

西湖凹陷新生代煤系烃源岩生烃动力学研究

谢康珍^{1,2}, 朱炎铭^{1,2}, 司庆红³, 黄辅强⁴

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州 221116; 3. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 4. 北京大地高科煤层气工程技术研究院, 北京 100040)

摘要:为了探究西湖凹陷平湖组煤系烃源岩生烃潜力, 优选出平湖组煤系烃源岩中煤、炭质泥岩和暗色泥岩样品各2块进行热模拟试验和生烃动力学研究, 并模拟了2口井的生烃史。研究表明, 煤和炭质泥岩活化能分布范围在20 kJ/mol之内, 体现了快速生烃过程; 暗色泥岩活化能分布范围在60 kJ/mol之内, 反应生烃持续时间较长; 暗色泥岩有机质在距今37 Ma进入生烃门限, 煤和炭质泥岩在距今30 Ma开始进入生烃期, 10 Ma以后开始进入大量生烃阶段, 同时在生烃热演化过程中存在明显的二次生烃作用, 可以此说明该区煤系烃源岩具有较大的生烃潜力。

关键词:西湖凹陷; 煤系烃源岩; 生烃动力学; 生烃史

中图分类号: TE132.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)03-0125-05

Study on kinetics of hydrocarbon generation from Cenozoic Coal Measures of Xihu Depression

XIE Kang-zhen^{1,2}, ZHU Yan-ming^{1,2}, SI Qing-hong³, HUANG Fu-Qiang⁴

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process Ministry of Education (China University of Mining and Technology), Xuzhou 221116, China; 3. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. Beijing Dadi Gaoke Coalbed Methane Engineering Technology Research Institute, Beijing 100040, China)

Abstract: In order to investigate the hydrocarbon generation potential and evolution of Pinghu Formation, coal, carbonaceous shale and dark mudstone samples each two were preferred to apply thermal simulation experiment and kinetics calculation, and two wells hydrocarbon generation history were simulated. The results demonstrated that the activation energy of coal and carbonaceous mudstone distribution was within 20 kJ/mol, and reflecting a rapid hydrocarbon generation, the activation energy of dark mudstone distribution was within 60 kJ/mol, and reflecting a longer hydrocarbon generation. The organic material from dark mudstone reached oil and gas threshold in 37 Ma, while coal and carbonaceous shale reached oil and gas threshold in 30 Ma. Additionally gas peak was in the last 10 Ma. Finally, the second hydrocarbon-generation was present in thermal evolution of hydrocarbon. The coal measures in Xihu Depression have large hydrocarbon potential.

Key words: Xihu Depression; hydrocarbon source rock; hydrocarbon generating kinetics; hydrocarbon generating history

0 引 言

烃源岩有机质在成烃地质演化过程中受地温、时间等因素的综合作用, 发生复杂的化学反应, 而地质环境中烃源岩的生烃反应和实验室可控条件下发生的化学反应具有相同的化学动力学性质^[1-4], 因此可采用室内控制试验条件的方法来模拟地质历史

时期烃源岩生烃演化过程。目前已对西湖凹陷进行了大量的勘探工作, 明确了新生代煤系烃源岩的特征及分布情况^[5], 但对烃源岩生烃动力学方面缺乏分析研究。笔者选用平湖组煤系烃源岩对其进行热模拟试验, 并进行了生烃动力学分析, 平湖组煤系烃源岩为好-很好烃源岩, 且处于西湖凹陷新生代地层的底部, 受热演化程度高, 生烃潜力大^[6-7], 因此

收稿日期: 2014-11-04; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2015.03.029

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2008ZX05023-01-08)

作者简介: 谢康珍(1989—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生。Tel: 15152117168, E-mail: xkzcumt@126.com

引用格式: 谢康珍, 朱炎铭, 司庆红, 等. 西湖凹陷新生代煤系烃源岩生烃动力学研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3): 125-129.

XIE Kang-zhen, ZHU Yan-ming, SI Qing-hong, et al. Study on kinetics of hydrocarbon generation from Cenozoic Coal Measures of Xihu Depression[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 125-129.

选用平湖组煤岩在一定程度上可代表西湖凹陷新生代煤系烃源岩的生烃潜力。模拟平湖组顶底界面的煤岩、炭质泥岩和暗色泥岩生烃史,分析西湖凹陷新生代煤系烃源岩生烃总体特征。

1 试验方案与样品

在进行热模拟试验中要求所用样品的成熟度低、有机质丰度高。本次试验样品为西湖凹陷平湖组煤系烃源岩,镜质组反射率 R_o 为 0.55% ~ 0.70%^[8],母质类型为 II₂-III型^[9-10]。

研究选取西湖凹陷平湖组不同井位、不同深度的煤系烃源岩样品多件,包括煤样品、炭质泥岩样品及暗色泥岩样品,采用硫碳分析仪和 Rock-Eval 热解仪^[11-12]进行有机碳测试及热解参数分析。根据有机碳测试结果筛选出生烃潜力相对高、成熟度相对低的分别来自平湖组顶底的煤、炭质泥岩及暗色泥岩各 2 个样品,共 6 个样品用于热模拟试验^[13],以此尽量接近地质条件,增加试验的有效性。

煤系烃源岩的热模拟试验依据时间—温度补偿原理,用高温快速的实验室热解条件模拟低温缓慢地质条件下的埋藏过程。本次热模拟试验采用开放体系,试验仪器选用 Rock-Eval 热解仪。将样品放入炉温为 200 °C 的热解炉中保持恒温 3 min 测得游离烃含量 S_1 ,在温度 200 ~ 600 °C,分别按照 10、50 °C/min 的升温速率程序升温分析裂解烃含量 S_2 ,并记录在不同时间对应瞬时产烃火焰离子化检测响应值, S_1+S_2 为烃源岩总的生烃潜量。二氧化碳进入温度 390 °C。热解氦气流量为 100

mL/min,载气氦气流量为 35 mL/min,氢气 28 ~ 30 mL/min,空气流量为 400 mL/min^[14]。最后通过热解氢指数 HI (裂解烃质量 S_2 /有机碳质量 TOC,mg/g) 估算干酪根生烃转化率。样品有机地球化学特征见表 1。

表 1 平湖组原岩样品有机地球化学特征

样品号	岩性	R_o / %	TOC/ %	生烃潜量/(mg·g ⁻¹)			HI/ (mg·g ⁻¹)
				S_1	S_2	S_1+S_2	
1	煤	0.47	65.10	8.17	128.52	136.69	218
2	煤	0.73	77.20	12.81	174.56	187.37	226
3	炭质泥岩	0.60	11.70	2.59	33.73	36.32	288
4	炭质泥岩	0.57	14.90	4.89	46.22	51.11	310
5	暗色泥岩	0.58	3.07	1.28	6.12	7.40	199
6	暗色泥岩	0.62	3.55	1.30	7.09	8.39	200

2 结果与讨论

2.1 干酪根生烃转化率参数

干酪根的活化能和指前因子的分布情况必须通过对不同升温条件下的生烃转化率进行分析才能确定。计算产烃累计 FID 响应值,并作为标准化试验条件下生烃转化率。生烃转化率随着温度升高而增加,为了便于对比不同样品之间的生烃转化率,将样品从 200 °C 升温到 600 °C,以 50 °C 为间隔实时记录 10、50 °C/min 升温速率下不同样品的生烃转化率 X ,即可得生烃转化率 X 与温度 T 的关系,结果如图 1 所示。

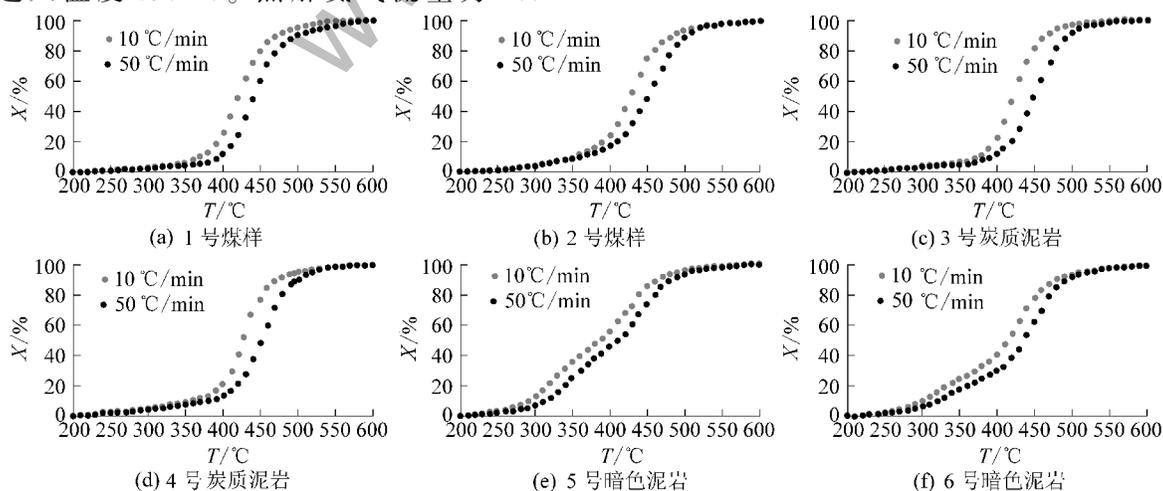


图 1 热模拟样品生烃转化率—温度关系曲线

从图 1 可知,达到开始有效生烃转化率为 10% 时的温度是煤和炭质泥岩相当,均大于暗色泥岩;而

达到 90% 时的温度则 3 种岩性相当。暗色泥岩最先到达有效生烃转化率 10%,其温度最低,而完成生烃

转化率 90% 时三者的温度相当, 则暗色泥岩有效生烃活化能跨度最大, 其生烃能力较强, 生烃量较大。

同一样品达到相同温度时, 50 °C/min 的升温速率下的煤系烃源岩生烃转化率明显低于 10 °C/min 升温速率对应的生烃转化率; 同一样品达到相同生烃转化率时, 50 °C/min 升温速率下的煤系烃源岩对应的温度明显高于 10 °C/min 升温速率对应的温度, 呈现出煤系烃源岩生烃过程的时温互补关系。

2.2 生烃动力学参数

油气的生成是烃源岩中有机质向烃类转换的过程, 即干酪根的热降解作用过程, 这是在地质时间尺度上发生的化学反应。在实验室高温、快速条件下

得到的该化学反应动力学参数(指前因子 A 和活化能 E) 可以认为与地质演化过程形似, 因而试验得到的动力学参数, 可以根据时间-温度补偿原理对具体盆地某一套烃源岩生烃演化历史进行模拟和重现。随温度的升高, 有机质中化学键按照活化能增大的次序相继发生断裂, 因此可以用活化能的分布来表示化学键断裂过程中产生的油气数量。

本次研究采用开放体系 Rock-Eval 测试平台对西湖凹陷平湖组煤系烃源岩干酪根进行热解分析, 利用 Kinetics2000 软件对热解数据进行动力学模拟计算, 得到动力学结果(指前因子 A 和活化能 E) 如图 2 所示。

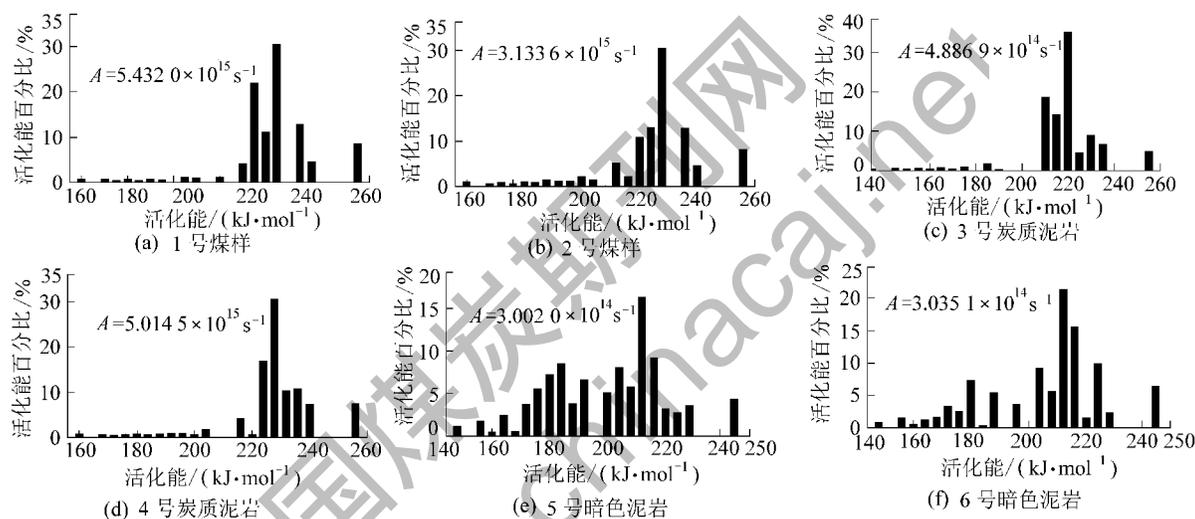


图 2 热模拟样品指前因子及活化能分布

总体上, 西湖凹陷新生代煤和炭质泥岩活化能分布范围较窄, 相对集中, 充分反映了一个快速生烃的过程; 暗色泥岩活化能分布范围比较大, 相对分散, 说明其生烃过程长于煤和炭质泥岩, 生烃持续时间长^[16], 也说明其干酪根母质的非均质性。以干酪根生烃转化率 10% ~ 90% 为干酪根的有效生烃区间, 暗色泥岩的生烃能量跨度也最大, 反映出暗色泥岩的生烃过程伴随着平湖组整个热演化过程。

3 煤系烃源岩生烃史模拟

结合 N 井和 T 井平湖组顶底界面地层受热史, 结合各样品生烃动力学参数, 依据时温互补原理, 模拟两井平湖组顶底界面煤生烃史, 如图 3 所示。平湖组顶底界面煤岩样品的生烃史实测及模拟结果分别如图 3a 和图 3b 所示。总的来说, 最大生烃量为 197 ~ 226 mg/g (TOC)。顶界面煤岩生烃转化率较低, 为 12% ~ 18%, 生烃量为 24 ~ 32 mg/g (TOC),

处于低成熟阶段, 生烃门限出现在 7 Ma 以后, 尚未进入大量生烃阶段, 具有较大生烃潜量, 为 165 ~ 173 mg/g (TOC)。底界面生烃转化率较高, 可达 60% ~ 88%, 生烃量为 136 ~ 199 mg/g (TOC), 大量生气主要出现在 10 Ma 以来^[17], 成熟度较高, 生烃潜量不大, 为 27 ~ 90 mg/g (TOC)。两口井顶界面煤岩样品生烃转化率相近, N 井略大; 但 T 井底界面生烃转化率较 N 井大, 已接近生烃极限。

平湖组顶底界面炭质泥岩样品的生烃史实测及模拟结果分别如图 3c 和图 3d 所示。炭质泥岩样品比煤岩样品生烃期略晚, 最大生烃量为 288 ~ 310 mg/g (TOC)。顶界炭质泥岩的生烃转化率为 18% ~ 20%, 生烃量为 46 ~ 58 mg/g (TOC), 生烃潜量为 230 ~ 242 mg/g (TOC), 与煤岩样品相比略高, 两口井样品生烃门限均在 7 Ma 以后。底界炭质泥岩进入大量生烃阶段, 生烃转化率达到 50% ~ 80%, 生烃量为 155 ~ 250 mg/g (TOC), 生

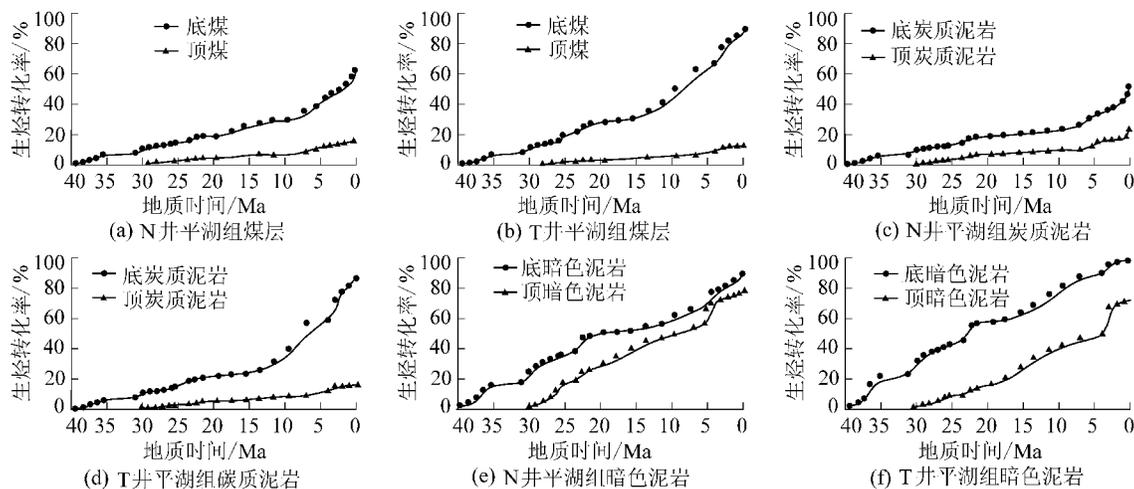


图3 西湖凹陷平湖组生烃史模拟结果

烃潜量为 62 ~ 155 mg/g(TOC)。

平湖组顶底界暗色泥岩样品的生烃史实测及模拟结果分别如图 3e 和图 3f 所示。与前 2 种样品模拟结果相比,暗色泥岩样品的生烃转化率与生烃量均大幅提高,进入生烃门限时间也较早。最大生烃量为 199 ~ 210 mg/g(TOC),平湖组顶界面暗色泥岩的生烃转化率达 70%,生烃量为 139 ~ 151 mg/g(TOC),生烃潜量为 48 ~ 60 mg/g(TOC)。平湖组底界暗色泥岩生烃转化率达到 90% 以上,已接近生烃极限,生烃量为 180 ~ 190 mg/g(TOC),生烃潜量为 10 ~ 20 mg/g(TOC)。与前 2 种岩性样品相比,暗色泥岩样品最大的区别在于没有明显的生烃期,生烃转化率呈线性增加。

经 N 井与 T 井相比,取自 T 井的样品生烃转化率较大,进入生烃门限的时间较早,生烃量较大。两口井底部样品生烃转化率相差较大,T 井的样品明显高于 N 井样品,但顶部样品转化率相当。造成此现象的原因主要是 2 口井分布位置相差较远,热演化作用也不尽一致^[18-19]。

生烃过程与煤系烃源岩活化能分布规律一致,暗色泥岩最易生烃,而煤和炭质泥岩生烃过程生烃转化率变化最明显。

西湖凹陷新生代煤系烃源岩热演化史从时间和温度上反映了其埋藏-受热过程,并对煤系烃源岩生烃作用有决定性的控制作用。同一生烃阶段,煤系烃源岩生烃转化率随着热演化程度呈现明显的线性关系;后一阶段煤系烃源岩生烃转化率起点明显高于前一热演化阶段结束时的煤系烃源岩转化率,说明煤系烃源岩在热演化过程中有明显的二次生烃现象^[20-23]。

综合各生烃期与生烃史分析西湖凹陷新生代煤系烃源岩油气特点:平湖组顶界煤系烃源岩煤和暗色泥岩生烃产率低,产率变化小,两产烃阶段中产率增幅相当;暗色泥岩第 1 生烃阶段产烃率涨幅约 20%,第 2 产烃阶段涨幅约 5%,表明平湖组顶煤系烃源岩生成的油气中以凝析油和重质油为主,成熟中质油较少。

平湖组底界煤系烃源岩第 1 生烃阶段产率涨幅约 5%,第 2 产烃阶段转化率涨幅约 15%,第 3 生烃阶段产烃转化率涨幅约 10%,表明平湖组底煤系烃源岩生成的油气中以中质油为主,其次为轻质油、湿气,而凝析油和低熟油成分最少。

4 结 论

通过烃源岩热模拟试验,对西湖凹陷新生代平湖组煤系烃源岩生烃转化率及活化能参数进行确定,运用这些参数并结合研究区地质条件对西湖凹陷新生代煤系烃源岩成烃动力学特征进行了研究,恢复了其生烃史,对生烃演化规律进行了分析,取得以下研究成果:

- 1) 煤和炭质泥岩样品的活化能分布较集中,暗色泥岩活化能分布较分散,较易生烃。
- 2) 暗色泥岩进入生烃期距今已 37 Ma,转化率呈线性增加;煤和炭质泥岩在距今 30 Ma 开始进入生烃期,10 Ma 以后开始进入大量生烃阶段,生烃过程中生烃转化率变化明显,与活化能分布规律相一致。
- 3) 西湖凹陷煤系烃源岩生烃过程中存在明显的二次生烃作用。总之西湖凹陷新生代煤系烃源岩具有较强的生烃的潜力,但是否能够形成一定规模

的油气田,受到储层特征及成藏作用的影响,需进一步研究。

参考文献:

- [1] Ungerer P, Pelet R. Extrapolation of the kinetics of oil and gas formation from laboratory experiments to sedimentary basins[J]. *Nature*, 1987, 327:52-54.
- [2] Ungerer P. State of the art of research in kinetics modeling of oil formation and expulsion[J]. *Org Geochem*, 1990, 16(1/3):1-25.
- [3] Behar F, Kressmann S, Vandenbroucke M, et al. Experimental simulation in a confined systems and kinetic modeling of kerogen and oil cracking[J]. *Org Geochem*, 1991, 19:173-189.
- [4] 李贤庆,肖贤明,米敬奎,等. 应用生烃动力学方法研究库车拗陷烃源岩生烃史[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(5):29-33.
- [5] 熊斌辉,王春红,张锦伟,等. 西湖凹陷古近系平湖组煤层分布及油气意义[J]. *海洋石油*, 2007, 27(3):27-33.
- [6] 陆俊泽,叶加仁,黄胜兵,等. 西湖凹陷平北地区烃源岩特征及生排烃史[J]. *海洋石油*, 2009, 29(4):38-43.
- [7] 王东良,李欣,李书琴,等. 未成熟-低成熟煤系烃源岩生烃潜力的评价:以塔东北地区为例[J]. *中国矿业大学学报:自然科学版*, 2001, 30(1):317-322.
- [8] 周洁. 东海盆地西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩地球化学特征[D]. 杭州:浙江大学, 2012:32-33.
- [9] 魏恒飞,陈践发,陈晓东,等. 西湖凹陷平湖组滨海型煤系烃源岩发育环境及其控制因素[J]. *中国地质*, 2013, 40(2):487-497.
- [10] 李上卿,李纯洁. 东海西湖凹陷油气资源分布及勘探潜力分析[J]. *石油试验地质*, 2003, 25(6):721-728.
- [11] 卢双舫,王民,王跃文,等. 密闭体系与开放体系模拟试验结果的比较研究及其意义[J]. *沉积学报*, 2006, 24(2):282-288.
- [12] 李婷婷,王民,卢双舫,等. 开放体系和密闭体系恒速升温试验条件下有机质生烃动力学特征对比及意义[J]. *吉林大学学报*, 2011, 41(4):1040-1047.
- [13] 成海燕,李安龙,龚建明. 陆相烃源岩评价参数浅析[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(2):6-10.
- [14] 江林香,王庆涛,卢鸿,等. 开放体系下平凉组页岩干酪根的生烃动力学研究[J]. *地球化学*, 2012, 41(2):139-146.
- [15] 王民,卢双舫,董奇,等. 有机质生烃动力学模型对比[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2011, 35(3):12-18.
- [16] 段毅,吴保祥,郑朝阳,等. 山西沁水盆地煤生烃动力学研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(7):1405-1411.
- [17] 陈琳琳,向昱. 西湖凹陷油气成藏史分析[J]. *海洋石油*, 2009, 29(3):1-6.
- [18] 叶加仁,顾惠容,贾健宜. 东海陆架盆地西湖凹陷油气成藏动力学[J]. *天然气工业*, 2005, 25(12):5-8.
- [19] 全志刚,贺清,何仕斌,等. 东海西湖凹陷地温场及其对烃源岩的作用[J]. *石油试验地质*, 2009, 31(5):466-471.
- [20] 熊永强,耿安松,王云鹏,等. 干酪根二次生烃动力学模拟试验研究[J]. *中国科学*, 2001, 31(4):315-320.
- [21] 张有生,秦勇,刘焕杰,等. 沉积有机质二次生烃热模拟试验研究[J]. *地球化学*, 2002, 31(3):273-282.
- [22] 朱炎铭,秦勇,范炳恒,等. 武清凹陷石炭-二叠系烃源岩的二次生烃评价[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(1):77-84.
- [23] 朱炎铭,张有生,范炳恒,等. 黄骅拗陷古1井古生界烃源岩的二次生烃演化[J]. *地质学报*, 2001, 75(3):426-431.
- [24] 傅宁,李友川,陈桂华,等. 东海平湖油气田油藏地球化学研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(4):240-244.
- [11] 柯春培,严家平,徐胜平,等. 祁南煤矿小型断裂构造复杂程度与褶皱变形研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(5):113-116.
- [12] 伍永平,于水,高喜才,等. 综放工作面导水裂隙带高度研究[J]. *煤炭工程*, 2012(10):59-61.
- [13] 王忠昶,赵德深,夏洪春,等. 水库下厚煤层综放开采的透水危险性的地质分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S1):370-376.
- [14] 杜学胜,张袁娟. 断层倾角对底板突水影响的数值模拟[J]. *中国煤炭*, 2013, 39(8):44-47.
- [15] 李俊,杨蕊,周汝良. 大尺度小样本情况下的数据预测方法对比研究[J]. *林业调查规划*, 2010, 35(5):7-11.
- [16] Sajil Kumar P J, Davis Delson P, Vernon J G, et al. A linear regression model (LRM) for groundwater chemistry in and around the Vaniyambadi industrial area, Tamil Nadu, India[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2013(1):19-26.
- [17] 刘琼峰,李明德,段建南,等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3):225-234, 300.
- [18] 秦铁山,王亚东,王春梅. 统计学[M]. 沈阳:辽宁大学出版社, 2007:125-136.

(上接第124页)

- [3] 陈佩佩,刘秀娥. 矿井顶板突水预警系统研究与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(12):93-96.
- [4] 路军,许家林,王露,等. 断层采动活化对导水裂隙带高度影响的模拟实验研究[J]. *中国煤炭*, 2012, 38(1):36-40.
- [5] 冯士安,肖建辉,葛英豪. 基于分形理论的许疃矿煤层顶板结构类型划分[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(9):107-109.
- [6] 李建林,张洪云,冯有利,等. 煤矿断层构造复杂程度的非线性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(4):69-73.
- [7] 林道云. 基于 Matlab 的断面分维求算方法研究[J]. *煤炭技术*, 2009, 28(12):149-152.
- [8] Cai Jiang-dong, You Qing. Fractal Theory and Its Application in Studying the Feature of Landforms[A]//Proceedings of 2010 International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications (IWCFTA 2010). Kunming, China: IEEE Computer and Society, 2010:440-444.
- [9] 颜恭彬. 基于 AutoCAD 的断裂构造分维值自动化统计研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(6):89-91, 95.
- [10] 李佩,杨秀春,王琳琳,等. 临汾区块煤储层裂隙发育评价方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(S1):244-248.