



青藏高原不同高程喀斯特地貌类型和发育特征

高 康¹, 林小兵^{1,2}, 韦桂梅¹, 郑宇超¹, 闫怡帆¹

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059

摘 要: 青藏高原地区喀斯特地貌发育较为普遍。通过查阅文献资料和系统性的研究总结, 明确了不同高程下喀斯特地貌类型、发育特征均存在明显的差异。极高海拔地区($\geq 5\ 000\text{ m}$)喀斯特地貌可分为隆起构造山原、内陆湖盆地、内陆湖洼、内陆山原、高山冰川深谷、山原基岩型, 风化剥蚀作用较强, 形成较多的残留峰丛、石柱、洼地等; 高海拔区($3\ 500\sim 5\ 000\text{ m}$)喀斯特地貌可分为喀斯特高山深谷型、喀斯特中高山湖泊、高山冰川深谷、隆起构造山原、内陆湖盆地、内陆湖洼型, 构造-溶蚀作用强, 主要发育大型宏观的峰林、峰丛洼地、溶洞、漏斗等; 中海拔区($1\ 000\sim 3\ 500\text{ m}$)喀斯特地貌可以分为喀斯特高山深谷型、喀斯特中高山湖泊、山原蚀余峰丘、山原峰丘湖泊、内陆湖洼、喀斯特海岸型, 构造-侵蚀作用较强, 风化剥蚀相对较弱, 喀斯特形态得以基本保存, 主要发育微小型峰丛洼地、溶孔、溶痕和溶隙等。

关键词: 喀斯特地貌; 碳酸盐岩; 海拔高程; 青藏高原

KARST GEOMORPHOLOGICAL TYPES AND DEVELOPMENT CHARACTERISTICS AT DIFFERENT ELEVATIONS IN QINGHAI-TIBET PLATEAU

GAO Kang¹, LING Xiao-bing^{1,2}, WEI Gui-mei¹, ZHENG Yu-chao¹, YAN Yi-fan¹

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The karst geomorphology is commonly developed in the Qinghai-Tibet Plateau. Previous researchers have studied on the regional karst geomorphology, runoff zone and genesis, but fewer on the overall summary of the types and development of karst geomorphology at different elevations. On the basis of systematical study and summarization, with referring to the literature, this paper concludes that there are obvious diversities in karst geomorphologic types and development characteristics in term of different elevations. The karst geomorphology in areas of very high altitude ($\geq 5000\text{ m}$) can be divided into the types of uplifted tectonic plateau mountain, inland lake basin, inland lake depression, inland plateau mountain, alpine glacial valley and plateau mountain bedrock, with intensive weathering and denudation, forming numerous residual peaks, stone columns, depressions, etc. The karst geomorphology in the high altitude areas ($3500\sim 5000\text{ m}$) involves karst alpine valley, karst mid-high mountain lake, alpine glacial valley, uplift tectonic plateau mountain, inland lake basin and inland lake depression types, with intensive structural dissolution, mainly developed with macro needle karsts, peak cluster depressions, karst caves and funnels. The karsts

收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-08-14. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家科技重大专项专题“四川盆地地下二叠统成藏条件与成藏主控因素研究”(2016ZX05007004-002).

作者简介: 高康(1999—), 男, 硕士研究生, 从事地质工程研究, 通信地址 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, E-mail/2932192316@qq.com

通信作者: 林小兵(1980—), 男, 博士, 讲师, 从事储层地质学研究, 通信地址 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, E-mail/linxiao_bing_07@cdut.edu.cn

with middle altitude (1000–3500 m) are in the geomorphologic types of karst alpine valley, karst mid-mountain lake, plateau mountain erosion residual peak, plateau mountain peak lake, inland lake depression and karst coast, with intensive structural erosion and weak weathering and denudation. The karst forms are basically preserved, mainly developing small peak cluster depressions, dissolved holes, dissolved marks and dissolved fissures. This study is expected to provide guidance and reference for the research of rational utilization of surface water resources, geological disaster control, geomorphology and landscape, as well as the major engineering construction in karst mountain areas of the plateau.

Key words: karst geomorphic types; carbonate rock; altitude; Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

喀斯特地貌也称岩溶地貌,主要是指可溶岩在水的作用下发生以化学溶蚀为主,在流水、生物等侵蚀下岩体发生塌陷、堆积等地质作用,以及在这些作用全过程中所产生的各种地质现象^[1-3]。喀斯特地貌的特征及发育主控因素一直是喀斯特研究的关键,喀斯特地貌的主控因素决定了主要发育的形态特征,而地貌形态特征作为喀斯特地区最直观的体现可以为分析主控因素提供直接的证据。

喀斯特地区是地球上最多样化的水文地质环境之一,它们与大气圈、水圈、岩石圈和生物圈以及人类历史 and 发展的过程密切相关,提供各种有价值的自然资源以及动植物生存的基本生存条件等^[4]。喀斯特还是全球碳循环的一部分,并参与多种生物地球化学过程。卢耀如先生^[5]将喀斯特发育机理与发展工程建设效应进行综合研究,详细分析了地质环境工程、地下空间开拓工程、生态城镇群建设工程效应,为喀斯特地貌与现代工程相联系提供了重要的参考和借鉴。

近年来,随着青藏高原地区经济社会的发展,对生态环境的保护提出了更高的要求,对水利、交通等大型项目建设和重大环境地质问题和水资源整体开发、利用提出了更高的标准^[6]。因此,分析青藏高原不同地区喀斯特地貌发育特征和主控因素,更有利于生态环境的保护、开发。国内外学者已经从岩性、地质构造、气候、水文等诸多方面,分析了影响青藏高原喀斯特地貌形态、发育特征以及演化模式^[7-12]。比如,基于地层、构造以及气候差异等分析,认为青藏高原地区喀斯特地貌可划分为强烈上升演化模式、狭窄沉降演化模式、剥蚀裸露演化模式^[13-14]。在青藏高原东缘梯度带,基于野外实测大气 CO₂ 和喀斯特发育情况调查,发现 CO₂ 浓度和高程对区域喀斯特发育类型和规模有着重

要影响^[15]。通过风化壳红土和洞穴次生化学沉淀的研究,明确了古喀斯特发育时期青藏高原地表处于湿热环境;并通过石英表面颗粒化学溶蚀形态,揭示了古喀斯特发育的溶蚀过程,对青藏高原的隆升和古气候的研究具有重要意义^[16]。

可以看出,目前在多地区、多层位开展了青藏高原喀斯特的研究工作。由于青藏高原地区整体上从西北部到东南部呈现出海拔逐渐降低的趋势,境内发育有众多海拔较高的山脉,地形以山地丘陵、深切河谷为主,地势变化差异明显^[17]。但对于青藏高原不同地势差异下喀斯特发育的类型和特征研究,尚需要进行系统性总结,以更好指导生产实践。因此,在结合前人的研究基础上,本研究聚焦青藏高原喀斯特在不同高程地貌类型及发育特征的差异性进行分析,以期高原喀斯特地区开展地表水资源合理利用、重大工程建设、地质灾害治理、地貌景观学的研究提供参考。

1 区域地质概况

青藏高原位于中国西南部,介于北纬 26.16—39.78°、东经 73.32—104.78°之间,面积达 250×10⁴ km²,平均海拔超过 4 000 m^[18]。该地区年均温度较低,降雨量较少,在夏季降雨较多,冬季较少,温差较大,温度随着海拔的降低而整体升高,降雨也由西北向东南逐渐增加^[19]。

青藏高原地区在地质历史时期构造运动活跃,具有多期性和不等幅性的特点^[20-21]。特别是新生代以来,强烈的构造运动使青藏高原长期处于隆升夷平阶段,对地块改造强烈,各类地质体之间均存在错动、碰撞挤压、分离的多期次交错叠加作用,地质构造带断裂发育密集,构造缝合带分布广泛,构造十分复杂^[21]。构造运动下产生的断裂具有不均一性,断裂、连通以及两

者并存的方式均普遍存在,形成多样化的喀斯特组合形式。喀斯特层组内部的空间结构以及边界的接触情况变化复杂,水体和岩体接触更加广泛,水岩反应更加充分,为岩溶水的溶蚀和侵蚀创造了十分有利的条件。

青藏高原经历了一系列沉积旋回、构造抬升、风化剥蚀,在震旦纪—第四纪均有碳酸盐岩地层分布,其中灰岩、结晶灰岩、细晶灰岩、鲕粒灰岩、泥灰岩、白云岩等地层分布良好,碳酸盐岩地层间夹杂有砂岩、千枚岩、大理岩等,地层发育齐全、结构分布复杂^[3, 22-23]。这些可溶岩有的出露于地表,有的埋藏于地下,在垂向上可溶岩和非可溶岩地层相间互存的类型比较广泛;在水平方向上由于构造活动强烈,岩层断裂比较明显,风化剥蚀下岩层厚度不均匀^[17, 22-23]。广泛分布的碳酸盐岩等可溶岩地层透水性强,含水量丰富,储水空间大,水流速度较快,地下水的连续补充使之处于不饱和状态,较易溶蚀,为岩溶地貌提供了良好的物质基础并为地下水径流提供了良好的通道^[8, 24-25]。碳酸盐岩等可溶岩地层受到构造运动的影响较易变形产生褶皱,岩层断裂明显,经历强烈剥蚀产生断陷盆地;盆地与山地的高差逐渐变大,导致深切河谷和盆地发育良好^[8, 26-27]。根据地形可以将青藏高原划分为低海拔(高程小于1 000 m)、中海拔(1 000~3 500 m)、高海拔(3 500

~5 000 m)、极高海拔(高程大于5 000 m) 4个类型^[27](图1)。不同海拔高程在空间分布上存在明显差异,极高海拔主要分布在西昆仑地区、唐古拉山附近以及冈底斯山地区,高海拔主要集中在青南地区、羌塘地区以及喜马拉雅山以北区域,中海拔则集中于柴达木盆地、共和盆地以及河湟谷地,而低海拔仅分布在藏东南墨脱一带^[27-28]。

2 不同海拔高程下喀斯特地貌类型

2.1 喀斯特地貌类型划分

随着喀斯特地貌研究的深入,学者们对喀斯特地貌的划分依据和基本类型的分类也是多种多样,但大部分学者主要根据埋藏条件、形成时代、区域气候、分布深度、成因类型等进行划分^[1, 29-30](表1)。

2.2 青藏高原不同高程喀斯特地貌类型划分

虽然青藏高原喀斯特地貌的形成时间还存在一些争议,但大部分学者认为青藏高原喀斯特地貌主要形成于古近纪、新近纪以及第四纪,古喀斯特发育良好^[16, 22, 31-33]。在构造运动的控制下,高原长期处于隆升夷平阶段,各级夷平面分布复杂,海拔高程变化显著,并且随着海拔高度的变化喀斯特地貌类型表现出明显的不同^[9, 34-35]。此外,在风化剥蚀、流水侵蚀以及冰蚀作用的影响下,大部分喀斯特形态表现为覆盖型喀斯

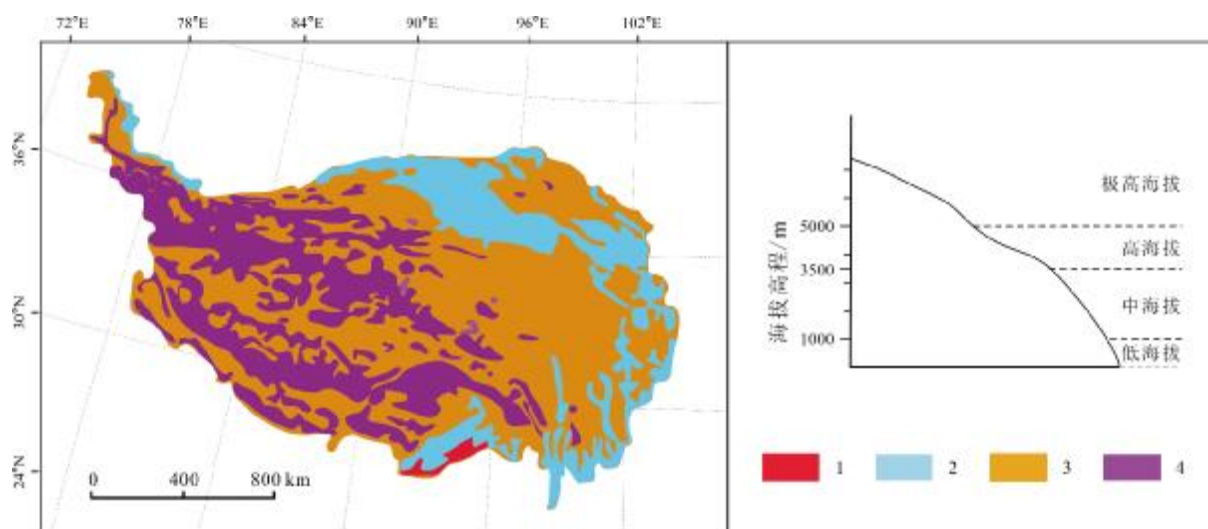


图1 青藏高原高程分级及分带图

(据文献[28]修改)

Fig. 1 Elevation classification and zonation of the Qinghai-Tibet Plateau

(Modified Reference [28])

1—低海拔(low altitude); 2—中海拔(medium altitude); 3—高海拔(high altitude); 4—极高海拔(very high altitude)

表 1 喀斯特地貌基本类型表

Table 1 Basic types of karst geomorphology

划分依据	基本类型	主要特征
埋藏条件	裸露型	岩层主要出露在地表低洼处,第四系覆盖层厚度不超过 10 cm
	浅覆盖型	岩层绝大部分被第四系覆盖,覆盖层不超过 30 m
	深覆盖型	岩层基本被第四系覆盖,厚度一般大于 30 m,基本看不到喀斯特景观出露地表
	埋藏型	可溶岩层被不可溶岩层覆盖,地表看不到喀斯特景观,地下水与地表水联系不大
形成时代	化石喀斯特	地下喀斯特空间已被全部充填,与现代地下水循环系统关系不密切
	古岩喀斯特	喀斯特形成早于新生代,溶洞中填有新生代以前的沉积岩石
	近代喀斯特	形成于新生代,洞隙是空洞的或者填有古近纪—第四纪沉积物
区域气候	寒带型	喀斯特发育强度小、规模小,地面被溶蚀成溶痕或浅洼地
	温带型	地表发育强度较弱、规模较小,地下较发育,以溶洞、干谷、浅封闭洼地和喀斯特裂隙泉为主要形态
	亚热带型	地表发育面积大,见地下溶洞、暗河
	热带型	地表发育强度大、分布范围广,多见地下暗河、溶洞
	干旱型	岩溶作用微弱,一般只有溶痕、干谷等形态
分布深度	浅岩溶	分布于垂直及水平循环带
	深岩溶	分布于水平循环带以下
岩性	碳酸盐岩	分布最广,形成速度慢,常见峰林、溶洞、石林、石芽等
	硫酸盐岩	形成速度快,常见膏盐角砾岩、溶孔、小洞穴、落水洞等
	氯化物岩	形成速度快,常见塌陷、落水洞、蜂窝状溶孔、盐泉等
成因类型	溶蚀为主型	发育强度大,多见溶洞、暗河、峰林、天生桥
	溶蚀-侵蚀	山高谷深、峡谷边坡极为陡立,甚至近于直立
	溶蚀-构造	盆地周边沿断裂带山坡陡峻,有断层崖或三角面等痕迹遗留

特出露后,经改造的地表喀斯特和地下喀斯特^[34-36]。

但是,单纯按照某种因素对青藏高原地区喀斯特类型进行划分,难以全面概括青藏高原地区喀斯特发育的规律性,而且也难以反映不同地区与不同喀斯特类型的特征。卢耀如^[36]综合考虑岩性及层组类型、主要地质构造条件、发育时的气候条件,将青藏高原地区喀斯特地貌按照成因类型划分出复杂溶蚀-构造型、溶蚀-冰蚀型、溶蚀-剥蚀型、溶蚀-侵蚀型、内陆盆地复合型、溶蚀-海蚀型、内陆高地复合型、原岩复合型 8 种一级类型。这 8 种一级类型又包括隆起构造山原、隆起构造山地、高山冰川深谷、山原蚀余峰丘、山原峰丘湖泊、内陆山原、内陆岗丘、喀斯特高山深谷、喀斯特

中高山湖泊、喀斯特海岸、内陆湖洼、内陆湖盆、内陆高地湖洼、内陆山原湖洼、内陆山原湖盆、内陆山原湖谷、山原基岩复合 17 种二级类型(图 2)。

不同海拔区,主要发育的喀斯特地貌类型具有明显不同。其中,在中海拔区(1 000~3 500 m)喀斯特地貌可分为喀斯特高山深谷、喀斯特中高山湖泊、山原蚀余峰丘、山原峰丘湖泊、内陆湖洼、喀斯特海岸;在高海拔区(3 500~5 000 m)喀斯特地貌可分为喀斯特高山深谷、喀斯特中高山湖泊、高山冰川深谷、隆起构造山原、内陆湖盆地、内陆湖洼;在极高海拔区($\geq 5\,000\text{ m}$)可分为隆起构造山原、内陆湖盆地、内陆湖洼、内陆山原、高山冰川深谷、山原基岩。

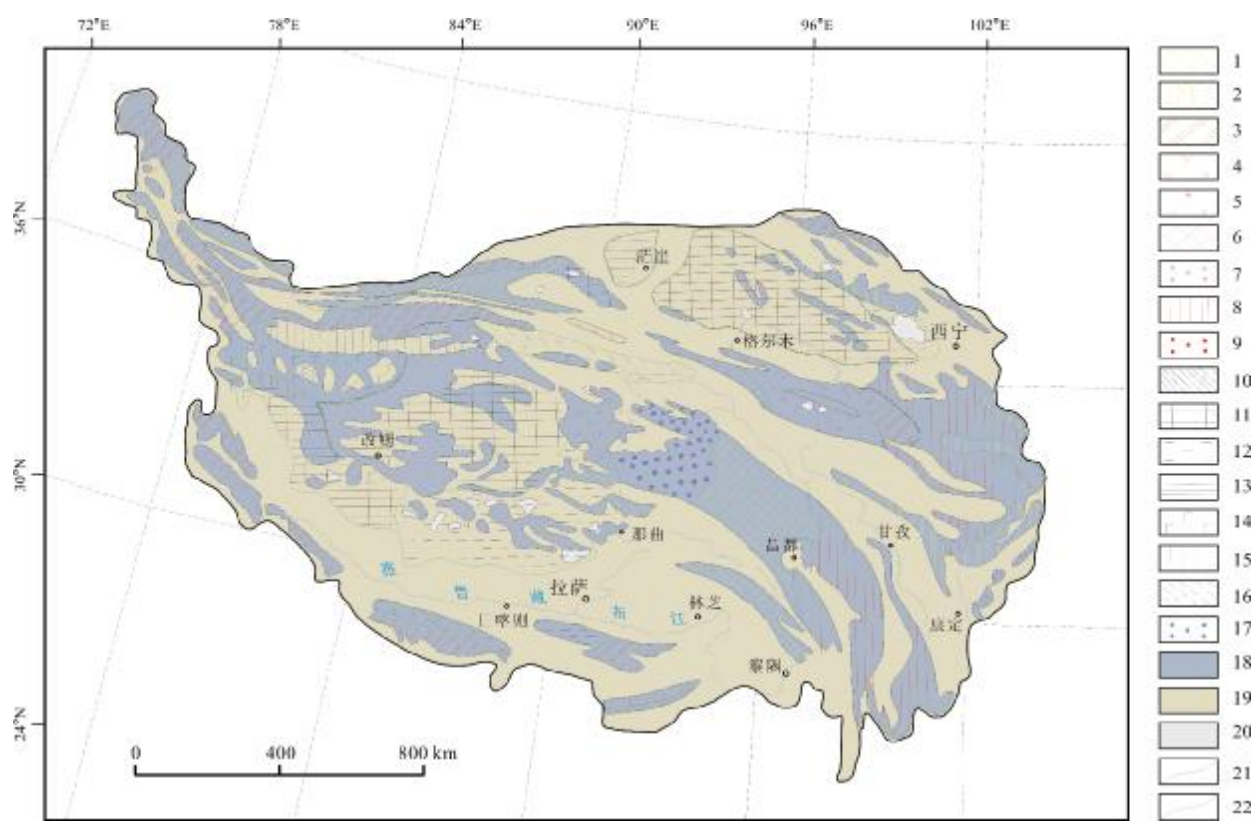


图 2 青藏高原喀斯特主要类型分布图
(据文献[30]修改)

Fig. 2 Distribution map of major karst types of Tibetan Plateau
(Modified Reference [30])

- 1—隆起构造山原型 (uplift tectonic plateau mountain type); 2—隆起构造山地型 (uplift tectonic mountain type); 3—高山冰川深谷型 (alpine glacier valley type); 4—高原侵蚀峰丘型 (plateau mountain erosion residual peak type); 5—高原峰丘湖泊型 (plateau mountain peak lake type); 6—内陆山原型 (inland plateau mountain); 7—内陆岗丘型 (inland hill type); 8—喀斯特高山深谷型 (karst alpine valley type); 9—喀斯特中高山湖泊型 (karst mid-mountain lake type); 10—喀斯特海岸型 (karst coast type); 11—内陆湖洼型 (inland lake depression type); 12—内陆湖盆型 (inland lake basin type); 13—内陆高地湖洼型 (inland highland lake depression type); 14—内陆高原湖洼型 (inland plateau mountain lake depression type); 15—内陆高原湖盆型 (inland plateau mountain lake basin type); 16—内陆高原湖谷型 (inland plateau mountain lake valley type); 17—高原基岩复合型 (plateau mountain bedrock compound type); 18—裸露碳酸盐岩分布区 (exposed carbonate rock area); 19—裸露非碳酸盐岩分布区 (exposed non-carbonate rock area); 20—湖泊 (lake); 21—喀斯特类型分布界限 (boundary of karst types); 22—河流 (river)

3 不同海拔高程下喀斯特地貌发育特征

3.1 中海拔区

中海拔地区,海拔高差变化较明显,一些灰岩山地海拔可达 4 000 m 左右.在海拔 3 200 m 以下主要发育多边形峰丛洼地、大-中型溶洞、岩溶泉、尺度较小石芽、残余塔状石柱以及红色土堆积等,峰丛洼地中包含着红色土堆积.大-中型溶洞内发育石钟乳、石笋等,裸露石芽表面发育溶痕,喀斯特地貌形态基本保存完好^[14, 37-38].在海拔 3 200 m 以上喀斯特发育程度较高,主要是高差中等的石林式石芽,中等大小的水平穿

洞和洞穴、石墙、残留竖井、红色风化壳等,明显受到较强的风化作用改造,喀斯特地貌形态部分被破坏^[14, 37].因此在中海拔区,处于不同高程处喀斯特地貌形态类型、发育特征以及风化剥蚀具有一定的差异;海拔较高的位置风化作用明显高于海拔较低的位置(表 2).

3.2 高海拔区

高海拔区由于构造运动强烈,剧烈抬升及河流迅速下切导致地形高差较大,深切河谷和盆地发育良好,喀斯特地貌类型多样^[30, 32](表 3).这些地区在海拔 3 500 m 以下的喀斯特地貌形态主要发育少量溶隙、

表 2 中海拔区典型喀斯特地貌形态特征

Table 2 Characteristics of typical karst geomorphology in medium altitude areas

地区	高程/m	喀斯特地貌形态特征
甘肃武都	2000~2500	以峰丛洼地、石芽、溶洞、残余塔状石柱、红色风化壳为主
甘肃迭部	约 2860	以残留石墙及塔状、柱状喀斯特为主
甘肃郎木寺	3200~4000	以石林式石芽、水平穿洞和洞穴、石墙、残留竖井、红色风化壳为主
甘肃白龙江流域马场和龙家沟地区	2200~3000	以峰丛、溶蚀洼地、溶沟、溶槽和溶洞为主
四川岷山、九寨沟	2100~3000	以裂隙、溶洞、岩溶泉、钙华为主

表 3 高海拔区典型喀斯特地貌形态特征

Table 3 Characteristics of typical karst geomorphology in high altitude areas

地区	高程/m	岩溶地貌形态特征
川西高原巴塘地区	4100 以上	以溶蚀节理、溶蚀裂隙为主
	3700~4100	以溶蚀裂隙、构造型溶洞及岩溶泉为主
	3300~3500	溶洞、岩溶管道不发育,主要分布岩溶泉
	2900~3100	仅分布岩溶泉
藏东南怒江峡谷区	4000 以上	以规模较大的溶蚀崖、溶蚀峰林为主
	3500~4000	以溶洞、落水洞、暗河、溶蚀槽、钙华台为主
	3500 以下	以喀斯特裂隙和地表溶孔、小型溶沟、钙华堆积、岩溶泉为主
格聂山地区	4000~4200	以喀斯特洞穴、溶隙、岩溶泉群为主
	3500~3600	以大中型溶洞、溶隙、岩溶泉为主
	2900~3200	以大型喀斯特洞穴、溶隙、岩溶泉为主
察雅地区	4700~4900	以落水洞、溶隙、溶孔为主
	4200~4600	以中小型溶洞、溶孔、溶蚀裂隙为主
	3500~3700	以大型溶洞、溶隙为主;出露岩溶大泉
盐源盆地西侧	3000 左右	以落水洞、伏流、漏斗以及红土风化壳为主
花石峡	4380 左右	以干涸溶洞、裂隙、洼地、残留红色风化壳为主
定日东山	4300 左右	以残留穿洞、洞穴、漏斗、洞穴和溶痕为主
定日西山	4300 左右	以残留漏斗、洞穴和溶痕为主
拉萨西郊堆龙德庆	3700~4300	残余落水洞、残留溶洞、石柱、石芽、钙华堆积、溶沟为主
曲水	3750 左右	以溶洞、石钟乳和针状钙华为主
玉树巴塘	3900 左右	以残留灰岩柱、石墙、穿洞、残留厚层的红色风化壳为主
盘道地区	4000 左右	石墙、石林式石芽、残峰、小型洞穴、小型石柱等
纳木错湖	4700 左右	峰林、天生桥、穿洞、孤立石柱

溶穴、岩溶泉等,溶蚀作用较弱,水流侵蚀较强,喀斯特地貌发育较弱,属于弱发育喀斯特带;在海拔 3 500~4 300 m 之间,主要发育溶洞、石林或石芽,小规模溶蚀崖、溶蚀槽、落水洞、溶穴、残留红色风化壳、残留石墙、垂向溶蚀裂隙,明显受到风化作用改造,岩溶作用一般,属于中等发育喀斯特带;在海拔 4 300 m 以上主要发育大规模溶蚀崖、溶蚀峰丛、峰林、峰丛洼地、落水洞、漏斗、洞穴等,岩溶作用较强,属于强发育喀斯特带^[9, 14, 32, 34, 36, 38-40]。

3.3 极高海拔区

极高海拔喀斯特发育区岩性以灰岩为主并且夹杂有泥灰岩,喀斯特地貌主要是古近纪、新近纪古喀斯特地下部分经后期剥蚀形成的,在更新世和全新世也有少部分发育(表 4)。在海拔高程 4 600 m 以上主要发

育表面粗糙、顶部尖锐的残留塔状灰岩石峰;根部的宽度和长度大于高度,呈锥状,相对高差达 50 m 的残留灰岩残丘;锥体外形浑圆,相对高度一般约为 10 m 的残留型石林式石芽;墙顶起伏不平,有的呈锯齿状,相对高差达 10~20 m 的石墙;中等大小的溶洞,较小的溶痕、溶沟以及灰岩碎屑物质堆积等。喀斯特受到风化剥蚀作用明显^[35, 38]。

因此青藏高原地区在不同海拔高程下呈现出不同的喀斯特地貌形态(图 3)。中海拔区溶蚀形态以峰丛、溶蚀洼地、溶沟、溶槽、溶洞、残余塔状石柱为主,沉积形态主要是红色风化壳;高海拔区溶蚀形态以溶蚀崖、峰丛、溶洞、石柱、溶槽、落水洞、溶穴、峰林、天生桥、石林、石芽、溶沟、溶痕为主,沉积形态主要是钙华堆积、瘤状或葡萄状钙化堆积、灰岩碎屑物质堆积、残留风化

表 4 极高海拔区典型喀斯特地貌特征
Table 4 Characteristics of typical karst geomorphology in very high altitude areas

地区	高程/m	岩溶地貌形态特征
协格尔	4900 以上	以残留塔状灰岩石峰、灰岩残丘、石墙、溶洞为主
斋如隆子流域的霍热拉喀一带	5000~5200	广泛发育溶蚀、冰蚀洼地、落水洞、角峰等
安多北山	4600~5125.7	混圆或塔状石峰、灰岩碎屑物质堆积、残留型石林式石芽、微型石芽为主
昆仑山	5000 左右	以石峰、石林、残林、洞穴为主
北羌塘高原	5700~5800	峰林式残林、石墙

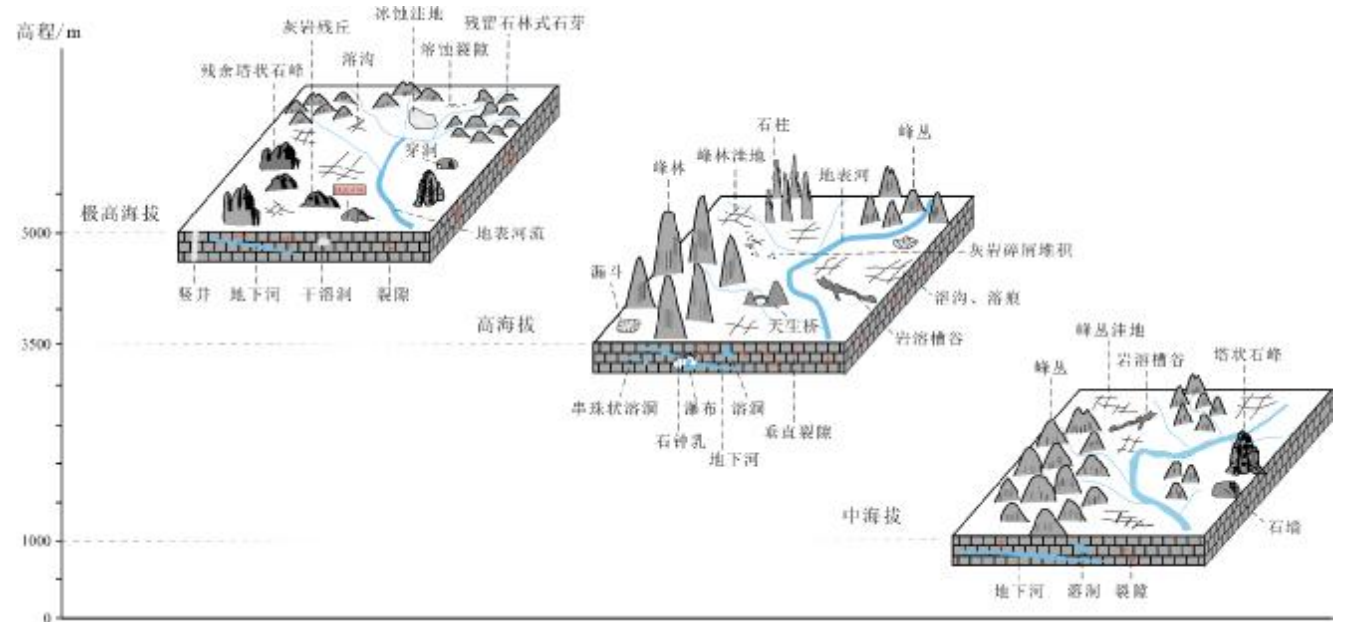


图 3 青藏高原不同高程喀斯特地貌形态
Fig. 3 Karst geomorphology at different elevations in Qinghai-Tibet Plateau

壳红土;极高海拔区溶蚀形态以灰岩残丘、石墙、冰蚀洼地、角峰、大型落水洞、雨痕和细小溶痕、溶沟为主,沉积形态主要是颗粒碎屑、石灰角砾。

4 结语

喀斯特地貌作为地貌学研究的十分重要的一部分,关于其分类以及形态特征一直是地貌学研究的重点、热点问题。喀斯特地貌的形成不是受单一的某种因素控制,而是在多种因素控制下共同形成。本文通过对青藏高原不同高程喀斯特地貌类型和形态特征进行研究综述和实例分析,认为青藏高原地区喀斯特地貌在地层岩性、构造运动、气候等因素的影响下形成复杂多样的喀斯特地貌。喀斯特地貌标志性高程清晰,在不同高程处地貌形态、发育特征差异性明显。喀斯特地貌的演化过程是复杂的,分布的环境也是多样的,如何精细地揭示各个因素在喀斯特地貌形成、演化过程中发挥的作用还需要进一步深化。

参考文献(References):

- [1]中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 欧阳孝忠. 岩溶地质[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 1-2.
Guiyang Survey and Design Institute of China Hydropower Consulting Group, Ouyang X Z. Karst geology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2013: 1-2. (in Chinese)
- [2]赵尔强. 辽东半岛东部海湾的滨海岩溶的初步研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.
Zhao E Q. Preliminary research on littoral karst of eastern bay of Liaodong Peninsula[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2008.
- [3]毛邦燕, 康小兵, 黄豪擎, 等. 青藏高原东缘梯度带可溶岩地层特征[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(3): 54-58.
Mao B Y, Kang X B, Huang H Q, et al. Characteristics of the karst strata in the gradient zone of the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, 31(3): 54-58.
- [4]Jiang G H, Chen Z, Siripornpibul C, et al. The karst water environment in Southeast Asia: Characteristics, challenges, and approaches[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(1): 123-135.
- [5]卢耀如. 喀斯特发育机理与发展工程建设效应研究方向[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 419-432.
Lu Y R. Karst development mechanism and research directions of developing engineering construction effect [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 419-432.
- [6]袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.
Yuan D X, Zhang C. Karst dynamics theory in China and its practice [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 355-365.
- [7]马剑飞, 付昌昌, 张春潮, 等. 康定北部高原构造岩溶发育特征与地下水径流带识别[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 288-299.
Ma J F, Fu C C, Zhang C C, et al. Plateau tectonic karst development characteristics and underground conduits identification in the northern part of Kangding[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 288-299.
- [8]王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 1-8.
Wang Y. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 1-8.
- [9]王杜江. 藏东南某隧址区高原型岩溶发育特征及工程影响[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 996-1006.
Wang D J. Development characteristics of plateau karst and its influences on a tunnel area in southeast Tibet[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2021, 41(6): 996-1006.
- [10]王宇, 王梓激. 岩溶地下水富集的地貌组合形态[J]. 中国岩溶, 2015, 34(4): 314-324.
Wang Y, Wang Z W. Patterns of karst geomorphologic combinations in areas with rich groundwater[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(4): 314-324.
- [11]周宇成, 陈清华, 孙珂, 等. 湖南地区岩溶分布特征及其发育模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 163-173.
Zhou Y C, Chen Q H, Sun K, et al. Distribution characteristics and development model of karst in Hunan area [J]. Journal of China University of Petroleum, 2020, 44(4): 163-173.
- [12]Breitenbach S F M, Cai Y J, Kwiecien O, et al. A high-altitude cave as an example of active karstification in the eastern Tibetan Plateau [J]. Cave and Karst Science, 2014, 41(3): 132-137.
- [13]卢耀如. 中国喀斯特地貌的演化模式[J]. 地理研究, 1986, 5(4): 25-35.
Lu Y R. Models of karst geomorphological evolutions in China [J]. Geographical Research, 1986, 5(4): 25-35.
- [14]崔之久, 洪云, 高全洲, 等. 青藏高原东北部古喀斯特过程与环境[J]. 地理学报, 1996, 51(5): 408-417.
Cui Z J, Hong Y, Gao Q Z, et al. The process and environment of polaeokarst in the northeast area of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(5): 408-417.
- [15]许模, 毛邦燕, 张广泽, 等. 青藏高原东缘梯度带大气 CO₂ 含量与岩溶发育相关性初探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(6): 724-732.
Xu M, Mao B Y, Zhang G Z, et al. A preliminary study on correlation of atmospheric CO₂ concentration and karst development in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),

- 2020, 47(6): 724–732.
- [16]高全洲, 陶贞, 崔之久, 等. 青藏高原古岩溶的性质、发育时代和环境特征[J]. 地理学报, 2002, 57(3): 267–274.
- Gao Q Z, Tao Z, Cui Z J, et al. The nature, formation age and genetic environment of the palaeokarst on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(3): 267–274.
- [17]魏晓椿. 青藏高原北缘新生代构造隆升和气候变化的耦合响应——来自塔里木盆地南缘的沉积记录[D]. 南京: 南京大学, 2017: 1–12.
- Wei X C. Coupled response of the Cenozoic tectonic uplift and climate change on the Northern Tibetan Plateau: Sedimentary records from the southern margin of the Tarim Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017: 1–12.
- [18]李兰. 青藏高原湖泊演化及生态环境效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- Li L. Study on the lake evolution and eco-environmental effects of lakes in the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [19]申晓谦. 基于卫星遥感的青藏高原不同海拔植被绿度变化分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Shen X Q. Investigating vegetation greenness variation along altitudes in Qinghai-Tibetan Plateau based on satellite remote sensing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [20]肖序常. 开拓、创新, 再创辉煌——浅议揭秘青藏高原之秘[J]. 地质通报, 2006, 25(S1): 15–19.
- Xiao X C. Making innovation in a pioneering spirit and scoring more glorious achievements: A preliminary discussion on the 1:250 000 regional geological mapping in the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(S1): 15–19.
- [21]刘训, 李廷栋, 耿树方, 等. 中国大地构造区划及若干问题[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1024–1034.
- Liu X, Li T D, Geng S F, et al. Geotectonic division of China and some related problems[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1024–1034.
- [22]朱学稳. 西藏高原喀斯特的性质及“残余峰林”质疑[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 220–228.
- Zhu X W. The nature of Tibet Plateau karst and the query concerning “relict Fenglin karst”[J]. *Carsologica Sinica*, 1994, 13(3): 220–228.
- [23]中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 148–247.
- Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Karst research in China[M]. Beijing: Science Press, 1979: 148–247. (in Chinese)
- [24]李德文, 崔之久, 刘耕年. 青藏高原古岩溶的存在及其与东邻地区岩溶的对比[J]. 中国岩溶, 1999, 18(4): 25–34.
- Li D W, Cui Z J, Liu G N. Existence of palaeokarst on Tibet Plateau and its correlation with the karst of the eastern district[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(4): 25–34.
- [25]袁道先. 中国西南部的岩溶及其与华北岩溶的对比[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 352–361.
- Yuan D X. Karst in Southwest China and its comparison with karst in North China[J]. *Quaternary Sciences*, 1992, 12(4): 352–361.
- [26]孙鸿烈. 青藏高原研究的新进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 536–542.
- Sun H L. Recent advance in studies on Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Advances in Earth Sciences*, 1996, 11(6): 536–542.
- [27]周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌遥感解析与制图[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 7–52.
- Zhou C H, Cheng W M, Qian J K. Digital geomorphological interpretation and mapping from remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2009: 7–52.
- [28]韩海辉, 王艺霖, 李健强, 等. 雷达地形测绘 DEM 用于青藏高原地貌分类[J]. 遥感信息, 2015, 30(4): 43–48.
- Han H H, Wang Y L, Li J Q, et al. Classification of Tibetan Plateau landform using SRTM-DEM[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(4): 43–48.
- [29]严钦尚, 曾昭璇. 地貌学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 88–102.
- Yan Q S, Zeng Z X. Geomorphology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985: 88–102. (in Chinese)
- [30]卢耀如. 中国岩溶——景观·类型·规律[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 15–59.
- Lu Y R. Karst in China: Landscapes, types and regularities[M]. Beijing: Geology Press, 1986: 15–59. (in Chinese)
- [31]崔之久. 青藏高原的古岩溶[J]. 自然杂志, 1979, 2(9): 550–551.
- Cui Z J. Paleokarst of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Nature*, 1979, 2(9): 550–551. (in Chinese)
- [32]王富葆. 青藏高原上的喀斯特(摘要)[J]. 中国岩溶, 1990, 9(3): 277–278.
- Wang F B. Karst in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 1990, 9(3): 277–278. (in Chinese)
- [33]章典, 师长兴. 青藏高原的大气 CO₂ 含量、岩溶溶蚀速率及现代岩溶微地貌[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 566–570.
- Zhang D, Shi C X. CO₂ partial pressure, karst dissolution rate and karst micro-landforms on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(4): 566–570.

- [33]王晓东, 田伟, 张雪艳. 宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 329–338.
- Wang X D, Tian W, Zhang X Y. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements for groundwater in the Ningxia Region of China[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 329–338.
- [34]刘瑞平, 徐友宁, 张江华, 等. 宁东煤炭基地梅花井矿区地下水三氮特征及成因[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2192–2198.
- Liu R P, Xu Y N, Zhang J H, et al. The evaluation and influencing factors of groundwater tri-nitrogen pollution in the Ningdong coal base, exemplified by Meihuajing field [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(12): 2192–2198.
- [35]邹环, 王金生, 赖德胜. 松花江吉林段沿岸浅层地下水硝酸盐污染特征和影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 6–11.
- Huan H, Wang J S, Lai D S. Characteristics and influencing factors of nitrate pollution in shallow groundwater at Jilin section of Songhua River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 6–11.
- [36]韩术鑫, 王利红, 赵长盛. 内梅罗指数法在环境质量评价中的适用性与修正原则[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2153–2160.
- Han S X, Wang L H, Zhao C S. Applicability and modifications of the Nemerow index method in evaluating environmental quality [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(10): 2153–2160.
- [37]左朝晖. 北京东北部平原区地下水氮素污染源解析及其贡献率研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2020.
- Zuo Z H. Source analysis and contribution rate of groundwater nitrogen pollution in the plain area of northeast Beijing[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2020.
-
- (上接第 123 页/Continued from Page 123)
- [34]李向全, 马剑飞, 张春潮, 等. 川藏铁路格聂山和察雅段构造岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 34–45.
- Li X Q, Ma J F, Zhang C C, et al. Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan-Xizang Railway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(5): 34–45.
- [35]李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 1–12.
- Li J J. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(1): 1–12.
- [36]康小兵, 杨四福, 管振德, 等. 川西高原巴塘地区可溶岩地层分布与岩溶地貌发育特征[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 381–388.
- Kang X B, Yang S F, Guan Z D, et al. Distribution of soluble rock strata and development of karst landforms in the Batang area, West Sichuan Plateau[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 381–388.
- [37]陈洪凯, 李古均. 白龙江流域的古喀斯特地貌及形成时代探讨[J]. 科学通报, 1992, 37(15): 1405–1407.
- Chen H K, Li G J. Paleo-karst landform and its formation age in Bailong River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(15): 1405–1407. (in Chinese)
- [38]袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 70–81.
- Yuan D X. Karst science in China [M]. Beijing: Geology Press, 1994: 70–81. (in Chinese)
- [39]高全洲, 崔之久, 刘耕年, 等. 晚新生代青藏高原岩溶地貌及其演化[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 85–90.
- Gao Q Z, Cui Z J, Liu G N, et al. Late Cenozoic karst landforms on Qinghai-Tibet Plateau and their evolution [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 85–90.
- [40]郝呈禄, 陈光庭, 赵楠. 青海省盘道地区高原岩溶地貌特征、演化及对比浅析[J]. 青海国土经略, 2020, 29(6): 57–64.
- Hao C L, Chen G T, Zhao N. Analysis on characteristics, evolution and comparison of karst landform in Pandao area of Qinghai Province [J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources, 2020, 29(6): 57–64. (in Chinese)