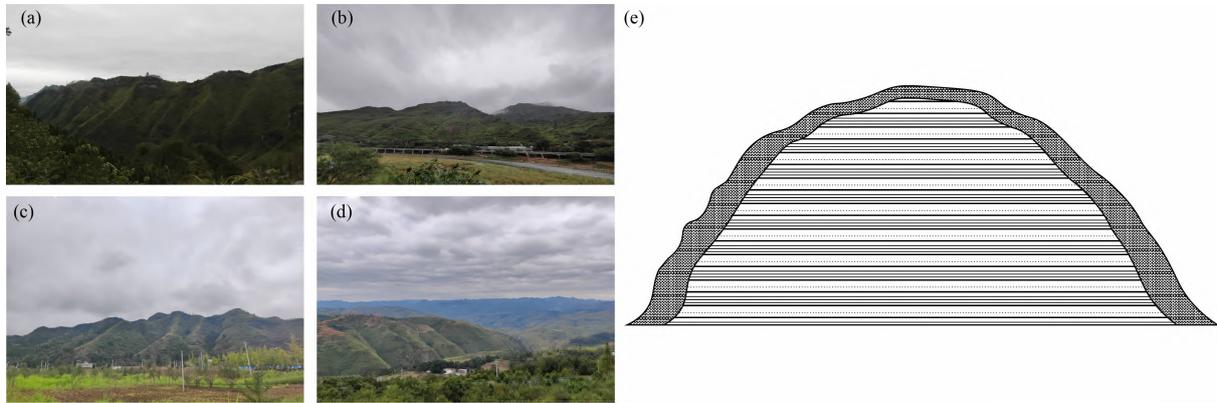


图5 常态山形态:(a)~(d)为照片;(e)为示意图(据文献[18]修改)

Fig. 5 The shapes of normal hill: (a)~(d) photos; (e) sketch(referred to reference[18])

注:(a)拍摄于晴隆县(106°45'47"E,27°16'25"N);(b)拍摄于土城(107°13'46"E,28°17'8"N);

(c)拍摄于中山区(104°38'37"E,26°45'49"N);(d)拍摄于新铺镇(105°25'0"E,25°53'6"N)。

制^[18],能解释锥峰、塔峰等热带喀斯特丘陵坡地的形成。喀斯特坡地漏失强烈,地表径流有限,表层岩溶带径流量和溶蚀量大,坡地近地表岩层的溶蚀主要受表层岩溶带径流的控制。热带、亚热带气候条件下,锥峰、塔峰表层岩溶带的溶蚀速率及顺坡径流量随坡长增加而增加。随时间推移,坡地下部被溶蚀岩层厚度逐渐厚于坡地上部,坡地变得越来越陡。坡地破碎岩层和风化松散岩屑边坡的稳定性受控于 37° 休止角。坡度大于 37° 的坡地稳定性差,不易维持^[18],因此锥峰主体坡度普遍在 37° 左右。塔峰的形成与高溶蚀速率和高强度岩层有关。高溶蚀速率导致坡地下部岩层破碎,坡地上部完整岩层易崩塌形成高陡塔柱,故塔柱坡度多大于 60° 。高强度岩层利于维持塔柱的稳定。塔柱崩塌的角砾,易堆积形成塔裙,塔群坡度同样受控于休止角,普遍在 37° 左右。热带、亚热带气候+产状水平的厚层纯碳酸盐岩+稳定的地形发育期是锥峰、塔峰地貌形成的必要条件。

同非碳酸盐岩丘陵常态山类似,穹丘(“馒头山”)坡地形态是土壤蠕动(soil creeping)的产物^[27-28]。该机制可以较好地解释穹丘的形成(图6):由于环境变化(冻融、干湿、冷热、动物扰动等)坡地土壤颗粒会上、下运动,向上运动时垂直坡面法线向上,向下运动时沿重力线方向垂直向下。土壤颗粒上、下运动后落点不重合,发生蠕移^[29]。坡地土壤颗粒长期不断向下蠕移,逐渐形成上凸形坡面形态的穹隆状丘陵(“馒头山”)。碳酸盐岩和非碳酸盐岩穹隆状丘陵坡地的形成机制相同,均为土壤

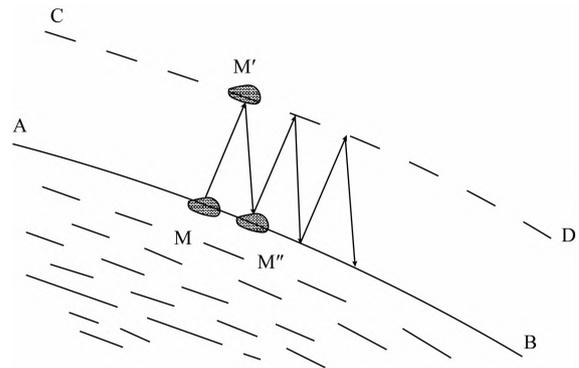


图6 土壤蠕动形成凸形坡的物理过程(据文献[29]修改)

Fig. 6 Physical process about soil creep forming convex slope (referred to reference [29])

长期蠕动的结果,但后者因地下裂隙不发育,地表径流系数高^[30],坡地中下部冲沟广泛发育;前者地下流失严重,地表径流系数低^[24-26],坡面冲沟不发育。由于岩性、产状等的差异,锥峰、塔峰和穹丘共存于同一地区的现象并不罕见,如黔中高原面和桂林地区等。

3 三种喀斯特丘陵的空间分布及主要受控因素

3.1 锥峰、塔峰、穹丘的空间分布

锥峰、塔峰是贵州典型热带喀斯特丘陵的代表,集中连片分布于黔中喀斯特高原,黔南喀斯特高原向广西盆地过渡的斜坡地带。黔中喀斯特高原地区地形起伏较小,地势相对平缓,发育浅碟型峰丛洼地地貌,锥峰、塔峰的高度普遍小于 200 m ^[17];贵州喀斯特高原向广西盆地过渡的斜坡地带地形起伏大,

地势陡,发育漏斗型峰丛洼地地貌,区内锥峰、塔峰的高度普遍大于 200 m^[17]。此外,锥峰、塔峰也零星分布于喀斯特槽谷区的山脊、槽底以及喀斯特峡谷区的分水岭附近。

穹丘是贵州普遍存在的非热带喀斯特丘陵,主要集中在黔北、黔西北、黔东北等地(图7)。黔北与黔西北等地的穹丘,高度低,地形起伏小;而黔东北槽谷区的穹丘,高度相对较大,主要分布在槽谷两侧,受隔槽式褶皱的影响,地形起伏较大。

3.2 受控环境因子

3.2.1 构造

大地构造上,贵州处于上扬子准地台,大部分地区岩层产状平缓,利于锥峰、塔峰等喀斯特丘陵地貌

发育。但黔东北地区,受川黔隔槽式褶皱带的影响,岩层产状多倾斜,不利于锥峰、塔峰等喀斯特丘陵地貌发育,以发育穹丘喀斯特地貌为主。

3.2.2 地层

除黔东北赤水河侏罗系、白垩系红色砂页岩地层分布区和黔东南元古界变质岩分布区外,贵州大部分地区碳酸盐岩广泛分布。碳酸盐岩地层时代跨度大,震旦系—三叠系地层均有发育,其中二叠系和部分地区的泥盆系—石炭系以及三叠系碳酸盐岩为纯质碳酸盐岩,其余地层多为不纯或薄层碳酸盐岩,不适宜锥峰和塔峰热带喀斯特丘陵地貌的形成。根据能否形成锥峰、塔峰、穹丘喀斯特丘陵地貌的岩性条件,碳酸盐岩地层可以分

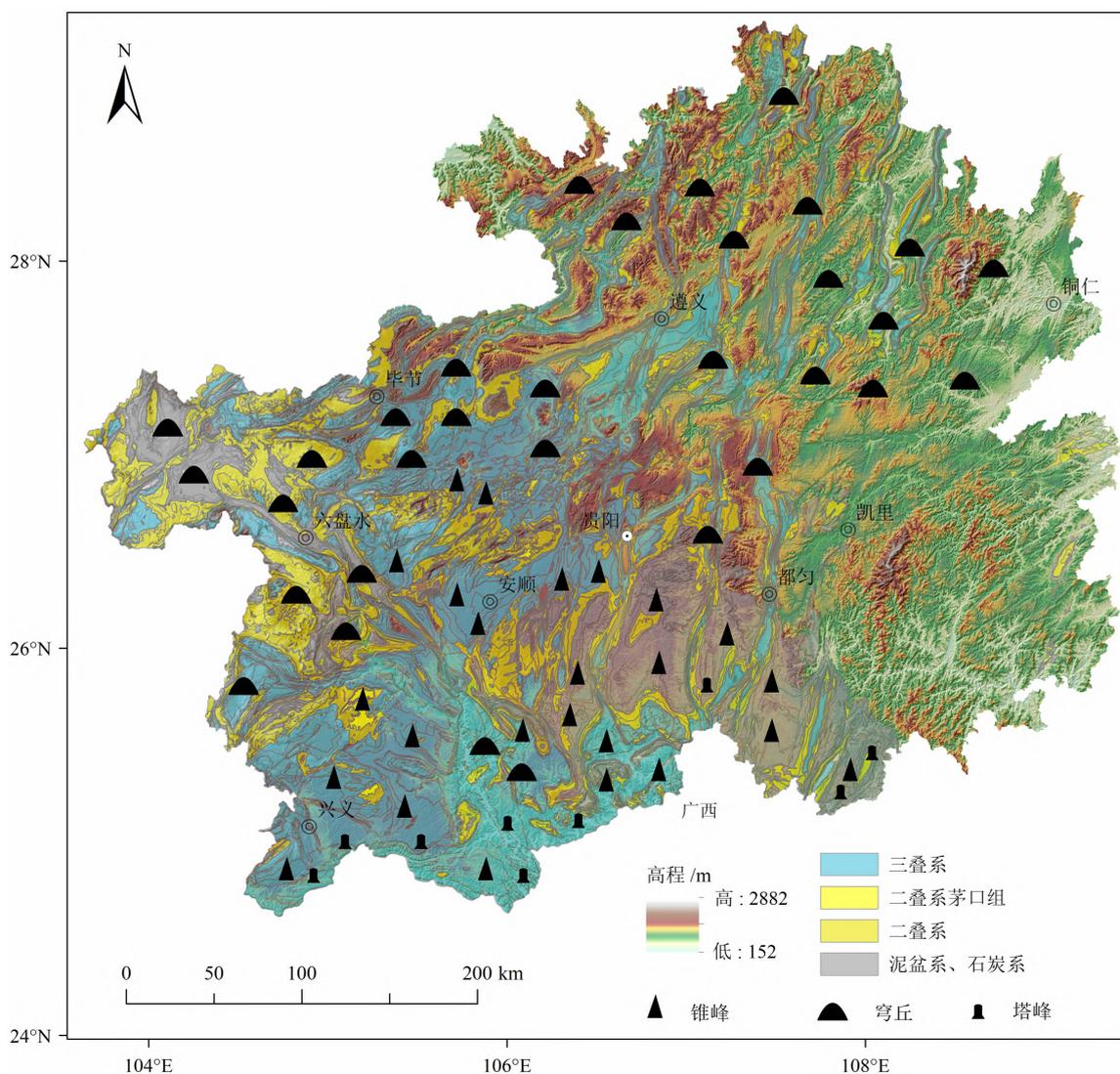


图7 贵州三种主要喀斯特丘陵类型分布图

Fig.7 Distribution map of the three kinds of major karst hill types in Guizhou, China

注:岩性数据来源于中国地质调查局 1:50 万贵州省地质图。

为两类:A类,厚层、纯质碳酸盐岩地层;B类,非厚层或不纯的碳酸盐岩地层。前者可以发育锥峰、塔峰地貌,后者只能发育穹丘地貌。贵州喀斯特地区利于发育锥峰、塔峰地貌的地层(图7)主要有:(1)临近广西的黔南和黔西南地区的泥盆系、石炭系碳酸盐岩地层;(2)二叠系碳酸盐岩地层,以二叠系茅口组地层为主,多为厚层、质纯的碳酸盐岩,但分布零星;(3)黔中、黔西南的下一中三叠统碳酸盐岩地层。B类碳酸盐岩地层,如寒武、奥陶系碳酸盐岩地层,不能发育锥峰、塔峰地貌,只能发育穹丘地貌。

黔中、黔北地区同为三叠系碳酸盐岩地层,黔中三叠系碳酸盐岩地层普遍发育锥峰地貌,而雨热条件较好的黔北地区(如遵义、大方等地区),少有锥峰发育,以穹丘地貌为主(图8),这一现象的出现与相同岩性地层背景下雨热条件较好地区锥峰、塔峰发育的认知相悖。文献[31]分析了贵州三叠系碳酸盐岩地层相变对喀斯特丘陵地貌形态的影响,并根据岩性变化解释了这一现象。贵州下一中三叠统碳酸盐岩地层的陆棚相带(Ⅰ2)、礁前斜坡相带(Ⅱ1)、礁相带(Ⅱ2)和礁后泻湖相带(Ⅲ1)沉积了纯质碳酸盐岩,是峰丛洼地喀斯特地貌分布区(贵阳、安

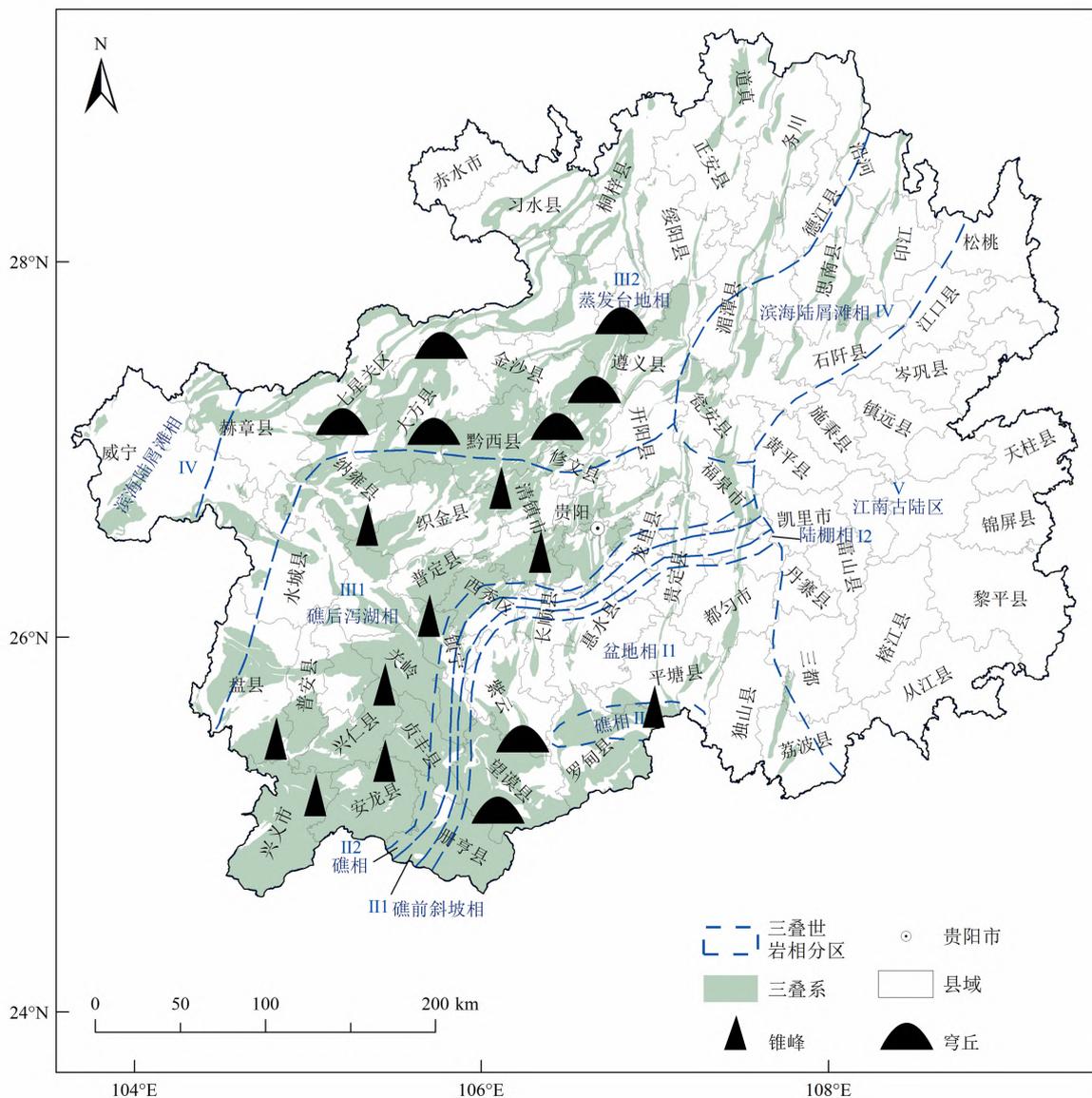


图8 贵州早、中三叠世岩相与锥峰、穹丘分布图(据文献[31]修改)
 Fig. 8 Distribution map of early and middle Triassic lithofacies and cone karst, dome karst distribution in Guizhou, China (referred to reference [31])

顺、水城、盘县、贞丰等地),发育锥峰喀斯特地貌;而盆地相带(Ⅰ1)、蒸发台地相带(Ⅲ2)和滨岸陆屑滩相带(Ⅳ)沉积了碎屑岩含量高的不纯碳酸盐岩,难以发育锥峰喀斯特地貌(威宁、毕节、遵义、湄潭、瓮安、都匀等地),以发育穹丘喀斯特地貌为主(图8)。因此,仅以地层岩性的变化不能完全反映喀斯特地貌变化,而同一时期地层沉积相的变化可以更好地指示和对应喀斯特地貌的变化。

贵州泥盆系、石炭系地层岩相变化对喀斯特丘陵地貌形态的影响也很明显。临近广西的黔南荔波和黔西南兴义等地,碳酸盐岩层厚、质纯,发育锥峰等热带喀斯特丘陵,为著名的喀斯特峰丛风景区。其他地区的泥盆系、石炭系地层多为不纯碳酸盐岩和碎屑岩,丘陵形态多为穹丘和常态山。

3.2.3 气候

根据贵州的气候带分区图(图9),贵州的气候带可分为暖温带、北亚热带、中亚热带以及南亚热带,大部分地区处于热带、亚热带东亚季风气候区。湿热的气候条件利于锥峰、塔峰等热带喀斯特地貌发育,但黔西北暖温带气候区以及毗邻云南的盘县西部西南季风区,水热条件差,不利于锥峰、塔峰等热带喀斯特丘陵发育,即使是纯质厚层的碳酸盐岩也难以形成锥峰、塔峰,仅以穹丘为主(图9)。

3.3 丘陵形态对应的岩性构造和气候组合

丘陵形态对应的岩性构造和气候组合见表1。纯质、厚层、产状水平的碳酸盐岩在热带、亚热带气候条件下以及长期稳定的地貌发育期,易发育锥峰、塔峰喀斯特丘陵地貌。碳酸盐岩层不纯,如含碎屑

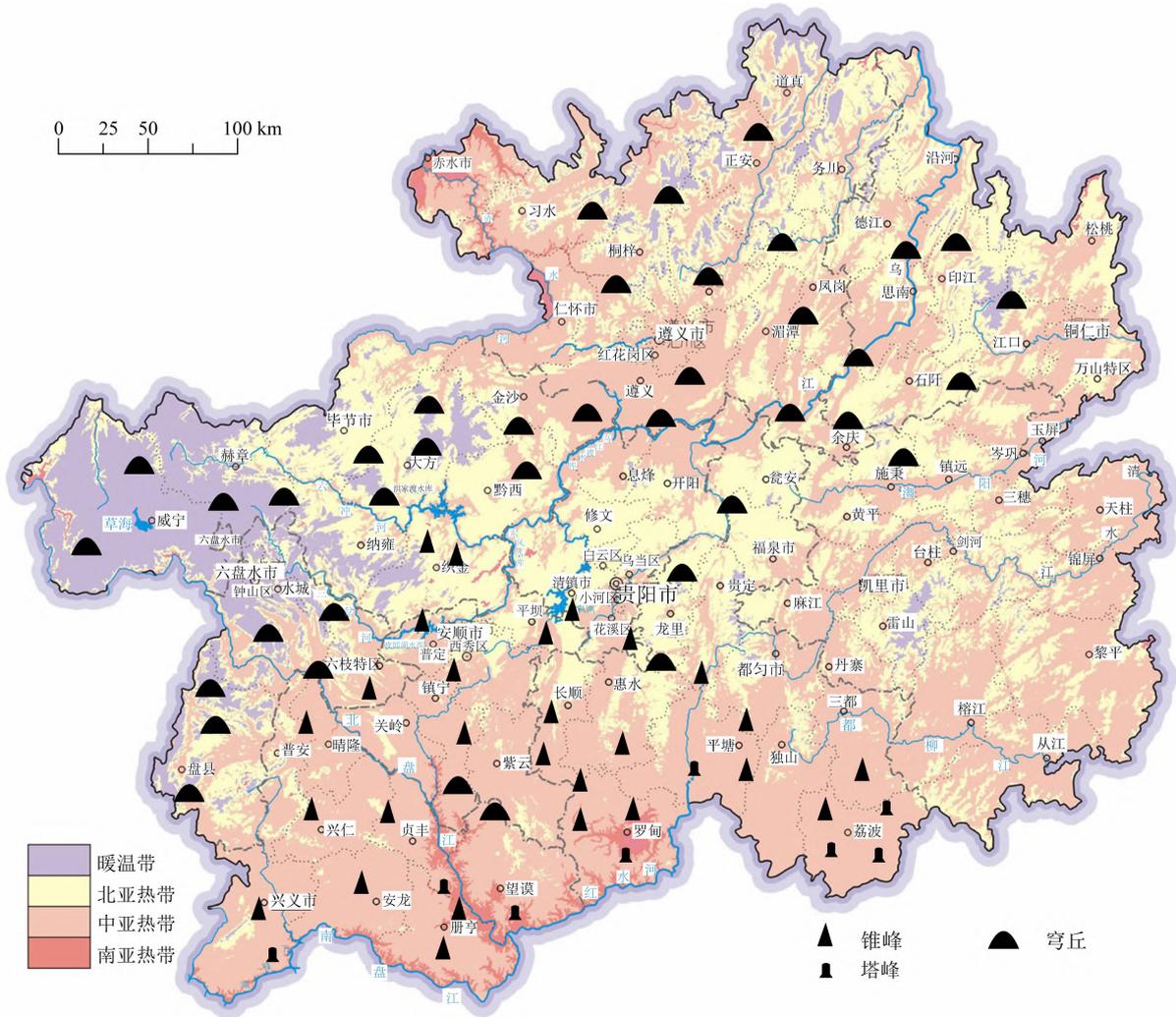


图9 贵州气候带分区与喀斯特丘陵类型

Fig.9 Climate zone and karst hills in Guizhou, China

注:气候带分区来源于贵州省地图集。

岩夹层等;岩层褶皱,产状倾斜;非热带、亚热带气候;没有长期的稳定地貌发育期等条件影响下,易发育穹丘喀斯特丘陵地貌。碎屑岩等非碳酸盐岩则不受气候条件的控制,在热带、亚热带、暖温带以及西南季风等气候条件下均可形成常态山。

表1 贵州高原丘陵形态对应的岩性构造和气候的组合

Tab.1 Combination of lithology structure and climate corresponding to hill morphology in Guizhou plateau

气候	不同岩性、构造的丘陵形态		
	产状水平的纯质厚层碳酸盐岩	褶皱或不纯的碳酸盐岩	碎屑岩等非碳酸盐岩
热带、亚热带	锥峰、塔峰	穹丘	常态山
暖温带、西南季风	穹丘	穹丘	常态山

4 贵州高原喀斯特地貌分区

4.1 贵州喀斯特地貌分区原则

本文综合考虑了喀斯特丘陵地貌形态和其他地质地貌、气候等环境控制因素的相似性,在前人分区的基础之上,尝试开展了贵州喀斯特地貌分区,主要遵循以下原则:

(1)喀斯特丘陵类型的同一性:将相似的喀斯特丘陵合并,不同地貌区的喀斯特丘陵类型应有明显差异;

(2)控制喀斯特丘陵发育的环境因子同一性:将相似环境因子控制发育的喀斯特丘陵划分合并,以揭示相同地貌区喀斯特丘陵地貌的形成环境因子一致;

(3)地域的连续性:将一定范围的区域进行划分和合并,保证行政区域的完整性和地域的连续性,以揭示喀斯特丘陵地貌的空间分异规律;

(4)主体地貌为主的原则:以区域内的主体喀斯特丘陵类型划分地貌区,体现喀斯特地貌的多样性与复杂性;

(5)喀斯特地貌发育的物质基础相同的原则。

4.2 贵州喀斯特地貌分区结果

根据岩层分布,将贵州分为喀斯特地貌区(碳酸盐岩)和非喀斯特地貌区(非碳酸盐岩)。喀斯特地貌区根据锥峰、塔峰、穹丘喀斯特丘陵地貌的发育情况,分为锥峰、塔峰喀斯特地貌区和穹丘喀斯特地

貌区。北盘江地区受河流切割影响,形成了独特的喀斯特峡谷地貌,喀斯特丘陵也呈立体分布,河谷分水岭地区以锥峰、塔峰为主,而临近河谷地区则普遍发育穹丘。鉴于北盘江地区喀斯特丘陵地貌的特殊性,特将北盘江等地划分为喀斯特峡谷地貌区。锥峰、塔峰喀斯特地貌区以发育锥峰、塔峰地貌为主,穹丘喀斯特地貌区以发育穹丘地貌为主,喀斯特峡谷地貌区则锥峰、塔峰和穹丘地貌均有发育。

锥峰、塔峰喀斯特地貌区根据锥峰、塔峰峰顶与洼地、谷地的相对高差大小,分为两个区(表2、图10):

(1)黔中西部北亚热带浅碟型峰丛(锥峰)洼地区,广泛分布下、中三叠统纯质厚层碳酸盐岩,发育锥峰地貌,山体普遍不高,相对高度普遍小于200 m^[17],是以锥峰为主的浅碟型峰丛洼地分布区。

(2)黔南南亚热带漏斗型峰丛(锥峰、塔峰)洼地区,区内泥盆系、石炭系、二叠系和部分三叠系地层的碳酸盐岩层厚、质纯且连续分布,锥峰、塔峰发育。山体较高,相对高度普遍大于200 m^[17],是以锥峰、塔峰为主的漏斗型峰丛洼地区。

根据限制锥、塔峰、穹丘等喀斯特丘陵地貌发育的主导因子,穹丘喀斯特地貌区又分为五个亚区(表2、图10):

(1)黔东北中亚热带褶皱构造穹丘槽谷区:广泛出露寒武系—志留系碳酸盐岩,受隔槽式褶皱的影响,地层倾斜,碎屑岩与碳酸盐岩地层相间分布,主要发育穹丘地貌。山脊和槽底地层平缓,零星发育锥峰地貌。

(2)黔北中亚热带不纯碳酸盐岩穹丘洼地区:广泛分布三叠系碳酸盐岩地层,受岩相变化影响,沉积了碎屑岩含量高的不纯碳酸盐岩,多发育穹丘地貌,局部纯碳酸盐岩地区可见锥峰。

(3)黔西北暖温带穹丘洼地、盆地区:区内广泛出露泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系地层,其他古生界地层零星分布,地层产状较为平缓,以非纯质碳酸盐岩为主,穹丘地貌发育。区内虽零星分布纯质厚层的茅口组灰岩,但受该区暖温带气候的影响,罕见锥峰、塔峰地貌。

(4)黔西西南季风常态山、穹丘洼地、盆地区:西南季风气候不够湿润,虽然地质条件(产状水平的质纯、厚层碳酸盐岩)和地貌发育条件相宜,难以发育锥峰、塔峰。该地区碳酸盐岩丘陵山地以穹丘

表2 贵州喀斯特地貌类型分区

Tab.2 Partition of karst landform type in Guizhou

类型区	地貌区	亚区	丘陵形态特征	涉及行政区面积/km ²	占全省面积百分比/%
锥峰塔峰喀斯特地貌区		黔中西部北亚热带浅碟型峰丛(锥峰)洼地区	以发育锥峰地貌为主,穹丘零星分布,山体普遍不高,是以锥峰为主的浅碟型峰丛洼地分布区。	8920.94	5.07
		黔南亚热带漏斗型峰丛(锥峰、塔峰)洼地区	普遍发育锥峰、塔峰地貌,山体较高,是以锥峰、塔峰为主的漏斗型峰丛洼地区。	27 861.50	15.82
喀斯特区	穹丘喀斯特地貌区	黔东北中亚热带褶皱构造穹丘槽谷区	广泛发育穹丘,山脊和槽底零星发育锥峰。	47 882.05	27.19
		黔北中亚热带不纯碳酸盐岩穹丘洼地区	多发育穹丘地貌,局部纯碳酸盐岩地区可见锥峰。	27 640.38	15.70
		黔西北暖温带穹丘洼地区、盆地区	普遍发育穹丘,由于气候不够湿润,难以发育锥峰。	12 439.64	7.06
		黔西南季风常态山、穹丘洼地、盆地区	碳酸盐岩丘陵山地,穹丘地貌发育,无锥峰等热带喀斯特地貌。	4026.85	2.29
		黔中东部北亚热带不纯碳酸盐岩穹丘—常态山洼地区	多发育穹丘和常态山地貌,局部纯碳酸盐岩地层可见锥峰。	12 229.64	6.95
	喀斯特峡谷地貌区	北盘江深切峡谷多丘陵形态立体分布区	河谷分水岭附近多发育锥峰,毗邻河谷地区普遍发育穹丘。	12 906.95	7.33
非喀斯特区		黔东南非喀斯特区	碎屑岩为主,普遍发育常态山地貌,地表冲沟发育,土被覆盖较厚。	20 248.17	11.50
		黔北(赤水)非喀斯特区		1832.18	1.04

地貌为主,几乎无锥峰等热带喀斯特地貌。

(5) 黔中东部北亚热带不纯碳酸盐岩穹丘-常态山洼地区:主要分布寒武系—二叠系古生代地层和三叠系地层,古生代地层大多为不纯的碳酸盐岩和碎屑岩地层,普遍发育穹丘和常态山地貌。

喀斯特峡谷地貌区:北盘江深切峡谷多丘陵形态立体分布区,位于北盘江两岸,河谷深切,地形起伏大。区内地层主要为泥盆系—三叠系地层,二叠系和三叠系地层是该区内的纯质碳酸盐岩地层,产状较为平缓。区内喀斯特丘陵形态多样,河谷分水岭附近多发育锥峰地貌,毗邻河谷地区则普遍发育穹丘地貌。

非喀斯特区:黔北(赤水)和黔东南非喀斯特地貌区,广泛分布以碎屑岩为主的非喀斯特地层,主要发育常态山地貌,地表冲沟发育,土被覆盖较厚。

5 讨论

贵州喀斯特高原主要存在两类四种丘陵,一类是由碳酸盐岩组成的丘陵,主要有锥峰、塔峰、穹丘三种不同形态的喀斯特丘陵;另一类是由碎屑岩等

非碳酸盐岩组成的丘陵,即常态山。《岩溶学词典》指出溶丘即喀斯特丘陵(karst hill),是由岩溶作用形成的丘陵,起伏不大,相对高差通常为100~150 m,坡度小于45°^[32]。但不同形态的喀斯特丘陵,坡度也不相同。锥峰的坡度一般在37°左右,塔峰的坡度则多大于60°,而穹丘的坡度普遍小于37°。现有溶丘的定义难以完全涵盖喀斯特丘陵的特征,故本研究认为凡是由碳酸盐岩组成的在岩溶作用下形成的丘陵,都应统称为喀斯特丘陵(karst hills),包括锥峰、塔峰、穹丘等类型。文献[33]利用航空影像获取了水城地区锥峰的坡度为45°~47°,与锥峰坡度在37°左右的结果出入较大。航空影像在拍摄时受多种因素影响,如拍摄角度、天气情况等,故利用该类影像测算锥峰坡度不够准确,难以反映锥峰准确的地形坡度。此外,文献[18]也对锥峰的坡度进行了详细的论述。锥峰、塔峰的形成主要与表层岩溶带顺坡径流溶蚀机制有关,并且指出锥峰受自然休止角的控制,坡度在37°左右^[18]。也不支持锥峰坡度在45°~47°的结果。

以往关于喀斯特地貌分区的研究,虽然逐渐重视了气候、岩性等对喀斯特地貌影响,体现了峰林、

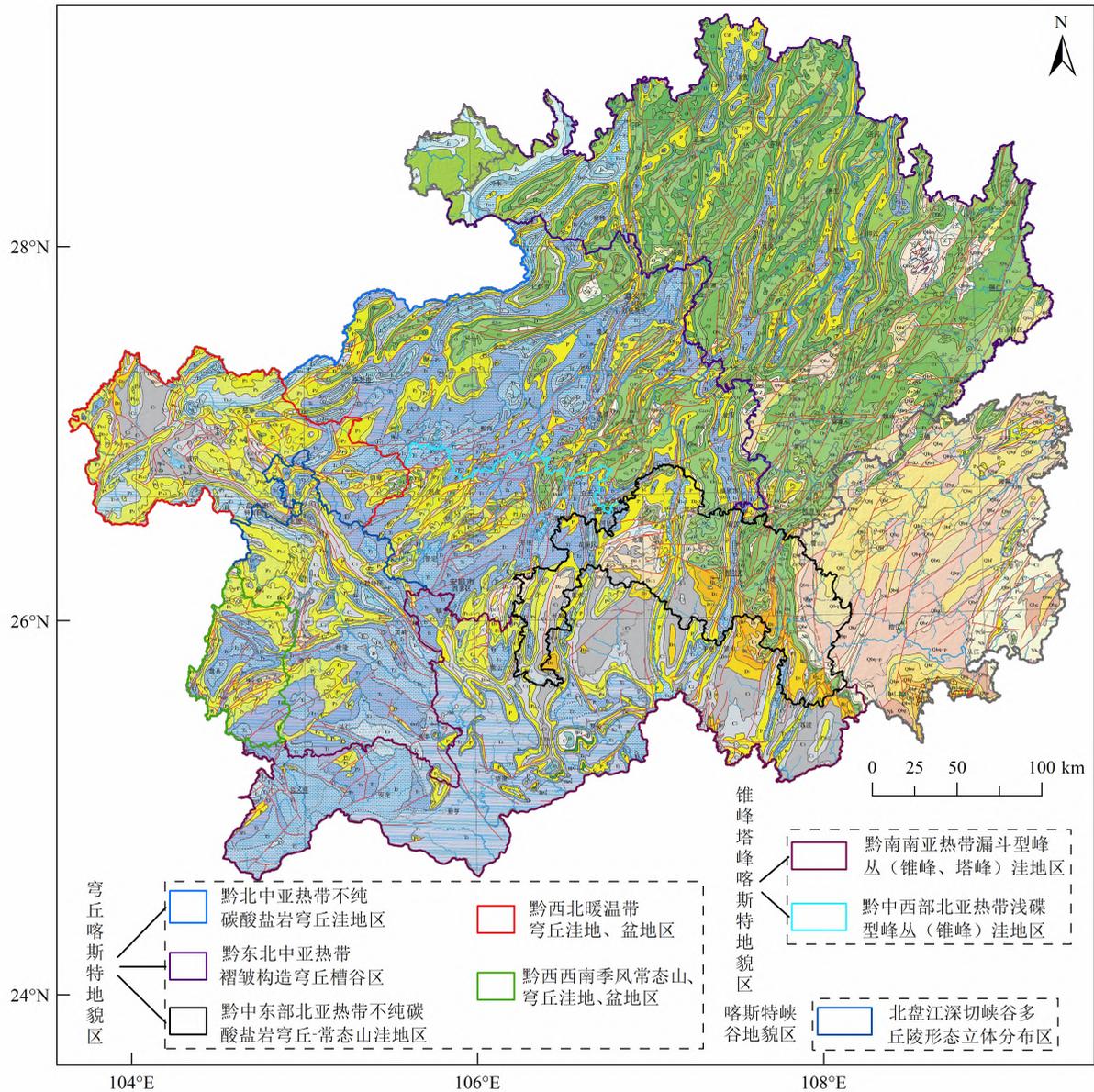


图 10 贵州喀斯特高原地貌分区图

Fig. 10 Geomorphology zoning map of Guizhou karst plateau

峰丛组合形态以及锥峰、塔峰等地貌类型的空间分布,但忽略了除典型锥峰、塔峰外大量分布的穹丘的重要性。仅以峰林、峰丛等地貌组合为基础的区划研究,难以完全反映贵州复杂的喀斯特地貌,尤其是高原型喀斯特为代表的地貌类型和喀斯特地貌空间分布特点。文献[1]虽从岩性和构造条件出发,以主体地貌形态为依据将贵州划分为三个喀斯特地貌区,但未体现气候差异对喀斯特地貌的影响。而本文从喀斯特丘陵类型出发,考虑了气候对喀斯特地貌形态的影响,以喀斯特丘陵形态为基础划分了不同地貌分区,体现了气候、构造、岩性等环境背景对

喀斯特地貌的影响,可为地方水土保持、生态恢复、经济科学可持续发展提供地貌学方面的依据,也可为土壤流失、水文过程、植被恢复等方面的科学研究提供基础信息。

6 结论

根据野外考察结果,并结合地质图、岩相图等资料对贵州喀斯特地貌进行了综合分析,阐明了贵州喀斯特高原主要丘陵类型、形态特征、空间分布以及形成机制,分析了不同喀斯特丘陵类型的空间分布

规律及与气候、地质、地势等环境背景的内在联系,并参考已有相关分区方案,提出了贵州喀斯特地貌分区,取得的主要成果如下:

(1)锥峰、塔峰、穹丘(馒头山)、常态山是贵州喀斯特高原主要的四种形态丘陵类型。锥峰、塔峰均由连续、厚层、产状水平的纯质碳酸盐岩组成,锥峰外形似金字塔状,坡度受休止角控制,普遍在 37° 左右。塔峰外形似塔状,由塔柱和塔裙组成,塔柱由重力崩塌形成,坡度大于 60° ,塔裙由塔柱崩塌撒落的角砾堆积而成。部分塔峰仅有塔柱,塔裙不发育。穹丘由产状倾斜或不纯的碳酸盐岩组成,受土壤蠕移控制,呈穹隆状,坡度小于 37° 。由碎屑岩等非碳酸盐岩组成的常态山形态与穹丘相似,但常态山地表径流系数高,坡地冲沟发育。

(2)气候、构造(产状)、岩性(岩相)均会对喀斯特丘陵地貌形态、形成机制和空间分布产生重要影响。热带、亚热带气候+产状水平的厚层纯碳酸盐岩+稳定的地形发育期是锥峰、塔峰地貌形成的必要条件,穹丘形态是不纯碳酸盐岩坡地土壤长期蠕动的产物。

(3)根据岩层分布,锥峰、塔峰、穹丘喀斯特丘陵的发育及控制其发育的主导因子,将贵州喀斯特区分为锥峰、塔峰喀斯特地貌区,穹丘喀斯特地貌区和喀斯特峡谷地貌区三个大区。其中锥峰、塔峰喀斯特地貌区包含黔中西部北亚热带浅碟型峰丛(锥峰)洼地区和黔南南亚热带漏斗型峰丛(锥峰、塔峰)洼地区两个亚区;穹丘喀斯特地貌区包含黔东北中亚热带褶皱构造穹丘槽谷区,黔北中亚热带不纯碳酸盐岩穹丘洼地区,黔西北暖温带穹丘洼地、盆地区,黔西南季风常态山、穹丘洼地、盆地区,黔中东部北亚热带不纯碳酸盐岩穹丘-常态山洼地区五个亚区;喀斯特峡谷地貌区为北盘江深切峡谷多丘陵形态立体分布区。

参考文献(References)

- [1] 李宗发. 贵州喀斯特地貌分区[J]. 贵州地质, 2011, 28(3): 177 - 181 + 234. [LI Zongfa. Division of karst landscape in Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2011, 28(3): 177 - 181 + 234]
- [2] WILLIAMS P W. Geomorphic inheritance and the development of tower karst [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1987, 12(5): 453 - 465. DOI: 10.1002/esp.3290120503
- [3] 杨明德, 祝安. 锥状喀斯特区溶洞景观特征及其旅游资源评价[J]. 中国岩溶, 2004, 23(2): 101 - 106. [YANG Mingde, ZHU An. The landscape characteristics of karst cave in cone karst area and evaluation on the tourism resource [J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(2): 101 - 106]
- [4] WALTHAM T. Fengcong, fenglin, cone karst and tower karst [J]. Cave and Karst Science, 2008, 35(3): 77 - 88.
- [5] ZHU X, ZHU D, ZHANG Y, et al. Tower karst and cone karst [J]. Treatise on Geomorphology, 2013, 88(36): 327 - 340. DOI: 10.1016/b978-0-12-374739-6.00141-x
- [6] 任美镔, 刘振中, 王飞燕, 等. 中国岩溶发育规律的若干问题[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1979(4): 95 - 108. [REN Meie, LIU Zhenzhong, WANG Feiyan, et al. Karst of China and principles of its development [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1979(4): 95 - 108]
- [7] 曾昭璇. 华南岩溶地形的几点特征[J]. 热带地貌资料, 1980: 63 - 68. [ZENG Zhaoxuan. Characteristics of karst topography in south China [J]. Tropical Geomorphology, 1980: 63 - 68]
- [8] 曾昭璇. 论我国南部喀斯特地形的特征[J]. 中国岩溶, 1982(1): 27 - 32. [ZENG Zhaoxuan. The karst morphological characters in south China [J]. Carsologica Sinica, 1982(1): 27 - 32]
- [9] 王飞燕. 岩溶(喀斯特)形态及类型[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1982(1): 191 - 200 + 146. [WANG Feiyan. Landform classification of karst region [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1982(1): 191 - 200 + 146]
- [10] 朱学稳. 我国峰林喀斯特的若干问题讨论[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 155 - 168. [ZHU Xuewen. Discussions on fenglin karst in China [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(2): 155 - 168]
- [11] 曾昭璇. 论石灰岩地形[M]. 上海: 新知识出版社, 1957: 16 - 49. [ZENG Zhaoxuan. Karst landform [M]. Shanghai: Intellectual Press, 1957: 16 - 49]
- [12] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 59 - 107. [YUAN Daoxian, CAI Guihong. The science of karst environment [M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 1988: 59 - 107]
- [13] 任美镔, 刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983: 181 - 183. [REN Meie, LIU Zhenzhong. Introduction to karst science [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983: 181 - 183]
- [14] DAVIS W M. The geographical cycle [J]. The Geographical Journal, 1899, 14(5): 481 - 504.
- [15] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 32 - 34. [YUAN Daoxian. Karst science of China [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1994: 32 - 34]
- [16] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 18 - 24. [WANG Shijie, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong. Discussion on nomenclature of the karst desertification regions and illustration for their environment characteristics in southwest China [J]. Mountain

- Research, 2013, **31**(1): 18 – 24] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.01.010
- [17] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要[J]. 山地学报, 2015, **33**(6): 641 – 648. [WANG Shijie, ZHANG Xinbao, BAI Xiaoyong. An outline of karst geomorphology zoning in the karst areas of southern China [J]. Mountain Research, 2015, **33**(6): 641 – 648] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000079
- [18] 张信宝, 刘再华, 王世杰, 等. 锥峰和塔峰溶丘地貌的表层喀斯特带径流溶蚀形成机制[J]. 山地学报, 2011, **29**(5): 529 – 533. [ZHANG Xinbao, LIU Zaihua, WANG Shijie, et al. Dynamic mechanism of runoff corrosion in the epikarst zone on the formation of cone and tower karst landforms [J]. Mountain Research, 2011, **29**(5): 529 – 533] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2011.05.013
- [19] 熊康宁. 关于锥状喀斯特与塔状喀斯特的水动力成因过程: 以黔中地区为例[J]. 中国岩溶, 1994, **13**(3): 237 – 246. [XIONG Kangning. Hydrodynamic genetics of cone karst and tower karst-with special reference to the middle Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 1994, **13**(3): 237 – 246]
- [20] 曹建华, 袁道先, 裴建国. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 112 – 145. [CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PEI Jianguo. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2005: 112 – 145]
- [21] 吴协保, 孙继霖, 林琼, 等. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(4): 391 – 396. [WU Xiebao, SUN Jilin, LIN Qiong, et al. Research on division treatment to eco-construction of karst rock deserted land in southwest China karst area [J]. Carsologica Sinica, 2009, **28**(4): 391 – 396]
- [22] 张雪梅, 祁向坤, 岳跃民, 等. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理自然地域分区[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5490 – 5501. [ZHANG Xuemei, QI Xiangkun, YUE Yuemin, et al. Natural regionalization for rocky desertification treatment in karst peak-cluster depression regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(16): 5490 – 5501] DOI: 10.5846/stxb201910092093
- [23] 国家发展和改革委员会. 岩溶地区石漠化综合治理规划大纲[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2008: 1 – 23. [National Development and Reform Commission. Outline of comprehensive control plan for stony desertification in karst areas [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2008: 1 – 23]
- [24] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, **36**(2): 125 – 129. [PENG Tao, WANG Shijie, ZHANG Xinbao, et al. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes [J]. Earth and Environment, 2008, **36**(2): 125 – 129] DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2008.02.014
- [25] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, **29**(3): 274 – 279. [ZHANG Xinbao, WANG Shijie, CAO Jianhua, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in southwest China karst area [J]. Carsologica Sinica, 2010, **29**(3): 274 – 279]
- [26] PENG Tao, WANG Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. Catena, 2012, **90**: 53 – 62. DOI: 10.1016/j.catena.2011.11.001
- [27] KIRKBY M. Hillslope process-response models based on the continuity equation [J]. Institute of British Geographers, 1971, **3**: 15 – 30.
- [28] 刘金涛, 韩小乐, 陈喜. 山坡表层关键带结构与水文过程[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 84 – 136. [LIU Jintao, HAN Xiaole, CHEN Xi. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity progress [M]. Beijing: Science Press, 2020: 84 – 136]
- [29] 杨景春, 李有利. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 15 – 16. [YANG Jingchun, LI Youli. Geomorphological principles [M]. Beijing: Peking University Press, 2001: 15 – 16]
- [30] ZHANG Zhicai, CHEN Xi, HUANG Yuanyang, et al. Effect of catchment properties on runoff coefficient in a karst area of southwest China [J]. Hydrological Processes, 2014, **28**(11): 3691 – 3702. DOI: 10.1002/hyp.9920
- [31] 赵吉发. 碳酸盐岩相与岩溶地貌发育的初步研究——以贵州三叠系为例[J]. 中国岩溶, 1994, **13**(3): 261 – 269. [ZHAO Jifa. A preliminary research on carbonate facies and karst geomorphology development – a case study of the Triassic strata of Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 1994, **13**(3): 261 – 269]
- [32] 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 15 – 21. [YUAN Daoxian. Glossary of karstology [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1988: 15 – 21]
- [33] XIONG Kangning. Morphometry and evolution of Fenglin karst in the Shuicheng area, western Guizhou, China [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1992, **36**(2): 227 – 248. DOI: 10.1127/zfg/36/1992/227

Major Types and Formation Mechanism of Karst Hill in Plateau and Discussion on Karst Landform Zoning in Guizhou, China

DAI Bin^{1, 2, 3}, PENG Tao^{1, 3*}, ZHANG Xinbao^{1, 3, 4}, MO Xiaomei^{1, 2, 3}, WANG Shijie^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Puding Karst Ecosystem National Observation and Research Station National Ecosystem Research Network of China, Puding 562100, Guizhou, China; 4. Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment & Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The definition of karst landforms and zoning were governed by various factors, such as climate, tectonics, geology; however, if a topographical division of karst landform in Guizhou, China was outlined merely based on a simple morphological combination of peak-forest and peak-cluster, it must be not fully interpret the complexity of local karst geomorphology. Previous attempts to karst landform zoning ignored the fact that there are widely dome karst landforms except typical cone and tower karst, which was not well aware of and short of knowledge of morphological features, spatial distribution and formation and evolution mechanism.

In this study, it investigated the distribution, formation mechanism in connection with the geo-environmental circumstances (climate, geology (lithology, lithofacies)) of different karst hill areas in Guizhou. It conducted field surveys, indoor testing and finally tentatively proposed a updated scheme of karst geomorphology zoning for Guizhou with full reference to past research achievements in karst landform zoning scheme.

Conclusions are listed as follows: (1) There were four major hill types of karst plateau in Guizhou, which were cone, tower, dome karst hills and normal hills (non-karst hills), separately. (2) The formation of cone and tower karst was controlled by chemical erosion of runoff in the epikarst zone. The formation of dome karst was subjected to soil creep. (3) Except non-karst area, karst area in Guizhou was initially divided into three landform zones: cone and tower karst, dome karst, and karst valley. (4) The cone and tower karst zone was divided into two geomorphology subzones which are the north subtropical fengcong (cone karst) depression region of shallow dish type in the west of central Guizhou, and the southern subtropical fengcong (cone and tower karst) depression region of funnel type in the south of Guizhou. (5) The dome karst geomorphology zone was divided into five geomorphology subzones which were middle subtropical dome karst trough valley region of the fold structure in the Southeast Guizhou; middle subtropical dome karst depression region of impure carbonate rocks in northern Guizhou; warm temperate dome karst depression and valley region in the northwest of Guizhou; southwest monsoon normal hills, dome karst, depression and basin region in the western Guizhou; north subtropical dome karst - normal hills depression region of impure carbonate rocks in the east of the middle Guizhou. (6) The karst valley geomorphology zone was divided into vertical distribution region of multiple hills in the deep valley of the North Pan River. This research can provide a scientific basis for high-quality ecological construction and sustainable development of regional economy and society in karst areas of China.

Key words: karst plateau; landform type; dome karst; geomorphology zoning; Guizhou

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)