

鐵路工程地質工作經驗
(7)

石灰岩喀斯特

鐵道部基本建設總局編



人民鐵道出版社

石灰岩喀斯特

引言

在以往铁路勘测和施工过程中，石灰岩喀斯特曾给我们工作造成了一定的困难，如湘黔线、川黔线及内昆线等地区。本文主要根据我们以往工作中所遇到的喀斯特问题，和初步取得的一些经验，对贵州、广西地区几条铁路线上的石灰岩喀斯特提出几点认识。介绍一些在铁路勘测和施工过程中对喀斯特的处理方法；此外，还简单地提出了对调查、勘探方法等问题的看法，以供参考。

一、石灰岩喀斯特与自然条件的关系

(一) 喀斯特的定义

两种观点：

(1) 把它当做“过程”如索科洛夫的定义是：“喀斯特是一种地质过程，它主要是水和水溶性透水岩层的相互作用的结果，这种过程的结果导致水溶性透水岩层的破坏”。

(2) 把它当做“结果”，也有不同的意见，如 A.A. 克鲁别尔认为喀斯特只是石灰岩中的现象；而 И.С. 舒金认为“喀斯特是地形和水文地理现象的诸般特点，这种特点仅产生在可溶性透水岩层发育的区域中”；也有莫稜两可的既代表“过程”又代表“结果”。

这里我们认为这样的定义是比较完善的：

“喀斯特是在易溶解的岩石（石膏，石灰岩等）所组成的地区中产生的特殊地形形态的总称。这些特殊地形形态的产生是地表水和地下水对这些岩石逐渐发生溶蚀作用（化学作用）的结果^①”。而是把喀斯特当作“结果”来理解，对于喀斯特发育过程则叫作“喀斯特作用”。

(二) 喀斯特的发育原因

(1) 地层岩性：

在西南各省，可溶性石灰岩到处出露，尤以贵州最为显著，自寒武纪至三叠纪大部有石灰岩之沉积。以贵州中南部为例^②，其地层分布如下：

上部	三桥统	薄层灰岩	150公尺
三叠纪 中部	青岩组	泥质灰岩	610公尺

① 地貌学讲义第六章 地下水活动与有关的地形形态，北京地质勘探学院编

② 贵州中南部地层的情况系录自“黔桂地台地层表”，中国地质学145页

	下部	玉龙山灰岩	160~500公尺
	上部	大隆組	0~ 35公尺
二疊紀		长兴灰岩	0~120公尺
		竹塘組	560公尺
	下部	茅口灰岩	40~250公尺
		棲霞灰岩	120~500公尺
		含煤組	0~ 50公尺
	上部	馬平灰岩	0~ 30公尺
石炭紀	中部	威宁統 (灰岩)	15~400公尺
	下部	上司組 (灰岩)	450公尺
		旧司組 (灰岩)	210~240公尺
		湯耙沟組	190公尺
		革老河組 (灰岩)	280公尺
	上部	茅寨統	
		堯梭灰岩	140~340公尺
		堯域坡組	100~200公尺
泥盆紀	中部	独山統	
		鸡窩寨灰岩	100~200公尺
		宋家桥砂岩	0~150公尺
		鸡泡灰岩	40~200公尺
		邦寨砂岩	10~350公尺
	下部	下泥盆系	0~ 30公尺
志留紀		新滩系	500~700公尺
	中部	艾家山統	
奥陶紀		宝塔灰岩	20~ 50公尺
		楊子貝組	120~170公尺
	下部	牛河統	160~340公尺
	中部, 上部	鐘山灰岩 (婁山关灰岩)	250~500公尺
	下部	下寒武系	
		金頂山組	210公尺
		明心寺組	300公尺
		牛蹄塘頁岩	35~ 80公尺

由以上可看出, 石灰岩几乎占全部岩层的70%左右, 各时代之石灰岩层在川黔綫上除缺石炭紀者外其他几乎全有出露; 湘黔綫則以石炭紀、二疊紀为最显著。石灰岩由于岩性不同而影响溶解的速度, 一般的含有泥质、白云质、砂质的薄层的要比純淨的結晶质的或含化石特多的介壳石灰岩溶解要慢些, 二疊紀厚层的、块状的且多含方解石脉的石灰岩多具有着大的溶洞、暗河, 但是应当提出, 单独岩性并不能决定



图1 在不同层位情况下石灰岩
上喀斯特的发展



图 2

喀斯特是否发育，还要考虑其他因素(如节理，构造水流)。例如夔山关前后20公里砂质灰岩喀斯特也非常发育。岩层的产状对喀斯特的发展具有一定关系，Н.И. 尼古拉也夫在“关于喀斯特形态发展的进化及构造因素的意义”的论文中特别注意地层层位在各种喀斯特形态的发展中所起的作用。

岩层水平分布时，喀斯特地形的特点是沿着溶斗的、井的和其他相当对称形态的主要裂隙的方向发展，地下水的运动主要是水平的(图1)^①。层位垂直时，岩层露出地表，但对水的作用是不相同的，而喀斯特作用局限于最易溶解岩石的出口线上，造成沿着岩层走向伸展的漏斗和溶沟(图2)；

层位倾斜时造成与上述情况中同样的形态(图3)。根据Д.В. 雷日科夫书中证明这种论点并不是如此的，而是“溶洞”的发展与地质构造和岩层的层位条件无关。在川黔线上，实测的溶洞也可以说明这一点，但是我们认为在石灰岩的夹层中如石灰岩夹有頁岩或者是石灰岩的层理(层理是沉积时形成可以认为是一种紧密的接触面)对于水流的侵蚀具有一定的影响。例如湘黔线上所见到的。上壩地区顺着倾斜方向发育的喀斯特，在顶部有溶沟落水洞顺倾斜向下，在底部有溶洞水流出，落水洞的水流沿节理和层面互相交替降入溶洞，因此在喀斯特的水流侵蚀过程中，层理对于水流也有局部的影响。



图 3

(2) 地质构造：

地质构造对于石灰岩喀斯特的形成有一定的影响。例如黔桂地台(图4)，经燕山运动，即已具有目前地形轮廓。构造上一般是宽闊背斜，并往往成为穹窿层，其间参杂一些窄小的盆地，经过喜马拉雅运动之后，也发生小背斜和向斜构造。主要的有大夔山折皱，位于黔北桐梓一带，其北即是四川地台，往西即是一穹窿，其一是威宁弧，是由北东走向的威宁黑石头大背斜，以及北西走向的威宁水城大背斜组成的，在威宁附近构成一尖锐的弧形，轴部古地层为下石炭系地层。在湘黔线上贵阳都匀独山，则为南北向的背斜。岩层其透水性决定于裂隙的多少，而节理、裂隙、

① 根据“普通水文地质学”245页 阿·麦·欧维奇尼柯夫



图4 黔桂地台构造线图
〔根据常隆庆, 杨鸿达 中国地质学〕

断层则又是地质构造的产物,“层理”由于是在沉积时形成的,是紧密的;节理裂隙是后来产生的,要比层理更易透水。背斜穹隆的轴部是张力节理分布最多的地方,最易透水,因而也最容易形成喀斯特。如:黎湛线郁江南岸地区,受兴业大背斜影响形成向斜层,河的北岸岩层层理为北 30° 西/ 19° 南及北 70° 西/ 15° 南(距河的北岸约四公里之石炭岩露头),南岸岩层层理为东 17° 北,故大致以河的北岸为向斜轴部;而南岸岩层因受挤压有局部折皱,节理发达,在此段形成东西方向的破碎带。

再以威宁草海为例:

草海位于威宁城西,东西向长10.5公里,南北向长5.5公里,地势低洼周围平坦开阔,环周丘陵,稍有起伏,谷丘间相对高度15~25公尺,海拔2180公尺,再向外丘陵陡起,相对高差50公尺以上。总的来说是西南高,东北低,位于威宁弧背斜

部分，为四条水的分水岭。向北洛泽河即发源于草海，向西为牛欄江一支流，向东为烏江，向南为南盘江（紅水河）之上源（图5）。

草海中阳关山附近，即有以前落水洞之遺跡，水深6公尺，一般的仅深0.5~1.0公尺；草海底有泥炭层，依照当地地質构造及地貌来看，在背斜的軸部，处于分水岭地形，由于裂隙多，水流的溶蚀，上部石炭紀的馬平石灰岩、威宁灰岩，相繼被溶蚀掉，成低洼盆地，漏斗滿布；底部石炭紀下部的夹頁岩层的石灰岩較之上中部石灰岩溶解要慢。在淤积物堵塞了地下水通道后，水流不能完全宣泄而积水成湖，成为喀斯特湖盆地，本地称之为“草海”。

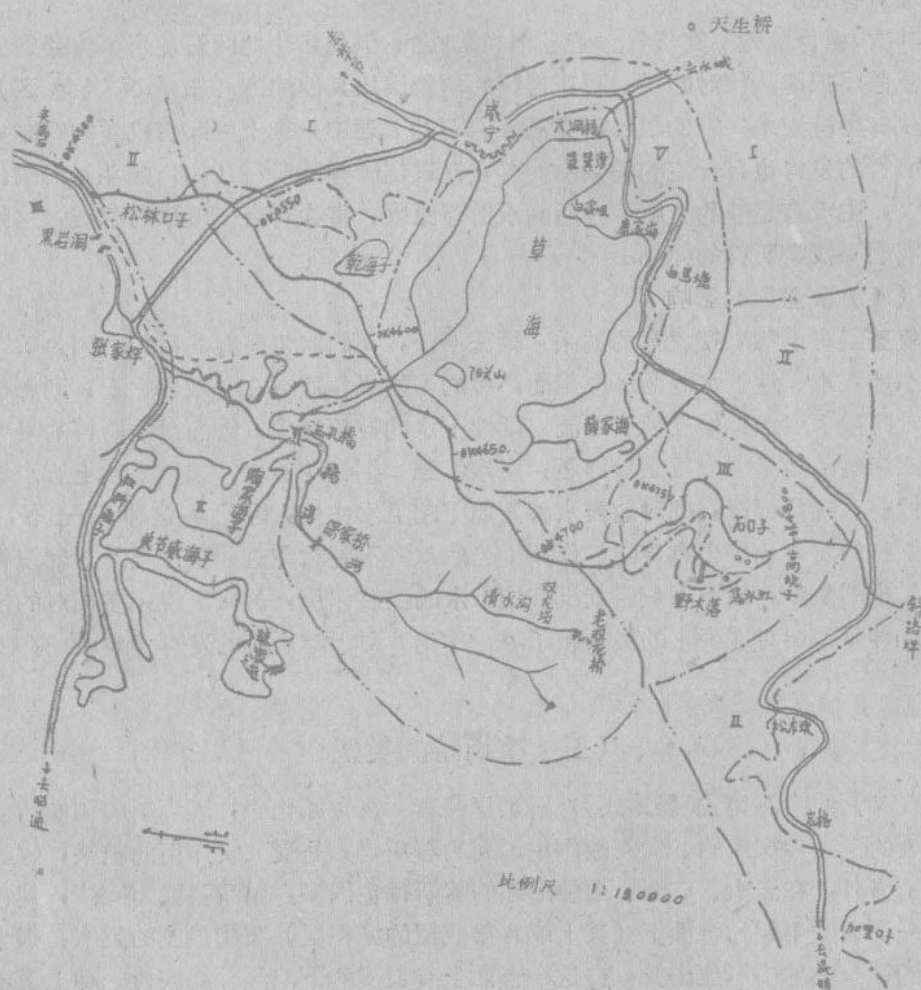


图5 威宁草海平面图

威宁喀斯特分区

I 石林或斗淋地区

II 陷穴或漏斗地区

III 溶洞或暗河地区

IV 椭圆碟形盆地

喀斯特湖及滨湖区

——定测线

- - - 初测线

——草测线

- · - · - 分区线

(3) 气候与植物:

云貴地区属亚热带型气候, 长年温湿, 鮮見冰雪, 如貴阳一月份平均气温为 4.2°C 。

由于寒暖两气团常在两省相遇, 云雨很多, 加以地形影响, 气团不易前进, 延长了雨期, 如: 貴阳在一年中阴雨日数占 260 天, 降雨量大部地区都在 1000~1500 毫米, 大致东南多于西北 (如: 榕峯为 2109 毫米, 貴阳为 1218 毫米), 而威宁由于海拔高 (2180 公尺), 温度变化大 ($-5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{C}$), 年雨量仅 1000 毫米, 但是蒸发量則为 1400 毫米, 雨季集中于 5~8 月。这样的气温, 对于石灰岩的喀斯特的发育极为有利。

其次, 植物复盖层在云貴一带是相当繁盛的, 但是貴州地区石灰岩多为暴露式, 土的复盖层很薄。相对的說, 石灰岩区的植物层比其他地方 (如砂頁岩地区) 稀少, 仅有稀疏灌木, 它的根部常穿插在岩石的节理中, 加上根部有机酸的腐蚀, 对于喀斯特的发育也有一定的关系。另外, 在貴州一些喀斯特 (如: 漏斗, 溶洞出口附近), 由于有足够的土层、合适的水份等原因, 常生有类似蘆葦的草类, 这就常成为我們寻找喀斯特的标誌。

(4) 复盖层的影响

复盖层对于喀斯特发育的关系, 說法不一, 我們认为是有关系的。因为喀斯特是由于地表水、地下水的循环作用而产生的, 如果复盖层在石灰岩之上, 則影响着地表水向地下渗透, 增加地表逕流, 則地下水的补給减少, 因而对喀斯特的发育具有一定影响。如果上复层是砂卵石, 透水性强, 則影响不大; 如果是粘土质土壤, 透水性弱, 并且很厚, 則对地表水渗入地下起阻水作用, 因此在这种情况下, 对于喀斯特的发育也多少有着防护作用。当然这并不是說在这种复盖层之下就沒有喀斯特; 也不是說, 地下石灰岩就沒有地下水的侵蝕作用, 这只是說, 在相对的情况下, 这种复盖层对地表水的渗入起了阻止作用, 对于喀斯特的发育多少是有影响的。

(三) 喀斯特的类型

(1) 地中海型式(暴露式): 石灰岩裸露, 沒有风化壳, 因而土壤和植物复盖是很少的。这种裸露的、受侵蝕作用影响的石灰岩, 是受气候作用的结果, 像威宁地区。另外, 在云南、广西, 这种形态的喀斯特也很多, 如“石林、斗淋”, 其特征是在一个大致平緩的台面上 (其上或有第四紀的沉积层) 突起很多的尖峯, 很少是相連的 (一般称山不連山), 在这个台面上有很多的下陷漏斗, 成为一种上下不对称的地形。

(2) 中欧型式: 有风化复盖层, 风化产物的搬运比喀斯特发育較慢, 即被厚的殘积层所复盖, 地表上多被腐植土和植物所布满 (有些地方还可以有森林), 像广西西部。

(3) 中俄罗斯型式: 主要特征是被非可溶性沉积岩所复盖, 像华北的奥陶紀

石灰岩。

此外，陈述彭将我国西南区喀斯特分为七个区，兹介绍如下：

- (1) 滇东石林湖盆区；
- (2) 贵州峡谷暗河区；
- (3) 红水河上游圆筒峯林区；
- (4) 越边围屏甬道区；
- (5) 桂江槽谷峰林区；
- (6) 柳江平台孤峯区；
- (7) 郁江低地残丘区。

在川黔綫、湘黔綫所经过的地区大多数位于贵州峡谷暗河区，那里溶洞、暗河、天生桥是相当多见的，河谷多呈深切峡谷，像烏江、南盘江，下切深达300~500公尺。

二、石灰岩喀斯特发展的一些规律

(一) “侵蚀基准面”和“溶蚀基准面”

侵蚀作用的含义是相当广的，它包括水在地面上作面的洗刷作用和水流比较集中的冲刷作用；也有由于地下水通过岩石孔隙把细小颗粒冲走的潜蚀现象；以及由于水溶液的溶解作用。综合的讲，侵蚀作用包含着水在地面下或地面上对岩石的机械和化学的破坏作用。溶蚀作用这个概念是属于侵蚀作用的范畴的，对于石灰岩喀斯特的形成，水溶液的化学溶解作用占有相当的比重。但是洗刷、冲刷、潜蚀作用，也是有一定的影响。因此，所说“溶解作用”这个概念可以包括在“侵蚀作用”范畴内的。只要是水流动，有排洩、有补给循环的就会有侵蚀作用；只有当水流静止，得不到补给或者由于不断蒸发，水中含有物沉淀，才失去了侵蚀作用。我们认为：“溶蚀基准面”和“侵蚀基准面”在应用上并无大出入，或者叫做“侵蚀基准面”，或者叫做“基准面”，叫做“溶蚀基准面”。而溶蚀的意义是比较狭窄的。在大多数情况下，侵蚀基准面决定于附近的河流、湖泊或海洋的水位。但是这并不意味着在这种水位以下就没有侵蚀作用，例如：伏尔加河河底比海水低38公尺；法国的隆纳河在离河口65公里的地方，河底才比海面高。同样我们也可以发现，河床底部有喀斯特的存在，例如：黎湛綫郁江大桥的泥盆纪石灰岩中，有喀斯特的存在，使施工中发生一些困难。

在喀斯特区，又可把基准面分为两种^①：(1) 主要基准面和(2) 暂时基准面。

在内陆喀斯特区域的条件下，主要基准面是从喀斯特区域流出的主要排水道；而在沿海喀斯特区域的条件下，主要基准面是海平面。暂时基准面又可分地表基准面和地下基准面。地表基准面是喀斯特作用进行和争夺地下分水岭过程中还未失去

① Д.В. 雷日科夫 “喀斯特的性质及其发展规律”

排水能力的河流；而地下基准面則是溶洞河流和喀斯特水流。

所有这些基准面，都与統一的水面相連系，即与有水力联系的統一的含水层相連系，每个基准面吸引一定面积的含水层。

(二) 喀斯特的發展过程

影响喀斯特的發展，有很多因素，然而最主要的还是水流的循环作用。

对喀斯特的水流的几种不同看法：

苏联学者 Д·В·雷日科夫根据 И·К·查依采夫的观点进行了修正和补充，把水的循环分为三个带；Д·С·索科洛夫又进行了修改和补充，又将管道循环带成为两部份。參閱图 6、7。

1. 垂直循环带：

(1) 大气降水到地面后，水流順岩石裂隙、节理力图以最小途徑达到喀斯特水水面，以垂直向下运动为主。有时因为岩层的产状关系，夹层中有局部水平运动，在喀斯特水面以上流出成泉，但絕不成层状流出。

(2) 在此带中也有溶洞存在，但不是主要的。

(3) 此带的厚度可以相差很大，主要决定于地壳升降的幅度及喀斯特水补给的情况。如果地壳上昇剧烈，水源充足，喀斯特水流和潜水面互相斗争，則使厚度扩大；当地壳下降时，厚度則縮小；当地壳稳定时則不增不减。

2. 水平循环带：

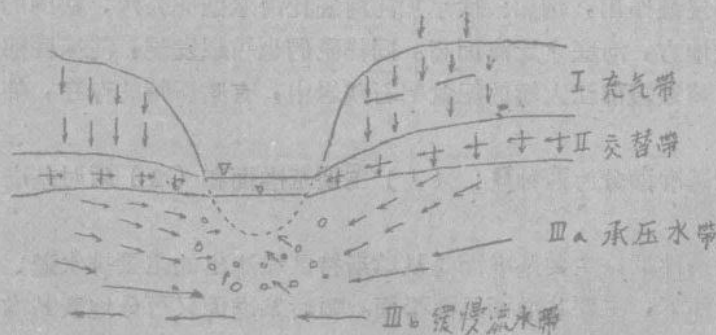


图 7 喀斯特水循环图 (根据索科洛夫)

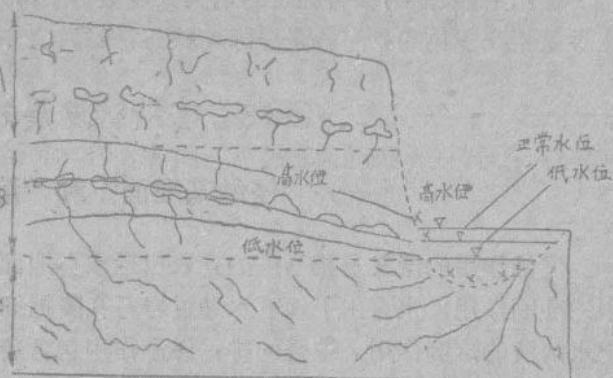


图 6 喀斯特水循环图 (根据雷日科夫)

A —— 垂直循环带 B —— 水平循环带
C —— “虹吸管式”循环带

(1) 地面水通过垂直循环带，渗入到此带，汇集成喀斯特水，主要为水平运动。并有一部份下渗到虹吸管式循环带。

(2) 喀斯特水水面上限，受补给来源及地壳升降影响，如果地壳上昇水平溶洞尚未形成时，則含水层水位变化的幅度较大；下限与虹吸管式循环带过渡。

成时，則含水层水位变化的幅度较大；下限与虹吸管式循环带过渡。

(3) 水的运动是从补给区流向泄水区，主要是水平运动，喀斯特水和含水层互相配合。

(4) 泄水以层状泉水为特征（水平运动的上部为周期性的泉，多是下降泉；下部为经常性的泉，多为上升泉）。

(5) 最大的溶洞产生在这一带中。

3. 虹吸管式循环带（饱水带）：

(1) 它的上限是含水层的下部，大多位于当地排水道水位（河流，湖泊，海洋水位）之下，受当地水位影响的。

(2) 水是由水平循环带的静水压力通过管道而运动的。

(3) 在排水道的边缘部份常有上昇泉、喷泉，水温恒常少变。水温愈高，则水来自地下愈深，这一带又叫承压水带。

(4) 再向深处，则管道数量减少，水流成为滞流带，又叫缓慢水带。

以上苏联学者们的对于喀斯特水的循环规律的阐明是相当完善的。例如：在威宁地区的黑岩洞暗河左岸陡崖上，有三层不同高度的溶洞，而黑岩洞就是一种向下侵蚀发展喀斯特。

根据雷日科夫的建议，喀斯特的发展可分为三个阶段：

(1) 喀斯特水剧烈适应其基准面的阶段或“深成喀斯特”阶段；

(2) 含水层本身和喀斯特水流共同发育的阶段或“侧面喀斯特”阶段；

(3) 含水层脱离旧有基准面的阶段或“从侧面喀斯特转变为深成喀斯特”阶段。

我们体会是：

(1) 相当“垂直”作用；

(2) 相当“水平”作用；

(3) 地壳上昇加深了“垂直带”，即原来“水平带”居于“垂直带”。

(三) 喀斯特区域的特征

Д. В. 雷日科夫对于喀斯特区域的特征作出了相当全面的总结。这些特征在我国西南区都可见到。

(1) 地下逕流显著的大于地表逕流，大部分集中在深处进行着溶蚀作用（溶解和搬运）；而河流区，则主要是在地表进行侵蚀作用（刻蚀和冲蚀），这样现象对于地表蓄水有很大的危害。在草海四周的高地上，虽然有許多洼地，如草海以北的松林口子、棒木树、土地庙；草海以南的石口子、斜路坪等地沒有一处可以积水，上面的漏斗与地下溶洞相通。

(2) 河流分支少，干谷多，河谷呈峡谷型：在我国西南石灰岩地区，此种河谷类型普遍存在。

(3) 河流在流入喀斯特区时常消失（小河则全部消失），如婁山关隧道頂部的地面小河，和內昆綫威宁北的洛澤河。

(4) 地下河流与地表河流同时存在：这种现象在川黔、湘黔綫多見。

(5) 喀斯特溶洞成层状分布，这里溶洞都是旧的干谷，与岩层的水平层状无关，这种现象在威宁的黑岩洞暗河右岸的陡崖上有之。

(6) 溶洞底部呈水平状态，与地质构造和岩层的层位无关，而是由于地区水流的位置受邻近河谷侵蚀基准面所控制。

(7) 具有一个統一的有着水力联系的含水层。

(8) 在垂直循环带中有层状分布的水平溶洞，証明在陆地上升状态下含水层位下降的結果。

(9) 喀斯特区中泉水的分布不是漫无秩序的，主要都分布在大河（主要排水流）流出喀斯特区时所經流过的边界地段。

(10) 水分地质分水峯和地形分水峯不相符合；地形集水面积和水文地质集水面积不相符合。

(11) 喀斯特区分水峯的喀斯特化强度不比河谷沿岸地段輕，可能还要更加剧。

三、石灰岩喀斯特区的选綫和工程处理

(一) 喀斯特对于铁路工程的实际意义

在喀斯特地区进行铁路建筑，如果事前没有很好的勘测研究，采取防御措施，在施工或使用建筑物时，都会产生很多不利的影响，如漏水及塌陷等。黎港綫郁江大桥在基础施工时发生漏水，造成施工困难。我国西南地区石灰岩喀斯特分布相当广泛，铁路綫路通过喀斯特区时，如何通过？采取什么措施等問題的研討，对于铁路建設是具有实际意义的。

喀斯特在铁路工程上认为是一种地质不良现象（当然有时也可能利用溶洞水作給水或排水），原因是这种不良地质现象在形成过程中或形成的状态都是多样化的，尤其是埋藏在地下的，这就給铁路工程（如路基，大型建筑等）带来了危害性，溶洞水并給施工造成很多困难。

(二) 喀斯特的工程地质分类

在經過詳細的調查、勘探、研究之后，可对喀斯特給于“定性”和“定量”的評價。为了在工程上的方便，一般在发展的概念上予以如下分类：

(1) 发展的——即是活的，指的是喀斯特作用还在繼續的进行着，也就是說，喀斯特发展的因素还存在（主要的如水的侵蚀性和地下水循环等），并具有前坍的现象。

(2) 接近停止的——由于地形或者地质作用对于喀斯特发展的因素有所抵制

(如季节性水流)，地壳已稳定或下降处于沉积阶段，并有崩坍的可能。

(3) 停止发展的——已填充或干涸，无地下水的循环。

(4) 复活的——是指第(3)类。由于喀斯特因素的复生，在已停止的喀斯特上又促使其发展(如地壳上昇，侵蚀基准面下降)，引起地下水的继续循环。

(三) 喀斯特区的选线

在铁路选线时，绕越喀斯特地区是一种方法，特别是应该绕避大范围内属于〈1〉和〈2〉两类的喀斯特区。因为在这两类喀斯特地区，都是处于不同的发展阶段，通常有溶洞、漏斗、暗河发展着，并具有塌陷危险，地面水和地下水的调治是困难的。我们在实际工作中有这种例子。

(1) 郁江南岸：地势平缓，在地面下12公尺以内的石灰岩地层中，一般均存在有直径1公尺左右厚的溶洞，个别达到3.07公尺，为粘土填充，其中还有一些存在着0.2~0.3公尺厚的空层。由于江水的影响地下水循环，不仅向上冒水，直接影响路基的稳固；又由于地层存在着纵横交错的空洞，也可能引起表土及路基同时遭受突然坍塌，因而绕行于喀斯特以东的粘土、砂页岩地区(图8)。

(2) 川黔线凉风垭越峯线刘家大坡地区(图9)，线路选择在溶洞出口下游一些通过，由于这里在比较稳定的侵蚀基准面附近，因为溶洞往往有成层分布的规律，也就是在这个侵蚀基准面以下，一

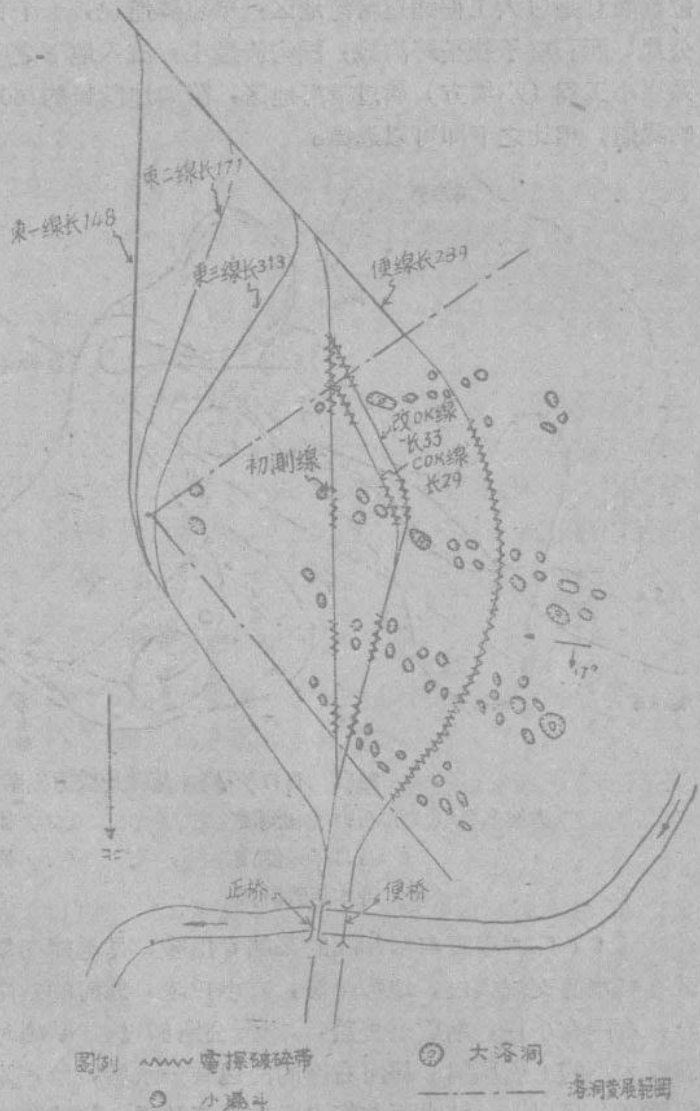


图8 喀斯特发展范围与各比较线的关系示意图
〔根据 设计通讯 工程地质勘测及路基设计专号 1955-12-15〕

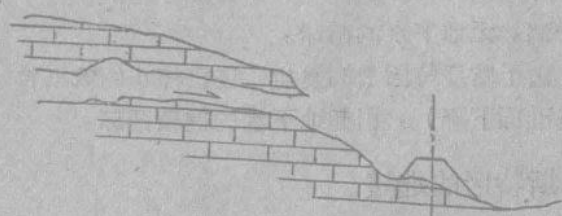


图9 溶洞口断面示意图

般說达到其下层的溶洞还有一定的岩层厚度。

(3) 在內昆綫威宁地区石口子、野木落选择方案时(图10)，曾对跨过喀斯特和工程大小进行了綜合研究。野木落綫是沿暗河綫，暗河流量大，旱季不干，而暗河地段在700公尺距离內无法查明实际

位置而且是以大工程通过暗河地区，单以隧道說，一个长984公尺，另一个长634公尺；而石口子綫是跨沟綫，該沟流量小，流入地下之口为落水缸，冬季即干枯，系以小工程(小填方)通过暗河地区，跨沟地段长约150公尺，仅有一座长420公尺的隧道，相比之下即可以选择。



图10 石口子·野木落綫比較方案图

- | | |
|-----------------|------------|
| 方案名称 (1) 石口子初測綫 | (3) 野木落初測綫 |
| 石口子定測綫 | (4) 野木落初測綫 |
| (2) 野木落設計綫 | |

(4) 广西来宾与柳州間的某站专用綫，是选择在复盖层厚的地带通过的，該区有紅水河支流通过，地势平緩，有小丘陵，靠河的左岸石灰岩間有出露，多漏斗，右岸有小丘，粘质土复盖，附近公路通过，勘测时雨后曾見到公路面上有像碗口大小的土质場陷。靠河右岸的河边有一水塘，塘底为石灰岩，以花杆探明有空洞深2公尺以上，塘水面与河水面有漲落关系，如綫路在此通过，处理不易，因此，把綫路向河的右岸远移，在丘陵地带复盖层較厚的地方通过。

由以上看来，喀斯特区的选綫一定要搞清楚整个地区喀斯特的发展規律，然后

結合綫路其他指标（如坡度、建筑費等）予以共同評价。茲綜合叙述以下看法：

（1）完全避开喀斯特区——如黎湛綫郁江南岸，地形開闊，可以繞避，走砂頁岩地区，且条件許可，而此处喀斯特又是极其严重的。

（2）选择复盖层厚的地区——因为复盖层对于石灰岩中的喀斯特起一种防止作用，同时也是喀斯特发展与否的見証。

（3）选择在喀斯特輕微地区通过避开主要严重地区，控制点选择喀斯特輕微的（不論是程度上、数量上）地段通过；

（4）选择邻近侵蚀基准面的部位通过——侵蚀基准面的变化是影响喀斯特发展的因素之一。在地质史上，往往有几个侵蚀基准面，在石灰岩中形成喀斯特溶洞带，綫路在这种地带通过时，最好选择在侵蚀基准面附近，因为相对地看，在此部位的下边多为垂直裂隙溶沟，即或有溶洞，比較說来也不会太大，如凉风垭越岭綫即属此种情况。

（5）避开地质构造綫地区——在流水的作用下，一定的地质构造反映出一定的地貌，在石灰岩区的喀斯特也是这样，尤其在断层地带、背斜軸部，因为这里的岩层被破坏，节理特別多，是喀斯特特別容易发育的地区，遇有这种情况时，綫路应当尽量繞避这些地区；必要的情况下，采取直交通过，而不要順构造綫平行通过，如凉风垭大隧道，接近直交通过 8 个断层。

（6）在岩性上的选择——石灰岩的岩性对于喀斯特作用也有很大的影响，例如含有泥質或白云質以及矽質的石灰岩，要比純淨的或介壳石灰岩发育的慢；薄层的或者頁岩石灰岩互层的，在相对程度上要比块状的石灰岩发育的要小。如：川黔綫二疊紀的茅口，棲霞块状灰岩，喀斯特最为发育，往往有大的溶洞生成；在泥盆紀的石牛欄层石灰岩夹頁岩层則发育較少。

（四）喀斯特的处理

尽管在选綫阶段对于喀斯特作了詳細的研究，并且选择了理想的方案，但当个别喀斯特現象仍然是不可避免时，則須采取必要的处理措施。

（1）首先的問題是在路基下面埋藏的溶洞，洞頂是否会因修建路基而塌陷。对于这个問題，在“威宁喀斯特地区的鉄路工程地质研究”一文中，作者引用了苏联 M·M·普罗托加科諾夫的土壤压力理論中的一个公式 $h = [b + a \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})] / f$ 来論証溶洞、暗河在路基基底以下的安全埋藏深度，但是还缺乏足够的說服力。譬如：沒有考虑路基填土重，列車活載影响，岩层、构造、岩性，地下水的繼續作用影响等因素。但是这种探討方法是值得注意的，直到如今我們对于这个問題还缺乏經驗，一般估計这种深度，还是以水文地质、地质构造、地貌、岩性等因素綜合考虑之。

（2）在有复盖的喀斯特区，常有这样情况，即当石林、斗淋散布在复盖层中，在作路基設計时一般認為：在短距离內有着軟硬悬殊的底层，会給将来的运营、維修带来不少麻煩，应当将石灰岩爆炸掉，路基皆为土层夯实，对于涵洞基底也应加以类似处理，如在內昆綫霑益北的里腊地区（图11）。

(3) 埋藏淺的可視具体情况可以将上层炸掉,重新作明桥通过。如果有困难,可在溶洞頂部和側部加固,起拱的作用以支持頂部压力,防止頂部坍塌(相当隧道內的襯砌),但是这样的例子还未見過。至于在沒有水流作用的地区,也可以采用片石浆砌封底,上部用粘土夯实的办法(图12)。

(4) 排水在喀斯特地区也是相当重要的,例如:黎湛綫某涵洞施工后不久水流大部份順涵洞底部流过,长久下去,基础被侵蝕,会遭到破坏;同样,对于路基排水,如果水流不从側沟排出而让其沿路基下部溶隙渗出,則不但对于路基填土起着潜蝕作用,而且还会繼續浸蝕,扩大节理,引起塌陷。因此在喀斯特地区排水工程应予以注意。

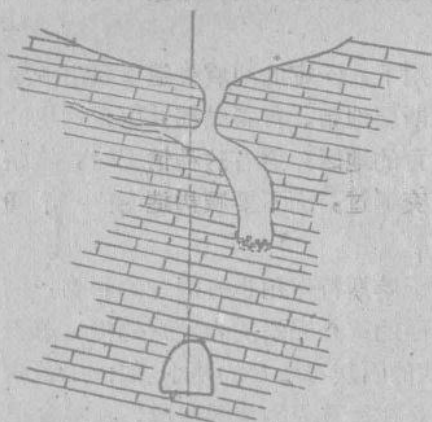


图12 湘黔綫大地二号隧道
喀斯特示意图

(7) 在隧道內筑桥这样的例子也有,例如在宝成綫史家坝隧道內遇到喀斯特,不得已架桥通过。

(五) 防止喀斯特作用进行的方法

在大面积上防止喀斯特作用的发展是困难的,因为喀斯特水并不像地面水那样有規律,防止方法主要有以下几

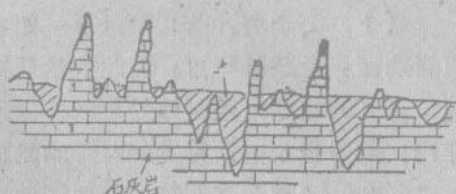


图11 溶洞原野示意图

(5) 桥基处理 在桥墩下遇到溶洞时,可将不稳固的岩层清除,以混凝土填实,做成整体基础并加鋼筋(图13)。

(6) 湘黔綫上寨隧道为石灰岩地层,在上导坑开挖中发现在100公尺处有水涌出,約1200吨/小时,当时以輸水槽将水导出;在下导坑繼續挖至70公尺左右,底部有水冒出,而上导坑水流不見,繼續以輸水槽导水,以便施工。永久措施拟于隧道右側20公尺(面向貴阳)处在隧道底面标高以下2公尺左右打一輸

水洞,将水源截断导出,以保隧道內无水,同时加强該段隧道襯砌(图14)。

都匀

貴阳

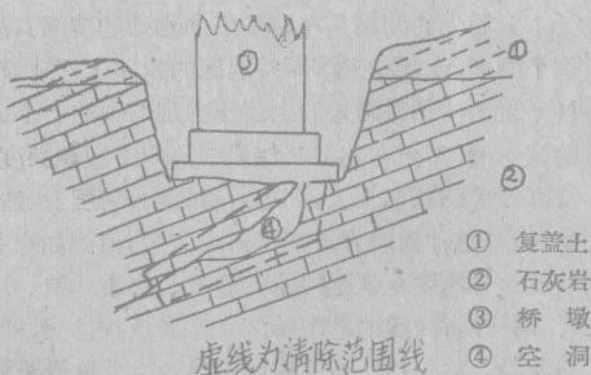


图13 桥墩下溶洞示意图

方面:

(1) 填塞地表的裂隙, 消除地表水的侵入, 减少喀斯特的作用, 例如路基侧沟以粘土夯实铺面, 减少渗漏。

(2) 用粗砂碎石干砌, 混凝土或瀝青, 堵塞地下空洞。

在广西某专用线上 (图15), 路基适位于一漏斗上, 漏斗水流皆为地表水, 漏斗底靠左部份为粘土砾石充填, 鑽深10公尺左右仍是, 相当密实, 漏斗生有茂密的丛树和杂草, 水流降至底部順右方的岩层的裂隙流入地下; 岩层傾向略偏右侧。



图15 路堤下溶洞示意图

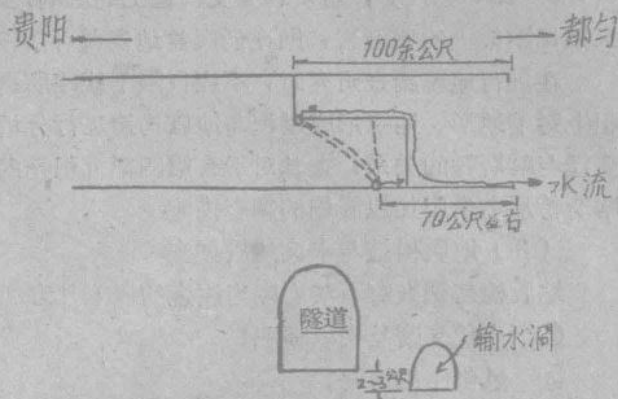


图14 隧道开挖出水示意图

考虑到断絕地面水水源会阻止裂隙的发展, 同时将横洞以混凝土灌筑后, 对路基的稳固会有一定的作用; 如果将綫路向左或向右移动, 工程量增大很多, 并有短隧道和深挖方, 因此, 采用了改移地表水流和堵塞溶洞的方法。

(3) 在喀斯特地区排除地表水和地下水这一方法, 仅当排水工程不复杂、不昂貴时才可采用。例如川黔綫婁山关隧道頂部的水流暗河, 曾考虑采取改河的方案。

四、石灰岩喀斯特的調查

И·В·波波夫教授指出: 到目前为止还没有一套令人滿意的研究喀斯特的方法, 他建議按步就班的来研究那些在工程地質調查时所应闡明的主要問題的研究方法, 也就是只有将地質調查、鑽探及物理勘探、試驗等方法綜合起来研究分析, 才有可能对喀斯特的生成、发展得出比較全面的結論。

(一) 地 質 調 查

(1) 气候、植物調查

調查气候的有关資料, 在实际工作中, 多数是向当地的气象机关搜集, 在进行这项工作時, 应当注意气温、水温、岩石温度的分布以及温变和蒸发条件。而降雨量是个很重要的資料, 如年降雨量, 暴雨量, 阴雨日数等等。并且应当考虑当地地形形态的影响条件。此外植物条件也应注意, 因为往往在其他条件相同时, 在植物生长的地区內, 喀斯特几乎是最为发育的。

(2) 地貌与喀斯特的形态

在石灰岩的喀斯特地区存在着特殊的地貌景观。例如：在贵州地区地形起伏大（700~2000公尺），石灰岩多受构造上的影响，多深切峡谷溶洞悬挂于陡壁之上；又如川黔綫上的鲁班岩，则在低緩盆地多漏斗溶沟。

在进行地貌調查研究时，不应只限于綫路所通过的喀斯特区，而应当在較大面积上对于地形、地貌形成过程与地质构造进行分析；还应当注意古今侵蚀基准面的变迁与喀斯特的关系，尤其对于有第四紀沉积物的喀斯特应特别注意。此外，对于喀斯特形态也应加以詳細的調查描述。

(3) 地质构造与水文地质調查

地质构造調查对石灰岩应当注意的以下几方面：

- ① 产状厚度及夹层情况；
- ② 风化作用情况；
- ③ 复盖层的性质、厚度及含水情况；
- ④ 背斜、向斜、断层的分布；
- ⑤ 节理的密度、节理空隙的間距及透水情况。

水文地质調查应当注意：

- ① 地表水、地下水的循环条件；
- ② 各个水文地质露头的测量描述、流量、水温；
- ③ 水的化学分析；
- ④ 流速流向的試驗；
- ⑤ 侵蚀基准的研究（地下的，地上的等）；
- ⑥ 有时还要对重要的水文地质露头或水文地质勘探点作长期的观测；
- ⑦ 地表水系的分布，河谷密度。

(4) 洞穴的測量

① 对地表上一切喀斯特形态，均应进行詳細調查、記錄。有时采用在地表上的所有喀斯特处作一些标誌的方法（插小旗），在作地形图时，用經緯仪来測量喀斯特的准确位置和标高。

② 在喀斯特区，对凡是可以进入的喀斯特，皆应尽可能进入測定。在川黔綫，我們采用这种方法，即：在入口小的时候，用小爆破。在作地下溶洞測量时，应注意溶洞的方位、大小、标高及各段长度；不同横截面的变化；有无沉积物，沉积物的形状、岩性，是原地崩落的，还是远处搬移的；岩石裂隙情况，有无水流，水流变化情况；有无石灰华的生成等。如图16。

在平面图上，应标明溶洞延展方向；在横断面上，应繪出堆积的情况和水流；溶洞洞身剖面可将各轉点延展成一直綫繪出。

③ 对于在地表的溶沟、落水洞，除进行准确定出位置标高并应查明其地下通道外，有时作一些小的挖掘和爆破，大的則直接下入通道內測量，逐段查明岩性、方向、横截面的变化等，一般是借助安全带系入井內。在湘黔綫貴定大关坡曾下过