

文章编号:1000-0747(2010)03-0310-06

微生物油气勘探技术在岩性气藏勘探中的应用

——以柴达木盆地三湖坳陷为例

张春林^{1,2}, 庞雄奇¹, 梅海², 黎茂稳³, 徐子远⁴, 梅博文^{2,5}, Daniel Hitzman⁶

(1. 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心; 2. 盎亿泰地质微生物技术(北京)有限公司; 3. 加拿大联邦地质调查局卡尔加里分部; 4. 中国石油青海油田勘探开发研究院; 5. 长江大学; 6. 美国地质微生物技术公司)

基金项目: 中国石油青海油田公司项目“三湖坳陷台南—台东地区微生物勘探新技术试验”(2008043)

摘要: 为了有效识别柴达木盆地三湖坳陷岩性生物气藏,以台南—台东地区为研究区,开展微生物勘探技术试验研究。东西向长 24 km 的采样测线横穿工区,在各采样点(间隔 150 m)采集 20 cm 深度处的土壤 200 g,样品共 156 个,由美国 GMT 公司完成甲烷氧化菌分析。结果显示,研究区 20 cm 深度处土壤湿度可维持甲烷氧化菌的生长;pH 值平均为 8.20,不抑制甲烷氧化菌生长;大量样品全盐盐度大于 20%,高盐度降低了甲烷氧化菌的浓度,但气藏区与非气藏区微生物浓度差别显著,气藏上方盐度高达 50% 以上仍发育微生物异常;而且探井试气产量与其上方微生物浓度呈显著正相关,表明微生物勘探技术适用于三湖坳陷。利用微生物异常判断,在台南 9 井东侧 1 km 处、台南气田西侧边界以外可能存在含气丰度高于台南 9 井的岩性气藏,是较为有利的勘探目标区。图 6 表 1 参 26

关键词: 微生物勘探; 柴达木盆地; 三湖坳陷; 生物气; 岩性气藏; 盐碱地; 甲烷氧化菌

中图分类号: TE132.4

文献标识码: A

Application of microbial oil surveying to exploration of lithologic gas reservoirs : A case from the Sanhu Depression, Qaidam Basin, NW China

Zhang Chunlin^{1,2}, Pang Xiongqi¹, Mei Hai², Li Maowen³,
Xu Ziyuan⁴, Mei Bowen^{2,5}, Daniel Hitzman⁶

(1. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. A E & E Geomicrobial Technologies (Beijing) Limited Company, Beijing 102200, China;

3. Geological Survey of Canada-Calgary, Alberta T2L 2A7, Canada; 4. Research

Institute of Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company,

Dunhuang 736202, China; 5. Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

6. Geomicrobial Technologies Inc., Ochelata 74051, USA)

Abstract: To effectively detect lithologic biogas reservoirs in the Sanhu Depression, an experimental investigation of Microbial Oil Surveying Technique (MOST) was conducted in the Tainan-Taidong area. Samples were from 156 sampling stations located 150 m apart in a near straight line of 24 km and extending from the west to the east of the investigated area, 200 g of soil from each sample site was taken at depth of 20 cm, and GMT Inc. of U. S. A. completed the analysis of soil methanotrophs. The result shows that moisture of soil at depth of 20 cm can maintain the growth of methanotrophs; The average of soil pH is 8.20, which does not inhibit the growth of methanotrophs; The salinity of many samples are more than 20%, the high salinity decreases methanotrophs concentrations, but the difference of methanotrophs concentrations between gas reservoirs and background areas is obvious, and the samples above gas reservoirs whose salinity are more than 50% still have microbial anomaly; Gas well testing production shows a significant positive correlation with methanotrophs concentrations of soil above the well, indicating the MOST is applicable to the Sanhu Depression. According to the microbial anomaly, two favorable exploration targets were identified in the eastern side of Well Tainan 9 and the western side near the limits of the Tainan gas field, their gas bearing abundance is better than the Well Tainan 9.

Key words: microbial oil surveying; Qaidam Basin; Sanhu Depression; biogenic gas; lithologic gas reservoir; saline soil; methanotrophs

0 引言

柴达木盆地三湖坳陷生物气勘探始于地面构造调

查,后依据地震异常勘探潜伏构造,先后发现并提交了 7 个构造气田的天然地质储量^[1,2],20 世纪 90 年代后按照相同勘探思路,钻探了所有可能的含气圈闭,几

乎全部落空^[3]。但三湖坳陷第三次油气资源评价显示仍有近4/5的资源未被发现^[4]。中国陆上剩余油气资源主要分布在中低丰度的岩性-地层油气藏领域^[5,6],且全世界重要的生物气藏区都发现了大量的岩性气藏^[7],但三湖坳陷的岩性气藏勘探一直未能取得突破。直到2008年,台南9井、台南10井、涩34井获工业气流且均证实为岩性气藏,显示了三湖坳陷岩性气藏勘探的良好前景。

岩性气藏勘探历来就是难点,加之三湖坳陷地层平缓、胶结疏松、砂泥薄互层、探井分布不均、二维地震分辨率低等因素限制了利用地震资料识别岩性圈闭群及沉积亚相的精细研究^[3],因而迫切需要能有效识别岩性气藏且适用于三湖坳陷的勘探技术。

微生物勘探技术避开圈闭识别的难题,直接寻找富集于圈闭内的烃类流体,且在隐蔽油气藏勘探方面较多的成功实例,如岩性油气藏勘探^[8,9]、生物点礁气藏勘探^[10]。此外,微生物勘探技术还具有传统化探方法不具备的优势——动态性,其发现的异常为现今

仍活跃的油气渗漏系统引起。古油气渗漏不会残留微生物异常,因为专性微生物若缺少食物(渗漏轻烃)会很快消亡,这也正是微生物油藏表征技术(MRC)的原理^[11]。勘探实例表明,油气藏开发数年后,上方原有的微生物异常因下伏油气的枯竭而消失^[12]。

此外,研究区第四系地层平缓,无断裂发育,气藏埋藏浅,是地表油气勘查技术理想的试验场所。但该区近地表为高盐度的盐碱地,此种地质条件下的微生物勘探研究较为薄弱,因此在三湖坳陷开展微生物勘探试验,对该区的天然气勘探和微生物勘探技术本身都有意义。

1 研究区概况

试验区选在台南—台东地区,面积100 km²左右,位于柴达木盆地东部三湖坳陷内(见图1),平均地面海拔2 700 m,昼夜温差大,年平均气温3.7℃,夏季偶有小雨,冬季干燥寒冷;地表多为盐碱地,大量分布盐析结晶,无任何植被;台南构造顶部因气田开发建设,表层土壤挖掘破坏严重。

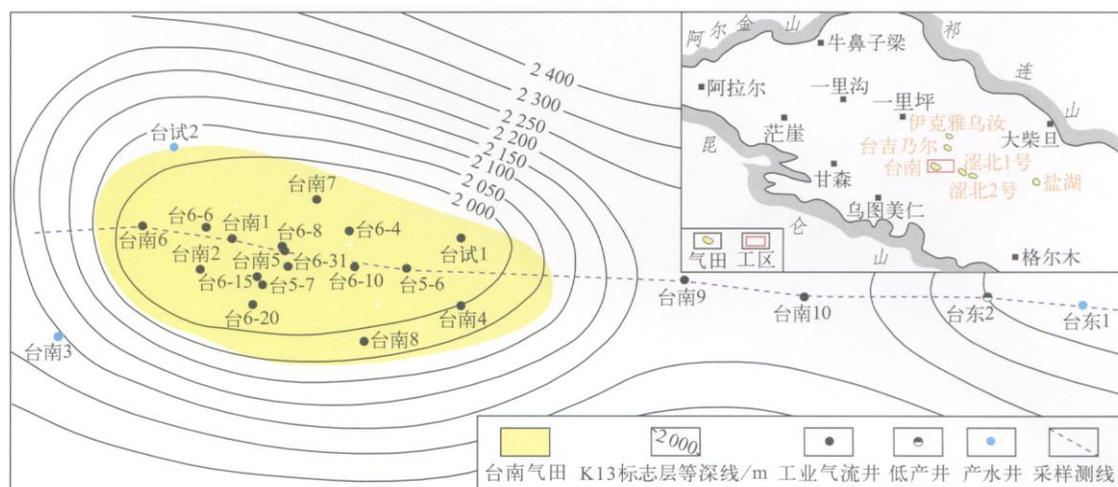


图1 台南—台东地区位置及微生物勘探采样测线布设图

工区内勘探已于台南气田、台南9井、台南10井发现生物气藏,台东2井也见到了低产工业气流。气藏埋深一般小于2 000 m。其中台南气田构造为第四系低幅度背斜构造,台南9井、台南10井处于台南构造与涩北一号构造间的鞍部,台东2井、台东1井处于涩北一号构造西侧斜坡带上(见图1)。

2 样品采集与实验分析

微生物勘探需采集近地表土壤样品,本次勘探的东西向采样测线横穿工区内气田及探井,长约24 km,采样点间隔150 m,采集近地表20 cm深度处土壤约200 g,共采集样品156个(采样时间:2008年7月5日

至2008年7月7日,历时3 d)。样品多为亚黏土、黏土、亚砂土,多数样品含白色针状或颗粒状结晶,无植物根系,仅工区西侧零星分布沙漠荆棘,其余都为盐碱地,无任何植被。

样品处理后直接发往美国GMT公司实验室进行甲烷氧化菌分析,流程如图2所示。分析结果以MV值(Microbial Value)指标评价体系表示,为美国GMT公司MOST技术专利^[13],类似于德国MPOG技术的MU值^[14]。MV值由微生物的显微镜计数结果(菌落数)和生长活性等综合分析得出,反映样品中专性微生物发育的相对浓度,而非一个绝对的数值,为一无量纲量。依据数理统计及与已知气藏类比,确定工区MV

值异常门槛值为 10, MV 值超过 10 的样品若连续分布, 下伏地层中极可能存在工业气藏。



图2 微生物勘探样品实验分析流程图

3 影响因素

美国 GMT 公司已在全球完成 3 000 余个微生物勘探项目, 雪地、沙漠、耕地、热带丛林、海洋等不同地表条件地区都有涉及^[15], 但像三湖坳陷如此高盐度的盐碱地区, 该公司也从未有过勘探实践。因此, 有必要研究该区甲烷氧化菌发育的影响因素, 特别是土壤盐度和 pH 值的影响。

3.1 土壤湿度的影响

近地表土壤中烃类的微生物氧化作用较大程度上受湿度控制, 若土壤的水分含量低, 将大大减弱甚至完全抑制土壤中的微生物活动^[16], 影响甲烷氧化菌的浓度和活性^[17,18]。

GMT 公司在全球干旱沙漠区的勘探实践表明, 地表 20 cm 深度处土壤所保持的水分, 一般可维持专性微生物的生长。该公司在已知油田上方 30 余年的实验表明, 土壤湿度的变化虽会引起烃类氧化菌绝对浓度的波动, 但却不会改变相对差异, 即油田上方专性微生物异常总是明显区别于背景值区^[19]。

本研究采样时现场描述了土壤的相对干湿度, 基本无潮湿渗水样品, 多为微潮湿或干燥样品。样品的微生物值与土壤相对湿度呈离散关系, 相对干燥的土壤中亦有微生物高值(见图 3), 表明研究区内 20 cm 深度处土壤的含水率可维持专性微生物的发育, 土壤湿度不是本区样品甲烷氧化菌发育的关键影响因素。

3.2 土壤 pH 值的影响

Sorokin 等发现, 蒙古国干旱地区盐碱湖沉积物中的甲烷氧化菌以 pH 值 8.5 左右为其最佳生长点^[20]; 中国内蒙古碱湖中嗜盐碱菌生存的环境介质也需 pH 值 8.5 左右为最佳^[21]; 湖北松滋油田土壤 pH 值为

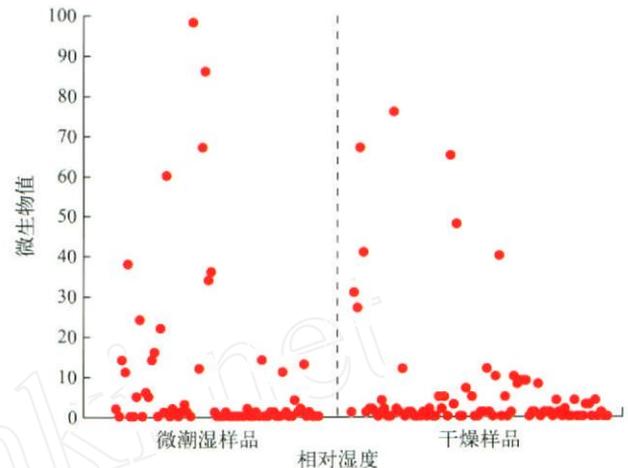


图3 台南—台东地区土壤湿度与微生物值关系图

8.0~8.3, 也适合甲烷氧化菌的发育^[22], 表明 pH 值为 8.0~8.5 左右的土壤有利于甲烷氧化菌的生长。在工区内台南 6 井、台 5-1 井、台南 9 井、如东 2 井选取 4 个样品进行分析, 其土壤 pH 值分别为 8.69、8.13、8.35、7.61, 平均为 8.20, 位于有利的 pH 值范围, 不是极端碱性环境。因此, pH 值也不是本区土壤甲烷氧化菌发育的关键影响因素。

3.3 土壤盐度的影响

盐碱地区土壤中盐度的平面非均质性极强^[23], 台南—台东地区亦如此, 样品全盐盐度最低不足 5%, 最高可达 70%, 大部分超过 20%, 表明研究区土壤盐度高, 且平面上非均质性极强。

Sorokin 等研究了蒙古国干旱区多个盐碱湖沉积物中的甲烷氧化菌, 显示盐度的升高会降低甲烷的氧化速率, 抑制氧化菌的发育^[20]。

研究区土壤微生物值平均为 10, 且多个样品为 0, 表明盐度对甲烷氧化菌发育浓度有影响, 导致微生物背景值低。然而在气藏上方, 盐度高达 50% 以上的土壤中仍有多个微生物高异常值, 盐度低于 20% 土壤中也有微生物异常值(见图 4), 而且气藏区与非气藏区甲烷氧化菌浓度的相对高低趋势依然明显(见图 5), 说明

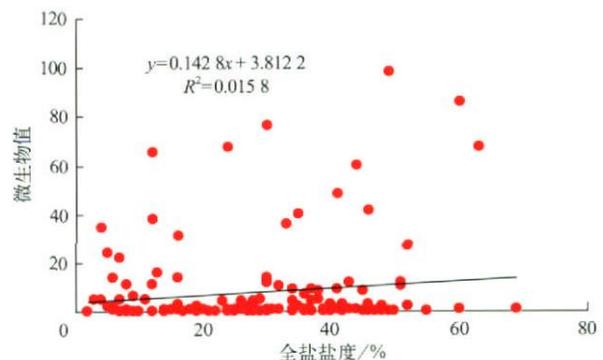


图4 台南—台东地区土壤全盐盐度与微生物值关系图

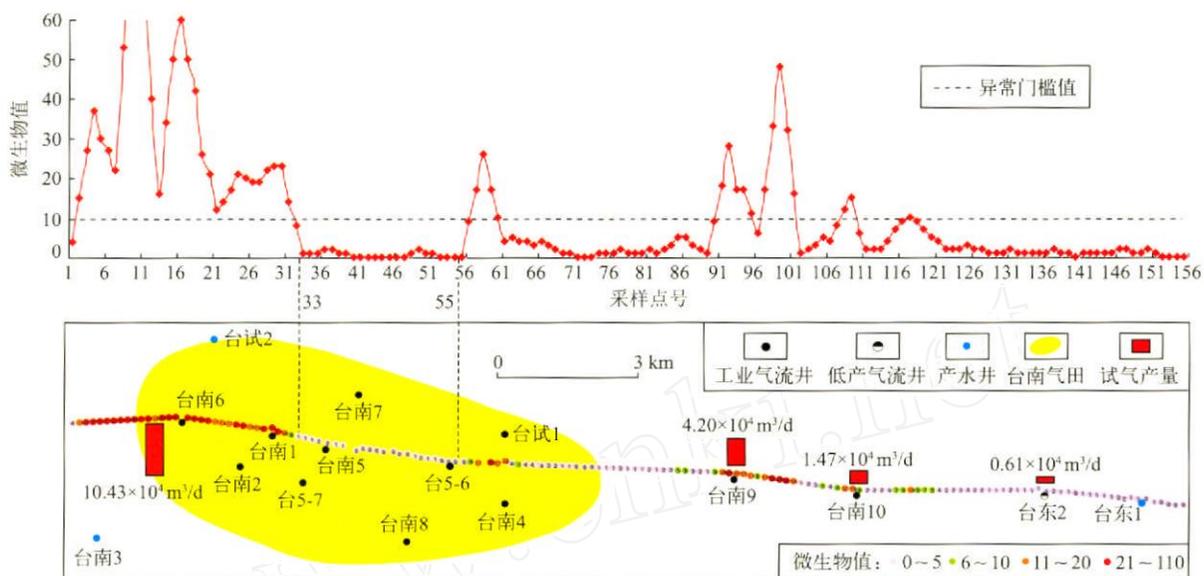


图5 台南—台东地区微生物勘探东西向测线微生物值剖面图与平面图

对该趋势起关键作用的还是下伏地层的油气富集程度,即高盐度造成了微生物低背景值,但气藏与非气藏区的微生物值差异依然清晰。很显然,在高盐度的工区根据微生物异常依然可以识别出气藏。

3.4 表层土壤挖掘破坏的影响

青海油田2008年制定了台南气田 $36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 年产能建设方案,因此气田上方井场、公路、输气管线密布,而表层土壤的新近挖掘会破坏微生物生存的微环境,抑制其生长发育^[24,25]。特别是33—55样品段,表层土壤挖掘破坏最为严重,无法取到未受扰动的土壤,样品多在翻新土壤上采集。该段测线各样品酸解烃分析资料显示其土壤酸解烃浓度与东西两侧差别不大,开发数据也显示构造顶部的开发井气藏压力并未降低,该段不缺少渗漏轻烃,故该段微生物应发育较好。而由图5可见,33—55样品段微生物值显示为低的背景值(0~5),分析认为,表层土壤的新近挖掘,极可能影响了该段微生物的发育。

4 微生物勘探应用效果

4.1 微生物异常与下伏地层含气性关系

台南—台东地区地层含气性自西向东有逐渐变差的趋势,即台南气田含气丰度最好,其次是台南9井、台南10井,最差的是台东2井和台东1井,这点从试气层位含气特征、试气产量上都有反映(见表1)。

在微生物显示上,除受施工影响的33—55样品段外,台南气田上方连续分布微生物异常值,且异常浓度较高,具最好的微生物异常特征,这与其含气丰度最好相符;台南9井上方连续分布5个异常值,但其微生物

表1 台南—台东地区钻井试气数据

井号	射孔井段/ m	日产气量/ 10^4 m^3	日产水量/ m^3	试气结论
台南6	1 133.3 ~ 1 134.8		55.91	水层
	1 599.0 ~ 1 602.0	10.427 1		气层
	1 725.0 ~ 1 730.0	8.950 0		气层
台南9	1 814.3 ~ 1 827.0	4.198 8	3.22	气水同层
	1 442.5 ~ 1 445.5		3.46	水层
台南10	1 705.5 ~ 1 707.0	1.470 8	12.98	气水同层
	1 790.5 ~ 1 798.0		23.13	水层
	1 843.5 ~ 1 848.0		8.22	水层
	789.0 ~ 798.0	0.009 7	14.21	含气水层
台东2	1 036.0 ~ 1 040.0		14.02	水层
	1 238.0 ~ 1 239.5			水层
	1 253.5 ~ 1 256.0	0.008 1	10.77	含气水层
	1 518.2 ~ 1 526.4	0.007 0	48.88	含气水层
台东1	1 853.0 ~ 1 854.5	0.612 0		气水同层
	测井解释无气层,故未试气			水层

浓度不及台南气田,与其地层含气性不及台南气田相符;台南10井试气产量及地层含气性不及台南9井,其上方微生物值也较后者低,只有2个微生物异常值分布;台东2井和台东1井测井解释和试气结果显示基本为产水井,地层含气性最差,其微生物值也只呈现背景值特征(见图5)。

探井试气产量与其上方地表300 m范围内土壤微生物值的关系表明,试气产量越高,微生物值越高(见图6),即地层含气性越好,其上方土壤中专性微生物越发育。这与四川盆地普光气田钻井试气产量与其上方微生物值呈现良好正相关关系^[26]一致。

4.2 微生物异常指示的油气勘探有利区

由图5可见,台南9井东侧1 km处发育5个微生物

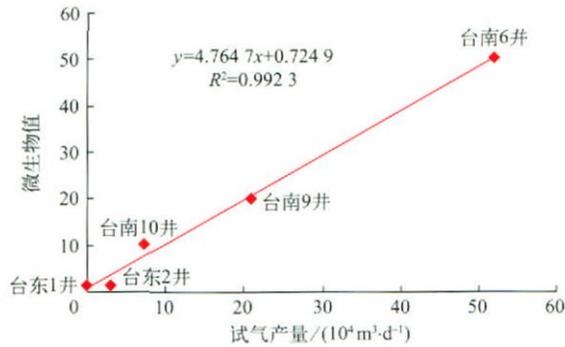


图6 台南—台东地区试气产量与土壤微生物值关系图

物异常点,连续的微生物高值异常预示其下伏地层含气性可能超过台南9井,构造特征也显示其可能为岩性气藏;台南气田西侧,即台南气田气藏边界向西2 km范围内的微生物值浓度高,且异常高值连续分布,其异常级别超过台南1井、台南9井,预示气田西侧扩边前景良好,这与三湖坳陷环构造气藏周围发育岩性气藏的认识相吻合。

5 结论

台南—台东地区20 cm深度处的土壤湿度、pH值适宜甲烷氧化菌生长,但高盐度却降低了甲烷氧化菌的浓度,造成了非气藏区微生物的低背景值,但气藏区与非气藏区的微生物浓度差异依然明显,且气藏上方盐度高达50%以上土壤中仍发育甲烷氧化菌高异常,依此可识别出气藏区。表明微生物勘探技术在高盐度的三湖坳陷依然适用。值得注意的是,表层土的新近挖掘破坏会抑制甲烷氧化菌的发育,导致微生物值低,在微生物勘探中应考虑这一因素的影响。

钻井试气产量(地层含气性)与其上方土壤中甲烷氧化菌浓度呈明显正相关,基于此认识,利用微生物勘探技术可在三湖坳陷识别出类似于台南9井、台南10井的低丰度岩性气藏。微生物异常表明,在台南9井东侧1 km处、台南气田西侧边界以外可能存在含气丰度高于台南9井的岩性气藏,是较为有利的勘探目标区。

参考文献:

- [1] 徐子远. 柴达木盆地第四系生物气的勘探历程与储量现状[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(4): 437-440.
Xu Ziyuan. Exploration courses and reserves state of Quaternary biogas in Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(4): 437-440.
- [2] 吴广大. 柴达木盆地东部台南气田的发现[J]. 天然气工业, 1994, 14(1): 18-23.
Wu Guangda. The discovery of Tainan gas field in the east part of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(1): 18-23.
- [3] 徐子远. 柴东生物气勘探的实践与思考[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(6): 33-37.
Xu Ziyuan. Practice and reflection on biogas exploration in Eastern Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(6): 33-37.
- [4] 姜桂凤, 孔红喜, 侯泽生, 等. 柴达木盆地生物气资源潜力评价[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(4): 363-366.
Jiang Guifeng, Kong Hongxi, Hou Zesheng, et al. Assessment of biogenetic gas reservoir potential in Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(4): 363-366.
- [5] 赵文智, 窦立荣. 中国陆上剩余油气资源潜力及其分布和勘探对策[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 1-5.
Zhao Wenzhi, Dou Lirong. Potential, distribution and exploration strategy of petroleum resources remained onshore China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 1-5.
- [6] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 257-272.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Geological theory and exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 257-272.
- [7] 张英, 李剑, 胡朝元. 中国生物气-低熟气藏形成条件与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 37-41.
Zhang Ying, Li Jian, Hu Chaoyuan. Reservoir formation and resource potential of biogenic-low maturity gases in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 37-41.
- [8] Hitzman D C, Rountree B A, Cunningham K. Integrated microbial and 3D seismic survey: Hydrocarbon microseepage in Osage Country, Oklahoma [R]. San Antonio, Texas: AAPG Annual Convention, 1999.
- [9] Hitzman D C, Rountree B A, Tucker J D, et al. Integrated microbial and 3D seismic surveys discover Park Springs (Conglomerate) Field and track microseepage reduction [A]. Schumacher D, LeSchack L A. Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing (AAPG Studies in Geology No. 48 and SEG Geophysical References Series No. 11) [C]. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 2002. 59-65.
- [10] Hitzman D C, Rountree B A, Schumacher D. Microseepage survey successfully high-grades Texas Cotton Valley Pinnacle Reefs on basis of hydrocarbon charge [R]. San Antonio, Texas:

- AAPG Annual Convention, 1999.
- [11] Geo-microbial Technologies Inc. Microbial reservoir characterization "MRC" [EB/OL]. http://www.gmtgeochem.com/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=59, 2010-03-17.
- [12] Tucker J D, Hitzman D C. Detained microbial survey help improve reservoir characterization[J]. *Oil & Gas Journal*, 1994, 92(23): 65-69.
- [13] Hitzman D O. Prospecting for petroleum deposits[P]. U. S. A Patent: 2880142, 1959-03-31.
- [14] Wagner M, Wagner M, Piske J, et al. Case histories of microbial prospecting for oil and gas, onshore and offshore in northwest Europe[A]. Schumacher D, Leschack L A. Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing (AAPG Studies in Geology No. 48 and SEG Geophysical References Series No. 11) [C]. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 2002. 453-479.
- [15] 梅海, 林壬子, 梅博文, 等. 油气微生物检测技术: 理论、实践和应用前景[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(6): 888-893.
Mei Hai, Lin Renzi, Mei Bowen, et al. Microbial oil-gas detection technologies: Theory, practice and application prospect [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6): 888-893.
- [16] Price L C. A critical overview and proposed working model of surface geochemical exploration [A]. Davidson M J. Unconventional methods exploration for petroleum and natural gas() [C]. Dallas, TX: Southern Methodist University Press, 1986. 245-304.
- [17] 周叶锋, 廖晓兰, 黄璜, 等. 甲烷氧化细菌氧化活性影响因素的研究[J]. *微生物学报*, 2008, 28(3): 77-80.
Zhou Yefeng, Liao Xiaolan, Huang Huang, et al. Influence factors of oxidation activity of methanotrophs [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2008, 28(3): 77-80.
- [18] Zhang Jiangshan, Guo Jianfen, Chen Guangshui, et al. Soil microbial biomass and its controls [J]. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(4): 327-330.
- [19] Tucker J, Hitzman D. Long-term and seasonal trends in the response of hydrocarbon-utilizing microbes to light hydrocarbon gases in shallow soils [A]. Schumacher D, Abrams M A. Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66 [C]. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1996. 353-357.
- [20] Sorokin D Y, Gorlenko V M, Namsaraev B B, et al. Prokaryotic communities of the northeastern Mongolian soda lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 522: 235-248.
- [21] 田新玉, 周培瑾, 王大珍. 嗜盐碱性淀粉酶产生条件和性质的初步研究[J]. *微生物学报*, 1994, 34(5): 355-359.
Tian Xinyu, Zhou Peijin, Wang Dazhen. Studies on production and some properties of haloalkaline amylase [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 1994, 34(5): 355-359.
- [22] 向廷生, 周俊初, 袁志华. 利用地表甲烷氧化菌异常勘探天然气藏[J]. *天然气工业*, 2005, 25(3): 41-43.
Xiang Tingsheng, Zhou Junchu, Yuan Zhihua. Exploration for gas reservoirs by applying the anomalies of surface methane oxidizing bacteria [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(3): 41-43.
- [23] 李延生, 崔玉军. 黑龙江省松嫩低平原区盐渍化地球化学特征[J]. *现代地质*, 2008, 22(6): 934-938.
Li Yansheng, Cui Yujun. Geochemical distribution characteristics of salinization in the Song-Nen low plain [J]. *Geoscience*, 2008, 22(6): 934-938.
- [24] 杨思忠, 金会军, 魏智, 等. 微生物对冻土生境的适应以及对全球变化和寒区工程扰动的响应: 进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 279-285.
Yang Sizhong, Jin Huijun, Wei Zhi, et al. Microbial adaptation to the habitat of permafrost and their responses to global change and engineering disturbance in cold regions: Advances and prospects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 279-285.
- [25] 谭周进, 戴素明, 谢桂先, 等. 旅游踩踏对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(11): 1921-1926.
Tan Zhoujin, Dai Suming, Xie Guixian, et al. Studies on the effect of recreation activities on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil microbial biomass phosphorus in Zhangjiajie National Forest Park [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1921-1926.
- [26] 林壬子, 梅博文. 镇巴区块微生物勘探成果报告[R]. 成都: 中石化股份有限公司南方勘探分公司, 2007. 34-35.
Lin Renzi, Mei Bowen. Report of microbiological exploration in Zhenba block [R]. Chengdu: Sinopec South Company, 2007. 34-35.

第一作者简介:张春林(1982-),男,贵州福泉人,中国石油大学(北京)在读博士研究生,主要从事地质微生物勘探技术以及油气渗漏方面的研究。地址:北京市昌平区府学路18号,中国石油大学(北京)234信箱,邮政编码:102249。E-mail:zhangchunlin_219@163.com

收稿日期:2009-06-11 修回日期:2010-03-20

(编辑 王大锐 绘图 李秀贤)