


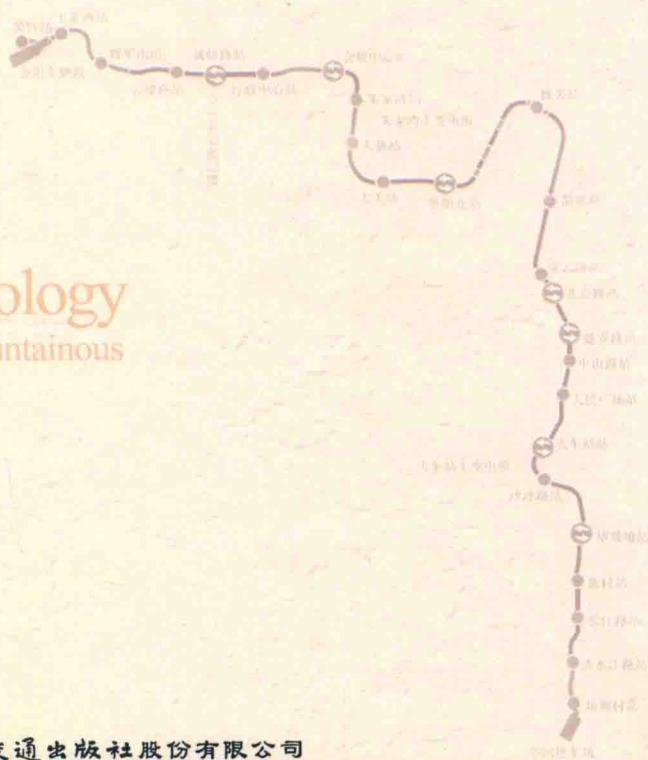


“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

贵阳喀斯特地貌山地城市轨道交通 修建技术创新与实践

李红卫 张乾国 李 辉 陈发达 等  著

Innovation and Practice of Urban Rail Transit
Construction Technology
in Karst Landform Mountainous
Areas of Guiyang



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

贵阳喀斯特地貌山地城市轨道交通 修建技术创新与实践

李红卫 张乾国 李辉 陈发达 等

著

Innovation and Practice of Urban Rail Transit

Construction Technology

in Karst Landform Mountainous
Areas of Guiyang



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书依托贵阳市修建的第一条城市轨道交通工程实践,开展了喀斯特地貌山地城市轨道交通修建关键技术专题研究,形成了一系列创新成果。

本书共分8章:第1章绪论,第2章轨道交通长大连续坡道安全控制关键技术,第3章喀斯特地貌山地城市轨道交通区间隧道岩溶处理关键技术,第4章喀斯特地貌山地城市轨道交通区间隧道悬臂掘进机工法,第5章喀斯特地貌山地城市轨道交通下穿建(构)筑物关键技术,第6章喀斯特地貌山地轨道交通车站修建创新与实践,第7章核心区轨道交通施工期间交通组织,第8章贵阳轨道交通1号线修建技术创新与实践。

本书可供从事城市轨道及相关行业的工程建设人员学习、参考,也可以作为相关专业高校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

贵阳喀斯特地貌山地城市轨道交通修建技术创新与实践 / 李红卫等著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2019. 8

ISBN 978-7-114-15573-4

I. ①贵… II. ①李… III. ①岩溶地貌—山区城市—城市铁路—轨道交通—工程技术—贵阳 IV. ①U239. 5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第101607号

书 名: 贵阳喀斯特地貌山地城市轨道交通修建技术创新与实践

著 者: 李红卫 张乾国 李 辉 陈发达 等

责任编辑: 谢海龙

责任校对: 张 贺 宋佳时

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 22. 75

字 数: 501千

版 次: 2019年8月 第1版

印 次: 2019年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15573-4

定 价: 128. 00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

编审委员会

主任:李红卫 张乾国

副主任:姜筱筠 李 辉 李 焱 陈发达 周 昊 刘志宏
王 祥 吴海宝 万宗祥

委员:(排名不分先后)

陆强波 吴 华 刘伯夫 朱 兰 黄 松 赖展超
刘远明 何建枝 雷 勇 刘向远 曾 敬 陈明华
陈 俊 马振兴 耿 培 彭旭东 闫国栋 吴其全
冉 军 聂晓东 张 颢 付守洪 胡朝程 张鹏帅
高智勇 王 均 王文轩 宋战平 何明卫 饶军应
曹师铭

审查人员:赵 军 谢 颖 朱建华 刘建新 刘教林 刘 宁
邬忠虎 黄质宏

主编单位:贵阳市城市轨道交通集团有限公司

广州中咨城轨工程咨询有限公司

参编单位:中国中铁二院工程集团有限责任公司

中国中铁二十四局集团有限公司

贵州大学

昆明理工大学

中国铁建股份有限公司



我国是多山国家,山地城市发展受交通制约比较大,急需改善交通条件。城市轨道交通具备快捷、准点、舒适的特点且运量较大,对解决山地城市交通拥堵和引导城市发展具有十分重要的意义。

喀斯特山地城市轨道交通建设难度极大,被喻为“在刀尖上跳芭蕾”和“在城市心脏动手术”,众多参与建设者曾感叹“建地铁难,西部建地铁更难,贵阳建地铁更是难上加难”。建设难度主要表现在:山地城市地形起伏,地面高差大、地势变化急剧,地下线路敷设坡度大且坡多、坡长;沿线岩溶发育强、岩溶见洞率高,且遇上大型溶洞、溶腔、暗河等可能性大,岩溶探查及处理难度大;道路曲折狭窄,而建筑物密集,线路频繁下穿(侧穿)建(构)筑物,施工难度大、风险高;老城区路窄且交通拥堵,工程实施期间交通组织不易。

贵阳市作为典型的喀斯特地貌山地城市,其轨道交通1号线于2009年开始试验段建设,2013年全线开工建设,并于2017年12月首通段开通初期运营,2018年全线开通初期运营,在多年的工程建设过程中,建设者们克服了多项建设难题:(1)长大连续坡度超过设计极限,其中贵阳北站到安云路站区间段,在8.5km范围形成最大纵坡为28%的连续长大坡道;(2)强发育岩溶多、岩溶段占比和岩溶见洞率高,1号线通过灰岩、白云岩类可溶岩地层的长度约占线路长度75%,全线地质钻孔5878个、发现溶洞1196个(部分为串状溶洞)、见洞率为20.3%;(3)引进悬臂掘进机施工法,安全、顺利完成强发育岩溶富水区间隧道施工;(4)成功多次穿越老城区密集建筑物群、河流、铁路及火车站站房;(5)成功解决了富水岩溶区域车站、明暗结合车站修建及大拱盖法施工车站修建的相关难题;(6)通过区域及沿线交通分流组织、公共交通组织方案调整等措施,较好解决了工程施工期间交通问题。

近年来,我国喀斯特山地城市轨道交通建设越来越多,面临的困难与挑战日益突出。本书基于贵阳轨道交通1号线工程实践,系统总结了喀斯特地貌山地城市轨道交通修建关键技术,解决了诸多技术难题,形成了众多创新成果,其中很多具体的经验和做法值得广大技术人员学习借鉴,可为今后同类工程建设提供宝贵的参考。

仅此为序。

中国工程院院士

2019年7月

随着城市现代化进程的不断加速,城市规模同步不断扩大,城市居住人口亦不断增多,对交通设施的需求也在不断增加。轨道交通作为解决城市交通问题、建设可持续性发展城市的有效手段,其建设规模、速度均在国内处于一个高速发展的阶段,越来越多的城市加入了轨道交通建设行列。贵阳轨道交通1号线作为贵阳市修建的第一条轨道交通,由于城市的特殊环境,在建设过程中会遭遇特殊地形地貌、复杂地质条件、老城区、既有建(构)筑物和交通设施、环境保护等因素影响,给工程正常推进带来一定的困扰。本书结合贵阳市轨道交通1号线工程建设实践,针对工程实施过程中遇到的重难点问题总结经验,提出了适应喀斯特地貌山地城市修建城市轨道交通的技术创新和应对措施,希望能给广大的读者和同行提供参考。

本书依托贵阳轨道交通1号线工程,紧紧围绕喀斯特地貌山地城市复杂环境条件下轨道交通工程修建技术,对喀斯特地貌山地城市轨道交通修建过程中涉及的特殊地形地貌、地质条件和形成的新工艺、新技术等技术创新进行了总结。本书分为8章,主要对喀斯特地貌山地城市的特点、贵阳轨道交通1号线工程的重难点及关键技术进行总结;结合轨道交通1号线贵阳北站到安云路站长大连续坡道情况,对轨道交通长大连续坡道安全控制关键技术进行系统研究和总结;结合轨道交通1号线岩溶分布、治理情况,对喀斯特山地城市轨道交通区间隧道岩溶处理关键技术进行深入研究和总结;结合轨道交通1号线悬臂掘进机应用情况,对喀斯特山地城市轨道交通区间隧道悬臂掘进机工法进行了全方位研究和总结;结合轨道交通1号线工程下穿建(构)物情况,对喀斯特地貌山地城市轨道交通下穿建(构)筑物关键技术进行了建设性的研究和总结;结合轨道交通1号线延安路站、蛮坡站、安云路站等站点,从设计到施工的情况对喀斯特地貌山地城市轨道交通下穿建(构)筑物关键技术进行详尽论述和研究;结合轨道交通1号线工程实施期间的交通疏解情况,对核心区轨道交通施工期间交通组织进行了深入细致研究。

承蒙我国著名地铁工程专家、深圳大学特聘教授、中国工程院院士陈湘生在百忙之中审阅本书并为之作序,同时向付出辛勤劳动的全体参建者、专家、学者以及本书全体参编人员、审稿专家表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验有限,不妥之处敬请读者批评指正。

作者

2019年7月



贵阳轨道

第 1 章 绪 论

1.1 喀斯特地貌山地城市轨道交通建设	001
1.1.1 喀斯特地貌山地城市	001
1.1.2 喀斯特地貌山地城市轨道交通建设特点	002
1.2 贵阳城市轨道交通规划	002
1.2.1 地貌特征	002
1.2.2 城市规划	003
1.2.3 城市轨道交通规划	004
1.3 贵阳轨道交通 1 号线工程概况	007
1.3.1 线路概况	007
1.3.2 地形与地貌	009
1.3.3 气象条件	009
1.3.4 河流水文	009
1.3.5 工程地质条件	010
1.3.6 水文地质	012
1.4 贵阳轨道交通 1 号线建设难点	013
1.4.1 长大连续坡度超过设计极限	013
1.4.2 强发育岩溶多和岩溶段占比高	013
1.4.3 特殊周边环境制约和影响施工	013
1.4.4 复杂条件下频繁下穿建(构)筑物	013
1.4.5 道路资源紧张和交通组织难度大	014
1.5 贵阳轨道交通 1 号线建设关键技术	014
1.5.1 长大连续坡道安全控制	014
1.5.2 车辆再生制动及能量回收应用	014
1.5.3 涌水、突泥强发育溶洞探测和治理	014
1.5.4 城市轨道交通悬臂掘进机法施工	015
1.5.5 城市岩溶区间隧道下穿建(构)筑物	015

1.5.6	复杂地形条件下车站设计和施工	015
1.5.7	核心城区施工期间交通组织管理	016

第2章 轨道交通长大连续坡道安全控制关键技术

2.1	长大连续坡道轨道交通线路优化设计	017
2.1.1	展线方案	017
2.1.2	展线方案研究结果	019
2.2	长大连续坡道运营安全技术	021
2.2.1	长大坡度段配线设置	021
2.2.2	运营安全保障	022
2.2.3	车辆选型与适应性研究	023
2.2.4	车辆制动关键技术研究	025
2.2.5	信号系统安全保障措施	027
2.2.6	长大区间疏散与救援	032
2.2.7	事故通风与排烟	033
2.2.8	水消防	038
2.2.9	应急照明与疏散指示	039
2.3	长大连续坡道上轨道稳定性研究	039
2.3.1	轨道稳定性设计	040
2.3.2	轨道稳定性分析	044
2.4	山地城市轨道交通长大连续坡道节能技术运用	045
2.4.1	再生制动技术	045
2.4.2	列车再生制动能量吸收方案	046
2.5	供电分区内上、下行并联直流牵引网结构研究	050
2.5.1	问题提出	052
2.5.2	设计思路和方法	052
2.5.3	关键技术	053
2.5.4	能量消耗分析研究	054
2.6	小结	054

第3章 喀斯特地貌山地城市轨道交通区间隧道岩溶处理关键技术

3.1	贵阳轨道交通1号线溶洞分布情况和岩溶特点	056
3.1.1	贵阳轨道交通1号线溶洞分布情况	056
3.1.2	贵阳轨道交通1号线岩溶特点	057

3.2	岩溶对贵阳轨道交通 1 号线建设的影响	059
3.2.1	复杂城市环境条件下岩溶对区间隧道建设影响分析	059
3.2.2	大型富水岩溶对轨道交通区间隧道建设影响分析	061
3.2.3	充填型岩溶对轨道交通区间隧道建设影响分析	063
3.3	岩溶综合探察技术及运用	065
3.3.1	贵阳轨道交通 1 号线岩溶塌陷分析	065
3.3.2	探察必要性及内容	066
3.3.3	岩溶探察方法	066
3.3.4	岩溶探察方法的运用	070
3.3.5	岩溶隧道超前综合预报方法	071
3.3.6	探察案例	077
3.4	岩溶处理关键技术	083
3.4.1	管理措施	084
3.4.2	工程措施	085
3.4.3	施工措施	086
3.5	典型岩溶处理设计和施工创新	086
3.5.1	上软下硬地层充填型岩溶处理设计和施工创新	086
3.5.2	基底隐伏岩溶处理设计和施工方案	087
3.5.3	富水岩溶发育隧道设计和施工创新	089
3.6	富水岩溶强发育处治方案研究	094
3.6.1	安全隔水层厚度研究	094
3.6.2	岩溶强发育富水隧道涌水、突泥施工处治研究	096
3.7	小结	101

第 4 章 喀斯特地貌山地城市轨道交通区间隧道悬臂掘进机工法

4.1	矿山法爆破施工存在的问题	103
4.1.1	光面爆破施工	103
4.1.2	水压爆破施工	106
4.1.3	秒差爆破	109
4.1.4	矿山法爆破施工缺点	112
4.2	区间隧道悬臂掘进机法论证和工程应用	113
4.2.1	国内外区间隧道悬臂掘进机法施工现状	113
4.2.2	悬臂掘进机组成	114
4.2.3	悬臂掘进机设备参数	116
4.2.4	区间隧道悬臂掘进机法论证	118

4.3	悬臂掘进机法开挖方式研究	119
4.3.1	长台阶法	119
4.3.2	短台阶法	120
4.3.3	全断面法	121
4.3.4	适用性研究	121
4.4	悬臂掘进机法与其他工法比较	122
4.4.1	隧道爆破、非爆破施工机理分析	122
4.4.2	与矿山法爆破开挖比较	123
4.4.3	与冷挖施工功效比较	124
4.4.4	悬臂掘进机法优点	124
4.5	悬臂掘进机法关键技术研究	125
4.5.1	激光环指向技术	125
4.5.2	基于视觉测量的悬臂掘进机开挖定位技术探究	130
4.5.3	悬臂掘进机施工通风降尘控制技术研究	132
4.5.4	悬臂掘进机开挖施工地层变形研究	136
4.5.5	移动互联网在延安路站—中山路站区间隧道工程监测中的研究与应用	144
4.5.6	悬臂掘进机施工方案优化	149
4.5.7	强发育岩溶情况下悬臂掘进机施工分析	151
4.6	火车站站—沙冲路站区间隧道掘进机施工实例	159
4.6.1	施工准备	159
4.6.2	悬臂掘进机掘进施工人员和机械配置	159
4.6.3	悬臂掘进机切割方式	160
4.6.4	悬臂掘进机出料运输方式	160
4.6.5	悬臂掘进机施工方案	161
4.6.6	施工流程及保障措施	162
4.7	小结	163

第5章 喀斯特地貌山地城市轨道交通下穿建(构)筑物关键技术

5.1	下穿建(构)筑物概况	165
5.1.1	下穿铁路	167
5.1.2	下穿河流	168
5.1.3	下穿房屋建筑	170
5.2	区间隧道下穿既有建(构)筑物风险分析和控制措施	170
5.2.1	岩溶隧道下穿既有建(构)筑物风险分析	171
5.2.2	下穿既有建(构)筑物的主要控制措施	173

5.3	区间隧道下穿既有运营火车站关键技术	175
5.3.1	区间隧道下穿贵阳火车站概况	175
5.3.2	区间隧道下穿贵阳火车站方案	176
5.3.3	隧道下穿火车站变形控制标准	181
5.3.4	隧道下穿火车站施工措施	182
5.3.5	下穿火车站施工模拟分析	185
5.4	区间隧道下穿既有房屋建筑加固技术	191
5.4.1	整体筏基托换公园 2008 小区	192
5.4.2	下穿三鑫大厦主动托换桩基	199
5.5	区间隧道下穿南明河关键技术	214
5.5.1	下穿南明河概况	214
5.5.2	下穿南明河的施工工法选择	215
5.5.3	下穿河流施工控制	217
5.5.4	施工模拟分析	221
5.6	小结	224

第 6 章 喀斯特地貌山地城市轨道交通车站修建创新与实践

6.1	轨道交通 1 号线车站建设特点和难点	226
6.1.1	车站类型	226
6.1.2	车站建设特点分析	227
6.1.3	车站建设难点	227
6.2	富水岩溶条件下车站修建关键技术	228
6.2.1	延安路站概况	228
6.2.2	延安路站工程重点及难点	229
6.2.3	延安路站设计及施工技术	230
6.2.4	自动化监测	239
6.2.5	建筑信息模型(BIM)应用平台	241
6.3	新型车站修建关键技术	245
6.3.1	蛮坡站简介	246
6.3.2	工程重点及难点	247
6.3.3	明挖车站设计及优化	248
6.3.4	暗挖站台隧道衬砌支护设计	250
6.3.5	蛮坡站基坑冷开挖施工	251
6.3.6	暗挖站台施工关键技术	252

6.4	喀斯特山地城市轨道交通车站拱盖法修建关键技术	257
6.4.1	安云路站简介	257
6.4.2	工程重点及难点分析	258
6.4.3	拱盖法设计方案	259
6.4.4	安云路站拱盖法暗挖施工方案	273
6.5	小结	284

第7章 核心区轨道交通施工期间交通组织

7.1	贵阳市交通分析	285
7.1.1	贵阳市现状	285
7.1.2	交通基础设施	286
7.1.3	居民出行特征	288
7.1.4	公共交通现状	290
7.1.5	交通管理政策	292
7.1.6	交通运行现状	292
7.1.7	城市交通特征	294
7.2	轨道交通建设影响分析	295
7.2.1	轨道交通沿线概况	295
7.2.2	轨道线路沿线交通情况	295
7.2.3	轨道交通建设影响分析	304
7.3	轨道交通施工期间的交通组织方案	320
7.3.1	区域交通分流组织方案	321
7.3.2	沿线交通分流组织方案	322
7.3.3	公共交通调整组织方案	324
7.3.4	重要站点及施工车辆组织方案	326
7.3.5	交通组织配套工程方案	331
7.4	轨道交通施工期间宣传及实施保障	332
7.4.1	交通组织宣传工作	332
7.4.2	交通组织实施保障	335
7.5	小结	337

第8章 贵阳轨道交通1号线修建技术创新与实践

8.1	设计和施工创新与实践	339
8.1.1	长大连续坡道轨道交通线路优化设计	339

8.1.2	长大连续坡道安全控制关键技术	339
8.1.3	车辆再生制动及能量回收应用	340
8.1.4	富水溶洞处理设计和施工	340
8.1.5	悬臂掘进机法施工	341
8.1.6	岩溶区间隧道下穿建(构)筑物设计和施工关键技术	342
8.1.7	复杂地质条件下车站设计和施工关键技术	343
8.1.8	核心城区施工期间交通组织管理	344
8.2	科研和成果	345
	参考文献	346

第1章 绪 论

1.1 喀斯特地貌山地城市轨道交通建设

1.1.1 喀斯特地貌山地城市

喀斯特地貌(karst landform)是具有溶蚀力的水对可溶性岩石进行溶蚀等作用所形成的地表和地下形态的总称,又称岩溶地貌。喀斯特地貌主要表现形式是地表的溶沟、石芽、落水洞、漏斗、峰丛、峰林和孤峰,地下的溶洞、地下河和岩溶泉。

山地城市广义上指具有山地特征的城市,即城市选址和建筑在丘陵、山坡等起伏比较大的地形之上,地形断面坡度大于5%,分割深度大于25m的城市。

我国是个多山国家,山地面积约为650万 km^2 ,占国土面积超过2/3,具有山地多、耕地少的特点。我国也是世界上岩溶分布较广的国家之一,岩溶分布面积达343.3万 km^2 ,约占国土面积的35.93%。我国岩溶分布纵深横广:北方以山西为中心,主要分布在山西、山东、河南、河北一带;南方以贵州为中心,主要分布在云南、贵州、广西、四川、湖南、湖北和广东一带。其中,贵州省92.5%的面积为山地和丘陵,地貌特征主要表现为喀斯特地貌典型发育。贵州省碳酸盐岩分布广泛,出露面积达13万 km^2 ,占全省面积的73.8%。

山地城市的功能区一般分布在起伏的地形上的,使得其空间特征和环境特征都与平原城市有很大的不同。山地城市的地形一般较为狭窄,有限的台地、平坝集中了大量的城市建筑,组团式发展特点非常明显。受到自然条件的制约,其城市道路网往往采用“随坡就弯”,道路往往比较狭窄。较之同等规模的平原城市,山地城市中可供建设的用地较少,因此依着有限的可建设用地,高密度集中开发的情况较为普遍。为充分利用土地资源,在山顶、山躯、山麓等都进行开发建设。为充分利用现状地形及减少土石方量,对建筑、交通等的设计采用立体的开发模式。山地城市的人与地是矛盾统一体,人与自然是和谐共生。

我国的重庆、青岛、贵阳、遵义、攀枝花等都是典型的山地城市。山地城市发展受交通制约比较大,急需改善交通条件。城市轨道交通作为一种运量大、速度快、准时的公共交通工具,是引导山地城市发展、解决交通拥堵的重要交通方式。

1.1.2 喀斯特地貌山地城市轨道交通建设特点

1) 岩溶是影响轨道交通建设的重要因素

喀斯特地貌山地城市轨道交通沿线岩溶发育,岩溶的探察、治理技术要求高。岩溶影响喀斯特地貌山地城市轨道交通工程的工期、造价、质量、安全。岩溶处理不当,将使工程工期大大延长,造价大幅提高,甚至危及工程安全。

2) 地形地貌制约轨道交通选线

山地城市轨道交通选线受地形地貌制约主要表现在两个方面:一是地面高低悬殊,二是地势变化急剧、起伏大。由于可建设用地少,道路往往比较狭窄,几乎不具备地上敷设高架线路的条件。山地城市轨道交通的车站经常出现埋深极大的情况。

3) 地势高差大导致轨道交通坡度大

由于山地城市地势高差大,在轨道交通设计时,设站需要缓坡、连续提升高度等限制条件,纵断面设计难度很大。

4) 下穿或侧穿建(构)筑物多

山地城市的自然特点决定了线路沿线控制性的建(构)筑物种类和数量众多,主要包括桥梁、隧道、大型边坡、桩基础、管涵以及电缆、天然气管线等。区间隧道需频繁下穿或侧穿建(构)筑物。

5) 施工受周边环境影响大

山地城市轨道交通工程周边环境复杂,施工期间交通疏解压力大,需有针对性地选择施工工法。

1.2 贵阳城市轨道交通规划

1.2.1 地貌特征

贵阳位于扬子准地台的黔北台隆和黔南台陷的过渡带,其地质构造和地貌的基本格局形成于中生代燕山运动,后经喜马拉雅运动改造而形成现今的地质地貌景观。区内地层出露比较齐全,从上震旦统至第四系均有分布,且碳酸盐岩层厚,分布面积大,断裂裂隙发育,喀斯特化强烈。市区东北部多为北东向褶皱与断裂,东南部为北东、北西、东西三组破裂组合,西部多南北向复式褶皱,中部为紧密褶曲的向斜构造。

贵阳市地处云贵高原东斜坡地带,为一典型的喀斯特山地城市。山高坡陡,地形破碎,