

烃气在泥岩和砂岩中的 微渗漏特征及油气勘探意义

黄臣军, 王国建, 卢丽, 杨帆, 高俊阳

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要:利用2个小型的烃气微渗漏实验装置,模拟了泥岩和砂岩中烃气微渗漏的变化规律,研究发现测点的烃组分含量达到平衡后则相对稳定,且平衡后的各组分占总烃含量的百分比不受测点烃组分及总烃含量大小的影响,而与测点至烃源的距离有关。这一特征在油气勘探上具有2点启示:一是通过实验模拟或实地测量烃组分的平衡时间,可以计算烃气的微渗漏速率,进而可以根据烃气的微渗漏模式来估算油气藏的散失量;二是通过井中化探或气测录井研究烃组分占总烃含量的百分比在垂向地层中的变化规律,可以预测油气藏的深度。

关键词:烃类微渗漏;烃组分分异;平衡时间;油气藏散失量;油气藏深度;实验模拟

中图分类号:TE132.4

文献标识码:A

Micro-seepage of hydrocarbon gas in mudstone and sandstone and its significance for oil and gas exploration

Huang Chenjun, Wang Guojian, Lu Li, Yang Fan, Gao Junyang

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Two mini apparatus were initially made and employed for the experimental simulation of hydrocarbon gas micro-seepage through mudstone and sandstone separately. It was found out that the ratio of hydrocarbon gas components would maintain stable if they had reached the balance state in a certain sampling point and the balanced componential percentage in the total hydrocarbon was in positive correlation with the distance between sampling point and hydrocarbon resource. These characters of hydrocarbon micro-seepage have two pieces of significance: On one hand, the balance time could be calculated through experimental research or field measurement. According to the balance time, the micro-seepage velocity of hydrocarbon gas could be accounted, as well as the micro-seepage amount of hydrocarbon gas from a reservoir further according to micro-seepage model. On the other hand, through the study of the characteristics of the vertical curve of hydrocarbon componential percentage in total hydrocarbon tested from core geochemical exploration or hydrocarbon gas logging, the depth of a potential reservoir is likely to be predicted.

Key words: hydrocarbon micro-seepage; hydrocarbon componential differentiation; balance time; micro-seepage amount; reservoir depth; experimental simulation

油气藏中的烃类在各种驱动力的作用下,可以穿透上覆岩层缓慢地、持续地向地表发生微渗漏并可被现代分析仪器所检测,这是油气地球化学勘探的理论基础^[1-5]。前人在烃气微渗漏机制方面已做过很多研究^[2-3,6-8],但绝大多数是在理论上的计算或数值模拟。关于油气运移物理模拟的研究比较少见,为数不多的物理模拟主要集中于油气在成藏之前的初次运移与二次运移方面^[9-13];也有少量

关于烃类微渗漏物理实验模拟的研究^[3,5,14]。本文研制了2个小型烃气微渗漏装置,模拟烃气在泥岩和砂岩中的微渗漏特征,以期能为计算油气藏散失量及预测油气藏深度提供依据。

1 烃气微渗漏模拟装置与实验程序

1.1 烃气微渗漏模拟装置

烃气微渗漏的简化地质模型^[3,5]包括油气藏、



图1 烃类微渗漏实验模拟用的小型装置

Fig. 1 Mini apparatus for hydrocarbon micro-seepage simulation

直接盖层和上覆盖层。在本次实验模拟中,将直接盖层和上覆盖层进一步简化成同一种岩性,即泥岩或砂岩。实验装置采用全密封设计,主要由上部空腔圆柱体、下部储气腔(两者之间由微孔砂芯片隔离)、侧壁取气口和顶部取气口组成(图1)。在2个模拟装置的上部空腔圆柱体内分别灌注混凝土和石英砂,用以模拟泥岩和砂岩;底部储气腔内注入一定量的标准气,用以模拟油气藏。

1.2 烃气微渗漏实验程序

实验可分为4个程序:1)将2个模拟装置分别命名为“水泥柱”和“石英砂柱”。每个装置侧壁上设计有4个取气口(图1),分别编号为1,2,3,4,水泥柱1号取气口命名为“水泥柱1”,石英砂柱1号取气口命名为“石英砂柱1”,其他类同。2个装置的顶部取气口分别命名为“水泥柱顶”和“石英砂柱顶”,储气腔底部的取气口分别命名为“水泥柱底”和“石英砂柱底”。2个装置的1号取气口使用微孔砂芯将取气腔与圆柱体内环境隔离,2,3,4号取气口使用半透膜隔离,顶部取气口与圆柱体内环境直接接触。其中4号取气口内接阀芯,使内端口伸入至圆柱体内腔的中轴线位置。2)进行柱体灌注。向水泥柱上部空腔灌注混凝土,使用的水泥和石英砂的配比为2:1(体积),石英砂按粗(8~16目)、中(16~32目)、细(70~120目)等比例混合;向石英砂柱上部空腔灌注饱和水的细石英砂(70~120目)。3)通入标准气。待灌注的柱体固结(水泥柱)或压实(石英砂柱)后,首先向装置下部的储气腔注满纯净水,然后用排水法向储气腔内注入一定量的标准气(标准气的烃组分含量(摩尔分数/ 10^{-6}): CH_4 为359, C_2H_6 为193, C_2H_4 为83, C_3H_8 为123, C_3H_6 为64, $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ 为71, $n\text{C}_4\text{H}_{10}$ 为95, $i\text{C}_5\text{H}_{12}$ 为53, $n\text{C}_5\text{H}_{12}$ 为73),气体压力为0.1 MPa。4)取样测试。通气前首

先对模拟泥岩和砂岩进行烃组分背景浓度测试,之后每周定期取样测试一次。测试仪器为Agilent 6890N GC系统。

2 烃气微渗漏模拟结果

2.1 烃气微渗漏模拟装置的性能分析

水泥柱中第4次测试的各测点的烃组分含量(图2a)大小关系是:水泥柱底(储气腔) $>$ 水泥柱2(半透膜) \approx 水泥柱3(半透膜) \approx 水泥柱4(半透膜) $>$ 水泥柱柱顶(直接接触),水泥柱1(砂芯)除甲烷外,其他组分接近空白。石英砂柱中第4次测试的各测点的烃组分含量(图2b)大小关系是:石英砂柱底(储气腔) $>$ 石英砂柱1(砂芯) $>$ 石英砂柱3(半透膜) \approx 石英砂柱4(半透膜) $>$ 石英砂柱顶(直接接触),石英砂柱2(半透膜)为空白。

综合水泥柱和石英砂柱的测试结果,水泥柱1和石英砂柱2测点的烃组分接近空白值,说明这2个取气口发生故障,样品测试值无效。2个模拟柱的其他测点的烃组分含量变化规律相似,大小顺序为:储气腔 $>$ 砂芯测点 $>$ 半透膜测点(各半透膜测点的含量近似) $>$ 顶部测点(砂芯测点与半透膜测点位于同一高度,顶部测点离气源最远)。这说明各半透膜透气性相似,砂芯的透气性大于半透膜;测点离气源越远,烃组分含量越小。可见,除了水泥

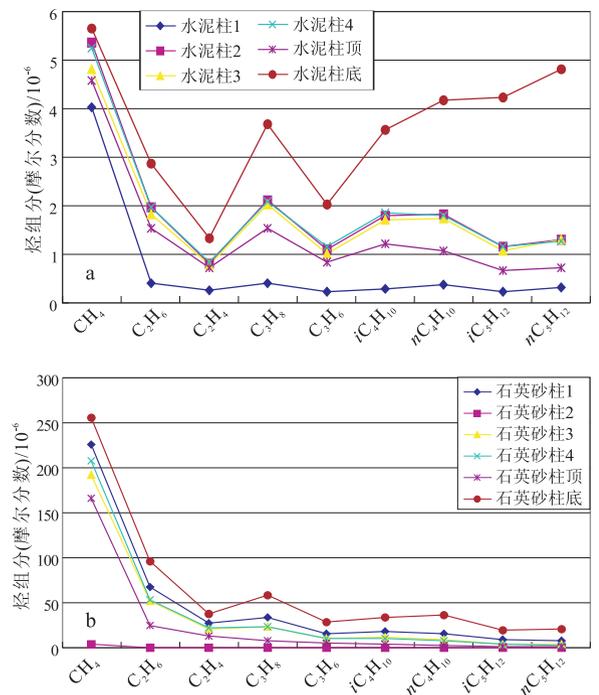


图2 水泥柱和石英砂柱中各测点烃组分含量曲线(第4次测试)

Fig. 2 Hydrocarbon componential content of sampling points in simulated mudstone and sandstone (4th testing)

柱1和石英砂柱2取气口发生故障外,其他取气口均正常工作。

2.2 模拟泥岩中的燃气微渗漏特征

固结后的模拟泥岩物性为:视密度为 2.08 g/cm³,孔隙度为 17.78%,渗透率为 0.016 6 mD,突破压力为 5.228 MPa,中值半径为 14.094 nm,优势孔隙范围为 10.2 ~ 25.0 nm,其物性相当于 IV-V 类泥岩^[15]。

水泥柱4号测点各烃组分占总烃含量的百分比随时间的变化(图3)可以看出,第1次测试中,CH₄、C₂H₆、C₂H₄ 占总烃的百分比均大于标准气对应组分的百分比,且前者与后者的差值随烃组分子半径增大而减小;C₃-C₅ 的百分比均小于标准气中对应组分的百分比,且前者与后者的差值随烃组分子半径增大而增大;在第2,3次测试中,CH₄ 百分比逐渐降低,C₂H₆ 和 C₂H₄ 百分比先升后降,C₃ 以上的百分比逐渐增大;第4次测试,CH₄ 百分比增大,C₂、C₃ 百分比继续降低,C₄ 以上烃组分百分比继续增大。从水泥柱4号测点各烃组分含量随时间的变化(图4)可以看出,随时间的迁移,燃气各组分含量逐渐降低,降低幅度大致随烃组分子半径增大而减小。水泥柱的其他几个正常测点的测试结果具有与4号测点类似的规律。

以上现象的原因是,燃气在水泥柱中向上运移,CH₄ 运移速率最大,随烃组分子半径的增大,运移速率逐渐减小。由于是一次性向储气腔中注入定量的标准气,即整个模拟系统中的燃气最大总量是一定的,随着燃气不断地被采样抽出,模拟系统中的燃气总量将越来越少。因此,运移速率越大的烃组分,每次采样被抽出的数量也越多,其含量降低的幅度也越大。从而造成了运移速率最大的烃组分占总烃含量的百分比逐渐降低,运移速率其次的先增大后降低,而运移速率较小的则逐渐增大。

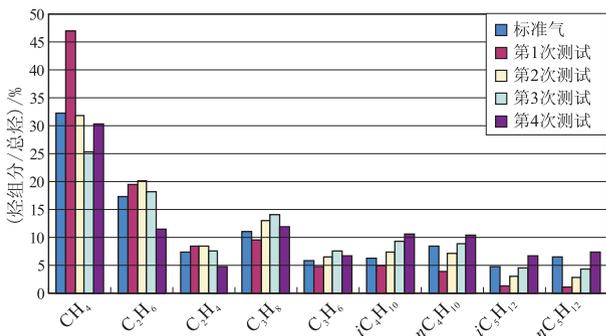


图3 水泥柱4号测点各烃组分占总烃含量随时间的变化
Fig.3 Hydrocarbon componential percentage in total hydrocarbon vs. time of sampling point no. 4 in simulated mudstone

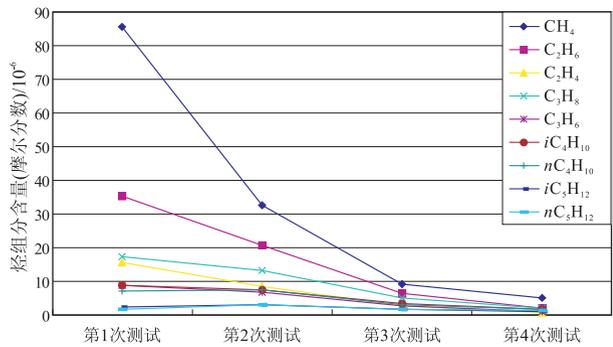


图4 水泥柱4号测点各烃组分含量随时间的变化

Fig.4 Hydrocarbon componential content vs. time of sampling point no. 4 in simulated mudstone

2.3 模拟砂岩中的燃气微渗漏特征

由于模拟砂岩是没有经过胶结的松散细粒石英砂,因此其孔渗性要比地层中的砂岩好得多。

从第4次测试的两测点之间对应烃组分含量的比值(图5)可以看出,石英砂柱4相对于石英砂柱底(情形一)、石英砂柱1相对于石英砂柱底(情形二)、石英砂柱4相对于石英砂柱1(情形三)的烃组分含量的比值具有随烃组分子半径增大而减小的趋势。因此,在以上3种情形中,前者与后者之间均存在一定的相对梯度,且不同组分的相对梯度亦不同,具有随烃组分子半径增大而变大的趋势。

根据情形一和情形二,石英砂柱中的上部测点相对于底部测点(相当于烃源)均存在一定的相对梯度,且随着烃组分子半径的增大,相对梯度变大。这说明燃气向上运移要受到孔隙介质(模拟砂岩)的渗滤作用,且随着烃组分子半径的增大,其运移阻力增强,从而造成了图5所示的烃组分含量的比值随分子半径增大而减小的现象。另外,在情形三中,砂柱4与内环境的接触口位于圆柱体的中轴线位置,砂柱1与内环境的接触口位于侧壁,2个测点处于同一高度;不同的是,砂柱4与内环境之间由半透膜隔离,而砂柱1与内环境之间由砂芯隔离,由于砂芯的孔渗性极好,可以看作是与内环境自由连通的。从情形三(图5)可以看出,石英砂柱4与1之间也具有一定的相对梯度,这说明半透膜对燃气也具有一定的渗滤作用。

由于石英砂柱1与内环境之间是由砂芯隔离的,可以看作是与内环境自由连通的,因此该测点的数据最能反映测点处的微渗漏情况。由图6可见,一方面,石英砂柱中CH₄ 占总烃含量百分比大于标准气中CH₄ 的百分比,C₂-C₅ 各组分百分比均小于标准气,且随碳原子数增加,这种差异逐渐

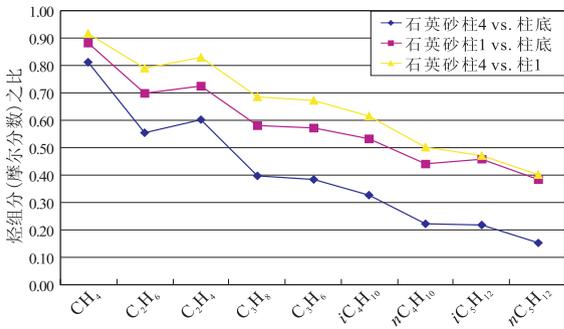


图5 石英砂柱中两测点之间对应烃组分含量的比值(第4次测试)

Fig.5 Ratio of hydrocarbon componential content between 2 sampling points in simulated sandstone (4th testing)

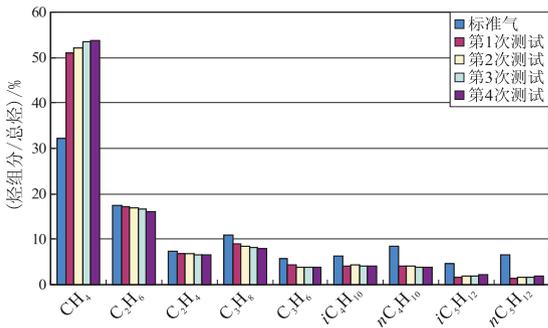


图6 石英砂柱1号测点烃组分占总烃含量百分比随时间的变化

Fig.6 Hydrocarbon componential percentage in total hydrocarbon vs. time of sampling point no. 1 in simulated sandstone

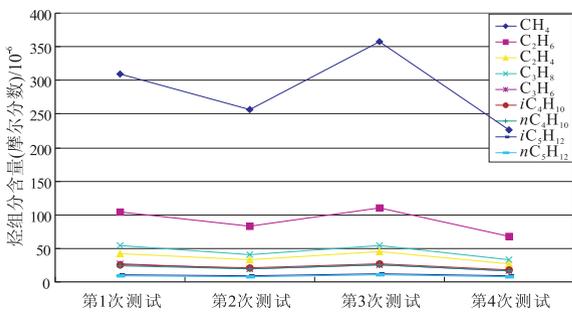


图7 石英砂柱1号测点烃组分含量随时间的变化

Fig.7 Hydrocarbon componential content vs. time of sampling point no. 1 in simulated sandstone

增大;另一方面,随着时间的变化,各烃组分占总烃含量的百分比几乎不变。图7表示的是石英砂柱1号测点烃组分含量随时间的变化,可以看出,烃组分含量总体呈变小趋势。因此,上述的石英砂柱中1号测点烃气微渗漏总的特征是:测点的烃组分含量随时间的迁移具有一定的波动性,总体呈变小趋势,而各烃组分占总烃含量的百分比几乎不随时间发生变化。这说明测点烃组分占总烃含量的百分比与烃组分及总烃含量大小无关。

对比模拟砂岩和泥岩中的烃气微渗漏特征,两者之间的区别在于:前者的烃组分占总烃含量的百分比随时间迁移几乎不发生变化;而后者出现运移速率最大的烃组分占总烃含量的百分比逐渐降低、运移速率其次的先增大后降低、运移速率最小的则逐渐增大的规律。究其原因是模拟砂岩的孔渗性远比模拟泥岩的好,烃气在砂岩中运移速度快,烃组分平衡时间短,在两次取样间隔时间内,各烃组分都已达到平衡状态,虽然每次取样会减少模拟系统内的总烃含量,但各烃组分均是按平衡状态的烃组分比例同步减少,因此,模拟系统内部残余烃气的烃组分百分比几乎保持不变。而烃组分在模拟泥岩中运移速度慢,平衡时间长,在取样的间隔时间内,烃组分没有达到平衡状态。

3 结论与启示

1) 孔隙性介质(如岩石)对烃类运移具有渗滤作用,烃组分子半径越大,其所受到的运移阻力也越大。这导致烃类通过上覆岩层发生垂向微渗漏时会出现分异效应,即距烃源越远,重烃组分含量越少,而轻烃组分含量相对增大。因此,烃类微渗漏会在垂向地层中形成特定的烃组分变化规律。

2) 烃组分含量达到平衡状态需要一定的平衡时间,这个平衡时间可以通过实验模拟或现场测量来获得。根据烃气微渗漏的平衡时间,可以计算烃气在岩层中的微渗漏速率,进而可以根据油气藏的微渗漏模式来计算油气藏散失量。

3) 根据平衡状态的烃组分占总烃含量的百分比不受测点烃组分及总烃含量大小的影响,而与测点至烃源的距离有关的特点,研究井中化探或气测录井的烃组分百分比在垂向上的变化规律,可以为油气藏深度预测提供依据。

致谢:陈伟钧为本文模拟装置的设计提供了技术支持,汤玉平、徐文明、吴传芝等人为本文的修改提供了宝贵意见,在此一并感谢!

参考文献:

[1] 汤玉平,王国建,程同锦. 烃气垂向微渗漏理论研究现状及发展趋势[J]. 物探与化探,2008,32(5):465-469.
 [2] 汤玉平,刘运黎. 烃气垂向微迁移的地球化学效应及其机理讨论[J]. 石油实验地质,2002,24(5):431-436.
 [3] 程同锦,王国建,范明,等. 油气藏烃气垂向微渗漏的实验模拟[J]. 石油实验地质,2009,31(5):522-527.
 [4] 王国建,唐俊红,范明,等. 油气微渗漏中的随水迁移机制[J]. 物探与化探,2010,34(3):294-297.

in coal petrology and oil exploration[J]. *Journal of Microscopy*, 1977, 109(1):49-73.

[6] Teichmüller M. Organic petrology of source rocks, history and state of the art[J]. *Oreg Geochem*, 1986, 10:581-599.

[7] Alpern B. The petrology of kerogen[M]//Durand B. Kerogen: insoluble organic matter from sedimentary rocks. Paris: Editions Technip, 1980:284-321.

[8] Robert P. Classification of organic matter by means of fluorescence; application to hydrocarbon source rocks[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1981, 1(2):101-137

[9] Burgess J D. Microscopic examination of kerogen (dispersed organic matter) in petroleum exploration[M]// Dutcher R R. Carbonaceous materials as indicators of metamorphism, 1974:19-29.

[10] Senftle J T, Brown J H, Larter S R. Organic matter fluorescence application to petroleum source rock evaluation[C]//Paper and Abstract Presented at Society of Organic Petrology Meeting, Virginia, 1984:17-23.

[11] 肖贤明. 有机岩石学及其在油气评价中的应用[J]. *地球科学进展*, 1992, 7(2):39-44.

[12] 熊波, 李贤庆, 马安来, 等. 全岩显微组分定量统计及其在烃源岩评价中的应用[J]. *江汉石油学院学报*, 2001, 23(3):16-20.

[13] Goodarzi F, Nassichuk W W, Snowdon L R. Organic petrology and Rock-Eval analysis of the Lower Carboniferous Emma Fiord Formation in Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1987, 4(2):132-134.

[14] Fowler M G, Gentzis T, Goodarzi F, et al. The petroleum potential of some Tertiary lignites from northern Greece as determined using pyrolysis and organic petrological techniques[J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17(6):805-826.

[15] Demchuk T, Cameron A R, Hills L V. Organic petrology of an early Paleocene coal zone, Wabamun, Alberta; palynology, petrography and geochemistry[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(2):135-148.

[16] Wu Chaodong, Chen Qiyang, Lei Jiajin. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the upper Sinian to the lower Cambrian, southwest of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 3:588-612.

[17] Obaje N G, Wehner H, Scheeder G, et al. Hydrocarbon prospectivity of Nigeria's inland basins: From the viewpoint of organic geochemistry and organic petrology[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(3):325-353.

[18] 国家石油和化学工业局. SY/T 6414-1999 全岩光片显微组分测定方法 中华人民共和国石油天然气行业标准[S]. 1999:1-4.

[19] 黄擎宇, 王淑芝. 全岩显微组分统计方法及应用[J]. *大庆高等专科学校学报*, 2004, 24(4):87-89.

(编辑 徐文明)

(上接第 448 页)

[5] Wang Guojian, Cheng Tongjin, Fan Ming, et al. Laboratory simulation of vertical hydrocarbon microseepage[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011(1):223-232.

[6] MacElvain R. Mechanics of gaseous ascension through a sedimentary column[M]// Heroy W. Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas. Dallas: Dallas Southern Methodist University Press, 1969.

[7] Brown A. Evaluation of possible gas micro-seepage mechanisms[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(11):1775.

[8] Klusman R W, Saeed M A. Comparison of light hydrocarbon micro-seepage mechanisms [M]//Schumacher D, Abrams M. Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66. Tulsa: AAPG Press, 1996:157-168, 203-221.

[9] 许怀先, 陈丽华, 万玉金, 等. 石油地质实验测试技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.

[10] 李明诚. 油气运移基础理论与油气勘探[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004(4):379-383.

[11] 马中良, 曾濞辉, 郑伦举. 稳态充注下输导层交汇处油气运移路径的选择性[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(1):89-93.

[12] 王连捷, 王红才, 王薇, 等. 油田三维构造应力场、裂缝与油气运移[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(23):4052-4057.

[13] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音. 储层构造裂缝定量预测与油气渗流规律研究现状和进展[J]. *地球科学进展*, 2003(3):398-404.

[14] Trost P B. Surficial geochemical expression due to molecular hydrocarbon migration[C]//Near-surface expression of hydrocarbon migration. AAPG Hedberg Research Conference, 1994:24-28, 239-240.

[15] 游秀玲. 天然气盖层评价方法探讨[J]. *石油与天然气地质*, 1991, 12(3):261-275.

(编辑 徐文明)