

裂缝性页岩气藏考虑应力敏感的产量递减模型构建

蔡华¹, 付随艺², 程时清²

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030
2. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

摘要 页岩气藏广泛采用常规气藏产量递减模型进行动态分析,而页岩气在储层中的赋存方式具有一定的特殊性,主要以吸附态和游离态为主,所以常规气藏递减分析方法已不再适应。本文在传统裂缝-基质双重介质模型基础上,引入无因次应力敏感系数,定义两个无因次吸附参数——无因次 Langmuir 体积和无因次 Langmuir 压力,建立了考虑应力敏感和吸附效应影响的裂缝性页岩气藏产量递减数学模型。利用隐式差分法和牛顿迭代法,进行数值离散,获得产量的数值解,并绘制了 Blasingame 型产量递减曲线。分析表明,裂缝性页岩气藏应力敏感越大,无因次产量、产量积分及产量积分导数越小;页岩气基质吸附量越大,无因次产量递减积分导数曲线出现下凹的时间越晚;同时结合页岩气井生产数据,页岩气藏的吸附常数和其他地层参数,以及应力敏感效应引起的产量下降都可以通过典型曲线得到。

关键词 页岩气;产量递减;吸附效应;应力敏感;裂缝

中图分类号 TE353

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.008

Production Decline Mode for Fractured Shale Gas Reservoirs with Stress Sensitivity

CAI Hua¹, FU Suiyi², CHENG Shiqing²

1. Shanghai Branch of China National Offshore Oil Corp Limited, Shanghai 200030, China
2. Ministry of Education Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The production decline model for conventional gas reservoirs is widely used for dynamic analysis of shale gas reservoirs at home and abroad, but due to some special features of the occurrence of the shale gas involving mainly adsorption state and free state, the regressive analysis methods of conventional gas reservoirs are no longer valid. Based on the traditional dual-porosity model, a mathematical model with consideration of the stress sensitivity and the sorption effects is established by introducing the non-dimensional stress sensitive coefficient and defining two non-dimensional adsorption parameters—dimensionless Langmuir volume and dimensionless Langmuir pressure. The numerical solution of the production is obtained together with the production decline Blasingame type curves through the numerical difference and Newton iterative methods. It is shown that the higher the stress sensitivity, the smaller the non-dimensional production, the production integral and the production decline integral derivative will be. The larger the adsorption of the shale gas matrix, the more delayed the point will be where the non-dimensional production decline integral derivative curve becomes concave down. At the same time, with the help of the shale gas well production data, the shale gas reservoir adsorption constants, other formation parameters, and the stress sensitive effect caused by the decline in the production can be obtained by typical curves.

Keywords shale gas; production decline; sorption effects; stress sensitivity; fracture

0 引言

页岩气藏是典型的非常规气藏,孔隙致密,渗透率低,储

集方式和运移规律复杂^[1],主要以吸附态和游离态赋存在页岩储层中^[2]。在此类气藏开发过程中,储层岩石弹性变形,会

收稿日期:2013-05-08;修回日期:2013-08-09

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05009-005)

作者简介:蔡华,高级工程师,研究方向为油气田开发,电子信箱:fusuiyi@163.com

产生应力敏感现象,储层的应力敏感性会影响储层中流体的渗流能力,进而影响气井的产能^[3,4]。许多学者在应力敏感对油气井产能的影响方面进行了研究^[5-8],但主要是集中在常规油气藏上,对页岩气藏的研究较少。Blasingame 产量递减曲线图版^[9-12]是现代产量递减分析中最具有代表性的图版,克服了常规井解释方法的缺点,用该方法来分析页岩气藏的生产动态数据,确定地层参数,具有重要意义。目前,Blasingame 产量递减模型的研究主要集中在均质、双重介质和双渗油气藏^[12-14],但尚未见对考虑应力敏感和吸附效应裂缝性页岩气藏进行研究。

本文在传统裂缝-基质双重介质模型基础上,建立了考虑应力敏感和吸附效应影响的产量递减的数学模型,利用隐式差分法和牛顿迭代法进行了数值求解,绘制了 Blasingame 型产量递减曲线,并分析了应力敏感和吸附效应对气井产量递减规律的影响。

1 数学模型的建立

目前裂缝性页岩气模型主要采用双重介质模型,考虑围岩封闭气藏中一口页岩气井以定压生产,做出如下假设:

- (1) 地层岩石微可压缩,且压缩系数为常数;
- (2) 通过井筒的流动是经过裂缝的,基质作为源;
- (3) 气体渗流过程为等温;
- (4) 忽略重力和毛管力的影响;
- (5) 考虑岩石应力敏感、基质中吸附效应、表皮污染的影响。

1.1 吸附效应

目前主要运用 Langmuir 等温吸附原理来描述页岩气的吸附和解吸。在拟压力条件下,吸附方程可改变为

$$Q_E = \frac{V_L \varphi(p)}{\varphi(p_L) + \varphi(p)} \quad (1)$$

式中, Q_E 为吸附量, m^3/t ; V_L 为 Langmuir 体积 (吸附气的最大体积), m^3/t ; p 为地层压力, MPa; p_L 为 Langmuir 压力 (吸附量达到最大吸附量的 50% 时的压力), MPa; $\varphi(p_L)$ 为 Langmuir 拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$; $\varphi(p)$ 为拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$ 。

1.2 应力敏感

气藏应力敏感对渗透率的影响可以写为

$$k = k_i \exp[-\beta(\varphi(p_i) - \varphi(p))] \quad (2)$$

式中, k 为考虑应力敏感的地层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_i 为原始地层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; p_i 为原始地层压力, MPa; β 为应力敏感系数, $mPa \cdot s/MPa^2$; $\varphi(p_i)$ 为原始地层拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$; $\varphi(p)$ 为地层拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$ 。

孙贺东和同登科等^[15,16]进一步研究认为,随着裂缝和基质应力敏感程度的增加,裂缝的应力敏感性远远大于基质的应力敏感性,所以在裂缝性页岩气藏产能模型中只是考虑裂缝的压力敏感性。

1.3 数学模型的建立

基于以上假设条件,将基质吸附方程和裂缝应力敏感方

程引入到双重介质模型,应用质量守恒和达西定律得到页岩气流动方程为

$$\nabla \left(\frac{k_f}{\mu_g} \rho_g \nabla p_f \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \phi_f) + \frac{\alpha \varphi_{gm} k_m}{\mu_g} (p_f - p_m) \quad (3)$$

$$\frac{\alpha \varphi_{gm} k_m}{\mu_g} (p_f - p_m) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{gm} \phi_m + \rho_{gsc} V_{Em}) \quad (4)$$

其中,

$$Q_{Em} = \frac{V_{Lm} \varphi(p_m)}{\varphi(p_L) + \varphi(p_m)}$$

$$k_f = k_{fi} \exp[-\beta(\varphi(p_i) - \varphi(p_f))]$$

式中, μ_g 为气体黏度, $mPa \cdot s$; ρ_g 为裂缝气体密度, kg/m^3 ; ρ_{gm} 为基质气体密度, kg/m^3 ; ρ_{gsc} 为地面状态下的气体密度, kg/m^3 ; p_f 为裂缝压力, MPa; p_m 为基质压力, MPa; $\phi(p_f)$ 为裂缝拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$; $\varphi(p_m)$ 为基质拟压力, $MPa^2/(mPa \cdot s)$; ϕ_m 为基质孔隙度; ϕ_f 为裂缝孔隙度; k_{fi} 为考虑应力敏感的裂缝渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_{fi} 为原始裂缝渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_m 为基质渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; α 为基质岩块形状因子; Q_{Em} 为基质的吸附量, m^3/t ; V_{Lm} 为基质 Langmuir 吸附体积 (吸附气的最大体积), m^3/t ; t 为时间, h。

定义新的无因次常数:

无因次 Langmuir 体积

$$a = \frac{2\pi k_{fi} h_{fi} V_{Lm}}{q_{sc} \mu_g [\phi_f c_{if} + \phi_m c_{im}]}$$

无因次 Langmuir 拟压力

$$\varphi_{DL} = \frac{\pi k_{fi} h_{fi} T_{sc}}{q_{sc} p_s T} (\varphi(p_i) - \varphi(p_L))$$

将式(3)和(4)进行无因次化,得到

$$\frac{\partial^2 \varphi_{DL}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \left(\frac{\partial \varphi_{DL}}{\partial r_D} \right) - \beta_D \left(\frac{\partial \varphi_{DL}}{\partial r_D} \right)^2 = e^{-2S} \left(\omega \frac{\partial \varphi_{DL}}{\partial t_D} + (1-\omega) \frac{\partial \varphi_{Dm}}{\partial t_D} \right) e^{\beta_D \varphi_{DL}} \quad (5)$$

$$\left[(1-\omega) \frac{\partial \varphi_{Dm}}{\partial t_D} + a \frac{\varphi_{DL} - \varphi_{Dm}}{(2\varphi_{DL} - \varphi_{DL} - \varphi_{Dm})^2} \frac{\partial \varphi_{Dm}}{\partial t_D} \right] = \lambda (\varphi_{DL} - \varphi_{Dm}) \quad (6)$$

初始条件

$$\varphi_{Dm}(r_D, t_D=0) = \varphi_{DL}(r_D, t_D=0) = 0 \quad (7)$$

内边界条件

$$1 = [\varphi_{DL}]_{r_D=1} \quad (8)$$

外边界条件

$$\left. \frac{\partial \varphi_{DL}(r_D, t_D)}{\partial r_D} \right|_{r_D \rightarrow \infty} = 0 \quad (9)$$

无因次流量

$$q_D(t_D) = -e^{-\beta_D \varphi_{DL}} \left(\frac{\partial \varphi_{DL}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \quad (10)$$

其中, 窜流系数 $\lambda = \alpha r_w^2 \frac{k_m}{k_{fi}}$; 储容比 $\omega = \frac{\phi_f c_{if}}{\phi_f c_{if} + \phi_m c_{im}}$; 无因次半

径 $r_D = r/(r_w e^{-s})$; 无因次基质拟压力 $\varphi_{Dm} = \frac{\pi k_{fi} h_{fi} T_{sc}}{q_{sc} p_s T} \Delta \varphi(p_m)$; 无

因次裂缝拟压力 $\varphi_{DL} = \frac{\pi k_{fi} h_{fi} T_{sc}}{q_{sc} p_s T} \Delta \varphi(p_f)$; 无因次原始拟压力

$\varphi_{D0} = \frac{\pi k_{fi} h_{fi} T_{sc}}{q_s p_{sc} T} \varphi(p_i)$; 无因次时间 $t_{D0} = \frac{k_{fi}}{(\phi_m c_{lm} \mu_g + \phi_f c_{fv} \mu_g) r_w^2} t$; 无因次应力敏感系数 $\beta_D = \frac{q_s p_{sc} T \beta}{\pi k_{fi} h_{fi} T_{sc}}$; 式中: s 为表皮因子; c_m 为基质综合压缩系数, 1/MPa; c_f 为裂缝综合压缩系数, 1/MPa; p_{sc} 为标准状态压力, MPa; T_{sc} 为标准状态温度, K; T 为气藏温度, K; q_s 为地面产气量, m³/d; h_{fi} 为气藏厚度, m。

2 模型求解

式(5)~式(10)是关于无因次拟压力的强非线性偏微分方程, 目前无法求得解析解, 故采用数值解法。采用全隐式差分方法建立数值模型, 并应用牛顿-拉普森迭代对数学模型进行数值求解。

令 $x = r_{cd}/(n-1)$, 式中 $r_{cd} = r_w/(r_m e^{-x})$, r_e 为边界半径, m; r_m 为基质半径, m。整理得到牛顿迭代方程组:

$$f_i = \varphi_{Di}^{n+1} - 1$$

$$f_i = \varphi_{Di+1}^{n+1} - 2\varphi_{Di}^{n+1} + \varphi_{Di-1}^{n+1} - \beta_D \left(\frac{\varphi_{Di+1}^{n+1} - \varphi_{Di-1}^{n+1}}{2} \right)^2 - \left(\omega \frac{\varphi_{Di}^{n+1} - \varphi_{Di}^n}{\Delta t} + (1-\omega) \frac{\varphi_{Di}^{n+1} - \varphi_{Di}^n}{\Delta t} \right) e^{\beta_D \varphi_{Di}^{n+1}} e^{2(i-1)\Delta x} e^{-2i\Delta x^2} \quad i=2, \dots, n-1$$

$$f_n = \varphi_{Dn}^{n+1}(r_D, t_D) - \varphi_{D(n-1)}^{n+1}(r_D, t_D)$$

其中,

$$\varphi_{Di}^{n+1} = e^{\beta_D \varphi_{Di}^{n+1}} \left[(1-\omega) \frac{\varphi_{Di}^{n+1} - \varphi_{Di}^n}{\Delta t} + a \frac{\varphi_{D0} - \varphi_{DL}}{(2\varphi_{D0} - \varphi_{DL} - \varphi_{Di}^{n+1})^2} \cdot \frac{\varphi_{Di}^{n+1} - \varphi_{Di}^n}{\Delta t} \right] / \lambda + \varphi_{Di}^{n+1}$$

3 页岩气藏 Blasingame 型产量递减曲线及影响因素分析

通过数值差分 and 牛顿迭代方法获得无因次产量 q_D 随 t_D 变化的关系。在此基础上, 定义以下 4 个无因次变量。无因次递减时间:

$$t_{D1} = \frac{t_D}{0.5(r_{cd}^2 - 1)(\ln r_{cd} - 0.5)} \quad (11)$$

无因次递减产量:

$$q_{D1} = q_D (\ln r_{cd} - 0.5) \quad (12)$$

无因次递减产量积分:

$$q_{D1i} = \frac{\int_0^{t_{D1i}} q_{D1}(\tau) d\tau}{t_{D1i}} \quad (13)$$

无因次递减产量积分导数:

$$q'_{D1i} = \frac{dq_{D1i}}{d \ln t_{D1i}} \quad (14)$$

3.1 吸附效应对页岩气井产量递减曲线的影响

以 t_{D1} 为横坐标, q_{D1} 、 q_{D1i} 和 q'_{D1i} 为纵坐标的复合曲线, 绘制页岩气藏 Blasingame 型产量递减的曲线。

从图 1 和图 2 可以看出, 裂缝性页岩气藏 Blasingame 产量递减曲线分为 4 个阶段: 第 I 段为裂缝系统向井筒的流动阶段; 第 II 段为基质向裂缝发生窜流阶段, 产量积分导数出

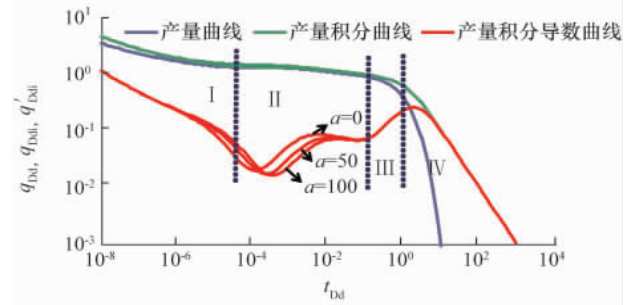


图 1 无因次 Langmuir 体积 a 对产量递减特征曲线的影响
Fig. 1 Effects of dimensionless Langmuir volume on production decline curves

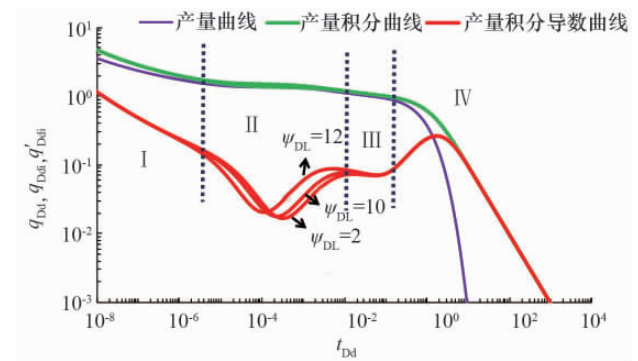


图 2 无因次 Langmuir 压力 φ_{DL} 对产量递减特征曲线的影响
Fig. 2 Effects of dimensionless Langmuir pressure on production decline curves

现下凹; 第 III 段为基质系统径向流阶段; 第 IV 段为封闭边界影响阶段。

吸附效应主要影响产量积分导数曲线凹陷出现的早晚, 随着无因次 Langmuir 体积 (a 分别为 0、50、100) 增大 (或无因次 Langmuir 压力 φ_{DL} 减小), 产量积分导数中的凹陷右移, 而且基质中径向流出现时间延迟。这是因为随着无因次 Langmuir 体积增大或无因次 Langmuir 压力减小, 基质中的吸附量变大, 当降压时, 基质中气体向裂缝中解吸附, 页岩气基质吸附量越大, 下降相同的压降所需的时间延长, 所以凹陷出现时间推迟, 基质中径向流出现时间也延迟。

3.2 应力敏感对页岩气井产量递减曲线的影响

图 3 为无因次应力敏感系数 β_D 为 0、0.5、1 时的裂缝性页岩气藏 Blasingame 产量递减的典型曲线。

由图 3 可以看出, 应力敏感对产量、产量积分和产量积分导数曲线在整个开发过程有明显的影响。无因次应力敏感系数增大 (β_D 分别为 0、0.5、1), 产量、产量积分及产量积分导数变小。这是因为当定压生产时, 随着地层敏感性增强, 地层渗透率降低, 造成渗透阻力增加, 从而使产量降低。

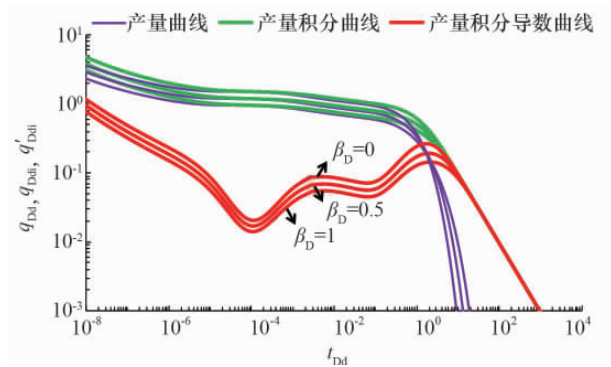
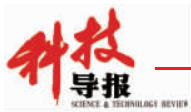


图3 应力敏感系数 β_D 对产量递减特征曲线的影响
Fig. 3 Effects of stress sensitivity on production decline curves

4 结论

(1) 建立了考虑应力敏感和吸附效应的裂缝性页岩气藏产量递减模型,并利用隐式数值差分 and 牛顿迭代方法数值求解,绘制了裂缝性页岩气藏 Blasingame 型产量递减曲线,并对其影响因素进行了综合分析。

(2) 裂缝性页岩气藏 Blasingame 产量递减曲线分为 4 个阶段:第 I 段为裂缝系统向井筒的流动阶段;第 II 段为基质向裂缝发生窜流阶段,产量积分导数出现下凹;第 III 段为基质系统径向流阶段;第 IV 段为封闭边界影响阶段。

(3) 地层应力敏感增强,产量、产量积分及产量积分导数变小。无因次 langmuir 体积增大(或无因次 langmuir 压力减小),即页岩气基质吸附量越大,无因次产量递减积分导数曲线出现下凹的时间延迟。

(4) 采用考虑应力敏感和吸附效应的裂缝性页岩气藏 Blasingame 型产量递减曲线,不仅可以通过气井生产数据确定页岩气藏的吸附常数及其他地层参数,而且可以确定应力敏感效应引起的产量下降。

参考文献 (References)

[1] 孙海,姚军,孙致学,等.页岩气数值模拟技术进展及展望[J].油气地质与采收率,2012,19(1):46-49.
Sun Hai, Yao Jun, Sun Zhixue, et al. Petroleum Geology & Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 46-49.

[2] 李新景,胡素云,程克明.北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J].石油勘探与开发,2007,34(4):392-399.
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-399.

[3] 薛永超,程林松.不同级别渗透率岩心应力敏感实验对比研究[J].石油钻采工艺,2011,33(3):38-41.
Xue Yongchao, Cheng Linsong. Oil Drilling and Production Technology, 2011, 33(3): 38-41.

[4] Archer R. Impact of stress sensitive permeability on production data analysis [C]/SPE Unconventional Reservoirs Conference, Keystone, Colorado, USA, February 10-12, 2008.

[5] 杨滨,姜汉桥,陈民锋,等.应力敏感气藏产能方程研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(5):158-160.
Yang Bin, Jiang Hanqiao, Chen Minfeng. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2008, 30(5): 158-160.

[6] 张楠,王晓琴,徐锋,等.启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响[J].特种油气藏,2012,19(1):74-77.
Zhang Nan, Wang Xiaoqin, Xu Feng, et al. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 74-77.

[7] 苏花卫,张茂林,梅海燕,等.应力敏感对低渗透气藏产能的影响[J].河北理工大学学报:自然科学版,2011,33(1):7-11.
Su Huawei, Zhang Maolin, Mei Haiyan, et al. Journal of Hebei United University: Natural Science Edition, 2011, 33(1): 7-11.

[8] Samaniego V F, Cinco-Leg H. Production rate decline in pressure-sensitive reservoirs [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1980, 19(3): 75-86.

[9] 朱豫川,刘建仪,张广东,等.气井产量递减规律分析方法对比分析[J].天然气勘探与开发,2009,32(1):28-31.
Zhu Yuchuan, Liu Jianyi, Zhang Guangdong, et al. Natural Gas Exploration and Development, 2009, 32(1): 28-31.

[10] Blasingame T A, Johnston J L, Lee W J. Type-curve analysis using the pressure integral method [C]/SPE California Regional Meeting, Bakersfield, California, April 5-7, 1989.

[11] Doublet L E, Pande P K, McCollum T J, et al. Decline curve analysis using type curves-analysis of oil well production data using material balance time: Application to field cases [C]/International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, Veracruz, Mexico, October 10-13, 1994.

[12] 梁利平,贾永禄,蔡明金.双渗油藏产量递减分析模型及应用研究[J].石油天然气学报,2011,33(11):127-130.
Liang Liping, Jia Yonglu, Cai Mingjin. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(11): 127-130.

[13] 赵海洋,贾永禄,王东权.双重-均质复合油藏产量递减模型研究[J].新疆石油地质,2010,31(1):63-65.
Zhao Haiyang, Jia Yonglu, Wang Dongquan. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(1): 63-65.

[14] 王东权,贾永禄,林涛,等.双重介质重整产量递减分析模型与应用研究[J].特种油气藏,2008,15(5):70-73.
Wang Dongquan, Jia Yonglu, Lin Tao, et al. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(5): 70-73.

[15] 孙贺东,韩永新,肖香姣,等.裂缝性应力敏感气藏的数值试井分析[J].石油学报,2008,29(2):270-273.
Sun Hedong, Han Yongxin, Xiao Xiangjiao, et al. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 270-273.

[16] 同登科,姜东梅,陈钦雷,等.变形双重介质油藏动态特征[J].中国石油大学学报:自然科学版,2001,25(5):53-56.
Tong Dengke, Jiang Dongmei, Chen Qinlei, et al. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2001, 25(5): 53-56.

(责任编辑 侯澄芝)