

滇中黄家阱隧道地区CO₂气藏的分布规律与成因探讨

伊 渊 蒋志信

(铁道部第二勘测设计院第三总队)

黄家阱隧道位于云南中部楚雄、禄丰两县接壤地带,长2.3公里,系勘设中的广(通)下(关)铁路的第一座长隧道。1978年勘测中,在隧道位置附近发现CO₂气苗。为此,我们进一步开展工作,复查和发现CO₂气苗共13处,初步掌握了CO₂气藏的分布规律,探讨了气藏的成因,从而对隧道的气害问题作出了评价。

一、地质概况

调查区位于广通盆地与龙川河谷之间,面积约50平方公里,呈现剥蚀低山地貌。区内最高点宝马山海拔2154米,相对高差最大约300米。

本区地层昆阳群为一套变质岩系,长期遭受剥蚀。上覆为上三迭系含煤碎屑岩建造和侏罗—白垩系巨厚的陆相碎屑岩建造,后者称为“滇中红层”,其层序见表1。

表 1

界	系	统	组	代号	主要岩性	厚度(米)
中生界	白垩系	上统	赵家店组	K _{2z}	砂岩、泥岩夹砂岩	584.7
			江底河组	K _{2j}	泥岩、粉砂岩夹砂岩,含石膏	1082
			马头山组	K _{2m}	砂岩夹泥岩、具底砾岩	137—526
	白垩系	下统	普昌河组	K _{1p}	泥岩、灰质泥岩夹泥灰岩	217—268
			高峰寺组	K _{1g}	砂岩夹泥岩及灰质砾岩	365.5
	侏罗系	上统	妥甸组	J _{3t}	泥岩夹泥灰岩,含油苗	425.3
		中统	蛇店组	J _{2s}	砂岩夹泥岩及角砾状泥灰岩	727.5
			张河组	J _{2z}	砂岩、泥岩夹泥灰岩	1027
		下统	冯家河组	J _{1f}	泥岩夹砂岩及砾岩透镜体	820

* 据云南地质局,1972,区域地质普查报告(1/20万),楚雄幅。

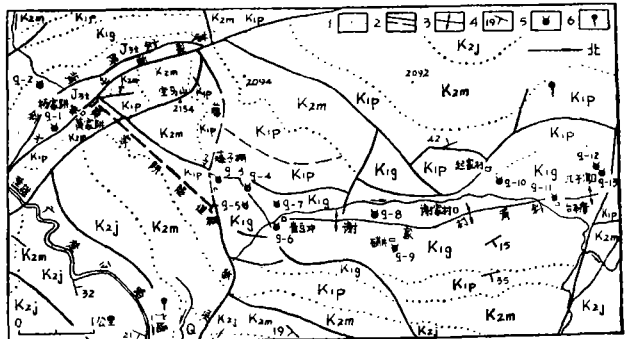


图 1 黄家阱隧道地区地质与CO₂气苗分布图

1—地层分界线; 2—断层与推测断层; 3—背斜轴; 4—岩层产状及倾向; 5—CO₂气苗及编号; 6—泉。

测区位于云南山字型构造的砥柱与西翼弧之间,由于喜山运动,形成南北纵贯测区的谢家村背斜及其东的广通向斜,其西的风家村向斜。背斜轴部有小规模张性断裂伴生,谢家村背斜被错断成南北两段,南段称为黄家阱背斜。区内规模最大的火烧屯断裂,属张扭性,走向北西倾东80°,全长25公里,断距1500米,通过黄家阱背斜轴部,由三条平行断层组成,主断层破碎带宽70米。由于东盘下错,致使黄家阱背斜两翼不对称,东翼缺失妥甸组与高峰寺组(图1)。

二、CO₂气藏的分布规律

我们称CO₂气藏在地表的出露点为气苗。气量大而闻名者有儿子湾、藤子棚、杨家阱三处,气苗位置示于图1,冒气景观列于表2。

气苗的化学成分除李家外,CO₂体积含量均占90%以上,最高达99%;其它成分有氮、氧、氢、氦和甲烷,含量甚微(表3)。由于CO₂气具窒息性与一定毒性,高浓度聚集时能伤害人畜。如儿子湾q-12于1953年打井时,一人下井底取水窒息而亡;置小虫于杨家阱气泉口1至2分钟即毙,放家畜(禽)于藤子棚冒气孔口0.3米处,2分钟后狗晕,兔叫,鸡亡。

据13处气苗的调查,本区CO₂气藏有如下分布规律:

1. 气藏分布与含碳酸盐的红层有关。13处气苗皆出露在富含CaCO₃的高峰寺组 and 夹有泥灰岩的普昌

表 2 CO₂气苗汇总表

编号	位置	地形	地层	构造部位	冒气景观
q-1	杨家阱(1869)	支沟头	普昌河组泥岩	背斜轴部, 近断层	冒水、气之上升泉, 历几辈人, 气具酸辣味
q-2	李家(1835)	小泥沼地	妥甸组泥岩	近背斜轴部	间歇冒气泡之上升泉, 流量小
q-3	藤子棚(1904)	水库旁	高峰寺组泥岩及砂岩	近背斜轴部, 邻断层	原沟底冒气, 1958年建水库后转至坡脚闻吹风声
q-4	青豆冲(1865)	支沟	高峰寺组砂、泥岩	近背斜轴部, 邻小断层	塘底间歇冒气泡, 冒泡点具移动性
q-5	青豆冲(1870)	支沟旁	高峰寺组砂岩及泥岩	背斜轴部	闻似轮胎放气声响, 积水后冒气泡明显
q-6	青豆冲(1845)	坡脚地	高峰寺组砂岩及泥岩	背斜轴部, 邻断层	十年前为冒水、气之上升泉, 后填埋
q-7	青豆冲(1850)	沟旁山坡	高峰寺组砂岩及泥岩	背斜轴部	冒气兼有轻微水泡声响
q-8	米油榨(1800)	支沟口	高峰寺组泥岩及砂岩	背斜轴部	旱季可见冒气
q-9	硝井(1840)	冲沟坡地	高峰寺组砂岩及泥岩	近背斜轴部	冒气泡之泉眼数塘, 平行沟床排列
q-10	起家村(1790)	主沟阶地	高峰寺组砂、泥岩	近背斜轴部	田干时见冒气泡
q-11	治本摩(1798)	通坝号洼地	高峰寺组砂岩及泥岩	背斜轴部	塘内6处间歇性冒气泡
q-12	几子湾(1785)	阶地后缘	高峰寺组砂、泥岩	近背斜轴部	原为冒水、气之泉眼, 53年打井后填埋
q-13	几子湾(1780)	阶地	高峰寺组砂、泥岩	近背斜轴部, 邻断层	400米 ² 稻田中普遍冒气泡, 沸腾状

注: 1. 括号内为气苗出露海拔高程(米); 2. q-1, 2位于黄家阱背斜; 3. q-3以下位于谢家村背斜。

表 3 气苗的化学成分(体积%)

气苗	分析日期	分析单位	CO ₂	氢	氮	氧	氩	甲烷
q-1	79.10.4	四川石油研究院	98.56	0.002	0.66	0.15	0.00	0.02
q-2	10.5	四川石油研究院	6.36	0.00	84.03	8.45	0.009	0.11
q-3	10.4	四川石油研究院	98.88	0.003	0.54	0.22	0.007	0.05
q-5	10.5	四川石油研究院	99.19	0.00	0.60	0.15	0.008	0.08
q-9	9.26	四川石油研究院	95.38	0.000	2.9	0.69	0.005	0.07
q-11	10.4	云南石油地调大队	91.48		6.13	2.39		
q-13	9.26	四川石油研究院	98.46	0.00	0.93	0.29	0.020	0.19

河组、妥甸组地层中。马头山组、江底河组未见气苗分布。

2. 气藏分布与背斜轴部有关。13处气苗中, 11处分布于谢家村背斜轴部, 2处分布在黄家阱背斜轴部。背斜翼部或向斜中均未发现气苗。部分气苗邻近断层, 多数气苗则离断层较远。

3. 气藏分布与酸根浓度大、矿化度高的水有关。绝大多部气苗与水直接相关, 分布于水塘(q-4、9、11)、稻田(q-8、10、13)中, 或形成水、气泉(q-1、2、6、12)。气苗处地表水、地下水的水质分析结果如表4。特点是阴离子浓度大、矿化度高、K⁺、Na⁺含量高, HCO₃⁻一般均在400mg/l以上, 而非气苗水多在350mg/l以下; Cl⁻普遍超过30mg/l, SO₄²⁻一般超过500mg/l; 非气苗水Cl⁻均小于20mg/l, SO₄²⁻一般不超过250mg/l, 矿化度多在1000以上, 非气苗水则低于600; 水化学类型多为HCO₃⁻·SO₄²⁻—(K⁺+Na⁺)·Ca²⁺型, 非气苗水多为HCO₃⁻·SO₄²⁻—Ca²⁺+Mg²⁺型。可见气藏与水化学环境有联系。

4. 气藏出露于相对低洼的负地形部位。如沟底或沟旁(q-1至5、8、9)、坡脚或坡面凹地(q-6、7、11)、阶地及其后缘(q-10、12、13)。出露高程除q-3外, 均在1870米以下。在丘岗、峰顶、凸坡上均未见气苗。

可见, 本区CO₂气藏分布于具高浓度阴离子水化学环境、处于背斜构造轴部的含碳酸盐红层中。

三、CO₂气藏的成因探讨

我们在杨家阱(q-1)、藤子棚(q-3)两处气苗口打了钻孔, 为揭示气藏成因提供了地下资料。

杨家阱气苗为上升泉, 钻孔(Z₂-黄-12)深100.3米, 全为普昌河组泥岩、钙质泥岩夹钙质粉砂岩、细砂岩。地表向下, 气量渐增, 深14至16米多φ1—2毫米溶孔; 40至49米岩层破碎, 节理发育, 层面倾角70°, 气量达到最大; 49米以下水、气量逐渐减小, 节理裂隙多为次生石膏充填。终孔后下带眼钢管, 钻孔遂成为间歇性喷泉, 每隔2—3小时喷发一次, 先喷水几分钟, 水柱高达丈余, 测得水量0.1—0.78升/秒。

水压 0.4 公斤/厘米²；水停后冒气泡，如蜂巢状，似 H₂S 味。

藤子棚气苗钻孔 (Z₁-黄-7) 全遇高峰寺组泥岩夹砂岩，局部含钙。因邻近断层，岩层破碎，风化严重，小错动面甚多。8 米以下多 $\phi 1-5$ 毫米孔洞，岩芯刚取出时见其继续冒气并留下小洞。至 63.6 米后气量特大；至 69.4 米，气体将泥浆和水冲出孔口达 5 米高，如喷雾状，孔内轰轰巨响百米内可闻，井场四周弥漫 CO₂ 酸味，只好就此终孔。孔坍后补测得孔口气压 0.2 公斤/厘米²，气量 0.15 米³/分，孔口白色升华物经差热分析为伊利石。

本区 CO₂ 气藏的成因，可从生成条件、储气构造和发散通道三个方面进行探讨。

1. 生成条件 产生 CO₂ 的物质基础是碳酸岩岩样分析表明，普昌河组和妥甸组地层含 CaCO₃ 可高达

33.6%，高峰寺组也达 23.8%。钻孔揭示这些地层中夹有钙质泥岩、钙质粉砂岩和泥灰岩。

由于区内无深大断裂展布，绿汁江、红河等深大断裂已远离本区，故本区 CO₂ 气苗不可能来源于深部。本区气苗的分布也表明，气苗主要集中在断裂不发育的谢家村背斜轴部，故气藏不会是深成因。

本区红层中所含硫化物、氯化物经过氧化和水解可生成 H₂SO₄ 和 HCl。如 FeS₂ 氧化生成硫酸铁再水解而成 Fe(OH)₃ 和 H₂SO₄。这样生成的含铁质水在藤子棚、杨家阱、李家的沟中聚集，农民均不饮用。本区植被繁茂，腐植物分解产生的 H₂S 溶解于水内，可产生稀硫酸。因此，本区地表水、地下水中的 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 浓度都较高 (表 4)，H₂S 的含量也达 0.22—7.67 毫克/公升。这些 H₂SO₄ 和 HCl 腐蚀碳酸岩，置换产生 CO₂：

$$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$$

表 4 水质分析成果表 (毫克/升)

气 苗	水 源	阴 离 子			游离 CO ₂	矿化度	pH 值	水 化 学 类 型
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻				
q-1	上升泉水	12.43	1279	2696	218.2	4095	6.8	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -Ca ⁺⁺ ·(Na ⁺ +K ⁺)
	钻孔喷水	35.50	1752	2440	976.8	4645	6.1	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -Ca ⁺⁺ ·K ⁺ ·Na ⁺
q-2	泉 水	13.49	1320	400	65.1	2272	7.3	SO ₄ ²⁻ ·HCO ₃ ⁻ -(Na ⁺ +K ⁺)·Ca ⁺⁺
	钻孔水 1	42.60	583	655	770.0	1389	6.3	SO ₄ ²⁻ ·HCO ₃ ⁻ -Ca ⁺⁺ ·Mg ⁺⁺
q-3	钻孔水 2	71.00	768	801	748.0	1831	6.4	同上
q-9	气苗泉水	71.00	144	976	288.8	1174	7.0	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -(K ⁺ +Na ⁺)·Ca ⁺⁺
q-11	气苗塘水	56.80	72	671	55.0	807	7.7	HCO ₃ ⁻ ·Cl ⁻ -(K ⁺ +Na ⁺)·Ca ⁺⁺
q-13	气苗稻田水	71.00	72	183	211.2	377	5.9	同上
非气苗	钻孔水 (8 处)	9.88	232	344	34.1	462	7.4	HCO ₃ ⁻ ·SO ₄ ²⁻ -Ca ⁺⁺ ·Mg ⁺⁺
处水	地表水 (6 处)	8.88	163	284	30.1	504	7.0	同上

本区地下水循环带最深 400 米，故 CO₂ 生成于 400 米深度内，系浅成因。杨家阱、藤子棚两钻孔岩芯中的溶孔就是上述反应的溶蚀痕迹，杨家阱钻孔下段岩芯中节理裂隙为次生石膏充填，正是上述反应的产物。可见，本区 CO₂ 是浅层地下水循环带内的产物。

2. 储气构造 本区 13 处气苗全集中分布于谢家村背斜及黄家阱背斜的轴部这一事实表明，本区 CO₂ 的储气构造与储油气构造类似。因为负压的 CO₂ 气往往顺层间裂隙向上运移，并集中至背斜轴部，而背斜轴部各种裂隙发育、为气体提供了良好的储集场所。

杨家阱、藤子棚两钻孔揭示气体集中在 40 至 70 米深范围内，再向下气量反而减小，表明气藏储集于这两个背斜轴的浅部。两个钻孔的岩层破碎，节理发育，错动面多，正是气藏储集的理想所在。由于谢家村背斜较完整，张性断裂少且规模小，其储气条件最好，

故 13 处气苗中有 11 处都分布在其轴部。黄家阱背斜受火烧屯断裂破坏，构造不完整，储气条件较差，只有 2 处气苗分布在其轴部。

3. 发散通道 本区多数气苗离断层较远，就是几子湾、杨家阱、藤子棚这些大气苗也不在断层破碎带上；硝井一泉有 7 个冒气孔成北 20° 西一线排列，与岩层走向一致，表明其发散通道是层间裂隙。

由于负压的 CO₂ 气要寻最短路径释压，故气苗多出露于沟底、洼地等负地形中。当沟底被第四系掩埋时就转而在坡脚、阶地后缘等覆土较薄的部位出露。藤子棚气苗原在沟底，修水库后，就转而在水库边坡脚冒气。

(下转第 32 页)

• 建字 730 部队，1975，区域水文地质普查报告 (1/20 万)，楚雄幅。

量方向变化时, BGD中采用的切距值应取各方向中最小平均切距, 除非情况特殊有理由采用其它方向的切距值。……有可能或适于分组表述时, 应垂直于破裂面测量其平均破裂间距。

从ISRM的两份材料提出的4个分界值为6、20、60、200厘米, 与收集的45例资料的平均的分界值7、23、67、160厘米以及图1中4种情况分别出现较多的数值均较为接近。与ISRM的建议值相比较, 国内除第3种情况多用40厘米, 50厘米显得略高外, 其它3种情况均较接近, 也能反映实际。

从发展趋势看, ISRM对此已有建议, 并希望其成员国积极试用推广, 考虑到这一建议较符合实际, 加之当前工作上也有需要, 所以, 笔者认为, 目前试行推广上述ISRM有关岩体节理裂隙间距划分标准6、20、60、200厘米是有基础的, 也是有条件的。这样作, 有利于国内的统一, 也有利于与国际上的学术交往, 值得引起注意。

参考文献

- [1] 《隧道译丛》, 1974, 6期
- [2] 岩体的工程表示法, 1974, 《隧道译丛》, 第6期
- [3] (日) 冈本舜三, 岩盘力学
- [4] 根据地质予测确定支护, 1975, 《隧道译丛》

2期

- [5] 湖北综合勘察院, 关于洞室围岩稳定性评价的一些看法
- [6] 水电部成都院科研所, 1975, 水电工程岩体分类探讨
- [7] 有关大坝基础的岩石力学国际会议文集, (巴西), 1978.9.
- [8] 何桂寒, 1983 岩石质量指标的应用, 《工程勘察》
- [9] 田良灿等, 1982, 采场稳定性分类, 《长沙矿山研究院季刊》, 第2卷三期
- [10] 关宝树, 1978铁路隧道围岩分类
- [11] 西南铁科所, 1981工程岩体分级中弹性波参数的应用
- [12] 西南交通大学, 1981, 隧道围岩分类专题研究报告集
- [13] 孙万和, 1984, 岩体质量的工程地质评价方法
- [14] 徐荣熙等, 1981, 工程岩体因子组合分类
- [15] 西南铁科所, 1973, 修建隧洞中岩石力学量测技术
- [16] 国际岩石力学学会, 1982, 《岩石力学试验, 建议方法》, 上集, 煤炭工业出版社
- [17] 岩体基本岩性描述, 1983, 《四川水力发电》第一期

(上接第29页)

综上所述, 本区CO₂是浅成的, 系地下水循环带内置换作用的产物。物质基础、反应条件、储气构造、发散通道是CO₂生成、运移、储集、发散的四个条件, 缺一不可。只有综合考虑这四个方面, 才能理解本区CO₂气藏的分布规律, 有效地指导生产实践。

四、黄家阱隧道CO₂气害评价

从实际材料看, 全区13处气苗皆分布在隧道之外, 最近的藤子棚气苗距隧道的垂直距离也有555米。在隧道进出口和峒身共钻10孔, 深度均达到路基面设计标高以下, 皆无CO₂气冒出。对峒顶的Z-黄-2、3两孔, 1978、1979两年连续取孔底气样化验, CO₂含量仅1.21—1.58%, 略高于土壤中含量, 情况正常。

从CO₂气生成条件看, 隧道主要在普昌河组泥岩及马头山组砂岩中穿过, 含泥灰岩, 具备产生CO₂的物质基础。但峒身钻孔及附近的水质分析表明, 除隧道右侧90米的8号钻孔SO₄²⁻浓度较高外, 阴离子含量和矿化度都很低, 阴离子当量浓度平均仅为气苗水的

29%, 矿化度平均为气苗水的27%, 不具备产生CO₂的水化学条件。

隧道处于南北向与北西向构造的交接部位, 右侧平行隧道的宝马山断层对CO₂的储集不利。同时, 除宝马山断层及隧道出口段的派生小断层外, 峒身大部分地段无断裂穿过, 钻孔岩芯也较完整, 节理与层间裂隙较不发育(曾取出长1米以上的完整泥岩岩芯), 故CO₂的发散条件并不良好。

此外, 据杨家阱、李家、藤子棚、硝井和几子湾5处气苗地下水的放射性试验, 含铀量均小于5×10⁻⁷克/升, 为正常低数值, 含氧量1.64—5.62埃曼, 浓度亦为低数值范围。表明这些地下水是表层的, 隧道无放射性危害。

综上所述, 黄家阱隧道不具备生成、储集CO₂的水化学条件和构造条件, 产生和富集CO₂的可能性甚小。隧道将不会遇到大量的CO₂气藏, CO₂气含量不会太高。因此, 只要在隧道施工中加强通风和现场监测, 将不会产生CO₂的危害。勘设中的黄家阱隧道基本上避开了CO₂气害, 方案是可行的。