



东北黑土地中碳赋存形态分析方法研究

安 帅¹, 陈鉴惠², 赵任远³, 宋丽华¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省有色地质勘查总院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110121; 3. 国家珠宝玉石质量监督检验中心, 辽宁 沈阳 110013

摘 要: 应用高频红外碳硫仪研究了东北黑土地中碳的赋存形态(全碳、有机碳), 实验优化了样品称样量、纯铁纯钨助熔剂加入量等测试条件。结果表明: 当样品称样量在 0.05 g、纯铁助熔剂加入量为 0.5 g、纯钨助熔剂加入量为 1.0 g 时, 黑土地中碳形态分析测试效果最佳。用该方法对有证土壤标准物质进行分析, 结果均在不确定度范围内, 测量值与标准值相对误差在 -5.00%~+2.69% 之间, 相对标准偏差(RSD)小于 6.29%。应用该方法与地质矿产行业标准方法(DZ/T0279.27—2016)对黑土实际样品进行比较分析, 测试结果基本一致, 此方法适合东北黑土地中碳的赋存形态分析研究。

关键词: 黑土地; 碳赋存形态; 高频红外碳硫仪; 助熔剂; 东北地区

ANALYSIS ON CARBON OCCURRENCE FORMS IN BLACK SOIL OF NORTHEAST CHINA

AN Shuai¹, CHEN Jian-hui², ZHAO Ren-yuan³, SONG Li-hua¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Liaoning Nonferrous Geological Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110121, China; 3. National Gemstone Testing Center, Shenyang 110013, China

Abstract: The occurrence forms of carbon (TC and C_{org}) in black soil of Northeast China are studied by using high frequency infrared carbon-sulfur analyzer, with the optimization of test conditions such as sample weight and addition amount of pure iron and tungsten fluxes. It is concluded that the test result of carbon occurrence form in black soil is the best with 0.05 g of sample weight, 0.5 g of pure iron flux amount of and 1.0 g of pure tungsten flux amount. The certified soil standard substances are analyzed by the above method, and the results are all within the range of uncertainty, with the relative error between measured value and standard value of -5.00% to +2.69% and relative standard deviation (RSD) less than 6.29%. The test results of actual black soil samples by the above method are basically consistent with those by the method of *Geology and Mineral Industry Standard (DZ/T0279.27—2016)*, which is suitable for the analysis of carbon occurrence forms in black soil of Northeast China.

Key words: black soil; carbon occurrence form; high frequency infrared carbon-sulfur analyzer; flux; Northeast China

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-01-28. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“黑土地关键带黑土标准物质研制”(编号 DD20190520-07).

作者简介: 安帅(1988—)男, 硕士, 工程师, 主要从事岩石矿物化学分析测试方法研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail/Chemical1618@126.com

通信作者: 宋丽华(1978—)女, 博士, 高级工程师, 主要从事岩石矿物化学分析测试方法研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail/120836684@qq.com

0 引言

黑土是具有强烈胀缩和扰动特性的黏质土壤,全世界仅有三大块黑土区:乌克兰大平原、北美洲密西西比河流域和松辽流域的东北黑土区^[1]。黑土土壤的组成包括矿物质、有机质、水分和空气4种物质,土壤碳是衡量黑土土壤养分供给能力的重要指标^[2-3]。近年来,随着科技水平不断提高,土地利用率也逐年提升,导致土壤肥力不断减弱,同时也带来了土壤环境污染问题^[4]。因此,通过了解土壤中碳的赋存形态,进一步探明有机质含量,对农业生产和环境检测具有重要的指导意义。

土壤中碳的赋存形态主要有无机碳(IC)和有机碳(C_{org})^[5]。无机碳包括碳酸、碳酸盐、重碳酸盐以及吸附的二氧化碳等^[6];有机碳主要来源于动植物残体以及牲畜粪便等有机物质^[7]。无机碳的分析方法有气压法、原子吸收光谱法以及连续流压电检测法^[8-10],这些方法操作繁琐,精密度低。有机碳的分析方法主要有烧失量法、重铬酸钾容量法以及光谱法、高频红外碳硫仪^[11-15]等仪器分析方法。笔者采用高频红外碳硫分析仪研究黑土土壤中碳赋存形态研究,相较其他方法,此法避免了传统方法中样品的固液转化流程^[16],排除了样品基体中 Cl^- 、 Fe^{2+} 等带来的干扰^[17],采用直接高温熔融检测的方法,有效提高了检测效率,为实现快速高效的检测碳赋存形态研究提供了可能。

黑土土壤样品具有较低的电磁感应^[18],在样品燃烧时不能产生电磁感应涡流,土壤中的碳无法完全氧化成 CO_2 ,影响最终的测试结果。针对高频红外碳硫仪在分析中存在的难题,笔者通过实验优化样品称样量、纯铁纯钨助熔剂加入量等实验条件,分别检测黑土土壤中的全碳(TC)和有机碳,无机碳= $TC-C_{org}$,然后确定土壤碳的主要赋存形态,用国家一级标准物质对实验方法进行了评价,并用此方法检测了黑龙江省海伦市和林甸县的黑土和黑钙土样品,测定结果与重铬酸钾容量法进行了对比,得到了理想的检测结果。

1 实验部分

1.1 主要仪器和试剂

CS-230 型高频红外碳硫分析仪(美国 LECO 公司),主要参数包括检测器恒温箱:48℃;碳检测器信号:7.5~9.2 之间;助燃气: O_2 (0.24 kPa);动力气: N_2

(0.28 kPa);最大输出功率:5 kW;高频振荡频率:20 MHz。

纯铁助熔剂(美国 LECO 公司, No. 501-077):碳含量小于 0.0005%;纯钨助熔剂(美国 LECO 公司, No. 502-294):碳含量小于 0.001%。

1.2 标准物质和黑土地样品

土壤国家标准物质: GBW07360、GBW07401、GBW07405、GBW07407、GBW07408、GBW07424、GBW07425、GBW07432。

黑土地样品均来自本课题组承担的“黑土地关键带黑土标准物质研制”(DD20190520-07)项目。样品采自黑龙江省海伦市和林甸县的黑土和黑钙土,采集后的样品经风干、研磨等前处理制备、存储备用。

1.3 实验方法

1.3.1 实验原理

称取经加工后的黑土样品,加入纯铁、纯钨助熔剂,置于高频红外碳硫仪高频感应炉内,在高纯氧气流环境下燃烧,土壤中的碳经高温燃烧生成 CO_2 , CO_2 在 4.2 μm 处^[19-20]有很强的红外特征吸收峰,通过在线检测生成气体中 CO_2 的含量,计算土壤样品中 TC 和 C_{org} 的含量。

1.3.2 高频红外碳硫仪操作步骤

TC 测定:准确称取 0.05 g 黑土样品(精确至 0.0001 g),置于经高温烘烤后的陶瓷坩埚中,加入适量纯铁、纯钨助熔剂,放于高频红外碳硫仪中进行测定。

C_{org} 测定:准确称取 0.05 g 黑土样品(精确至 0.0001 g),置于陶瓷坩埚中,滴加适量 1+1 的盐酸^[18],使样品充分反应直至无气泡产生,去除样品中无机碳的影响,将反应后的黑土样品放于 100℃ 的干燥箱内,去除多余的 HCl 并烘干样品。加入适量助熔剂,放于高频红外碳硫仪中进行测定。

1.3.3 称样量实验

称取 0.02、0.03、0.05、0.10、0.12、0.15 g 标准物质 GBW07425,分别加入 0.8 g 纯铁和 1.5 g 纯钨助熔剂进行分析,测试不同称样量对碳形态分析的影响。

1.3.4 纯铁、纯钨助熔剂加入量实验

准确称取 0.1、0.2、0.3、0.5、0.8、1.0 g 纯铁助熔剂,分别加入 0.05 g 标准物质 GBW07425 和 1.5 g 纯钨助熔剂,测试纯铁助熔剂添加量对碳形态分析的影响。

准确称取 0.5、0.7、1.0、1.3、1.5、2.0 g 纯钨助熔剂,分别加入 0.05 g 标准物质 GBW07425 和 0.08 g 纯铁助熔剂,测试纯钨助熔剂添加量对碳形态分析的影响.

1.4 方法验证实验

选择碳含量在 0.5%~2.5%范围内的标准物质作为样品, 检验分析测试方法. 称取 0.05 g 不同含量的标准物质,加入 0.5 g 纯铁和 1.0 g 纯钨助熔剂,每个样品分析测试 10 次,计算平均值、标准偏差和相对标准偏差,进行方法验证.

2 结果与讨论

2.1 标准工作曲线

实验选取化学结构稳定结构单一的蔗糖(碳含量: 42.1%)^[21]做标准曲线,准确称取 0.01、0.02、0.05、0.10、0.20 g 蔗糖置于陶瓷坩埚中,精确值 0.0001 g,设置碳硫分析仪样品称样量为 1.0 g,加入 0.5 g 纯铁和 1.0 g 纯钨助熔剂测定, 得到碳含量为 0.421%、0.842%、2.105%、4.210%、8.420%的曲线, 如图 1 所示. 从图 1 中可知校准曲线线性良好($R^2>0.99$),实验选用不同体系的国家标准物质对标准曲线进行验证,TC 测定值与标准值如表 1 所示,检测结果满足分析测试的要求.

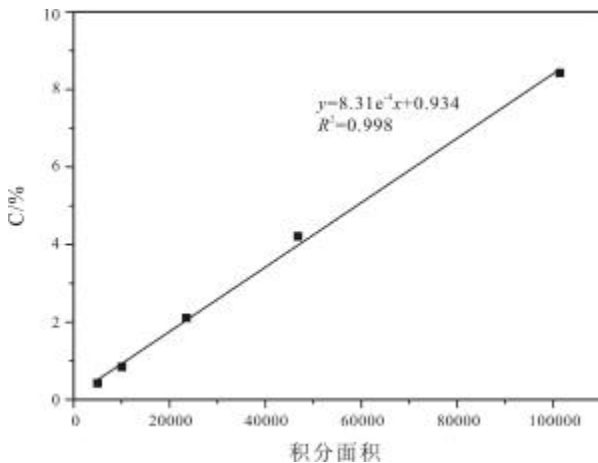


图 1 标准曲线图

Fig. 1 Standard curve of carbon

2.2 实验条件的影响

2.2.1 干扰的消除

由于土壤样品中有机质含量多基体复杂, 燃烧同时产生 SO_2 和 NO_2 等杂质, 燃烧不完全时也产生 CO 等杂质气体, SO_2 对 CO_2 红外检测信号有干扰^[22]. 研究发现在一定温度下铂金属能活化 O_2 , 催化 CO 、 SO_2 与

表 1 不同体系国家标准物质 TC 检测值比较

Table 1 Test results of TC by national standard substances of different system

国家标准物质	标准值/%	测定值/%
GBW07360(水系沉积物)	4.76	4.73
GBW07405(黄红壤)	0.35	0.39
GBW07408(黄土)	1.93	1.96
GBW07425(辽河平原土壤)	1.12	1.10
GBW07401(暗棕壤)	2.11	2.09
GBW07407(砖红壤)	0.67	0.65
GBW07424(松嫩平原土壤)	1.57	1.60
GBW07432(富硒土壤)	1.71	1.70

O_2 发生氧化反应^[23-24], 实验采用镀铂硅胶催化剂将未完全燃烧产生的 CO 催化转化为 CO_2 , SO_2 转化为 SO_3 , 提高检测精度降低基体干扰.

2.2.2 称样量的影响

样品称样量对碳形态分析的影响如表 2 所示. 称样量小于 0.05 g 时,TC 和 C_{org} 分析结果相对标准偏差(RSD)偏差较大,测试结果重现性差,随着称样量增加相对标准偏差变小, 重现性越来越好. 当称样量大于 0.10 g 时, 测定结果明显小于标准物质 GBW07425 的标准值. 当分析样品过多时, 助熔剂在高频感应磁场下产生的热量不足以使样品中的碳完全释放出来, 导致测试结果偏低, 因此实验选用 0.05 g 作为样品称样量.

2.2.3 纯铁、纯钨助熔剂加入量的影响

纯铁助熔剂加入量对碳形态分析的影响如图 2a、b 所示,随着铁助熔剂的增加,碳含量测定值趋于标准值,加入量大于 0.5 g 时碳含量测定值波动变大,重现性变差. 纯钨助熔剂加入量对碳形态分析的影响如图 2c、d 所示,随着钨助熔剂的增加,碳含量测定值也趋于标准值,加入量大于 1.0 g 时碳含量测定值重现性也明显降低. 在高频感应磁场下, 样品的燃烧随着助熔剂的增加越来越剧烈, 低加入量时燃烧产生的热量不能够使样品完全反应,导致测定误差偏大,高加入量时熔融的助熔剂容易飞溅,同时造成样品的飞溅,导致测试结果不稳定. 实验所得,当纯铁加入量为 0.5 g、纯钨加入量为 1.0 g 时最为适合.

表 2 称样量对 TC、C_{org} 的影响

Table 2 Test results of TC and C_{org} by sample weights

分析次数	TC 测定值/%						C _{org} 测定值/%					
	0.02 g	0.03 g	0.05 g	0.10 g	0.12 g	0.15 g	0.02 g	0.03 g	0.05 g	0.10 g	0.12 g	0.15 g
1	0.91	1.20	1.15	1.08	0.95	0.85	0.94	1.03	1.08	1.06	1.01	0.95
2	1.22	1.07	1.11	1.09	0.98	0.87	1.12	1.12	1.09	1.07	1.01	0.98
3	0.85	0.95	1.09	1.07	0.97	0.88	0.82	0.96	1.07	1.05	1.00	0.97
4	1.21	0.78	1.12	1.08	0.93	0.85	1.15	0.90	1.08	1.06	1.01	0.93
5	1.01	1.11	1.13	1.09	0.95	0.87	0.88	1.05	1.02	1.07	1.01	0.95
6	0.81	0.97	1.11	1.05	0.98	0.85	0.75	0.98	1.05	1.03	0.98	0.98
7	0.65	1.21	1.15	1.09	0.85	0.95	1.17	0.85	0.99	1.08	1.02	0.95
8	0.73	1.05	1.11	1.03	0.95	0.87	0.91	0.83	1.03	1.01	0.96	0.99
9	1.17	1.07	1.14	1.12	0.95	0.90	0.73	1.02	1.14	1.02	1.06	0.95
10	0.95	1.23	1.13	1.05	0.98	0.87	0.94	1.18	1.05	1.03	0.98	0.98
标准值	1.12						1.07					
平均值	0.95	1.06	1.12	1.08	0.95	0.88	0.94	0.99	1.06	1.05	1.00	0.96
RSD	21.09	13.00	1.74	2.41	4.08	3.45	16.94	11.23	3.95	2.27	2.86	2.02

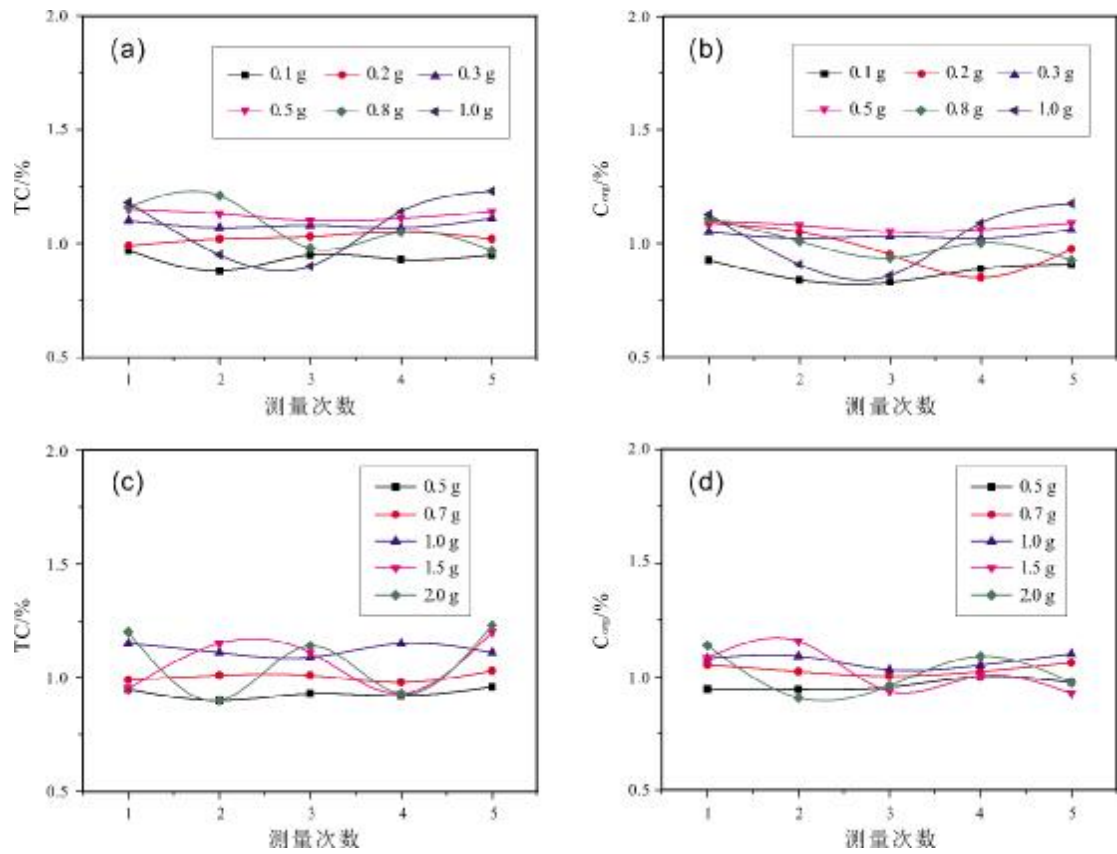


图 2 纯铁、纯钨加入量对 TC、C_{org} 的影响

Fig. 2 Variation curves of TC and C_{org} by addition amount of pure iron and tungsten fluxes

表 3 土壤标准物质中 TC、C_{org} 的测定结果
Table 3 Test results of TC and C_{org} by soil standard substances

有证标准物质	TC 认定值/%	10 次 TC 测定值/%	平均值/%	相对误差/%	RSD/%
GBW07401	2.11±0.19	2.15, 2.13, 2.09, 2.20, 2.11, 2.15, 2.02, 2.21, 2.13, 2.10	2.13	0.90	2.58
GBW07407	0.67±0.09	0.65, 0.63, 0.68, 0.67, 0.69, 0.74, 0.65, 0.70, 0.72, 0.75	0.69	-1.17	5.81
GBW07424	1.57±0.16	1.53, 1.60, 1.56, 1.62, 1.58, 1.64, 1.55, 1.59, 1.60, 1.51	1.58	2.69	2.57
GBW07425	1.12±0.11	1.11, 1.09, 1.22, 1.17, 1.10, 1.24, 1.15, 1.10, 1.08, 1.05	1.13	-5.00	5.51
有证标准物质	C _{org} 认定值/%	10 次 C _{org} 测定值/%	平均值/%	相对误差/%	RSD/%
GBW07401	1.80±0.16	1.68, 1.77, 1.93, 1.65, 1.90, 1.75, 1.82, 1.88, 1.73, 1.68	1.78	0.51	5.59
GBW07407	0.64±0.07	0.60, 0.58, 0.57, 0.59, 0.63, 0.54, 0.66, 0.63, 0.65, 0.63	0.61	1.63	6.29
GBW07424	1.35±0.07	1.36, 1.45, 1.37, 1.41, 1.35, 1.44, 1.34, 1.32, 1.38, 1.30	1.37	0.98	3.58
GBW07425	1.07±0.06	1.05, 1.02, 1.10, 1.05, 1.07, 1.08, 1.09, 1.05, 1.06, 1.07	1.06	-0.56	2.18

2.3 分析方法评价

实验研究了方法的精密度和准确度：选择碳含量从低到高、有代表性的有证土壤标准物质 GBW07401、GBW07407、GBW07424、GBW07425 作为样品进行测定，采用 2.2 节分析方法对每个标准物质平行测定 10 次，测定结果如表 3 所示，结果均在土壤有证标准物质不确定度范围内，相对误差在-5.00%~+2.69%之间，相对标准偏差(RSD)小于 6.29%。

2.4 实际样品比对

实验选取黑龙江省海伦市和林甸县的黑土和黑钙土实际样品用本方法进行分析测定 15 次，同时采用地质矿产行业标准《区域地球化学样品分析方法 第 27 部分：有机碳量测定 重铬酸钾容量法》(DZ/T0279.27—2016)的方法对土壤样品进行分析测定，两种方法比较结果见表 4。从表 4 中可以看出，本方法与 DZ/T0279.27—2016 标准方法的测定结果基本一致，本方法可以用于黑土中碳赋存形态研究。

3 结论

本文结合区域地球化学调查样品分析特点，建立了高频红外碳硫仪分析检测黑土样品中碳赋存形态的方法。通过优化称样量以及纯铁、纯钨助熔剂的加入量，得到了较好的分析结果。通过国家标准物质验证了本方法具有很好的精密度和准确度，满足土壤样品分析质量的要求。

表 4 两种方法测定黑土土壤中 C_{org} 结果比对

Table 4 Comparison of C_{org} test results in black soil between two methods

黑土 C _{org} 测定值/%			黑钙土 C _{org} 测定值/%		
样品编号	本方法	DZ/T 0279.27—2016 方法	样品编号	本方法	DZ/T 0279.27—2016 方法
1-01	2.17	2.15	2-01	1.35	1.31
1-02	2.10	2.25	2-02	1.40	1.45
1-03	2.15	2.17	2-03	1.37	1.34
1-04	2.19	2.17	2-04	1.42	1.46
1-05	2.20	2.20	2-05	1.43	1.35
1-06	2.17	2.17	2-06	1.41	1.50
1-07	2.10	2.16	2-07	1.34	1.31
1-08	2.17	2.15	2-08	1.35	1.39
1-09	2.16	2.21	2-09	1.39	1.47
1-10	2.14	2.34	2-10	1.43	1.38
1-11	2.16	2.12	2-11	1.39	1.32
1-12	2.13	2.26	2-12	1.41	1.44
1-13	2.17	2.09	2-13	1.36	1.49
1-14	2.16	2.16	2-14	1.35	1.35
1-15	2.23	2.12	2-15	1.38	1.42
平均值	2.16	2.18	平均值	1.39	1.40
RSD	1.36	2.91	RSD	2.31	4.95

参考文献(References):

- [1]戴慧敏,赵君,刘国栋,等.东北黑土地质量调查成果[J].地质与资源,2020,29(3):299.
Dai H M, Zhao J, Liu G D, et al. Progress in the quality survey of black soil in Northeast China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 299.
- [2]窦森.土壤有机质[M].北京:科学出版社,2010:1-3.
Dou S. The organic matter of soil[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-3. (in Chinese)
- [3]杨佳佳,林楠,于秀秀,等.东北典型黑土区有机碳遥感定量反演研究[J].地质与资源,2020,29(4):357-362.
Yang J J, Lin N, Yu X X, et al. Study on quantitative inversion of remote sensing for organic carbon in the typical black soil areas of Northeast China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(4): 357-362.
- [4]陈卫平,谢天,李笑诺,等.中国土壤污染防治技术体系建设思考[J].土壤学报,2018,55(3):557-568.
Chen W P, Xie T, Li X N, et al. Thinking of construction of soil pollution prevention and control technology system in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 557-568.
- [5]陈宗定,许春雪,安子怡,等.土壤碳赋存形态及分析方法研究进展[J].岩矿测试,2019,38(2):233-244.
Chen Z D, Xu C X, An Z Y, et al. Research progress on fraction and analysis methods of soil carbon[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2): 233-244.
- [6]Adenuga O S, Ajiboye G A, Shade J. Soil carbon[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 27-28.
- [7]Wang X J, Xu M G, Wang J P, et al. Fertilization enhancing carbon sequestration as carbonate in arid cropland: Assessments of long-term experiments in northern China[J]. Plant and Soil, 2014, 380(1/2): 89-100.
- [8]王莲莲,杨学云,杨文静.土壤碳酸盐几种测定方法的比较[J].西北农业学报,2013,22(5):144-150.
Wang L L, Yang X Y, Yang W J. Comparison of three methods for determination of soil carbonate[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2013, 22(5): 144-150.
- [9]Sherrod L A, Dunn G, Peterson G A, et al. Inorganic carbon analysis by modified pressure-calimeter method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(1): 299-305.
- [10]Zougagh M, Ríos A, Valcúrcel M. Direct determination of total carbonate salts in soil samples by continuous-flow piezoelectric detection[J]. Talanta, 2005, 65(1): 29-35.
- [11]邱灵佳,黄国林,帅琴,等.灼烧法中有机质与总有机碳换算关系的重建及其在页岩分析中的应用[J].岩矿测试,2015,34(2):218-223.
Qiu L J, Huang G L, Shuai Q, et al. Reconstruction of the conversion relationship between organic matter and total organic carbon in calcination method and its application in shale analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(2): 218-223.
- [12]吴才武,夏建新,段峥嵘.土壤有机质测定方法述评与展望[J].土壤,2015,47(3):453-460.
Wu C W, Xia J X, Duan Z R. Review on detection methods of soil organic matter (SOM)[J]. Soils, 2015, 47(3): 453-460.
- [13]陶培峰,王建华,李志忠,等.基于高光谱的土壤养分含量反演模型研究[J].地质与资源,2020,29(1):68-75,84.
Tao P F, Wang J H, Li Z Z, et al. Research of soil nutrient content inversion model based on hyperspectral data[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 68-75, 84.
- [14]张东辉,赵英俊,秦凯,等.光谱变换方法对黑土养分含量高光谱遥感反演精度的影响[J].农业工程学报,2018,34(20):141-147.
Zhang D H, Zhao Y J, Qin K, et al. Influence of spectral transformation methods on nutrient content inversion accuracy by hyperspectral remote sensing in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 141-147.
- [15]唐伟祥,孟凡乔,张煜,等.不同土壤有机碳测定方法的比较[J].土壤,2018,50(3):552-557.
Tang W X, Meng F Q, Zhang Y, et al. Method comparison for determining soil organic carbon[J]. Soils, 2018, 50(3): 552-557.
- [16]殷陶刚,窦向丽,张旺强,等.应用高频红外碳硫仪测定农用地土壤样品中有机质含量[J].岩矿测试,2020,39(4):631-638.
Yin T G, Dou X L, Zhang W Q, et al. Determination of organic matter content in farm land soil by high frequency infrared carbon-sulfur analyzer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(4): 631-638.
- [17]杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008:30-31.
Yang J H, Wang C L, Dai H L. The agrochemical analysis of soil and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press, 2008: 30-31. (in Chinese)
- [18]张明杰,戴雪峰,陆丁荣,等.高频燃烧-红外碳硫仪用于农用地土壤质量调查样品中碳硫的快速测定[J].岩矿测试,2010,29(2):139-142.
Zhang M J, Dai X F, Lu D R, et al. Rapid determination of carbon and sulfur in farmland soil samples by high frequency-infrared carbon-sulfur analyzer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(2): 139-142.
- [19]钱宝,刘凌,肖潇.土壤有机质测定方法对比分析[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):34-38.
Qian B, Liu L, Xiao X. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(1): 34-38.

(下转第709页/Continued on Page 709)

间,建设战略性原油储库,是当前复杂国际国内形势下保障我国能源资源安全的新课题.总体思路是:针对关键地质问题与技术难点,优选代表性区域;综合运用区域地质、工程地质、环境地质,以及油气储运方面理论技术,开展废弃地下空间状况调查;通过阶段性的野外现场小试、中试,建设地下原油储库示范区;总结可用于原油战略储备的废弃矿山调查规范与评价标准;为保障国家原油战略储备安全,提供可利用的后备地下空间,培育相关的人才队伍.

参考文献(References):

- [1]陈树旺,许光,杨建国,等.松辽盆地及外围油气资源基础地质调查——“十三五”阶段进展与未来工作展望[J].地质与资源,2021,30(3):221-231,248.
- Chen S W, Xu G, Yang J G, et al. Foundational geological survey for oil and gas resources in Songliao Basin and its periphery areas: Progress and prospect [J]. *Geology and Resources*, 2021, 30 (3): 221-231,248.
- [2]陈树旺,公繁浩,杨建国,等.松辽盆地外围油气基础地质调查工程进展与未来工作方向[J].中国地质调查,2016,3(6):1-9.
- Chen S W, Gong F H, Yang J G, et al. Progress and orientation of the project about fundamental geological survey on oil and gas resources in the periphery area of Songliao Basin [J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(6): 1-9.
- [3]杨子健,李威.中国石油储备体系的发展现状与建议[J].国际石油经济,2015,23(9):69-77.
- Yang Z J, Li W. Development situation and needs of China's petroleum reserve system [J]. *International Petroleum Economics*, 2015, 23 (9) : 69-77.
- [4]李玉忠,马伟平.中国石油储备库设计运行技术现状及发展建议[J].天然气与石油,2021,39(3):18-23.
- Li Y Z, Ma W P. The status quo and development suggestions of design and operation of oil reserves storage depot in China[J]. *Natural Gas and Oil*, 2021,39(3):18-23.
- [5]崔少东,郭书太,代云清.砂岩地下水封洞库各向异性渗透系数确定方法及应用[J].现代隧道技术,2019,56(2):65-69.
- Cui S D, Guo S T, Dai Y Q. Determination method of anisotropy permeability coefficient for underground water sealed cavern in sandstone area and its application[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2019,56(2): 65-69.
- [6]崔少东,郭书太,高剑锋.基于非饱和流的地下水封洞库涌水量研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(S2):746-751.
- Cui S D, Guo S T, Gao J F. Research on water inflow into underground water sealed cave based on unsaturated flow [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(S2): 746-751.
- [7]任文明,梁久正.大型地下洞库岩体力学参数取值及工程应用[J].石油工程建设,2012,38(1):14-17.
- Ren W M, Liang J Z. Selection and engineering application of rock mechanical parameters for large underground rock cavern[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2012, 38(1): 14-17.
- [20]廖漓文,董震堃.红外碳硫仪测定土壤中碳含量的探讨[J].价值工程,2015,34(11):181-182.
- Liao L W, Dong Z K. New application of high frequency infrared ray carbon sulphur analyser [J]. *Value Engineering*, 2015, 34 (11): 181-182.
- [21]李建红,李熹.高频燃烧红外吸收法测定页岩中有机碳[J].煤炭与化工,2015,38(5):137-138,141.
- Li J H, Li X. The application of high frequency combustion infrared absorption method in measuring organic carbon in shale[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2015, 38(5): 137-138, 141.
- [22]钟其云,王启芳.碳硫分析专用复合催化剂的研制[J].分析实验室,1997,16(1):79-82.
- Zhong Q Y, Wang Q F. Development of special complex catalyst for analysis of carbon and sulfur [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 1997, 16(1): 79-82.
- [23]Bielański A, Haber J. Oxygen in catalysis on transition metal oxides [J]. *Catalysis Reviews*, 1979, 19(1): 1-41.
- [24]叶青,李冬辉,程水源,等.铝柱撑蒙脱石负载Au和Pt催化剂的结构特点及其催化氧化CO性质[J].北京工业大学学报,2012,38(8):1269-1275.
- Ye Q, Li D H, Cheng S Y, et al. Au or Pt supported on Al pillared montmorillonite: Characterization and catalytic activity for CO oxidation [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2012, 38 (8): 1269-1275.

(上接第721页/Continued from Page 721)