

基于野外资料和 Google Earth 影像的 地质信息识别与提取方法

——以塔里木盆地西克尔奥陶系古岩溶露头为例

石书缘¹, 胡素云¹, 刘伟¹, 武娜¹, 蔡俊²

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油大学(北京)地球科学学院)

摘要 以塔里木盆地西克尔奥陶系古岩溶露头为研究对象, 根据高精度 GPS 野外定点和 Google Earth 影像数据的结合, 明确了岩溶地质现象在影像图上的响应特征, 进而提取定量化的古岩溶信息数据, 经过数据处理建立了古岩溶地质模型。本项研究证实了基于野外资料和 Google Earth 影像的地质信息识别与提取方法的可行性, 也表明了该方法能够实现未开展露头考察的影像图直接提取相应地质信息和采集量化数据。通过利用这些数据建立岩溶储层地质模型, 结合野外资料, 综合分析岩溶储层发育的控制因素, 进而客观地理解地下岩溶储层特征及分布规律, 能够为勘探开发提供有效指导。

关键词 塔里木盆地; 古岩溶; 地质建模; 奥陶系; Google Earth 影像

中图分类号: TE19 **文献标识码**: A

岩溶储层作为塔里木盆地重要的油气储层, 近年来已经在勘探中取得了重大突破, 但井下岩溶储层的预测方法仍然有限, 多以地球物理方法预测为主^[1]。而结合露头的古岩溶研究以及对井下岩溶储层预测的研究相对较少, 仅局限于露头的单一解剖以及建立宏观岩溶的发育模式^[2-4]。在露头研究中, 前人多进行单一地质现象描述, 或者综合探地雷达等工具得到三维地质体结构^[5-9]。

国内外学者已经尝试综合遥感技术的应用^[9-11], 但受限于遥感数据获取的途径及所需费用, 这种技术在古岩溶研究中的应用并不普遍。而 Google Earth 软件是著名的美国网络搜索服务商——谷歌公司投资 300 多亿美元、于 2005 年夏季推出的、以网络为平台的地图服务系统。软件免费提供的卫星影像解析度高、图片完整、更新快、使用方便简单, 推出之后很快受到了各类专业人员的青睐, 已经在不同专业领域中得到应用, 但多数体现在建立数据库及路径的识别上^[13-14]。在地质学领域, Google Earth 软件的

应用也已经渗透到许多方面, 例如利用 Google Earth 软件研究河流形态学特征^[15]、喀斯特地区碳酸盐岩风化成土能力^[16]、浅水三角洲沉积类型^[17], 以及寻找矿产资源^[18]、建立地质知识库等^[19]。在古岩溶研究方面, 杨瑞东等^[20]提出了利用 Google Earth 影像分析区域性大型“X”共轭节理系统对宏观岩溶发育的控制作用, 这为岩溶研究提供了一种新的方法。而谭克龙等^[18]采用遥感技术进行煤炭勘查, 利用新型的多波段、多极化、多角度、多时相和多分辨率遥感数据, 结合 GIS 工具进行空间分析, 探索煤田分布规律。这些应用体现了野外露头区考察与量化数据综合研究的新思路。

本次研究, 笔者通过高精度 GPS 进行野外定点, 综合利用 Google Earth 软件提供的宏观形态特征和野外露头研究提供的实际地质信息, 提出基于野外资料和 Google Earth 影像的地质信息识别和提取方法, 并以塔里木盆地西克尔奥陶系露头区为解剖实例, 说明该方法的可行性及量化优势。鉴于前

收稿日期: 2014-08-24; 改回日期: 2015-09-16

本文受国家科技重大专项“四川、塔里木等盆地及邻区海相碳酸盐岩大油气田形成条件、关键技术及目标评价”(编号: 2011ZX05004-001)资助

石书缘: 1987 年生, 2013 年毕业于中国石油勘探开发研究院, 获矿产普查与勘探硕士学位, 从事碳酸盐岩储层沉积学及地质建模研究。通讯地址: 北京市海淀区学院路 20 号中国石油勘探开发研究院地质研究所。E-mail: shi18yuan@163.com

人对西克尔露头剖面已经开展过许多定性研究,包括储层类型、溶洞系统特征及其控制因素等^[21-27],故本文主要阐述该方法在定量化及模型精细化方面的优势,并认为该方法在两个方面具有推广应用前景:一方面是通过建立岩溶储层地质模型,结合野外资料来分析岩溶储层发育的控制因素,可以为客观理解地下岩溶储层特征及分布规律提供基础;另一方面体现在基于露头岩溶地质信息与Google Earth影像图的校正和对应关系,可以对未开展露头考察的影像图直接提取相应地质信息,并采集定量化数据,以此为勘探开发提供有效指导。

1 方法介绍

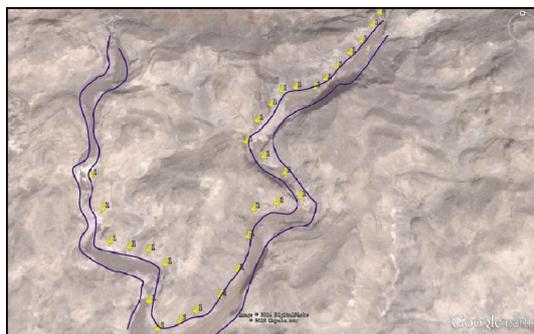
基于野外资料和Google Earth影像的地质信息识别和提取方法的流程,包括数据采集、数据应用和数据应用三个方面。其中,数据采集是在Google Earth软件中API组件的基础上,自行编写了“古岩溶数据采集系统”,进行批量化数据采集,从而实现人工识别、自动采集数据的目的,需要说明的是,对影像信息的盲区(即Google Earth影像无法清晰获取的区域)则需辅助利用GPS在野外定点进行校正(图1)。在此基础上,数据处理则是强调对采集数据进行后期处理并建立模型的过程。数据应用的关键在于建立定量化的地质模型,即对原始数据处理成图后的结果显示及其应用。应用目的在于对未开展露头采集的研究区从Google Earth影像中直接进行地质信息识别与提取。

1.1 数据采集

数据采集包括野外选区、野外定点和室内校正三个工作步骤:

野外选区 选取基础地质数据较全的研究区,如针对古岩溶缝洞系统应包括裂缝(走向、延伸长度、缝宽)、断裂、溶洞、溶蚀沟道等信息,明确野外地质信息类型。

野外定点 首先判断地质信息是否存在盲区(即Google Earth影像无法清晰获取的区域),如果存在盲区,则在野外考察时需利用GPS对地质体的具体位置进行高密度定点,以方便对Google Earth软件提供的高分辨率影像信息进行定位;如果不存在盲区,则不需要进行GPS定点,可直接在Google Earth影像图中采用“古岩溶数据采集系统”提取识别的地质信息。



(a) 溶蚀沟道边界采集



(b) 溶蚀洼地边界采集

图1 “古岩溶数据采集系统”软件中批量采集数据示意图
黄色点表示软件自动采集的点,可用野外采集点投影校正

室内校正 在露头区考察完成后,把采集的高密度GPS数据利用Google Earth提供的GPS数据接口导入软件中,根据地质认识校正定点数据位置,以此为基础在影像图上采集,得到GPS定点盲区数据,从而实现影像图上全部地质数据的采集。

1.2 数据处理

在该步骤中,通常采用地理信息软件,如ArcMap软件,主要目的是将采集的地质信息数据的经纬度坐标转换成大地坐标。首先,把数据转换成shape文件,以方便数据的输入。然后,利用ArcToolbox投影和转换,在北京54坐标系中,采用高斯克里金方法投影到六度带中,进而可进行数据输出。最后,把坐标附到属性中输出,从而实现坐标的转换,并对不同类型数据进行分类,就可建立相应地质信息的定量化地质数据库。

1.3 数据应用

由于前人对古岩溶露头研究以定性描述为主,基于此,本文进行数据采集和处理后,可对古岩溶进行定量建模及定性分析。

(1) 根据研究需要,判定是否要建立量化地质模型。如判定需要,则可以在数据处理的基础上,建立量化地质模型,如古岩溶等;如果判定不需要,则可以直接分析采集地质要素之间的关系,如河流相等。

(2) 针对模型的应用,一方面是通过建立岩溶储层地质模型,结合野外资料来分析岩溶储层发育的控制因素,包括各因素之间的定量关系,为客观理解地下岩溶储层特征及分布规律提供基础;另一方面,模型的应用主要体现在基于露头岩溶地质信息与Google Earth影像图的校正和对应关系,对未开展露头考察的影像图直接提取相应地质信息,采集量化数据。

2 实例研究

塔里木盆地西北缘奥陶系古岩溶出露良好,因此,笔者综合考虑各岩溶露头的特点,以Google Earth影像识别的相对难易程度为主要依据,选取西克尔露头区进行实例研究。

2.1 实例研究区地质背景

塔里木盆地西北缘奥陶系广泛出露于314国道北侧(图2),南侧仅一间房剖面(在研究区之外)有零星出露。研究区的沉积演化特征表明,在中奥陶世早期,塔里木盆地西北缘为向北倾斜的缓坡型碳酸盐岩台地,而西克尔剖面位于内—中缓坡位置;到中奥陶世晚期,过渡为弱镶边的碳酸盐岩台地边缘环境;在晚加里东运动之前,柯坪断隆受到南天山洋俯冲的影响,普遍抬升,奥陶系石灰岩局部出露,发生岩溶,并快速被下志留统柯坪塔格组覆盖;至晚中新世—晚更新世,被由北向南的逆冲断层推出地表,形成良好的露头区^[4,21-27]。西克尔地区位于研究区西边靠近南天山脚下314国道北侧(图2a)。本文主要针对中奥陶统一间房组底部到鹰山组顶部碳酸盐岩古岩溶发育段进行研究,从图2b可以看出,奥陶系古岩溶发育区的影像明显不同于其它层系岩性在Google Earth影像上的响应,它以灰白色为主色调,区别于其它层系岩性。而通过野外考察同样可以明确,碳酸盐岩古岩溶地层岩性偏灰色,而其他岩性以绿色和紫红色为主(图2c的顶部)。且前人已经从多个角度证实研究区为古岩溶^[26-27]。油田实际勘探生产也表明,塔里木盆地岩溶储层以大型古溶洞系统为主^[28-31]。综合露头资料和Google Earth影像图特征,结合岩溶地貌单元的划分依据,西克尔露头区包括溶蚀洼地、溶蚀

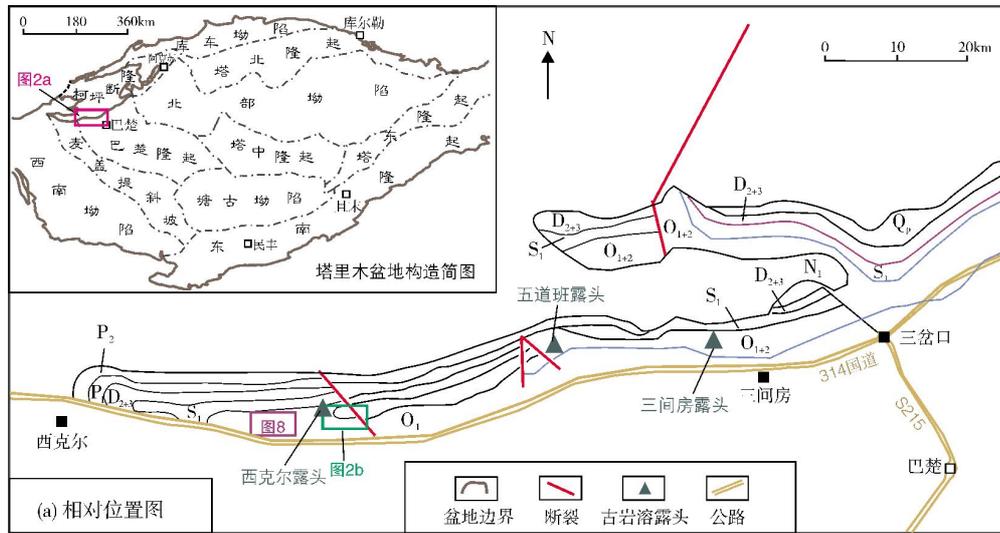
沟道和溶洞等多种岩溶地貌单元,这些数据在该剖面上易于识别和提取。总体上,西克尔露头剖面确为良好古岩溶出露区,且构造和地表条件好,选取西克尔地区作为本文方法的实例研究工区切实可行。

2.2 岩溶地质信息的识别提取及数据库的建立

不同的岩溶地貌单元在Google Earth影像上响应特征有明显差别,与野外考察特征较相似,其中洼地充填志留系紫红色岩屑砂岩,在影像图上呈淡红色,溶蚀沟道则有明显的视觉梯度差,这两者都易于识别和提取(图3)。以此为基础,通过露头资料和Google Earth影像图的对比,统计出研究区共发育溶蚀洼地11个,计算得到溶蚀洼地所占面积从800 m²到95 000 m²不等,形态以椭圆形和近圆形为主。溶蚀沟道(包括主沟和支沟)在研究区内普遍发育,主沟的宽度在10~25 m之间,而支沟的宽度较小,一般在5 m以下。不同岩性在Google Earth影像上的响应特征也不同,如洼地中充填的紫红色岩屑砂岩呈淡红色(图3c);泥晶砂屑灰岩则以灰白色为主,颜色偏深,色度较暗(图3c);亮晶生物碎屑灰岩呈白色,颜色偏浅,色度较亮(图3d),生物碎屑灰岩组成了生物碎屑滩。

根据野外地质现象特点,本次研究的溶洞主要是指成人能够自由进入(一般高度在2 m以上)的天然地下空间^[32]。大型古溶洞的分带性在Google Earth影像图上响应特征不明显,需要野外GPS定点和实际考察相结合,以确定其分布位置及特征。从Google Earth影像图上可反映出西克尔剖面上大型古溶洞成群分布,主要沿溶蚀沟道和断裂分布。而通过露头考察资料解剖,可以得到大型古溶洞的详细特征。在平面上,大型古溶洞一般呈厅堂型,管道状和树枝状相连,多个溶洞成群分布,其中单个溶洞长度一般在15~80 m之间。在剖面上,大型古溶洞可以划分为5个带,包括溶洞主体带、洞顶强烈溶蚀垮塌破碎带、洞顶微弱溶蚀带、洞侧溶蚀影响带和洞底溶蚀破碎带(图4)。前人研究表明,整个溶洞系统都可以成为良好的储集空间^[4,33]。因此,建立量化的岩溶地质模型需要确定大型古溶洞的分布范围,并在此基础上分析其控制因素,为此明确了需要采集溶蚀洼地、溶蚀沟道和古溶洞这三类数据。

在识别与提取出古岩溶信息后,将野外的GPS



(b) 研究区的Google Earth影像特征(主要是(a)图中绿色方框圈定的地区)



(c) 研究区古岩溶现象(位于(b)图左上角蓝色框圈定的剖面)

图2 塔里木盆地西克尔奥陶系古岩溶露头区位置

高精度定点数据导入到 Google Earth 软件中进行影像数据分析,采集岩溶信息影像数据,结合野外资料,从而建立起了古岩溶地质数据库。根据影像分辨率和野外资料的特点,地质数据库中包括点数据和线段数据 2 种类型,其中溶蚀沟道、溶蚀洼地等地貌单元的

位置边界为点数据类型,大型古溶洞分布位置也为点数据类型,大型溶洞体的长、宽和高为线段数据类型,这些主要通过野外考察获取,以位置点计算得到建模线段数据(表 1)。点数据类型包括经度、纬度、海拔和代号。线段数据类型包括经度、纬度和线段长度。

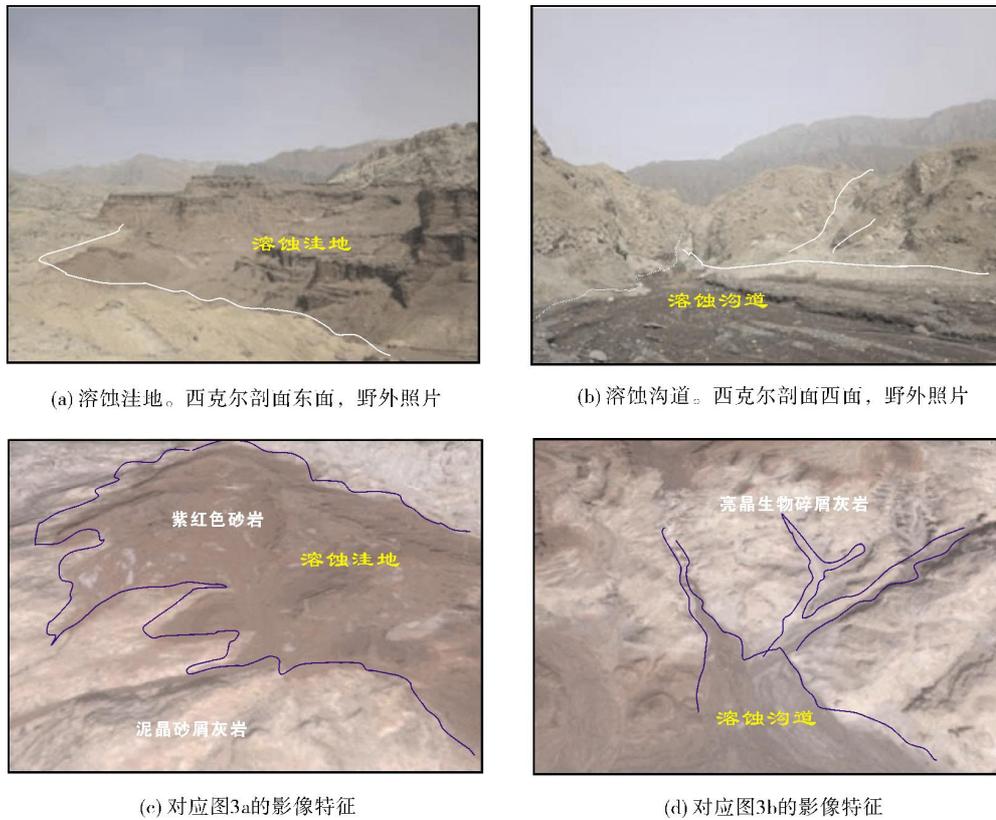


图3 古岩溶现象在Google Earth影像中的响应特征

表1 塔里木盆地西克尔剖面奥陶系岩溶量化数据类型及特征

数据类型	溶蚀洼地	溶蚀沟道	古溶洞
影像特征	紫红色	浅灰色	不明显
是否直接采集	是	是	否
数据类型	点	点	点和线段
采集数量	11组	25组	60个
应用范围	古地貌	古地貌	溶洞形态
影像图特征			

2.3 岩溶地质模型的建立及其应用

2.3.1 岩溶地质模型的建立及其特征

在获得转化的定量古岩溶地质数据库后,利用

Petrel 软件对研究区不同类型的数据采用不同的方法进行处理、显示和成图。溶蚀沟道(包括主沟和支沟)数据,采用曲面生成算法和正负高程控制,结合野外地质考察结果校正,得到地貌—溶蚀沟道分布

图;对溶洞的分布,采用简化的球形处理方式;对洼地和生物碎屑滩的分布,利用曲面算法对两者的边界数据进行处理,其中溶蚀洼地采取负高程控制,亮晶生物碎屑灰岩分布区采用正高程控制,得到残留古地貌的形态特征。最后,由所有的模块综合得到研



图4 塔里木盆地西克尔剖面奥陶系鹰山组大型古溶洞解剖

究区岩溶发育地质模型(图5)。从模型可看出研究区的溶蚀洼地、溶蚀沟道、大型溶洞等岩溶地貌发育齐全,直观反映了溶洞分布在溶蚀沟道的两侧,这表明溶洞受溶蚀沟道和地貌的控制,而断裂系统也是影响溶洞发育的控制因素(后文将述及)。

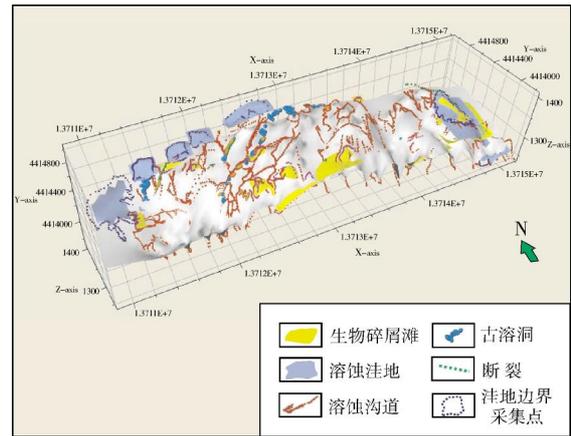


图5 塔里木盆地西克尔剖面奥陶系岩溶发育地质模型

2.3.2 岩溶地质模型的应用

在建立岩溶地质模型的基础上,可以结合野外考察及地质模型本身来应用和推广,这主要体现在两个方面,一是以模型为基础,分析岩溶储层发育的控制因素,客观理解地下岩溶储层的特征和分布规律;二是在前期岩溶储层模型建立过程中,通过野外考察与影像特征的校正,建立了相对应的联系,从而可对未开展露头采集的地区,对应地从Google Earth影像信息中进行地质信息的提取和采集,并对影像特征不明显的地质信息进行预测(如古溶洞)。

2.3.2.1 已知研究工区的岩溶储层控制因素分析

(1) 岩性是影响岩溶发育最基本的因素

野外资料统计结果表明,溶洞在生物碎屑灰

岩、泥晶砂屑灰岩中均有发育,但具不同的响应特征(表2):生物碎屑灰岩区溶洞主要发育在洼地附近,泥晶砂屑灰岩区溶洞则主要分布在溶蚀沟道附近,这在地质模型中同样可以反映该特征(图5);以生物碎屑灰岩为围岩的溶洞个数为27个,要少于泥晶砂屑灰岩区的73个,表明泥晶砂屑灰岩中溶洞相对更容易发育,这与地质模型反映的特征吻合较好,说明岩性控制了岩溶储层的分布。

(2) 岩溶发育受沟道系统和古地貌的控制

从西克尔地区岩溶地质模型(图6a)可见,岩溶区呈现中间高、两边低的格局,研究区中分布有多条规模较大的溶蚀沟道,溶洞则集中分布在研究区北面的地貌高点,另外,沿着研究区西面的一组溶蚀沟道中也分布了一群溶洞,这说明溶蚀沟道对古岩溶也有很强的控制作用。实际上,通过野外露头资料和

表2 塔里木盆地西克尔大型古溶洞系统分布特征统计表

发育位置	溶洞围岩	规模(m ²)	剖面形态特征	发育数目(个)
沟道附近	泥晶砂屑灰岩	大于500	椭圆形	15
断裂附近	泥晶砂屑灰岩	50-500	椭圆形或者葫芦形	22
沟道附近	泥晶砂屑灰岩	小于50	椭圆形	36
洼地附近	生物碎屑灰岩	大于500	椭圆形或者葫芦形	6
沟道附近	生物碎屑灰岩	50-500	椭圆形或者葫芦形	15
洼地附近	生物碎屑灰岩	小于50	椭圆形	6

Google Earth影像图的对比(图6b₁,图6b₂,图6c₁,图6c₂),可明显观察到溶蚀沟道的两侧分布有大量的

古溶洞,其中充填了大量的志留系柯坪塔格组紫红色砂岩。

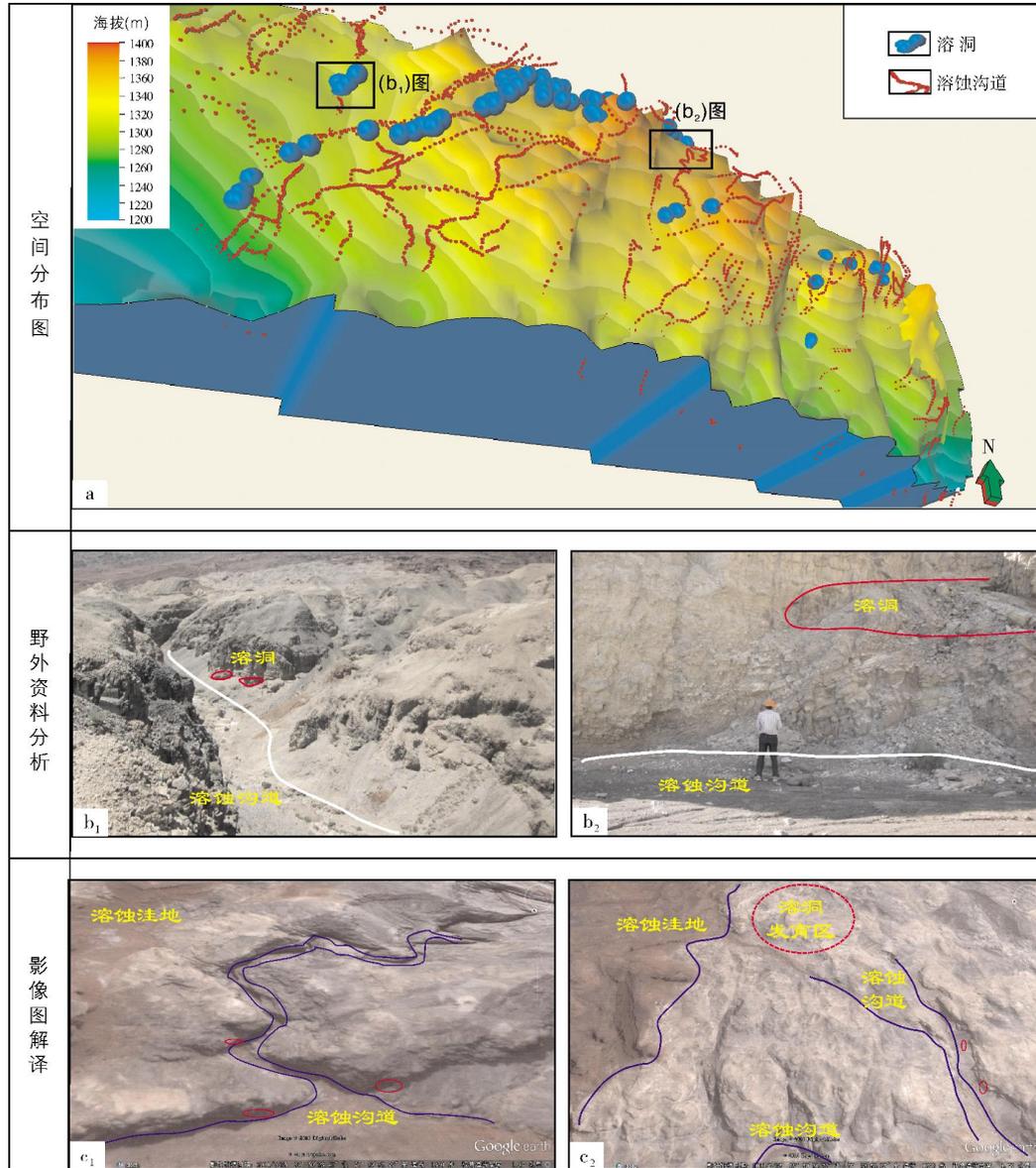


图6 塔里木盆地西克尔地区地貌-溶蚀洼地-溶蚀沟道与溶洞分布关系

(3) 断裂系统也是岩溶发育的重要控制因素

通过露头区考察,在西克尔4.5平方千米内,发育有3条大断裂,其中一条主断裂F₁,走向332°,另有两条伴生的次级断裂F₂和F₃,走向分别为82°和75°(图7a)。在构造应力作用下,发育有一系列的伴生裂缝。经统计,研究区的55条I级裂缝,以方位125°(位于120°~129°之间)和155°(位于150°~159°之间)的两组裂缝为发育的优势方位,且155°方位的裂缝处

溶洞发育相对密集(表3,图7)。

通过对大型古溶洞分布与断裂走向的叠合,发现溶洞明显受断裂的控制(图7a)。从野外剖面上,可以观察到部分溶洞沿着裂缝发育(图7b₁),也有部分溶洞系受到裂缝沟通影响而形成,后期溶洞垮塌,形成破碎带(图7b₂)。所有证据都表明,研究区溶洞的分布与断裂系统有很好的耦合关系,这表明断裂系统也是西克尔地区溶洞系统发育的控制因素。

表3 塔里木盆地西克尔剖面测量裂缝主要方位、级别及分布位置

走向范围	裂缝条数	延伸长度(m)	分布位置
0°~9°	3	20~50	西克尔沟东边
10°~19°	1	18	西克尔沟东边
20°~29°	2	35	西克尔沟
40°~49°	1	25	西克尔沟东边
50°~59°	1	30	西克尔沟
70°~79°	3	110	西克尔沟东边
80°~89°	3	30~80	西克尔沟东边
90°~99°	1	35	西克尔沟
100°~109°	2	25	大断裂溶洞顶部
110°~119°	3	35	大断裂溶洞顶部
120°~129°	15	63	大断裂溶洞顶部
130°~139°	1	50	西克尔东面
140°~149°	2	65	大断裂溶洞顶部
150°~159°	13	35	大断裂溶洞顶部
160°~169°	2	45	溶洞顶部
170°~179°	2	53	大断裂、溶洞顶部

2.3.2.2 未考察露头区的岩溶地质信息推断

根据本研究方法所得到的古岩溶特征,在野外考察中可观察到溶蚀洼地、溶蚀沟道等多种岩溶地貌单元。不同的岩溶地貌单元在Google Earth影像上响应特征有明显差别,通过与影像图的校正和对比,明确溶蚀洼地中充填志留系紫红色岩屑砂岩在影像图上呈淡红色,溶蚀沟道则有明显的高程差,可有视觉差别显示而被识别,山脊同样可通过高程显示来识别和提取。总体上,不同岩性,则颜色不同,紫红色岩屑砂岩在影像图上同样呈现紫红色,石灰岩以灰白色为主要色调。

据此,通过在影像图上搜索,可在西克尔剖面另一侧寻找到一块相类似的区域(图8,经纬度数据可通过影像图查明),由紫红色色调的砂岩和灰白色色调的灰岩所组成,也可找到多个溶蚀沟道发育。同时根据前面研究的结论,推断在溶蚀沟道发育的相对高点处发育溶洞,但是受到影像图分辨率(目前可分辨地质体间距在10m左右)的限制,难以直接从图像上采集相关信息。

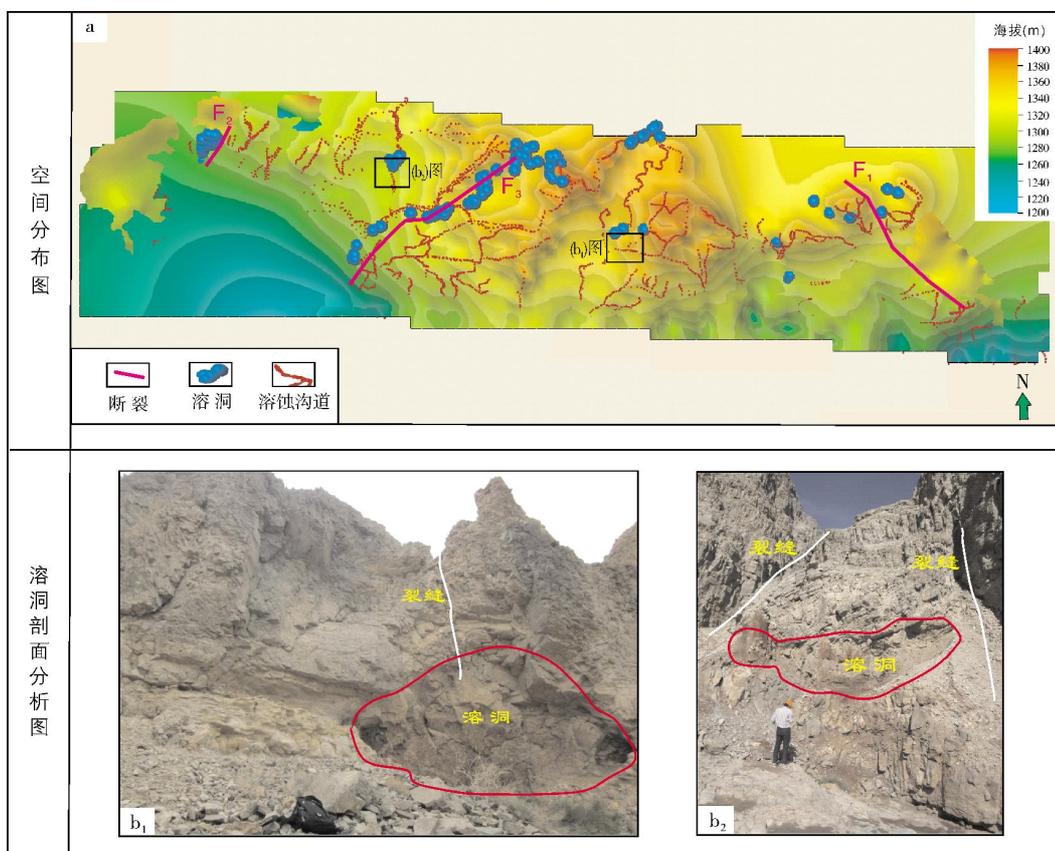


图7 塔里木盆地西克尔地区断裂系统、溶蚀沟道与溶洞平面分布的耦合关系图



图8 塔里木盆地西克尔未考察露头区的数据识别及采集示意图
虚线方框位置见图2a

3 结论及讨论

(1)综合 Google Earth 软件提供的影像形态特征和野外研究提供的实际地质资料,辅助采用 GPS 高精度定点,提出了基于野外资料和 Google Earth 影像的地质信息识别和提取方法。方法包括数据采集、数据处理和数据应用三个方面。其中,数据采集的关键在于利用 GPS 进行定点;数据处理的关键在于得到大地坐标;数据应用的关键在于建立量化地质模型。

(2)以塔里木盆地西克尔奥陶系古岩溶露头作为研究实例,建立了一个量化岩溶数据库。从 Google Earth 影像图上采集量化数据,从野外资料中得到大型溶洞的结构及分布特征。采集的数据包括点数据和线段数据 2 种类型。其中,点数据包括溶蚀沟道边界、溶蚀洼地边界、断裂和裂缝信息,具体数据中包含经度、纬度、海拔等;线段数据类型包括经度、纬度和线段长度,如溶洞的长度、宽度和高度等。数据经过转换成大地坐标后建立量化的古岩溶数据库。

(3)构建了岩溶地质模型并分析其控制因素。将古岩溶数据库中数据采用图形显示算法进行处理,得到量化的岩溶地质模型。以模型为基础,综合野外资料和影像特征,分析得到研究区古岩溶发育受到岩性、溶蚀沟道和古地貌以及断裂系统等多个因素的控制。

总体上,本研究中方法的提出及实例的应用,表明这些不仅可为勘探决策提供依据,而且可为岩溶缝洞型油藏开发中后期地质模型的精确表征提供量化的原型模型。该方法的实例应用取得了不错的效

果,但仍存在诸多不足;研究的精细程度取决于影像图的分辨率;对露头考察未涉及区域的预测仍是难点;仅有部分野外露头测量点,不能得到整个研究区岩溶缝洞体的三维空间结构及分布特征,这时综合探地雷达等工具进行研究可能是很好的补充。此外,今后的研究还需要将该方法的应用拓展到河流相、三角洲相和冲积扇相等现代沉积的空间分布上去。

致谢:感谢中国石油勘探开发研究院塔里木分院罗平教授对野外工作的指导,感谢吴珍珍博士在数据处理上给予的帮助。

参考文献

- [1] 王兆峰,陈鑫,王鹏,等.缝洞型碳酸盐岩储集体特征及预测——以 A 油田 PZ 段为例[J].石油与天然气地质,2012,33(3): 459-466.
- [2] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoir: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [3] Loucks R G, Mescher P K, McMechan G A. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(5): 545-564.
- [4] 刘伟,罗平,顾家裕,等.塔里木盆地西克尔地区古岩溶储层露头表征[J].地质学报,2010,84(8): 1215-1222.
- [5] 焦养泉,荣辉,王瑞,等.塔里木盆地西部一间房露头区奥陶系台缘储层沉积体系分析[J].岩石学报,2011,27(1): 285-296.
- [6] 沈安江,郑剑锋,顾乔元.塔里木盆地巴楚地区中奥陶统一间房组露头礁滩复合体储层地质建模及其对塔中地区油气勘探的启示[J].地质通报,2008,27(1): 137-148.
- [7] 郑剑锋,沈安江,乔占峰,等.基于激光雷达技术的三维数字露头及其在地质建模中的应用——以巴楚地区大班塔格剖面礁滩复合体为例[J].海相油气地质,2014,19(3): 72-78.
- [8] Pringle J K, Westerman A R, Clark J D, et al. 3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: An example from Alport Castles, Derbyshire, UK [J]. Petroleum Geoscience, 2004, 10(4): 343-352.
- [9] Young R A, Slatt R M, Staggs J G. Application of ground penetrating radar imaging to deepwater (turbidite) outcrops [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(6/8): 809-821.
- [10] 杨佳佳,姜琦刚,陈永良,等.基于最小二乘支持向量机和高分辨率遥感影像的大尺度区域岩性划分[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1): 60-67.
- [11] Purkis S J, Riegl B M, Andrefouët S. Remote sensing of geomorphology and facies patterns on a modern carbonate ramp (Arabian Gulf, Dubai, U.A.E.) [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(5): 861-876.
- [12] Philip G. Remote sensing data analysis for mapping active faults in the northwestern part of Kangra Valley, NW HI-

- malaya, India [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(21): 4745-4761.
- [13] 段慧娟, 边少锋. 基于 Google Earth 的海洋物理场数据可视化研究[J]. *海洋测绘*, 2008, 28(6): 36-39
- [14] 莫善军, 李志凛, 陈成江, 等. 利用 Google Earth 建立等高线三维地形模型[J]. *测绘通报*, 2012, 57(2): 39-42.
- [15] 张斌, 艾南山, 黄正文, 等. 中国嘉陵江河曲的形态与成因[J]. *科学通报*, 2007, 52(22): 2671-2682.
- [16] 杨瑞东, 魏晓, 文雪峰, 等. 利用 Google Earth 研究构造对喀斯特地貌的控制和对碳酸盐岩岩系风化成土的影响[J]. *地球与环境*, 2009, 37(4): 319-325.
- [17] 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 浅水三角洲沉积模式[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 933-944.
- [18] 谭克龙, 万余庆, 王晓峰, 等. 基于遥感技术的煤炭勘查方法研究[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 218-227.
- [19] 石书缘, 胡素云, 冯文杰, 等. 基于 Google Earth 软件建立曲流河地质知识库[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 869-878.
- [20] 杨瑞东, 盛学庸, 魏晓, 等. 基于 Google Earth 影像分析区域性大型“X”共轭节理系统对宏观岩溶作用的控制[J]. *地质论评*, 2009, 55(2): 173-180.
- [21] 周刚, 郑荣才, 罗平, 等. 塔里木盆地西克尔地区中奥陶统鹰山组生物礁沉积特征[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(4): 365-368.
- [22] 周刚, 郑荣才, 罗平, 等. 塔里木盆地西克尔中奥陶统礁滩相储层成岩特征与系统划分[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 135-145.
- [23] 张文博, 金强, 徐守余, 等. 塔北奥陶系露头古溶洞充填特征及其油气储层意义[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(3): 50-54.
- [24] 刘显凤, 吴楠, 蔡忠贤, 等. 新疆西克尔地区碳酸盐岩系垂向裂缝层控发育模式[J]. *地球科学 中国地质大学学报*, 2011, 36(6): 1125-1133.
- [25] 高达, 林畅松, 黄理力, 等. 塔里木盆地西克尔露头区鹰山组古岩溶特征及其储层意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(1): 156-162.
- [26] 李宝刚, 贾承造, 李启明, 等. 塔里木盆地西克尔地区古溶洞特征及主控因素[J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(3): 247-250.
- [27] 石书缘, 胡素云, 刘伟, 等. 塔里木盆地西克尔地区奥陶系溶洞系统特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(2): 167-177.
- [28] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(1): 1-12.
- [29] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. *石油学报*, 2011, 32(1): 101-106.
- [30] 张朝军, 贾承造, 李本亮, 等. 塔北隆起中西部地区古岩溶与油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 263-269.
- [31] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔里木盆地英买力—哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩岩溶型储层特征及成因[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 465-474.
- [32] Curl R L. Scallops and flutes [J]. *Transactions of Cave Research Group of Great Britain*, 1966, 7(2): 121-160.
- [33] 夏日元, 邹胜章, 梁彬, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011.

编辑: 黄革萍

Identification and Acquisition Methods of Geological Information Based on Integrating Outcrops and Google Earth Satellite Images: A Case at an Ordovician Paleokarst Outcrop in Xekar, Tarim Basin

Shi Shuyuan, Hu Suyun, Liu Wei, Wu Na, Cai Jun

Abstract: Public Google Earth satellite images can provide a large number of quantitative information data of geology. On the basis of outcrop information anatomy, precise positioning by GPS and the high resolution satellite image, a new method by integrating outcrop data and Google Earth images for identifying and acquiring geological information was proposed. To test the method of validation, the Ordovician paleokarst outcrop developed in Xekar area, Tarim Basin, was adopted to build karst geological model. The responsive characteristics of several types of geological information, which contains corrosion channels, paleocaves on Google Earth images in Xekar, can be confirmed. A quantitative paleokarst geological database is established. The basic type of data contains the edges of corrosion depressions, the edge of corrosion channels, and the size of paleocaves. Paleokarst geological models, outcrop phenomenon and satellite images are all available data that can be used to analyze the controlling factors of paleokarst in the research area.

Key words: Paleokarst; Geological modeling; Ordovician; Google Earth satellite image; Tarim Basin

Shi Shuyuan: Master. Add: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 20 Xueyuan Rd., Beijing, 100083, China