

文章编号:1673-5005(2007)06-0018-05

# 塔里木盆地塔东2井寒武系稠油分子化石与油源分析

唐友军<sup>1,2,3</sup>, 王铁冠<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023; 3. 长江大学 地球化学系, 湖北 荆州 434023)

**摘要:**综合运用同位素质谱、色谱、色谱-质谱技术手段研究了塔东2井寒武系稠油分子化石特征。结果表明,塔东2井寒武系稠油具有高伽马蜡烷、高C<sub>28</sub>甾烷、低重排甾烷和高C<sub>27</sub>-三芳甾烷的特征,与寒武系-下奥陶统烃源岩的分子化石特征类似,说明塔东2井寒武系原油源自寒武系-下奥陶统烃源岩;塔东2井稠油中检出高丰度的稠环化合物(荧蒽、苝、苯并[a]蒽、屈、苯并荧蒽、苯并苝),全油的碳同位素值明显偏重,揭示了原油烃类经热蚀变发生稠化。

**关键词:**分子化石; 油-岩对比; 热蚀变; 稠油; 塔里木盆地

**中图分类号:**TE 122.113 **文献标识码:**A

## Molecular fossils and oil-source rock correlations of Cambrian heavy oil in Tadong 2 well in Tarim Basin

TANG You-jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Tie-guan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Petroleum Accumulation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China;

3. Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China)

**Abstract:** The molecular fossils characteristics of Cambrian heavy oil in Tadong 2 well were studied by the synthetic methods such as carbon isotope, GC and GC-MS. The results show that the Cambrian heavy oil is noted for its abundance of gammacerane, C<sub>28</sub> sterane and C<sub>27</sub> triaromatic sterane and the indigence of dissterane, which are conformed with the molecular fossils characteristics of the Cambrian and lower Ordovician source rock. This shows that the Cambrian oil in Tadong 2 well has genetic relationship with the Cambrian and lower Ordovician source rock. Densification with hydrocarbon thermal alteration was indicated by the polycyclic aromatic hydrocarbon with high abundance: fluoranthene, Pyrene, Benzo [a] anthracene, Chrysene, Benzo Fluoranthene and Benzo pyrene, and the obvious more weighty carbon isotope detected in the heavy oil in Tadong 2 well.

**Key words:** molecular fossils; oil-source rock correlation; thermal alteration; heavy oil; Tarim basin

气相色谱和气相色谱-质谱分析技术的出现使人们能够从复杂混合物中分离和鉴别出单个化合物,分子地球化学得以迅速发展,并产生了分子化石(molecular fossil)或称生物标志化合物(biokarkers)的概念。分子化石作为一种独立的且与硬体化石相互补充的化学纪录保存于沉积岩石中,由于在成岩作用及后生作用过程中其碳骨架的稳定性和复杂的

“指纹”特征,它们被广泛用于石油地球化学研究,从这些指纹中获得的油-岩对比结果有助于人们了解原油的成因及从源岩到油藏的运移过程<sup>[1]</sup>。20世纪90年代先后在塔东地区钻探了塔东1井、群克1井和库南1井等,均未获得油气显示,对此的解释是源岩时代老、埋藏深、生排烃期早,现今有机质已达过成熟阶段,虽然有大型的构造圈闭存在,但海西

收稿日期:2007-05-12

基金项目:国家“973”重点基础研究发展规划项目(2006CB202303)

作者简介:唐友军(1975-),男(汉族),湖北荆州人,副教授,博士研究生,研究方向为石油地质。

期和印支期地层的抬升使得油气藏保留下来的机率大为降低<sup>[2,5]</sup>。然而,2001年钻探的塔东2井在寒武系顶部获得30L的稠油,该井的突破极大地提升了塔东地区油气的勘探价值。塔里木盆地是一个复杂的叠合盆地,具有烃源岩古老、多套烃源层复合、多期生烃过程、多期运移聚集的特点,对其油源的认识一直存有争议<sup>[1]</sup>。因此,对塔东2井寒武系稠油分子化石特征与油源的剖析,对认识塔里木盆地海相原油的成藏特征具有重要的实际意义<sup>[1,7]</sup>。

## 1 地质背景

塔东2井位于满加尔凹陷南缘的中央隆起带东段塔东低凸起的塔东2号构造(图1)。塔东低凸起构造高部位在泥盆纪至三叠纪持续隆升,泥盆系-三叠系均未沉积,虽奥陶系和志留系有沉积,但后期的构造运动使得志留系地层剥蚀殆尽,奥陶系也遭受强烈剥蚀<sup>[2,4,5]</sup>。烃源岩调查表明,塔东2井中、上奥陶统无高丰度的烃源岩发育,寒武系上部-奥陶统发育有高丰度的烃源岩,但各层段热演化程度高,仅上奥陶统的等效镜质体反射率就达2.05%~2.12%,处于过成熟阶段<sup>[2,4]</sup>。按Carol A Law对烃源岩类型划分方案,即划分为潜在的、有效的、残余有效的和枯竭的烃源岩,寒武系上部-下奥陶统烃源岩应属枯竭的烃源岩。



图1 塔东地区构造轮廓(据文献[2],有修改)

## 2 实验分析

将岩样粉碎后用氯仿抽提72h,原油/氯仿沥青“A”的沥青质用正己烷沉淀后,将其可溶物通过硅胶氧化铝层析柱,依次用正己烷和二氯甲烷冲洗,分离出饱和烃、芳香烃备用。

使用一台配置DB-5毛细柱和IAIS数据处理系统的菲尼根SSQ-710型四极杆分析系统,作饱和烃和芳香烃馏分的GC-MS分析。GC分析条件:采用

氮作载气,进样器与检测器温度300℃。饱和烃馏分升温程序:初始温度100℃,恒温1min后,以4℃/min升温速率升温到220℃,再以2℃/min升温速率升温到300℃,恒温5min。芳香烃馏分升温程序:初始温度80℃,恒温1min后,以3℃/min升温速率升温到300℃,恒温15min。MS分析条件:采用EI离子化模式,电子能量70eV,扫描范围为50~550amu。检测方式全离子扫描。依据与文献发表的标准谱图对比,鉴定化合物。

稳定碳同位素检测的分离仪器为iso-pach,检测仪器为Finnigan-MAT252型质谱仪。按《石油和沉积有机质的氢、碳同位素分析方法》(SY5239-1991)测 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

## 3 结果分析

### 3.1 原油宏观组成

与塔里木盆地其他海相原油比较,塔东2井稠油表现为“三高两低”,即高密度、高粘度、高非烃和沥青质含量,低总烃含量和低饱芳比,此外,还具中等含蜡量和较低含硫量。

塔东2井稠油及各馏分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-29.3‰~-27.4‰,全油的碳同位素值为-28.5‰,与马安来等报道的塔东2井稠油全油的碳同位素值为-28.2‰具有很好的重现性<sup>[4]</sup>,并且现有资料均表明塔东2井稠油全油的碳同位素值是塔里木盆地海相原油中最重的,塔里木盆地塔中、塔北、东河塘、英买力地区原油全油碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-34.4‰~-31.7‰,塔河油田原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-33.5‰~-31.5‰<sup>①</sup>。

原油基本上继承其生烃母质的稳定碳同位素组成特征,但是在烃源岩成熟生烃和油气运移过程中,还会发生碳同位素组成的分馏效应,通常成熟度对有机质碳同位素组成成分馏效应的影响有限,所引起的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围不超过2‰~3‰<sup>[9]</sup>。因此,一般碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差达到2‰~3‰以上的原油都是出自不同生源构成,或不同沉积环境烃源岩的油源贡献,而不会是同源的原油。因此,从塔东2井原油稳定碳同位素组成异常重的特征可知其与台盆区其他海相原油来源不同。

### 3.2 塔东2井稠油分子化石特征

#### 3.2.1 正构烷烃分布特征

塔东2井稠油饱和烃馏分气相色谱图呈单峰态

①王铁冠.塔里木盆地轮南-塔河油田油源研究进展与现状.石油大学(北京),2004.

分布,正烷烃系列的碳数分布范围为  $C_{12} \sim C_{30}$ ,主峰碳数为  $nC_{16}$ ,  $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$  为 1.44,  $w(\text{Pr})/w(nC_{17})$  和  $w(\text{Ph})/w(nC_{18})$  分别为 0.46, 0.43, 不具备奇偶优势或偶奇优势,展示出低等水生生物的生源优势与成熟-高成熟原油特征(图2)。

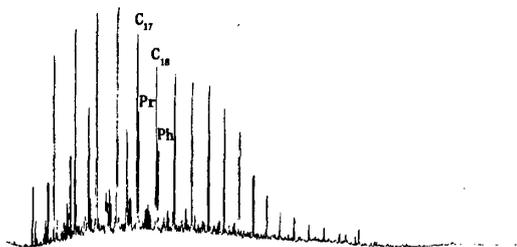


图2 塔东2井稠油饱和和烃气相色谱图

### 3.2.2 甾萜烷分布特征

甾萜烷和甾烷是沉积物中最普遍的分子化石。甾萜烷主要起源于原核生物(如细菌),甾烷起源于真核

生物(包括藻、植物和动物),具有很强的生源属性<sup>[1]</sup>。塔东2井稠油的三环萜烷含量较低,在  $C_{19} \sim C_{26}$  三环萜烷相对组成上以  $C_{23}$  为主,  $C_{24}$ -四环萜烷含量低,然而哈德2井、塔中111井原油的三环萜烷含量高,  $C_{23}$ -三环萜烷呈明显的主峰态优势,  $C_{24}$ -四环萜烷含量高。塔东2井稠油的伽马蜡烷含量高,而哈德2井、塔中111井原油中此化合物含量低,高含量的伽马蜡烷指示有机质沉积时的强还原超盐度条件(图3)。上述分布特征差异说明了塔2井原油与哈德2井、塔中111井原油不同源。

甾烷的分布差异也进一步佐证了上述认识。塔东2井稠油的  $C_{28}$ -规则甾烷含量高,但重排甾烷丰度低,而哈德2井、塔中111井原油却是  $C_{28}$ -规则甾烷含量低、重排甾烷丰度高。这与文献资料中报道的海相原油中  $C_{28}$ -规则甾烷相对含量随地质年代而增加相吻合<sup>[9]</sup>。塔东2井稠油中低的重排甾烷指示了贫粘土的碳酸盐岩的烃源贡献。

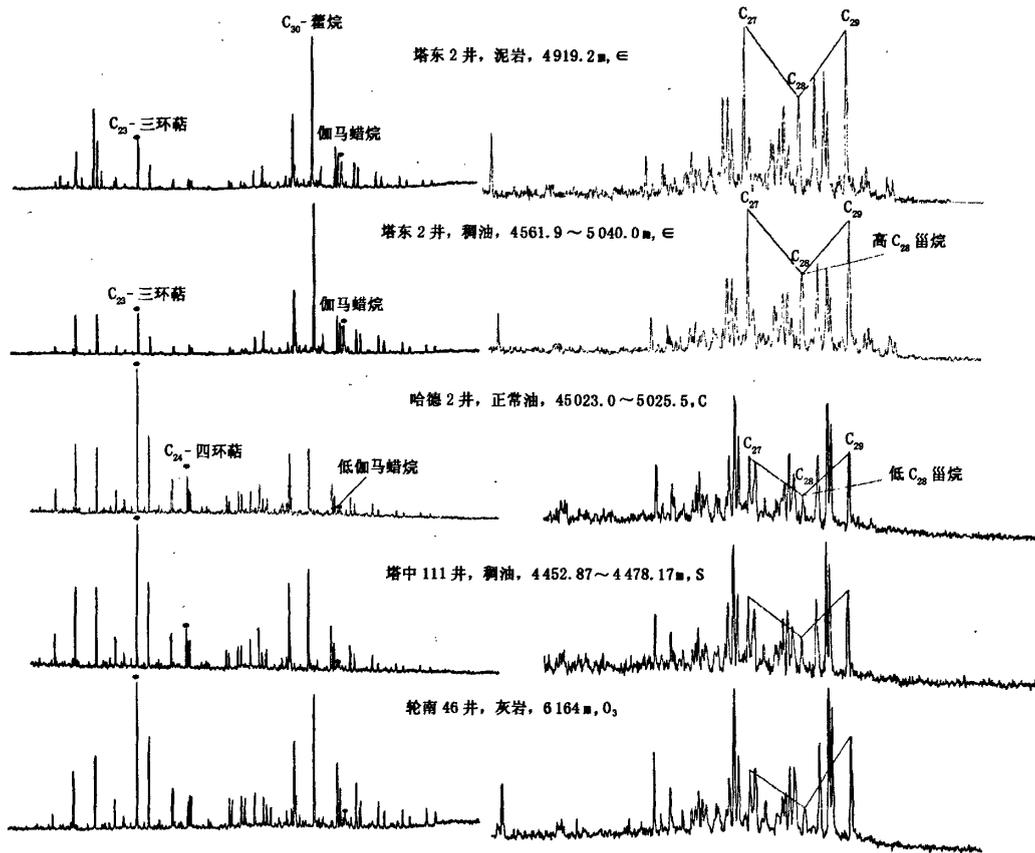


图3 不同井的油-岩甾萜烷对比

### 3.2.3 多环芳烃分布特征

与标准谱图对比,从塔东2井稠油的芳烃中检测到高含量的萘系列、菲系列、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、屈、苯并荧蒽、苯并芘等多环芳烃(图4),除萘系列、菲系列外,荧蒽、芘、苯并[a]蒽、屈、苯并荧蒽、苯并芘这些多环化合物多与燃烧及火山喷发有关,其形成可能是烃类经热蚀变作用发生稠化的结果<sup>[4]</sup>。重建的塔东2井埋藏-热演化史表明,由于巨厚的中、上奥陶统(5000 m)快速堆积,寒武系烃源岩在晚奥陶世快速经历了成熟、高成熟阶段,进入了过成熟阶段,在志留纪末—早泥盆世达到最大古地温,约210℃<sup>[2,4,5]</sup>,说明塔东2井原油在地质历史时期经历过局部高温,与塔东2井稠油中检测到高丰度的荧蒽、芘、苯并[a]蒽、屈、苯并荧蒽、苯并芘等稠环化合物相互印证。塔东2井原油稳定碳同位素组成异常偏重的特点也佐证上述认识,热蚀变造成烃类组分稠化的同时,也会造成烃类稳定碳同位素的变重<sup>[5]</sup>。

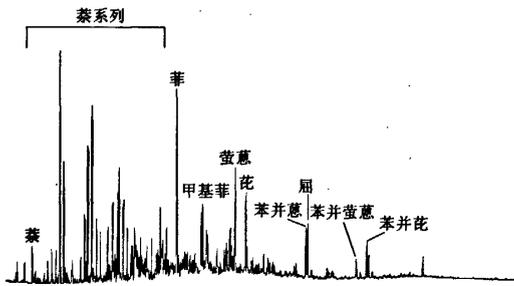


图4 塔东2井稠油多环芳烃分布

芳香甾烷是甾类化合物的芳构化产物。塔东2井稠油的三芳甾烷分布也与哈德2井、塔中111井原油不同,进一步说明了它们在来源上的差异。塔东2井稠油的C<sub>27</sub>-三芳甾烷含量高,而哈德2井、塔中111井原油C<sub>28</sub>-三芳甾烷含量高、C<sub>27</sub>-三芳甾烷含量低(图5)。

### 3.3 油-岩对比

塔里木盆地台盆区存在寒武系-下奥陶统和上奥陶统两套烃源岩,寒武系-下奥陶统烃源岩具有高伽马蜡烷、高C<sub>28</sub>规则甾烷及低重排甾烷等特征,上奥陶统烃源岩则具有与之相反的特征<sup>[1,3,5,9-10]</sup>,图3中例举的典型烃源岩特征也印证了上述认识。伽马蜡烷、C<sub>28</sub>规则甾烷及重排甾烷生源意义明确,可作为有效的油源对比参数<sup>[5,9-11]</sup>。从图3可以看出,塔东2井寒武系原油具高伽马蜡烷、高C<sub>28</sub>甾烷和低重排甾烷的特征,与寒武系-下奥陶统烃源岩的分子特

征类似,而与上奥陶统烃源岩分子特征不同,由此说明塔东2井寒武系原油源自寒武系-下奥陶统烃源岩。

三芳甾烷是甾烷芳构化的产物,具有甾烷碳骨架特征,来源于海相疑源类(未确定种属的光合浮游藻类),祖先是作为古生代海洋原始生产力的沟鞭藻,为高、过成熟区油源对比的有效指标<sup>[12]</sup>。三芳甾烷分布特征进一步确认了塔东2井稠油与寒武系-下奥陶统烃源岩的亲缘关系,塔东2井稠油与寒武系源岩均为C<sub>27</sub>-三芳甾烷含量高的特点,而上奥陶统烃源岩则C<sub>27</sub>-三芳甾烷含量低(图5)。

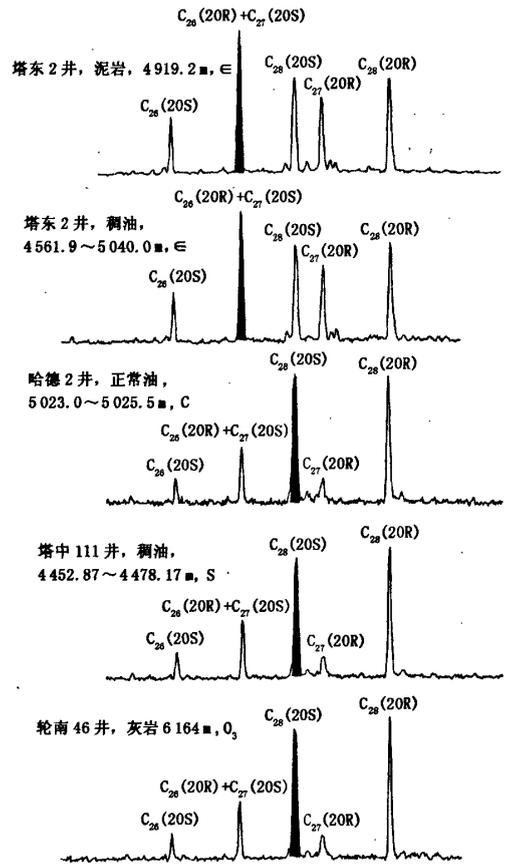


图5 不同井的油-岩三芳甾烷对比

## 4 结论

(1)塔东2井稠油检测到高丰度荧蒽、芘、苯并[a]蒽、屈、苯并荧蒽、苯并芘这些多环化合物,及塔东2井稠油的全油δ<sup>13</sup>C值为台盆区海相原油之重(δ<sup>13</sup>C为-28.5‰),揭示了原油烃类经热蚀变发生稠化。

(2)塔东2井稠油饱和烃色谱图呈单峰态分布,正烷烃系列完整,主峰碳数为nC<sub>16</sub>,w(Pr)/

$w(\text{Ph})$  为 1.44,  $w(\text{Pr})/w(n\text{C}_{17})$  和  $w(\text{Ph})/w(n\text{C}_{18})$  分别为 0.46 和 0.43, 不具备奇偶优势或偶奇优势, 展示出低等水生生物的生源优势与成熟-高成熟原油特征。

(3) 塔东 2 井寒武系稠油分子化石呈现高伽马蜡烷、高  $\text{C}_{28}$  甾烷、低重排甾烷和高  $\text{C}_{27}$ -三芳甾烷的特征, 与寒武系-下奥陶统烃源岩的分子化石特征类似, 说明塔东 2 井寒武系原油源自寒武系-下奥陶统烃源岩。

#### 参考文献:

- [1] 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 分子化石与塔里木盆地油源对比[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊): 16-23.  
ZHANG Shui-chang, LIANG Di-gang, LI Mao-wen, et al. Molecular fossils and oil-source rock correlations in Tarim Basin, NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(sup): 16-23.
- [2] 张水昌, 王招明, 王飞宇, 等. 塔里木盆地塔东 2 油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 25-31.  
ZHANG Shui-chang, WANG Zhao-ming, WANG Fei-yu, et al. Oil accumulation history in Tadong 2 oil reservoir in Tarim Basin, NW China—a case study of oil stability and cracking [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 25-31.
- [3] 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 270-340.
- [4] 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 塔里木盆地塔东 2 井稠油地球化学研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 59-62.  
MA An-lai, ZHANG Shui-chang, ZHANG Da-jiang, et al. Geochemistry of the heavy oils from Well TD2 in Tarim Basin, NW China [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 59-62.
- [5] 肖中尧, 黄光辉, 卢玉红, 等. 塔里木盆地塔东 2 井原油成因分析[J]. 沉积学报, 2004, 22(增刊): 66-72.  
XIAO Zhong-yao, HUANG Guang-hui, LU Yu-hong, et al. Origin of oils from Well Tadong 2 in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(sup): 66-72.
- [6] 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 轮南、塔河油田稠油油源对比[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 31-38.  
MA An-lai, ZHANG Shui-chang, ZHANG Da-jiang, et al. Oil and source correlation in Lunnan and Tahe heavy oil fields [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 31-38.
- [7] 孙玉善, 金英爱, 顾乔元, 等. 塔东 2 井古油藏成藏期分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 31-33.  
SUN Yu-shan, JIN Ying-ai, GU Qiao-yuan, et al. Timing of paleo-oil accumulation in Tadong 2 well, Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 31-33.
- [8] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534-547.  
LIANG Di-gang, ZHANG Shui-chang, ZHANG Bao-min, et al. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin [J]. Earth Science Frontier, 2000, 7(4): 534-547.
- [9] PETERS K E, MOLDOVAN M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1993.
- [10] 林青, 林壬子, 王培荣, 等. 塔中北斜坡西部原油类型及主力油源层[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 150-153.  
LIN Qing, LIN Ren-zi, WANG Pei-rong, et al. Crude types and main source rocks in west part of north slope, central Tarim [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 150-153.
- [11] 张立平, 黄第藩, 廖志勤. 伽马蜡烷-水体分层的地球化学标志[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 136-140.  
ZHANG Li-ping, HUANG Di-fan, LIAO Zhi-qin. Gam-macerane-geochemical indicator of water column stratification [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 136-140.
- [12] 梁狄刚, 陈建平. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 8-14.  
LIANG Di-gang, CHEN Jian-ping. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 8-14.

(编辑 刘为清)