

多目标地球化学调查数据在松嫩平原油气藏远景预测的应用

赵 君^{1,2}, 汪月华¹, 张哲寰^{1,2}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 利用全国多目标土地调查获得的海量地球化学数据,以松嫩平原深层样品为研究对象,利用卤族元素和全碳、氧化钙等异常特征,结合地质特征对松嫩平原油气藏进行预测。在松嫩平原圈定了 3 个油气藏远景区,其中 YQ-1 位于大庆油田东部,具有较好发现油气藏的潜力。YQ-2、YQ-3 具有进一步发现油气藏潜力。

关键词: 多目标土地调查;地球化学数据;卤族元素;油气藏预测;大庆油田;松嫩平原

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.021

APPLICATION OF MULTI-TARGET GEOCHEMICAL SURVEY DATA IN PROSPECT PREDICTION OF THE OIL-GAS RESERVOIRS IN SONGNEN PLAIN

ZHAO Jun^{1,2}, WANG Yue-hua¹, ZHANG Zhe-huan^{1,2}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China

Abstract: Based on the massive geochemical data obtained from the national multi-target land survey, taking the deep-soil samples from Songnen Plain as the research object, the anomaly characteristics of halogen elements, total carbon (TC) and CaO, combined with the geological features, are used to predict the oil-as reservoirs in Songnen Plain. A total of 3 prospective areas are delineated, among which YQ-1 is located on the east of Daqing Oilfield, with great potential of oil-gas reservoir, YQ-2 and YQ-3 with the potential for further discovery of reservoir.

Key words: multi-target land survey; geochemical data; halogen element; oil-gas reservoir prediction; Daqing Oilfield; Songnen Plain

0 前言

近年来,中国地质调查局在全国开展多目标土地调查,获取了耕地、平原区、山区等海量的地球化学数据。这些数据蕴藏了多种信息,除了常规的土地质量、矿产资源等信息外,也包含了大量基础地质、生态环

境^[1]以及应用指示油气藏的信息。有关多目标数据指示油气藏的研究较多。国外的学者在 20 世纪 80 年代就开展过此类研究,如 Tedesco^[2]对卤族元素油气藏指示作用进行了详细研究,得出碘是良好的指示元素; Klusman^[3]发现的全量铁和锰围绕已知油田呈环状分

收稿日期:2020-08-31;修回日期:2020-10-13。编辑:张哲。

基金项目:中国地质调查局“松嫩平原北部平原及丘陵区 1:25 万土地质量地球化学调查”项目(DD20160315-05)。

作者简介:赵君(1981—),男,博士,高级工程师,主要从事地球化学、生态地质调查工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号,E-mail//286911635@qq.com

布等. 国内一些学者^[4-7]也开展过类似研究,并取得较好效果.

多目标区域地球化学调查以区域土壤地球化学测量为主,测试分析了 54 项元素指标,其中 24 种元素指标与油气有关系. 根据多目标调查数据结合油气藏的元素组合特征和指示元素特征,可以预测油气藏的位置.

1 多目标油气化探的基本原理

1.1 多目标元素与石油元素组成

石油的元素组成以碳、氢为主,两者共占 95%以上;其次是少量的硫、氮、氧,三者约占 3%;此外还有少量的微量元素,如钒、镍、铅、铁、锶、钡等^[8]. 在多目标测试分析元素指标中,有多达 24 种元素被证实与油气有关.

卤族元素由 F、Cl、Br 和 I 组成,由于其化学性质活泼,以往被地质学家用于锌、铜、金矿的地球化学勘查^[9-10]. 只有 I 被经常用于油气的勘查,成为油气勘查的一个辅助指标^[2,11-12].

大量的理论研究和实验结果表明,油气藏上方近地表土壤中的微量元素与油气藏范围之外近地表土壤中的微量元素,在含量和组合关系上都存在明显的差异. 可以将这种差异性应用于地表油气地球化学勘探的研究中.

1.2 研究现状

国内外学者在 20 世纪 80 年代就应用微量元素进行地表油气化探勘查研究. 汤玉平等^[13]在鄂尔多斯盆地镇原-泾川地区开展微量元素实验研究,表明该区油气评价的有效微量元素指标主要为 Hg 和 V/Ni、V/Fe,其次为 N/C_{org}、Pb、U. 王国建等^[5]在四川盆地西部新场气田上方研究了土壤中微量元素指标与有机地球化学指标的相关性及其与油气微渗漏的关系,认为 Cl、S、V、Ni、Cu、Zn、Sb、Cr、Co、Ba、Mo、Mn、Fe、Fe/Mn、V/Ni 等微量元素指标与气田区存在着响应关系,为该区预测天然气的有效指标. 贾国相等^[14]在四川盆地 5 个已知天然气田上也发现了比较好的 S、H₂、N₂、Cu、Ba、Co、Ni、V、Cr 异常,提出 Sr、Ba、Cu、Ni、V 等微量元素对寻找天然气藏应具有一定的指示意义;S 正异常指示浅层构造有大规模

油气储藏;Ba 能在油气田上形成异常,并且能够从异常形成的形态、结构判断油气田形成的时代. 周亚龙^[6]在松嫩平原南部利用多目标区域地球化学调查数据,结合松辽盆地已知油气田上方微量元素反映油气异常的效果,认为 Cl、S、I、Sr、CaO、TC、Br 等微量元素指标与油气田区存在着响应关系,为该区预测油气的有效指标.

2 研究区概况

松嫩平原位于大、小兴安岭与长白山脉及松辽分水岭之间的松辽盆地的中部区域,主要由松花江和嫩江冲积而成. 松辽盆地是中国东部大型中、新生代盆地,是著名的大庆油田所在地. 盆地含有 7 个一级构造单元,即西部斜坡区、北部倾没区、中央拗陷区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区和开鲁拗陷区. 盆地含油层主要是侏罗系的萨尔图、葡萄花、高台子、扶余、杨大城子等油层,埋藏深度约 300~3 208 m. 截至目前,盆地累计探明石油地质储量超过 60×10⁸ t,天然气地质储量超过 3 000×10⁸ m³^[15].

3 样品采集与分析

按照多目标地球化学规范要求,深层土壤采样间距为 4 km×4 km,4 个样品等重量组合,即每 16 km² 一个样品,共组合分析样品 3453 件,采样位置见图 1. 为了便于研究,收集了南部约 27 824 km² 的深层样品 1739 件样品数据. 样品采集深度为 150~200 cm,共分析了 54 种元素或氧化物. 其中 Al₂O₃、Cr、Ga、K₂O、Nb、P、Pb、V、Rb、SiO₂、Ti、Y、Cl、Zr、Br、Cu、Ba (CaO、Co、TFe₂O₃、MgO、Mn、Na₂O、Ni、Sr、Zn) 采用 X 射线荧光光谱法(XRF);元素 Ag、B、Sn (Mo) 采用发射光谱法(AES);元素 Cd、Mo、U、Th、Tl、Bi、Ge、W (Ga、Rb、Nb、Pb、Cr、Y、Cu、Ce 采用等离子体质谱法(ICP-MS);元素 As、Sb、Hg、Se 采用原子荧光光度法(AFS);Be、CaO、Ce、Co、TFe₂O₃、La、Li、MgO、Mn、Na₂O、Ni、Sc、Sr、Zn (Al₂O₃、Ti、Ba、K₂O、V) 等采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)进行分析^①.

①赵君,等. 松嫩平原北部土地质量地球化学调查报告(1:250 000). 沈阳地质调查中心,2018.

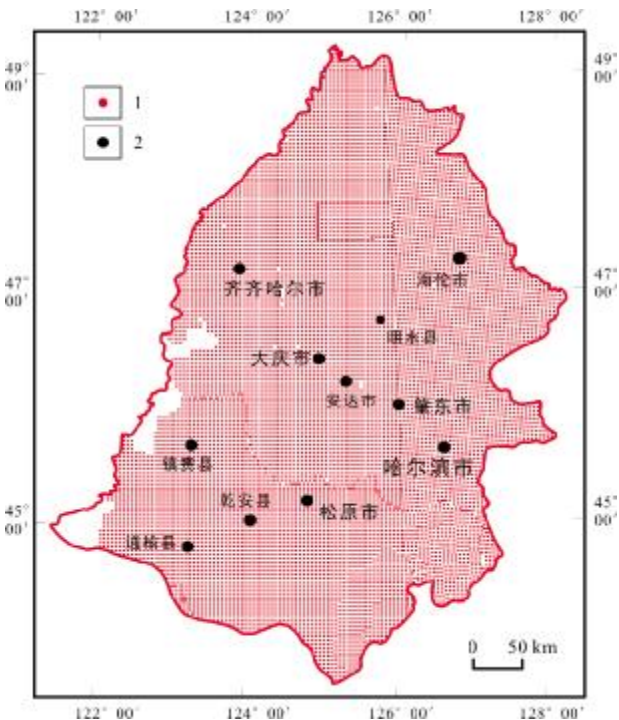


图 1 松嫩平原深层土壤采样点位图

Fig. 1 Location map of deep-soil sampling sites in Songnen Plain

1—深层样位置(deep-soil sampling site); 2—地名(place name)

4 分析结果

综合前人研究成果^[6, 16-17], 由于油气藏可以产生微弱的氧化还原电池效应, 产生从油藏到地表的电流异常, 因此卤族元素可呈现正异常。例如, 松辽盆地大庆长垣油田及其周边的中小型油气田上方呈现大面积片状区域异常。原油中含硫, 天然气中硫化氢的来源常与油田中微生物对硫酸盐的还原及有机硫受热脱硫有关, 因此土壤硫和全碳的异常富集指示了地下油气田中微生物作用和油气的热演化, 可指示油气藏的位置。例如, 松辽盆地大庆长垣油田存在硫和全碳异常。在沉积盆地深部由于温度升高, Sr 矿物易于被溶解, 原油和沉积物中的可溶微量元素 Sr 会分离出来溶解在伴生的水中, 随其他物质和水溶液迁移至地表, 形成异常。根据以往研究, CaO 在油气藏地区存在明显的正异常。

4.1 松嫩原油气藏指示元素特征

根据前人研究成果, 对松嫩平原全部深层土壤的油气藏指示元素进行计算, 得出油气指示元素相关特征, 结果见表 1。

表 1 松嫩平原深层土壤油气指示元素特征表

Table 1 Characteristics of oil-gas indicator elements in the deep soil of Songnen Plain

元素	平均值 (<i>X</i>)	中位数 (<i>M</i>)	标准离差 (<i>S</i>)	变异系数 (<i>CV</i>)	最大值	最小值
Br	2.02	1.92	1.25	0.62	51.10	0.03
Cl	64.34	59.00	35.59	0.55	12160.00	3.00
I	1.87	1.72	0.96	0.52	123.00	0.01
S	88.71	88.00	53.29	0.60	2359.00	0.17
Sr	195.98	199.00	91.89	0.47	899.00	4.52
CaO	1.48	1.34	0.56	0.38	27.64	0.19
TC	0.70	0.59	0.40	0.58	6.62	0.01

氧化物单位为 10⁻², 其余元素为 10⁻⁶。

由表 1 可见, 大部分元素变异系数都不大, 反映出各元素含量较为集中。卤族元素量差异较大, 最大值、最小值与平均值差异大。

4.2 已知油气藏区元素特征

收集松嫩平原大庆油田相关元素的特征, 计算结果见表 2。

表 2 大庆油田油气指示元素特征表

Table 2 Characteristics of oil-gas indicator elements in Daqing Oilfield

元素	平均值(<i>X</i>)	中位数(<i>M</i>)	标准离差(<i>S</i>)	变异系数(<i>CV</i>)	富集系数
Br	3.29	3.30	0.86	0.26	1.63
cl	85.84	69.97	43.35	0.51	1.33
I	3.80	3.50	1.97	0.52	2.03
S	144.98	143.00	36.42	0.25	1.63
Sr	316.49	319.00	38.49	0.12	1.61
CaO	5.45	5.58	1.47	0.27	3.68
TC	1.17	1.17	0.38	0.33	1.67

氧化物单位为 10⁻², 其余元素为 10⁻⁶。

从表 2 可见, 已知油气藏区指示元素均有富集现象, 富集能力 CaO>I>TC>Br=S>Sr>Ba。各指示元素含量变异系数均较小, 显示各元素相对集中, 差异较小。

4.3 油气藏远景预测

按照前人的研究成果, 将松嫩平原主要油气指示元素的异常位置套合, 结合已知油田的位置, 研究油气

元素的指示性.

将主要指示元素按卤族元素和其他元素,圈定了异常.各组合异常图和综合异常图,见图 2~5.

如图 2~5 所示,已知油气区位于 Br、Cl、I、CaO、S 等综合异常内,按异常分布,可划分 3 个综合异常:YQ-1、YQ-2、YQ-3,可作为油气藏的远景区.结合松嫩平原第四系地质图(图 6),分析综合异常特征.

YQ-1 位于松嫩平原中部,为北至林甸县、西至大庆市、南至肇州县、东至兰西县的近南北走向异常带,面积约 16 933 km²,分布于全新统沼泽堆积层、上更新统哈尔滨组冲积湖积层及中更新统上荒山组冲积湖积层.该异常区内土壤参数特征见表 3.

综合异常区内,各油气指示元素相比松嫩平原均为富集状态,富集倍数以 CaO 最高, I 次之.同时已知油田分布在该异常内,且异常区的元素平均含量与已

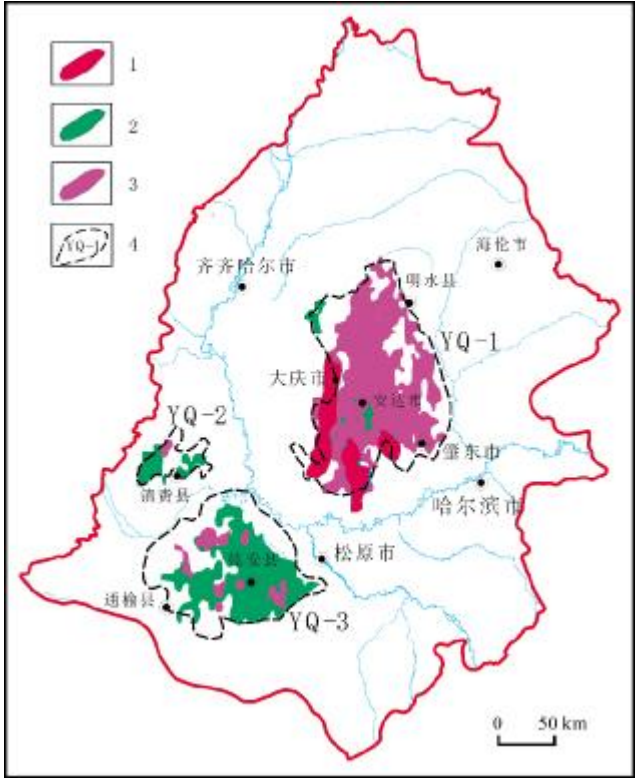


图 3 松嫩平原深层土壤 CaO、S 组合异常图

Fig. 3 Integrated anomaly map of CaO and S in the deep soil of Songnen Plain

1—已知油气区 (known oil-gas area); 2—氧化钙异常区 (CaO anomaly area); 3—硫异常区 (S anomaly area); 4—综合异常区 (integrated anomaly area)

知油田相比大都呈富集状态,以 I 最为富集,只有 Cl 呈贫化状态.总之,该异常区域具有发现油气藏良好前景.

YQ-2 位于松嫩平原西部镇赉县以西,白城以北,面积 1 540 km²,分布于全新统冲积湖积层、上更新统冲积湖积层及下更新统平台组残积层中.异常元素特征见表 4.

该异常油气指示元素相比松嫩平原,富集系数较高,以 CaO 最高, CaO>Cl>Br>TC>Sr, S 呈亏损状态;相比已知油气区 Cl 富集系数最高, Cl>Br>TC>CaO>Sr>I>S.

YQ-3 位于松嫩平原南部,地理位置为洮南市—通榆—乾安一带,面积 12 251 km²,分布于全新统风积层和冲积湖积层、上更新统冲积湖积层中.异常元素特征见表 5.

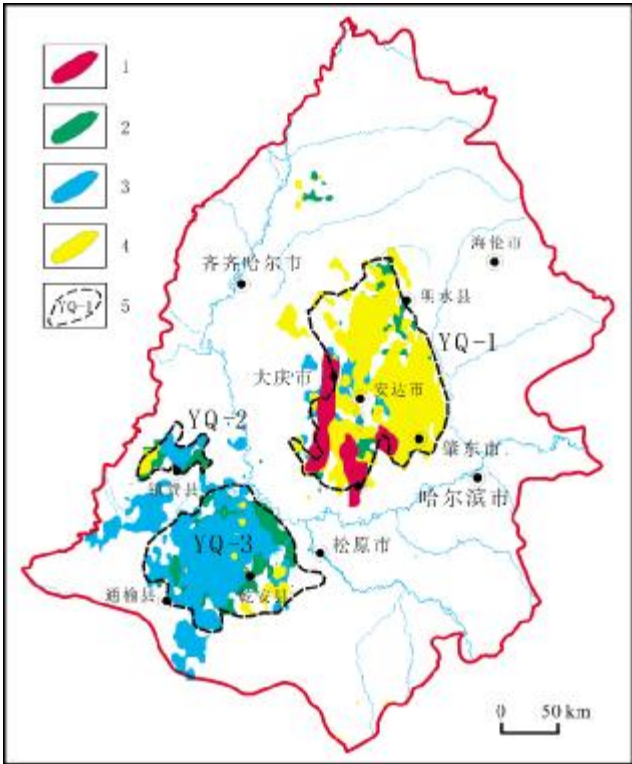


图 2 松嫩平原深层土壤 Br、Cl、I 组合异常图

Fig. 2 Integrated anomaly map of Br, Cl and I in the deep soil of Songnen Plain

1—已知油气区 (known oil-gas area); 2—溴异常区 (Br anomaly area); 3—氯异常区 (Cl anomaly area); 4—碘异常区 (I anomaly area); 5—综合异常区 (integrated anomaly area)

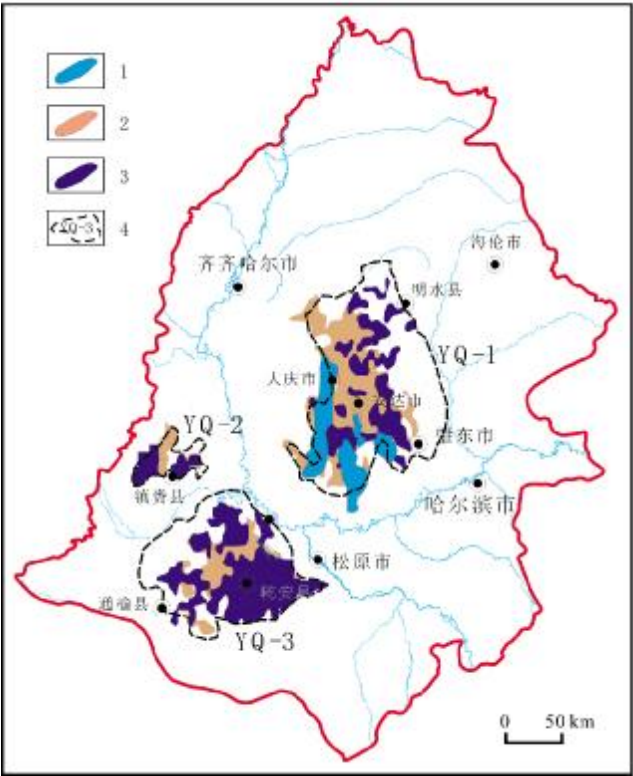


图 4 松嫩平原深层土壤 Sr、TC 组合异常图

Fig. 4 Integrated anomaly map of Sr and TC in the deep soil of Songnen Plain

1—已知油气区 (known oil-gas area); 2—锶异常区 (Sr anomaly area); 3—全碳异常区 (TC anomaly area); 4—综合异常 (integrated anomaly area)

该异常油气指示元素相比松嫩平原, 除 S 外都呈富集状态, $\text{CaO} > \text{Cl} > \text{Br} > \text{TC} > \text{Sr} > \text{I}$, S 呈贫化状态; 相比已知油田, $\text{Cl} > \text{Br} > \text{TC} > \text{CaO} > \text{Sr}$, I 和 S 含量较低.

5 结论

- (1)根据前人研究结果,多目标地球化学测量提供的海量数据除了提供基本的地球化学特征以外,其中油气指示元素特征结合与已知油田元素特征对比,可以为油气藏的指示提供预测.
- (2)大庆油田在松嫩原油气指示元素圈定的异常内,验证了该指示方法的合理性.
- (3)在松嫩平原圈定了 3 个油气藏远景区,其中 YQ-1 面积大,与大庆油田相比各指示元素含量均较高. 同时该异常包括大庆油田,显示出大庆油田外围具有进一步发现油气藏的潜力.

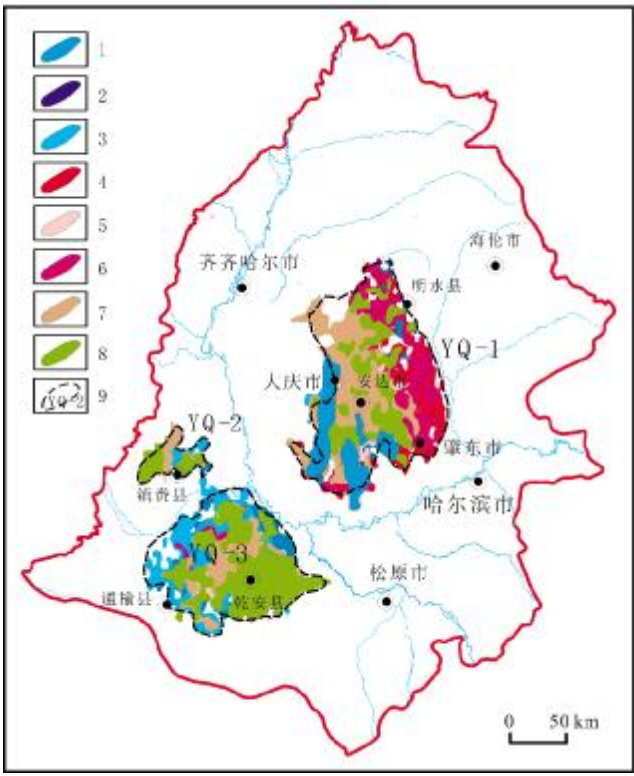


图 5 松嫩平原深层土壤油气指示元素综合异常图

Fig. 5 Integrated anomaly map of indicator elements in the deep soil of Songnen Plain

1—已知油气区 (known oil-gas area); 2—溴异常区 (Br anomaly area); 3—氯异常区 (Cl anomaly area); 4—碘异常区 (I anomaly area); 5—氧化钙异常区 (CaO anomaly area); 6—硫异常区 (S anomaly area); 7—锶异常区 (Sr anomaly area); 8—全碳异常区 (TC anomaly area); 9—综合异常区 (integrated anomaly area)

表 3 YQ-1 异常油气指示元素特征表
Table 3 Characteristics of oil-gas indicator elements in YQ-1 anomaly area

元素	平均值 (X)	中位数 (M)	标准离差 (S)	变化系数 (CV)	富集系数 1	富集系数 2
Br	3.51	3.50	0.80	0.23	1.74	1.07
Cl	64.08	59.81	17.98	0.28	1.01	0.75
I	4.49	4.19	1.72	0.38	2.40	1.18
S	169.85	166.00	36.83	0.22	1.91	1.17
Sr	316.02	317.00	47.69	0.15	1.61	1.00
CaO	5.99	5.94	1.27	0.21	4.04	1.10
TC	1.31	1.29	0.29	0.22	1.88	1.12

富集系数 1 为异常区内元素平均含量/松嫩平原平均含量; 富集系数 2 为异常区内元素平均含量/油田区元素平均含量; 氧化物单位为 10^{-2} , 其余元素为 10^{-6} .

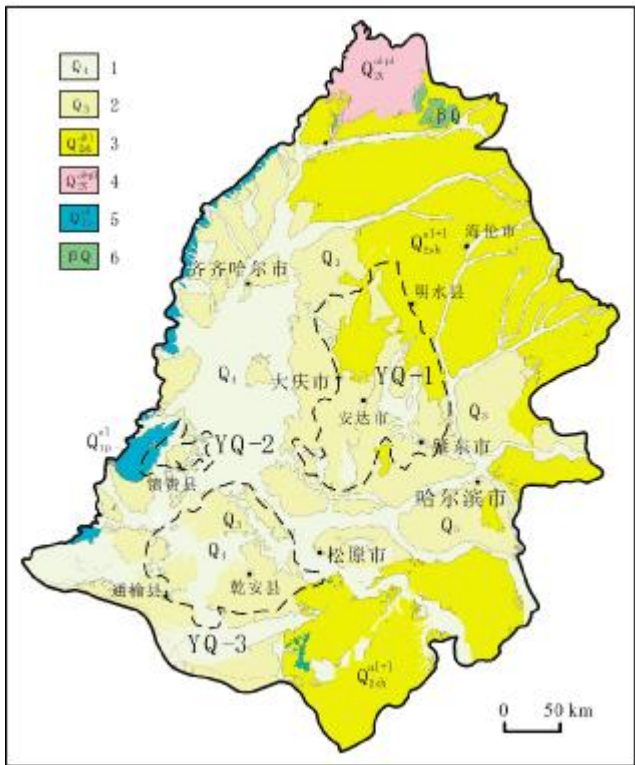


图 6 松嫩平原第四系地质简图

Fig. 6 Geological sketch map of Quaternary strata in Songnen Plain

1—全新统冲洪积层(Holocene alluvium-diluvium); 2—上更新统冲积湖积层 (Upper Pleistocene alluvial lacustrine deposits); 3—中更新统上荒山组冲积湖积层 (alluvial lacustrine deposits of U. Huangshan fm., Middle Pleistocene); 4—中更新统下荒山组冲洪积层(alluvium-diluvium of L. Huangshan fm., Middle Pleistocene); 5—下更新统平台组残积层 (eluvium of Pingtai fm., Lower Pleistocene); 6—第四纪喷出岩 (Quaternary effusive rock)

表 4 YQ-2 异常油气指示元素特征表.

Table 4 Characteristics of oil-gas indicator elements in YQ-2 anomaly area

元素	平均值 (X)	中位数 (M)	标准离差 (S)	变化系数 (CV)	富集系数 1	富集系数 2
Br	5.50	3.60	4.05	0.74	2.72	1.67
Cl	190.21	175.00	69.68	0.37	2.96	2.22
I	2.34	2.15	1.22	0.52	1.25	0.62
S	65.57	50.00	29.90	0.46	0.74	0.45
Sr	317.07	312.50	52.31	0.17	1.62	1.00
CaO	7.97	5.65	5.78	0.73	5.39	1.46
TC	1.86	1.36	1.49	0.80	2.65	1.59

富集系数 1 为异常区内元素平均含量/松嫩平原平均含量; 富集系数 2 为异常区内元素平均含量/油田区元素平均含量;氧化物单位为 10⁻²,其余元素为 10⁻⁶.

表 5 YQ-3 异常油气指示元素特征表.

Table 5 Characteristics of oil-gas indicator elements in YQ-3 anomaly area

元素	平均值 (X)	中位数 (M)	标准离差 (S)	变化系数 (CV)	富集系数 1	富集系数 2
Br	4.36	4.05	1.63	0.37	2.16	1.33
Cl	190.14	152.50	118.24	0.62	2.96	2.22
I	2.20	2.04	0.89	0.40	1.18	0.58
S	81.87	72.00	32.78	0.40	0.92	0.56
Sr	316.50	314.00	60.78	0.19	1.61	1.00
CaO	6.02	6.06	1.89	0.31	4.06	1.10
TC	1.42	1.43	0.41	0.29	2.02	1.21

富集系数 1 为异常区内元素平均含量/松嫩平原平均含量; 富集系数 2 为异常区内元素平均含量/油田区元素平均含量;氧化物单位为 10⁻²,其余元素为 10⁻⁶.

参考文献:

[1]奚小环. 多目标区域地球化学调查与生态地球化学——第四纪研究与应用的最新方向[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 269-274.

[2]Tedesco S A. Surface geochemistry in petroleum exploration[M]. New York: Chapman and Hall, 1995:98-112.

[3]Klusman R W. 微渗漏烃的多种微量元素检测法[J]. 王国建,译. 油气化探,1998,5(3):36.

[4]李锡平. 松辽盆地北部 Sr、Ba 异常与油田关系[J]. 世界地质,1990 (3):69-75.

[5]王国建,程同锦,汤玉平,等. 微量元素方法应用于近地表油气化探研究进展[J]. 物探与化探,2006,30(3):236-239.

[6]周亚龙,孙忠军,杨志斌,等. 多目标化探数据与油气藏指标特征的相关性研究[J]. 物探与化探,2015,39(3):466-472.

[7]谢薇,高宇,韩鹏,等. 多目标地球化学勘查数据在油气化探中的应用——以宁夏盐池地区油气田为例[J]. 地质与勘探,2011,47(3): 524-530.

[8]张厚福,方朝亮,高先志,等. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1999,14-15.

[9]Boyle R W. Gold: History and genesis of deposits[M]. New York: van Nostrand Reinhold, 1987:1-676.

[10]Levinson A A. Introduction to exploration geochemistry[M]. Wilmette: Applied Publishing, 1980:1-924.

[11]孙忠军. 安达-绥化地区碘与油气关系[J]. 物探与化探,1992,19 (1):78-80.

[12]孙忠军. 中国油气化探的成功案例[J]. 地质通报,2009,28(11): 1562-1571.

[13]汤玉平,李鼎民,陈银节,等. 微量元素在油气化探中的应用[J]. 物探与化探,2008,32(4):350-353.

(下转第 626 页/Continued on Page 626)

- 2017, 170: 8-13.
- [18] Barbarick K A, Lai T M, Eberl D D. Exchange fertilizer (phosphate rock plus ammonium-zeolite) effects on sorghum-sudangrass[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(3): 911-916.
- [19] Ferguson G A, Pepper I L. Ammonium retention in sand amended with clinoptilolite[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(1): 231-234.
- [20] 姜淳, 周恩湘, 霍习良, 等. 沸石改土保肥及增产效果的研究[J]. 河北农业大学学报, 1993, 16(4): 48-52.
- [21] 宋秀华, 王秀峰, 魏珉, 等. 沸石添加对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长及离子含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 259-263.
- [22] 周宝库. 天然沸石农业利用研究 II 天然沸石对提高化肥利用率的影响[J]. 黑龙江农业科学, 1998(2): 5-7.
- [23] 关连珠, 梁成华, 金耀青, 等. 天然沸石保氮供氮能力及其机制的研究[J]. 土壤通报, 1990(2): 71-75.
- [24] 张继宏, 颜丽, 关连珠, 等. 沸石的增产效果及对土壤淋溶水离子的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(3): 123-125.
- [25] 仲秀珍. 应用天然沸石矿粉改良盐碱土的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1985, 7(2): 85-91.
- [26] 左莎, 左建, 孔庆瑞. 沸石对盐碱地玉米、高粱的增产效果及机理的研究[J]. 垦殖与稻作, 1997(3): 24-26.
- [27] 仲秀珍, 吴江. 天然沸石改良苏打盐碱土吸附机理的探讨——I. 天然沸石对苏打盐碱土中主要盐分吸附规律的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1990, 12(1): 40-45, 55-117.
- [28] 耿辉, 朱彧, 王志强, 等. 酸雨石等 5 种常用吸盐材料的盐碱土壤改良效果研究[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 967-975.
- [29] Smith J V. Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves[J]. Mineralogical Magazine, 1980, 330: 829-830.
- [30] 张莉, 赵保卫, 李瑞瑞. 沸石改良土壤的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(1): 39-43.
- [31] 李增新, 张启军, 邵敏. 天然沸石的开发与应用[J]. 现代化工, 1997, 17(6): 42-43.
- [32] 张冬梅, 王承智, 黄相国. 天然沸石及其应用进展研究[J]. 环境保护科学, 2008, 34(1): 30-32, 41.
- [33] 王参, 关志秀, 王志强. 酸雨石硅肥对汉麻产量和纤维品质的影响[J]. 吉林农业, 2016, 23(17): 98.
- [34] 吴立全. 盐碱地改良模式现状与探索[J]. 吉林省教育学院学报(下旬), 2008, 24(2): 51-52.
- [35] 左建, 孔庆瑞. 沸石改良碱化土壤作用的初步研究[J]. 河北农业大学学报, 1987, 10(3): 58-64.
- [36] 李焕珍, 张忠源, 谢桂兰, 等. 天然沸石的增产效果及提高肥料利用率的研究[J]. 盐碱地利用, 1994(3): 20-24.
- [37] 翟鹏辉, 李素艳, 孙向阳, 等. 隔盐层对滨海地区盐分动态及国槐生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 80-83.
- [38] 段登选, 杨立邦, 刘树云, 等. 低洼盐碱地薄膜隔盐碱效果的研究[J]. 土壤, 2000, 32(5): 274-277.
- [39] 王启基, 王文颖, 王发刚, 等. 柴达木盆地弃耕地成因及其土壤盐渍地球化学特征[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 44-49.
- [40] 许迪, 程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模型的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 27-30.
- [41] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455.

(上接第 640 页/Continued from Page 640)

- [14] 贾国相, 姚锦琪. 油气田上方的某些化探新指标与油气埋深的关系之研究[J]. 矿产与地质, 2001, 15(2): 124-132.
- [15] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 23.
- [16] Xie X J. Local and regional surface geochemical exploration for oil and gas[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1992, 43(1): 25-42.
- [17] 吴传芝, 李沙园, 程同锦, 等. 油气化探中土壤碘测量技术应用研究[J]. 安徽地质, 2009, 19(2): 124-128.