

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.018

尼泊尔基本石油地质条件及对油气勘探的启示

王正和^{1,2}, 谭富文^{1,2}, Rajaure Sudhir³, Tripathi Ganesh Nath³, 杜佰伟^{1,2}, 杨平^{1,2}
WANG Zhenghe^{1,2}, TAN Fuwen^{1,2}, RAJAURE Sudhir³, TRIPATHI Ganesh Nath³,
DU Baiwei^{1,2}, YANG Ping^{1,2}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081;

3. Department of Mines and Geology, Kathmandu, Nepal

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China;

3. Department of Mines and Geology, Kathmandu, Nepal

摘要: 尼泊尔境内地质条件复杂, 油气勘探程度和投入及油气地质认识程度很低, 但其低喜马拉雅带及以南地区具丰富的油气显示。为了进一步探讨尼泊尔山前带的油气勘探潜力, 结合前人研究成果及新认识, 对尼泊尔低喜马拉雅带及以南的区域油气地质特征进行了梳理、总结与分析。结果表明, 尼泊尔低喜马拉雅带及以南发育多套潜在的规模性烃源岩, 具有潜在的生、储、盖组合; 新构造运动是控制区域性油气运移与调整成藏的关键; 丰富的地表油气显示及静态石油地质条件预示着尼泊尔低喜马拉雅带及以南, 尤其是 MBT 以南具有良好的油气远景与勘探潜力。

关键词: 尼泊尔; 石油地质; 烃源岩; 油气潜力; 喜马拉雅; 新构造运动

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)02/03-0411-09

Wang Z H, Tan F W, Rajaure S, Tripathi G N, Du B W, Yang P. Basic petroleum geological conditions in Nepal and its implications for hydrocarbon exploration. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 411-419

Abstract: Nepal has complex geological conditions, low degree of hydrocarbon exploration and investment, and low degree of understanding about the petroleum geology. But there are abundant surface and borings shows of hydrocarbon in Lesser Himalaya and its south. In order to understand the hydrocarbon potential of the mountain front in Nepal, the authors intend to combine the previous and the new research results to summarize and analyze the petroleum geological characteristics in the Lesser Himalaya of Nepal and its south. The results show that there are many large scale potential layers as source rocks in Lesser Himalaya of Nepal and its south, and there are also a assemblages formed by potential source rocks, reservoirs and cap rocks. Neotectonic movement is the key to control the regional migration and the adjustment of hydrocarbon. Both of the abundant hydrocarbon shows and the static petroleum geological conditions indicate that Nepal's Lesser Himalaya and the south, especially south of MBT, have good prospects for hydrocarbon exploration.

Key words: Nepal; petroleum geology; source rock; hydrocarbon potential; Himalaya; neotectonics

尼泊尔东西延伸最大长度约为 825 km, 南北宽 170~250 km, 其东、南、西三面与印度相接, 北边与中国相邻, 地形变化剧烈。其约 1/3 的面积属于印

度北部的恒河平原, 被厚度较大的第四系覆盖, 无基岩出露; 另外约 2/3 的面积处于印度-欧亚大陆碰撞形成的喜马拉雅造山带南坡, 所有地层仅在这

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-08-31

资助项目: 商务部项目《援尼泊尔油气资源调查》(编号: CGSA001)

作者简介: 王正和(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 从事石油天然气地质综合研究。E-mail: 3121927631@qq.com

一区域大致平行喜马拉雅山脉呈不完整的线性出露。因构造改造及变质作用强烈,加之由北往南地层的缺失越来越多,地层往南的尖灭成因(比如是沉积尖灭还是剥蚀尖灭)与状况(如尖灭位置)多不清楚,难以建立该区域完整的地层序列,难以重建各套地层的岩相古地理并预测生、储、盖时空展布,也难以恢复各地层单元的埋藏史、热演化史和潜在烃源岩的生排烃史,导致不能全面系统地评价其境内的油气资源潜力。

迄今,尼泊尔境内无工业性油气开发,但在以往的双边或多边合作中,已开展过地质、二维地震、航磁、重力、遥感、钻探等工作,并以南部 Terai 平原为重点,划分了 10 个油气勘探区块,每个区块约 5000 km²。尼泊尔境内的地质调查始于 1950 年,目前已有 1:25 万地质图覆盖了 10 个油气勘探区块。尼泊尔境内系统性的油气调查始于 1979 年。在工业开发署/世界银行的帮助下,尼泊尔地质矿产部(DMG)在 1979—1980 年主导了覆盖 Terai 平原和 Siwalik 带 48000 km² 的航磁调查。Hunting Geology and Geophysics 有限责任公司于 1984 年在尼泊尔南部实施了 60000 km² 的遥感地质研究。1982—1992 年,开展了总计 5253 km 的地震资料采集,主要覆盖了尼泊尔南部 Terai 平原。壳牌尼泊尔公司于 1986—1990 年对尼泊尔东部第 10 区块进行了勘探工作,包括对岩石样品的地球化学研究及闭合的网格化重力和地震勘探(超过 2000 km),并于 1989 年 6—8 月在一地垒(大致为印度中北部 Ganga 盆地与 Purnea 盆地之间的 Mongher-Saharsa 脊向北的倾没端)控制的小型低幅背斜上,钻探了尼泊尔境内迄今唯一的一口探井——Biratnagar-1 井(TD3520 m),该井无油气显示。

目前为止,与尼泊尔处于相似构造-沉积演化背景下的邻区-巴基斯坦北部的 Potwar 盆地及印度东北部的 Assam 盆地均有油气产出。尼泊尔境内虽然开展过上述与油气勘探相关的工作,但迄今仍无任何油气产出。这可能归因于尼泊尔境内地质条件复杂、油气勘探程度低,无持续性勘探投入,并且缺乏新的成功勘探经验在本区的实践,加之广泛的变质岩出露对油气勘探极具挑战。那么,具有丰富地表油气显示的尼泊尔境内具有什么样的油气地质条件?究竟有无油气远景?针对这些问题,笔者从区域基本石油地质条件分析入手,既参考前人对

尼泊尔境内的石油地质研究成果,又参考前人对尼泊尔以南印度邻区(尼泊尔低喜马拉雅带往南至印度中北部在地质历史上具有一致的构造-沉积演化历史,另文发表)的石油地质研究成果,并结合最近的新发现、新认识,对尼泊尔低喜马拉雅带及以南的区域石油地质条件进行总结与分析,以期能引起产业界对尼泊尔油气远景与勘探潜力的重新审视及关注。

1 地质背景

尼泊尔位于印度板块与欧亚板块碰撞形成的弧形喜马拉雅造山带向南凸出的中间部分(Dhital, 2015),主体处于喜马拉雅山脉南坡。前人对尼泊尔进行了方案不一的构造区带划分(Dhital, 2015)。目前,从北到南,通常将尼泊尔划分为 5 个东西走向的构造带:特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅、次喜马拉雅及特莱平原(图 1)(Dhital, 2015; Khadka, 2017)。各构造带之间以大的断层分隔,这些断层由北往南分别为 STDS(藏南拆离系)、MCT(主中央逆冲断裂)、MBT(主边界逆冲断裂)及 MFT(主前缘逆冲断裂)。其中,特提斯喜马拉雅主要指位于印度-雅鲁藏布江缝合带与 STDS 之间的未变质沉积岩,其地层时代为寒武纪—古新世;高喜马拉雅指 STDS 与 MCT 之间的结晶岩区域;低喜马拉雅指 MCT 与 MBT 之间的区域,以未变质—高级变质的元古宙 Dailekh 群和 Lakharpata 群、晚石炭世—早白垩世 Gondwana 群、晚白垩世—早中新世 Surkhet 群沉积岩为主,夹变质侵入岩;次喜马拉雅等同于 Siwalik 褶皱带,指 MBT 与 MFT 之间的区域,主要由中中新世—早更新世前陆盆地背景下沉积的 Siwalik 群构成,局部为第四系覆盖;Terai 平原指恒河平原位于 Nepal 境内的部分(Stoecklin, 1980; Khadka, 2017),全为第四系覆盖,该区域也具有叠合盆地性质(王正和等, 2022)。上述的各大断裂除 STDS 为低角度正断层外(Liu et al., 2012), MCT、MBT 及 MFT 均为大型逆冲断层,且后面 3 条逆冲断层由北往南,其形成时代越来越新(Upreti, 1999)。其中, MCT 形成于 25~20 Ma(Hodges et al., 1988; Macfarlane, 1993; Meigs et al., 1995), MBT 形成于约 11 Ma(Meigs et al., 1995), MFT 的形成时间晚于 3 Ma(DeCelles et al., 2001)。

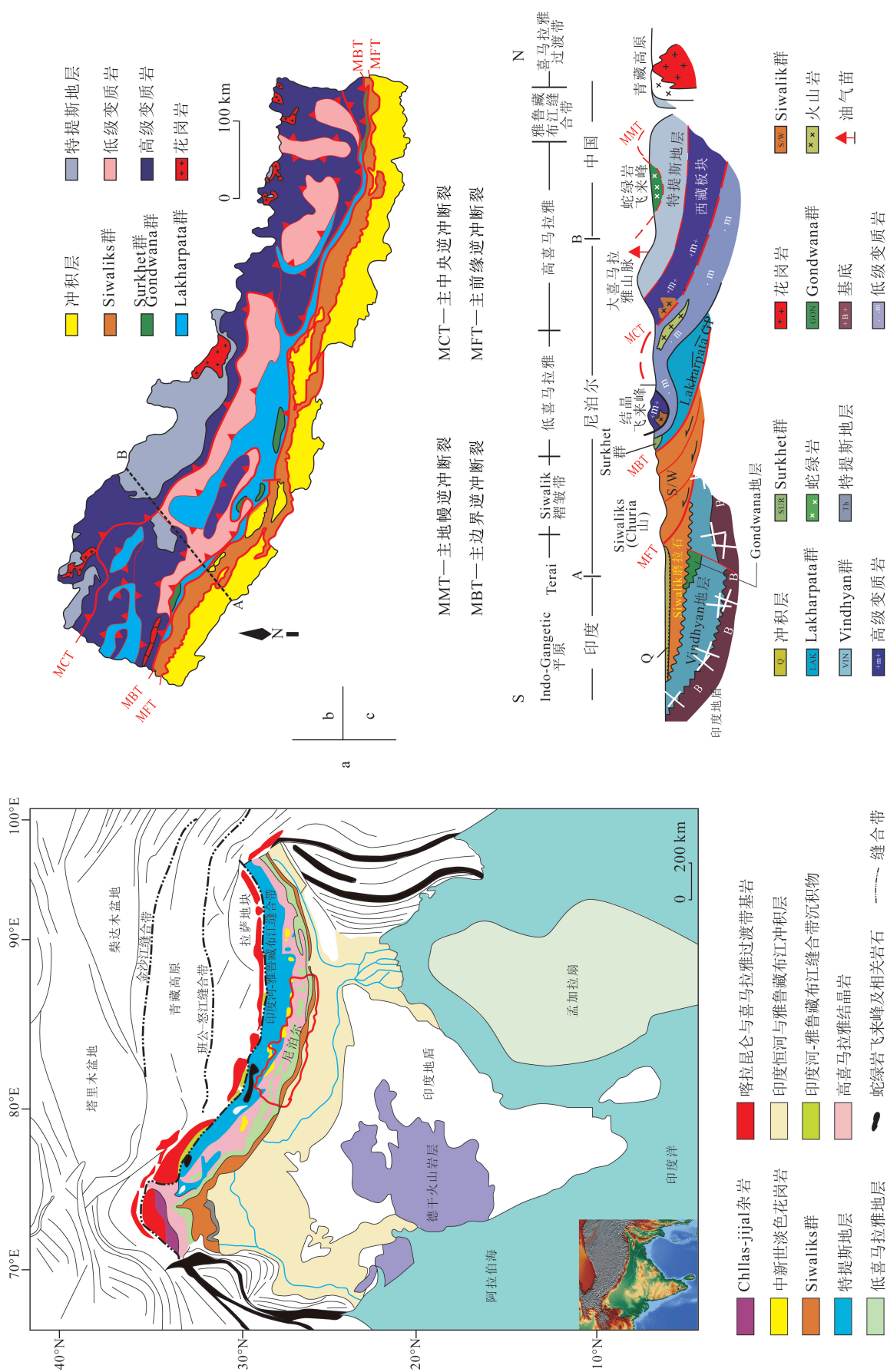


图1 尼泊尔及邻区大地构造位置 (a) (据Dhital, 2015)、尼泊尔地质简图(b)和南北向横跨尼泊尔地质构造剖面图(c) (据Subed et al., 2012)

Fig. 1 Tectonic location of Nepal and neighboring areas(a), the simple geological map of Nepal(b) and north-south cross-section of Nepal's geological structure(c)

构造、变质、地层特征(如古生物缺乏、地层缺失、难以准确定年)等因素,导致针对尼泊尔境内地层的研究难度大、研究程度低,难以建立完整的沉积地层充填序列,对地层的划分及构造的演化也存在多种方案和争议,故地层和构造仍然存在许多未解之谜(Dhital, 2015)。综合前人研究成果与认识,尼泊尔境内地层自下而上包含前寒武纪 Miland 超群、石炭纪—白垩纪 Gondwana 群、晚白垩世—早中新世 Surkhet 群和中中新世—早更新世 Siwalik 群。其中, Miland 超群又分为 Dailekh 群和 Lakharpata 群,前者相当于 Midland 超群下部,后者相当于 Midland 超群上部; Surkhet 群相当于 Tansen 群(表 1)。Dailekh 群、Lakharpata 群和 Surkhet 群通常出露于 MBT 以北, Siwalik 群则通常在 MFT 与 MBT 之间,沿整个喜马拉雅前缘从西至东均有出露(图 1-a、b)。其中, Dailekh 群主要为低级—中级变质岩,在尼泊尔西部 Surkhet 以北的 Dailekh 地区出露最全, Lakharpata 群则为未变质—低变质程度,在 Surkhet—Tansen 一带出露最全, Gondwana 群主要出露于 Tansen、尼泊尔东部 Dharan, 以及 MCT 以北的特提斯喜马拉雅。

Dailekh 群:由元古宙千枚岩、片岩、片麻岩、石英岩等低—高级变质沉积岩构成,多沉积于被动大陆边缘滨岸至半深海相,夹变质岩浆岩;变质沉积岩基本上为哑地层,无可识别的古生物。在西尼泊尔 Surkhet 地区低喜马拉雅带,该群含有 2 套厚度大,且炭质含量高的灰黑色炭质板岩—片岩,也含有厚度大、中—粗粒的浅变质或低级变质石英砂岩。该群全境均无完整出露。

Lakharpata 群:相当于印度北部的 Vindhyan 超群(Khadka, 2017),更近于下 Vindhyan 群。由浅变质—未变质的海相沉积的页岩、粉—细砂岩及碳酸盐岩构成,碳酸盐岩多为中—薄层状泥微晶灰岩或白云岩,且基本上只发育藻类化石,多形成叠层石。在西尼泊尔 Tansen 地区低喜马拉雅带,该群中出露一套厚度大,且炭质含量高的灰黑色炭质钙质板岩—片岩。该群全境均无完整出露。

Gondwana 群:由页岩、砂岩、碳酸盐岩、火山碎屑岩等组成,局部夹煤线或薄煤层,横向相变明显。在尼泊尔 Tansen 及 Dharan 一带只发育二叠系,在特提斯喜马拉雅,石炭系—白垩系均有发育。该群与下伏的 Lakharpata 群均沉积于陆内裂

谷环境。

Surkhet 群:自下而上主要由 Melpani 组、Swat 组和 Suntar 组组成。其中, Melpani 组为海岸相沉积,以中粗粒石英砂岩为主,夹泥岩,其时代大致为晚白垩世—古新世。Swat 组以灰色—灰黑色炭质泥页岩为主,夹薄层状或透镜状灰岩,含有货币虫和露环虫属,其时代为始新世,相当于印度和巴基斯坦的 Subathu 组、Laki 组,其上部属海岸沉积环境(Kumar, 1991),为海相向陆相的过渡。Suntar 组为河流相沉积,以紫红色泥岩及灰绿色砂岩交互为特征,其时代大致为中中新世早期—渐新世,相当于喜马拉雅西北部 Kashmir 地区和巴基斯坦 Potwar 地区的 Murree 组,也相当于尼泊尔境内 Simla 地区的 Dagshai 组和 Tansen 地区的 Dumri 组。

Siwalik 群:主要由泥岩、砂岩和砾岩构成,自下而上为粒度逐渐变粗的倒旋回,也是水退过程中形成的一套地层序列。且通常依据岩性特征划分为上、中、下 3 个岩性单元。其中,下 Siwalik 以暗色泥岩为主,中 Siwalik 以砂岩为主,上 Siwalik 以磨拉石建造为主。

尼泊尔在地质历史上位于印度地盾边缘,长期保持着被动大陆边缘背景。其境内发育的地层总体上呈现向印度地盾超覆尖灭的趋势。因此,从印度地盾往北经尼泊尔至 Tethys 喜马拉雅,由老到新的地层越来越全,而向相反方向,地层缺失越来越多。老于 Siwalik 群的很多地层向南的现今尖灭位置尚难以确定,且往南的地层缺失究竟是属于沉积缺失,还是被剥蚀缺失,依然是悬而未决的问题。另外,从区域地层特征看,即便是元古宙地层,其在印度中北部的 Vindhyan 盆地中仍然尚未变质,而往北进入造山带内,其变质程度才越来越高,并在喜马拉雅南坡呈现为倒置的变质序列(大致海拔越高,变质程度越高)。因此,在低喜马拉雅带及以北出露的变质沉积岩,在山前带究竟变质程度如何,仍然存在疑问。

2 基本石油地质条件

2.1 油气显示

在尼泊尔及喜马拉雅山南侧的邻区,无论是 Vindhyan 盆地中,还是尼泊尔低喜马拉雅带,均有丰富的油气显示。在西尼泊尔 Surkhet 地区,既发现过较多的气苗显示,也发现过油苗点及古油藏。其

表 1 尼泊尔低喜马拉雅带及以南综合地层

地层单元			时代	潜在 烃源岩	潜在 储层	潜在 盖层	成熟 度	圈闭 类型	厚度 /m	岩性特征	其他特征	大致 沉积 环境	构造 背景
超群	群	组/段											
Midland超群	Siwalik群	上Siwalik组	中新世—上新世					构造及岩性圈闭	2400—6300	以巨厚的砾岩/磨拉石建造为主 以砂岩为主		前陆盆地	被动大陆边缘
		中Siwalik组						1100—2800	红色、紫色、绿色及杂色泥岩、粉砂岩及砂岩。泥岩、粉砂岩比重较高				
		下Siwalik组						~750	硬的红褐色—绿灰色细—中粒砂岩与紫色、绿色及灰色页岩交互，且页岩中夹泥灰岩条带				
		Suntar组				160—200	深灰色—绿灰色页岩夹透镜状或条带状深灰色含化石灰岩	与下伏地层呈角度不整合					
		Swat组				>280	浅灰色—深灰色含铁变质石英岩及细—粗砂岩夹灰色炭质页岩及偶尔的砾岩及泥质灰岩夹层						
	Surkhet群	Melpami组	中新世—上新世				油窗		下部含底砾岩，之上为橄榄绿中粗砂岩与浅红色—紫色—少量不规则绿色斑点页岩交互。底砾岩主要为火山岩及石英岩	该群在印度的地槽盆地含煤、产气，但在巴基斯坦的Potwar油由该群组成。该群在印度地槽中北部沉入，并且指状侵入旁尼泊尔、尼泊尔、孟加拉、Arunachal山脚为海相沉积。海相沉积在中央—东尼泊尔山前深部也可能发育			
		Taltung组					~200						
	Gondwana群	Sisne组	中新世—上新世				油窗		~1000				
	Lakhapatala超群（等同于印度的下Vindhyan群）	Anu组	中新世—上新世					裂缝、溶孔、溶洞	?	白云岩为主，夹少量砂岩与页岩	相当于印度的下Vindhyan群，顶界为角度不整合；厚度>5000 m 尼泊尔境内可能缺失印度中北部Vindhyan盆地中的上Vindhyan群	深裂槽—浅裂槽	
		Katwa组						气窗	?	灰色—深橄榄灰色—黑色钙质页岩，向上夹灰岩及黄灰色—褐灰色灰质白云岩			
		Khara组						?	灰岩与页岩比重相当				
		Gawar组						约1700	下部以白云岩及灰岩为主，上部以页岩夹砂岩为主				
		Ramko组						约850	粉色、灰色砂岩及紫色、绿灰色—灰色页岩夹粉色—灰色白云岩				
	Mahakoshal群（等同于印度的Dailik超群）	Sangram组	中新世—上新世						约1700	灰色—绿灰色—黑色页岩为主，其次为钙质砂岩与灰岩	以变质沉积岩为主，夹变质侵入岩		
Nabhisthan组							?	千枚岩为主					
Dubidanda组							?	中粗粒石英岩为主，夹变质侵入岩					
Gitachaur组							?	以云母片岩和云母石英岩为主					
Paraju组							?	中粒石英岩夹炭质片岩					
Dailekh段							?	以铁质胶结的中细粒石英岩为主					
Dungeshwor组							?	以片麻岩和花岗岩为主					
Dailik超群	Raniban组						?	片岩、石英岩及片麻岩					
	Gorthi组						?	片岩、石英岩					

中,在 Surkhet 北部 Dailekh 地区低喜马拉雅带元古宙变质岩出露区的气显最多,且有的气苗点逸出的天然气被简陋的管线引入附近的寺庙燃成长明火(图版 I-a)。笔者曾对 Dailekh 一处小河中的气苗点做过估算,该处一个冒泡点每年可泄露常压下天然气大于 61 m^3 (而实际上,一个气苗点往往包含很多冒泡点)。尼泊尔西部的 Dailekh 地区 Dailekh 群变质岩出露区也发现过棕黄色轻质油苗,收集的样品保存于尼泊尔地质矿产局(图版 I-b)。笔者在 Surkhet 市北郊 Surkhet 群 Melpani 组滨岸相石英砂岩中也首次发现富含干沥青的古油藏(图版 I-c),前人在 Surkhet 以东其他地方的该套地层中也发现了富含干沥青的古油藏。笔者在 Surkhet 地区 Surkhet 群的 Sutar 组砂岩,以及 Siwalik 群中的 Siwalik 砂岩中均发现沥青脉(图版 I-d、e)。这些丰富的油气显示意味着尼泊尔境内具有良好的油气远景。

2.2 潜在烃源岩

在尼泊尔低喜马拉雅带及以南的地层序列中,自下而上发育多套潜在烃源岩。

(1) 在西尼泊尔 Dailekh 群的 Gitachaur 组和 Parajul 组中均发育规模性的富有机质层段(图 2),其中,Parajul 组中烃源岩垂厚约 25 m, Gitachaur 组中烃源岩目估大于 15 m,且 Gitachaur 组中的 3 件样品的 TOC 分别达到 4.63%、7.12% 和 8.53%。虽然这 2 套地层在低喜马拉雅出露区已经变质,但其在变质前的地质历史中也应为烃源岩。另外,这 2 套地层在往南的埋藏区是否变质尚属疑问,这是因为喜马拉雅造山带中的变质岩变质程度为逆序,海拔越高,变质程度越高,且印度中北部 Vindhyan 盆地的元古宙地层仍未变质。因此笔者认为,造山带内的变质岩基本上属于动力变质,怀疑往南离造山带越远,地层受动力变质作用越弱,直至未变质。

(2) 在 Tansen 地区出露的 Lakharpata 群 Sangram 组中也发育规模性的富有机质层段,据 Slind(1993)研究^①,采自中部地区该套地层中的炭质页岩 TOC 含量为 1.6%~10.33%。在尼泊尔以南的 Vindhyan 盆地中发育的超过 5000 m 厚的元古宙沉积地层中,也含有多次最大海泛形成的多套烃源岩(Banerjee et al.,2006)。其中,与 Lakharpata 群相当的下 Vindhyan 群中的 Hinota 和 Pulkova 页岩 TOC 分别达 3.89% 和 1.86%, Arangi 页岩 TOC 为

0.5%~10.14%, Rampur 页岩 TOC 为 1.14%~1.78%,均被认为具有良好的烃源岩潜力,且 Vindhyan 盆地地表和钻井中的气显均表明该盆地具有油气勘探潜力(Prasanna et al.,2010;Rasheed et al.,2010;Paul et al.,2013)。这可能表明,Vindhyan 盆地恒河平原深部延伸的 Sarda、Gandak 拗陷也会存在与 Vindhyan 超群可对比的、较好的烃源岩及油气勘探潜力。

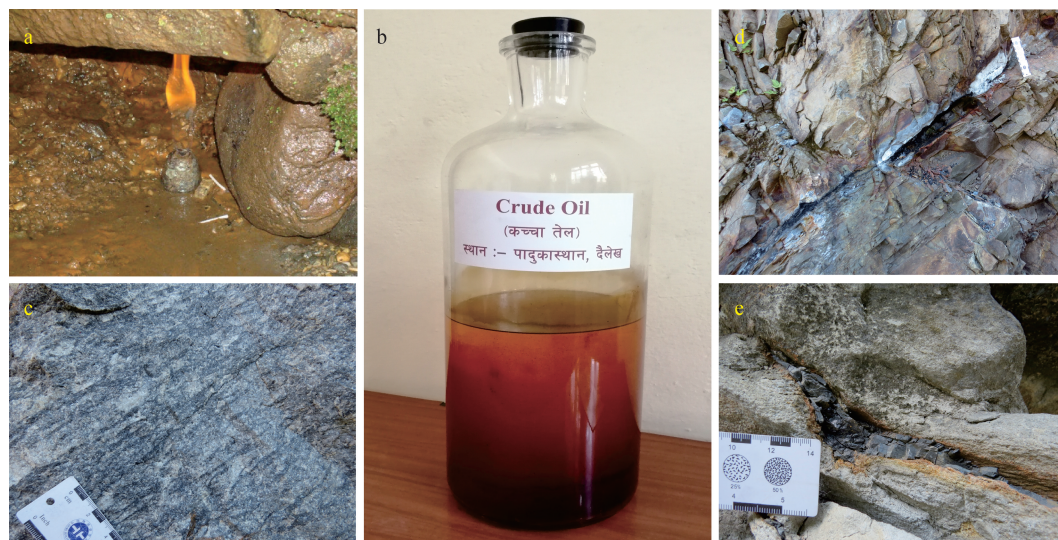
(3) 尼泊尔境内的 Gondwana 群在东尼泊尔达兰一带出露煤系烃源岩,但其中的烃源岩规模尚不明确。不过,该群的煤系是中印度主要的产煤层系,而且在印度的含煤地堑中,该套层序亦产气。该群的 TOC 可达 10%(Subedi et al.,2012),而尼泊尔东部以南印度中北部的 Raniganj 盆地中, Gondwana 群下部发育累积厚度远超 80 m 的富有机质页岩,页岩 TOC 为 1.01%~12.73%,以 III 型干酪根为主, $T_{\max}$ 介于 430~470℃ 之间,是该盆地主要的页岩气勘探目标(Mendhe et al.,2017)。

(4) 尼泊尔低喜马拉雅带 Surkhet 群中的 Swat 组以含炭质泥页岩为主,在 Sanodhupa、Naiti、Syaule Khola 等地区厚约 200 m(Khadka,2017)。前人对 Swat 组 26 件露头样品的分析表明,TOC 为 0.07%~2.80%,平均为 0.57%,其中 3 件样品 TOC > 2%(Slind,1993)^①。露头上,该套地层 TOC 虽然偏低,但在覆盖区应该会横向相变至高 TOC 相带。并且,尼泊尔境内仅出露于 MBT 以北低喜马拉雅带的这套地层如果确实属于隆后盆地沉积(Li,2013),那么有理由相信,前渊相带的富有机质沉积已全被掩埋在 MBT 之下。而且, Surkhet 群底部的 Melpani 组往北也可能有可对比的、具烃源岩潜力的富有机质低能相带被掩埋在 MBT 之下。

(5) 前陆盆地前渊沉积的下 Siwalik 群中潜在的烃源岩也可能有相当一部分被逆掩在 MBT 之下。而且,由于前渊向南迁移,下 Siwalik 群中的烃源岩可能会逐步向南超覆,导致其横向展布范围很广。

此外,中印度 Vindhyan 盆地 Son Valley 下 Vindhyan 群的 Semri 群及上 Vindhyan 底部的 Kaimur 群中的露头中,页岩有机质 VR_o 多数都低于 0.5%(Dayal et al.,2014)。但 Banerjee et al.(2006)同样对 Vindhyan 盆地 Son Valley 中的 Vindhyan 超群露头样品有机质成熟度 VR_o 进行研究,结果为 2.05%~2.40%。从地层时代及 Vindhyan 盆地钻井

图版 I Plate I



a. Sristhan 附近的气苗(据 Subedi et al., 2012); b. 从 Dailekh 油苗点收集到的轻质油(被保存于尼泊尔地质矿产局);
c. Surkhet 北郊 Melpani 组中的古油藏; d, e. Santar 组和中 Siwalik 砂岩中的沥青脉

气显看, Banerjee et al. (2006) 的 VR_o 结果可能更合理。

Sarda 坳陷南部(位于印度境内的恒河平原)的 Tisua-A 井在 3000 m 以浅钻遇厚约 45 m 的前新生界潜在烃源岩, 13 件样品 TOC 为 0.89%~5.80%, 平均值为 3.19%, VR_o 为 0.72%~1.1%, $HI-T_{max}$ 参数表明为 III 型干酪根; Banda-A 井中钻遇厚约 35 m 的 Siwalik 群潜在烃源岩, 7 件样品 TOC 为 4.65%~9.78%, 均值为 6.46%, $HI-T_{max}$ 参数表明为 I 型干酪根(Chand et al., 2012)。

Gandak 坳陷南部(位于印度境内的恒河平原)所钻的 Gandak-1 井中, 埋深 4400 m 以下的晚前寒武纪—寒武纪泥页岩 VR_o 也仅达 1.53% (Srinivas et al., 2014), 仍处于可大量生气阶段。据模拟, Swat 组处于 4070~4325 m 埋深时, 其 R_o 处于 0.68%~

0.72% 之间, Surkhet 群底界埋深处于 6450 m 时, R_o 为 1.37%, Siwalik 群底界埋深 5960 m 时, R_o 为 1.14% (Khadka, 2017)。

Tansen 地区 MBT 上盘 Swat 组露头样品 VR_o 为 2.12%~2.14%。尼泊尔全境内 Siwalik 群露头样品 R_o 为 0.36%~1.04%^②。

以上分析表明, 无论是细粒岩的 TOC 与 R_o , 还是钻井气显或地表油气苗与干沥青, 均表明尼泊尔境内具有曾经大量生烃的潜在烃源岩。

2.3 潜在储盖组合

元古宙 Dailekh 群发育厚度巨大的海相细粒沉积岩与滨岸相石英砂岩组合, 其在未变质前及未变质区可构成良好的生、储、盖组合。

Dailekh 群之上的元古宙 Lakharpata 群顶界的不整合时间跨度大, 经历了长期的地表暴露、溶蚀, 导



图 2 Dailekh 群中 2 套烃源岩

Fig. 2 Two sets of source rocks in the Dailekh Group

致在 Tansen 地区及以西, Lakharpata 群中的碳酸盐岩地层直接被石炭纪—白垩纪 Gondwana 群或晚白垩世—早中新世 Surkhet 群覆盖, 所以不整合之下的碳酸盐岩地层可能会发育较大规模的与不整合相关的古岩溶储层。另外, 该套地层中的碳酸盐岩也可能在成岩之后的构造活动中形成类似于中国塔里木盆地的断溶体储层。

尼泊尔东部 Gondwana 群中砂岩较发育, 也可能具有良好的潜在储集性。Surkhet 群中的 Melpani 组石英砂岩具较好的储集性, 且区域上含沥青较普遍。局部测试的样品孔隙度达 7%~10%, 且与处于同一构造带的印度 Assam 盆地和巴基斯坦 Potwar 盆地的油气产层相当 (Khadka, 2017)。Siwalik 群中的砂岩、砂砾岩及砾岩也具有潜在储集性。

在尼泊尔境内低喜马拉雅带及以南, 从整体的地层序列看, Surkhet 群中的 Swat 组、Suntar 组, 以及下 Siwalik 中的泥岩均可构成良好的区域性盖层。Lakharpata 群碳酸盐岩中可能发育与古岩溶及断溶体相关的潜在储集体, Gondwana 群中的砂岩、Melpani 组石英砂岩、Suntar 组中的砂岩, 以及 Siwalik 群中的砂岩、砂砾岩及砾岩均具较好的储集潜力。其中, Melpani 组石英砂岩与 Swat 组泥页岩是最优的区域性储、盖组合, 具有常规油气藏勘探潜力。另外, Suntar 组及 Siwalik 群中的砂岩与泥岩局部可构成较好的层内储盖组合, 形成岩性或地层圈闭, 具有非常规油气藏 (包括岩性油气藏、致密砂岩油气、页岩油气等) 勘探潜力。

2.4 生排烃及油气运移

据 Khadka (2017) 模拟研究认为, Surkhet 群 Swat 组在 MBT 上盘, 2.44~1.32 Ma 期间, 位于 5435~5782 m 埋深时, 其处于生油高峰, 且现今还在持续生油, 而在 MBT 下盘, Swat 组于 6.5~5.5 Ma 期间处于生油高峰, 且构造圈闭于 4.1~1.8 Ma 期间形成。

笔者野外勘查发现, MBT 上盘的 Melpani 组及 Suntar 组砂岩裂缝中均发育沥青脉, 而 Melpani 组砂岩中也有被破坏的古油藏, 故推测 Melpani 组及 Suntar 组砂岩裂缝中的沥青脉是由于 MBT 断裂活动破坏了 Melpani 组中的古油藏引起油气二次运移所致。因此, Melpani 组中的油气充注及成藏应当是早于 MBT 形成, 即早于约 11 Ma。

另外, MBT 下盘 Siwalik 群局部砂岩裂缝中也

发育沥青脉 (图版 I -e), 且局部砂岩基质孔隙中也充填有干沥青。因 Siwalik 群中的断裂及裂缝多数是随 MFT 的形成而伴生, 推测 MFT 形成时 (MFT 可能形成于 2.4~1.8 Ma, Subedi et al., 2012) 发生过最后一次区域性的油气运移与再调整。因此, 在尼泊尔低喜马拉雅带及以南, 新构造运动是控制区域性油气运移与调整成藏的关键。

2.5 潜在有利区带

前人数值模拟表明, 尼泊尔南部 Siwalik 山脉以南 Siwalik 群之下的潜在烃源岩均处于生油窗, 且生烃时间为 10~20 Ma, 与许多现今构造的发育同期或滞后^②。纵观前人对尼泊尔烃源岩的热演化研究成果, 尽管有许多相互矛盾之处, 但尼泊尔低喜马拉雅带及以南, 尤其是 MBT 以南还是具有较好的油气勘探潜力。毕竟, 油气苗、古油藏及沥青脉的存在是最直观的远景预期证据。在尼泊尔 MBT 以南的山间盆地、Siwalik 褶皱带及特莱平原可能具有较好的油气前景, 尤其是 Sarda 和 Gandak 拗陷区构造—沉积演化历史很长, 具有裂陷盆地—拗陷盆地—前陆盆地相叠合的特征, 其保留的地层序列最全, 受喜马拉雅构造改造较小, 油气潜力可能最大。

3 结 论

尼泊尔低喜马拉雅带及以南自元古宙以来发育了多套潜在且曾经大量生烃的规模性烃源岩, 也发育有潜在的储层及盖层, 具有潜在的生、储、盖组合。与喜马拉雅造山相关的新构造运动是控制区域性油气运移与调整成藏的关键。丰富的地表油气苗、古油藏、沥青脉及静态石油地质条件均预示, 尼泊尔低喜马拉雅带及以南, 尤其是 MBT 以南的 Sarda 和 Gandak 拗陷区具有良好的油气远景与勘探潜力。

致谢:感谢审稿专家对本文的辛劳付出及提出的宝贵意见。

注释

①Slind O L. Nepal source and seal study—Hydrocarbon prospectivity assessment of southern Nepal[R]. Alconsult International LTD, 1993.

②Snowdon L R, Fowler M G. Source and seal study: Appendix II[R]. 1993.

参考文献

Banerjee S, Dutta S, Paikaray S, et al. Stratigraphy, sedimentology and bulk

- organic geochemistry of black shales from the Proterozoic Vindhyan Supergroup(central India) [J]. *Journal of Earth System Science*, 2006, 115(1): 37-47.
- Chand T, Sethi S, Kaushal S, et al. Source Organofacies in Tertiary and Pre-Tertiary sequences of Ganga Basin and their hydrocarbon exploration significance [C]//9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, 2012.
- Dayal A M, Mani D, Madhavi T, et al. Organic geochemistry of the Vindhyan sediments: Implications for hydrocarbons [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 91: 329-338.
- DeCelles P G, Robinson D M, Quade J, et al. Stratigraphy, structure, and tectonic evolution of the Himalayan fold-thrust belt in western Nepal [J]. *Tectonics*, 2001, 20(4): 487-509.
- Dhital M R. *Geology of the Nepal Himalaya, Regional perspective of the classic collided orogene* [M]. Springer International Publishing, 2015.
- Hodges K V, Hubbard M S, Silverberg D S, et al. Metamorphic Constraints on the Thermal Evolution of the Central Himalayan Orogen [J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 1988, 326(A): 257-280.
- Khadka D R. Assessment of Hydrocarbon Prospectivity in Terai and Siwaliks, Exploration Block 2, Western Nepal [J]. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 2017, 5(3): 112-138.
- Kumar K. *Anthracobune Aijiensis* Bov. SP. (Mammalia: Proboscidea) from the Subathu formation, Eocene from NW Himalaya, India [J]. *Geobios*, 1991, 24(2): 221-239.
- Li A. Structural evolution of the Himalayan thrust belt, west Nepal [D]. Houston: University of Houston the Faculty of the Department of Earth and Atmospheric Sciences, 2013.
- Liu X B, Liu X H, Leloup P H, et al. Ductile deformation within upper Himalaya crystalline sequence and geological implications, in Nyalam area, Southern Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(17): 1562-1577.
- Macfarlane A M. Chronology of tectonic events in the crystalline core of the Himalaya, Langtang National Park, central Nepal [J]. *Tectonics*, 1993, 12(4): 1004-1025.
- Meigs A J, Burbank D W, Beck R A. Middle-late Miocene (>10 Ma) formation of the Main Boundary Thrust in the western Himalaya [J]. *Geology (Boulder)*, 1995, 23(5): 423-426.
- Mendhe V A, Mishra S, Varma A K, et al. Gas reservoir characteristics of the Lower Gondwana Shales in Raniganj Basin of Eastern India [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 149: 649-664.
- Paul S, Bisht B S, Raturi V C, et al. Exploring frontiers through sequence stratigraphic approach: Vindhyan basin case study [C]//10th Biennial International Conference & Exposition, KOCHI, 2013.
- Prasanna M V, Rasheed M A, Madhavi T, et al. Light gaseous hydrocarbon anomalies in the near-surface soils of Sagar District, Vindhyan Basin, India [J]. *Current Science*, 2010, 99(11): 1586-1590.
- Rasheed M A, Veena Prasanna M, Lakshmi M, et al. Geo-microbial studies for the Exploration of Hydrocarbon in part of East Vindhyan Basin, India [C]//8th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, 2010.
- Srinivas C, Madhavi T, Lakshmi M, et al. Geochemical characterization of adsorbed light gaseous alkanes in near surface soils of the eastern Ganga basin for hydrocarbon prospecting [J]. *Geochemistry International*, 2014, 52(1): 68-76.
- Stoecklin J. Geology of Nepal and its regional frame [J]. *Journal of the Geological Society*, 1980, 137: 1-34.
- Subedi D N, Mahato S P, KC S B, et al. Oil and gas Exploration Activities in Nepal [C]//22nd Geophysical Conference. ASEG, 2012.
- Upreti B N. An overview of the stratigraphy and tectonics of the Nepal Himalaya [J]. *Journal of Asian earth sciences*, 1999, 17(5): 577-606.
- 王正和, 谭富文, Sudhir R, 等. 尼泊尔及南侧邻区元古宙以来的构造-沉积演化 [J]. *地球科学*, 2022, 47(2): 405-417.