

文章编号:1673-5005(2007)04-0070-04

# 特高含水油藏综合调整效果的模糊评价方法

侯健<sup>1</sup>, 陈月明<sup>1</sup>, 赵红兵<sup>2</sup>, 郭振海<sup>2</sup>, 孙新敏<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石化胜利油田分公司 胜利采油厂, 山东 东营 257051)

**摘要:**建立了特高含水开发期油藏综合调整效果评价指标体系,分为注采状态评价指标、开发动态评价指标、经济效益评价指标等3大类,包括井网密度变化率、注采对应率变化值、水驱储量控制程度变化值、含水率评价系数降低值、存水率评价系数降低值、平均年增油程度、采收率增加值、耗水量降低值、产出投入比等9项子指标。基于模糊综合评判原理和层次分析法,提出了综合调整效果的模糊综合评判方法。对胜坨油田“十五”期间12个综合调整单元的调整效果进行了模糊评价,结果表明,该方法能综合反映多方面的调整效果。

**关键词:**特高含水油藏; 综合调整; 模糊评价; 胜坨油田

**中图分类号:**TE 323 **文献标识码:**A

## Fuzzy evaluation method of reservoir comprehensive adjustment effect in ultra-high water cut stage

HOU Jian<sup>1</sup>, CHEN Yue-ming<sup>1</sup>, ZHAO Hong-bing<sup>2</sup>, GUO Zhen-hai<sup>2</sup>, SUN Xin-min<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;  
2. Shengli Oil Production Plant of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257051, Shandong Province, China)

**Abstract:** Evaluation indexes systems of reservoir comprehensive adjustment effect in ultra-high water cut stage were established, which can be divided into three types including evaluation indexes of injection-production condition, development and economic benefit. These indexes can also be subdivided into nine indexes including variation rate of well spacing density, variation of injection-to-producing-well corresponding ratio, variation of reserve controllable degree of water drive, decrease of evaluation coefficient of water cut, decrease of evaluation coefficient of water storage, average oil increment degree per year, increase of oil recovery efficiency, decrease of water consumption, ratio of output and input. A fuzzy comprehensive evaluation method of reservoir comprehensive adjustment effect was presented on the basis of fuzzy comprehensive evaluation theory and analytical hierarchy process. Fuzzy evaluation of adjustment effect was performed on 12 adjustment units of Shengtuo Oilfield during tenth five-year plan period. It is indicated that the method can comprehensively reflect adjustment performance from many aspects.

**Key words:** ultra-high water cut reservoir; comprehensive adjustment; fuzzy evaluation; Shengtuo Oilfield

油田开发进入特高含水期以后,面临一系列的问题,如高含水井数增多,水驱稳产的难度加大;油水井井况复杂,套损井数呈快速增长趋势,造成油田开发井网不完善;老井措施挖潜的难度加大,措施成本越来越高;工艺技术的适应性变差,设备设施严重老化,影响油田正常生产等。因此,为了改善开发效果、提高原油最终采收率,往往需要对各个区块开展

一系列的综合调整,进行剩余油挖潜<sup>[1]</sup>。由于特高含水开发阶段的油田挖潜难度大、风险高,综合调整效果的经济技术评价显得十分必要。笔者在建立特高含水期油藏综合调整效果模糊评价方法的基础上,以胜坨油田“十五”期间所实施的综合调整单元为例说明评价方法的应用效果。

收稿日期:2007-05-21

基金项目:中国石油化工集团公司科技攻关项目(P03002)

作者简介:侯健(1972-),男(汉族),四川隆昌人,副教授,博士,主要从事油气田开发方面科研与教学工作。

# 1 综合调整效果评价指标体系

为了全面评价特高含水阶段油田综合调整效果,建立了综合调整效果评价指标体系,分为注采状态评价指标、开发动态评价指标、经济效益评价指标 3 大类,包括井网密度变化率、注采对应率变化值、水驱储量控制程度变化值、含水率评价系数降低值、存水率评价系数降低值、平均年增油程度、采收率增加值、耗水量降低值、产出投入比等 9 项子指标。

## 1.1 注采状态评价指标

注采状态评价指标包括井网密度变化率、注采对应率变化值、水驱储量控制程度变化值 3 个子指标。

井网密度变化率定义为油田调整后增加的井网密度与调整前的井网密度的比值。井网密度变化率较大时,调整效果较好。

注采对应率是指现有井网条件下与注水井连通的采油井射开小层数与采油井射开总小层数之比。注采对应率较大时,注采效果较好。

水驱储量控制程度是指现有井网条件下与注水井连通的采油井射开有效厚度与采油井射开总有效厚度之比。对于某一油藏来讲,水驱储量控制程度

越大,开采效果越好。

## 1.2 开发动态评价指标

开发动态评价指标包括含水率评价系数降低值、存水率评价系数降低值、平均年增油程度、采收率增加值、耗水量降低值等 5 个子指标。

### 1.2.1 含水率评价系数降低值

矿场统计的含水率与采出程度关系曲线与理论曲线对比,可用来评价油田在当前开采条件下,含水率上升是否正常以及开发效果的好坏。

对水驱油田,其含水率上升曲线既受油层物理性质和油水粘度比的制约,又受开采条件的影响。以流管概算法和矿场数据统计为基础,回归出的不同类型油田含水率上升曲线可作为评价油田注水效果的标准曲线<sup>[2]</sup>。含水率与采出程度关系可表示为

$$f_w = \left[ 1 + \frac{1}{(\lambda \alpha R' + 1) \exp(\beta + \lambda \alpha R')} \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中

$$R' = R/\eta.$$

式中  $f_w$  为含水率,小数;  $R'$  为可采储量采出程度,小数;  $R$  为采出程度,%;  $\eta$  为采收率,%;  $\lambda, \alpha, \beta$  为回归系数,与油水粘度比  $\mu_r$  有关。 $\lambda, \alpha, \beta$  参数取值表达式见表 1。

表 1  $\lambda, \alpha, \beta$  参数取值表达式

油水粘度比 $\mu_r$	$\lambda$ 表达式	$\alpha$ 表达式	$\beta$ 表达式
1.5 ~ 3.5	$1.035 + 0.002(\mu_r - 1.5)$	$30.37 - 18.461\mu_r$	$19.611\mu_r - 31$
3.5 ~ 50	$\begin{cases} 1.3089(\ln\mu_r)^{-0.3915}, & \mu_r \leq 25 \\ 1.3904\mu_r^{-0.057}, & \mu_r > 25 \end{cases}$	$\frac{23.1729}{\ln\mu_r + 2.2517}$	$\frac{8.4070}{\ln\mu_r + 0.1064}$
> 50	$1.3265 - 0.0006\mu_r$	$4.56 - 0.1251\mu_r$	$0.661\mu_r - 4.76$

各调整单元含水率与采出程度关系实际曲线和理论曲线之间存在的偏差越大,说明在某采出程度下,实际含水率与理论含水率差距也越大,实际的开发效果与理论开发效果差距也越大。如果实际含水率大于理论含水率,那么开发效果相对较差,反之较好。综合调整将改变实际曲线和理论曲线之间的偏差程度。为了定量地描述这种变化,定义含水率评价系数指标<sup>[3]</sup>如下:

$$\Delta f_w = f_{w_s} - f_{w_i},$$

$$F^+ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M'} \Delta f_{w_i}^2}{M'}} \quad (\Delta f_{w_i} > 0),$$

$$F^- = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N'} \Delta f_{w_i}^2}{N'}} \quad (\Delta f_{w_i} < 0).$$

式中  $f_{w_i}$  为理论方法计算的含水率,%;  $f_{w_s}$  为实际统

计的含水率,%;  $\Delta f_{w_i}$  为第  $i$  点对应的实际含水率与理论含水率之差,%;  $M'$  为  $\Delta f_{w_i} > 0$  的数据点数;  $N'$  为  $\Delta f_{w_i} < 0$  的数据点数。若  $K'$  为  $\Delta f_{w_i} = 0$  的数据点数,那么总的考察数据点数  $D_s = M' + N' + K'$ 。

含水率评价系数  $F$  可定义为

$$F = \frac{M'F^+ - N'F^-}{D_s}. \quad (2)$$

含水率评价系数  $F$  值越小,说明总体上实际含水率低于或越接近于理论值,开发效果越好。油田综合调整后,如果含水率评价系数降低,则反映调整取得了效果。含水率评价系数降低值可以反映综合调整改善开发效果的程度。

### 1.2.2 存水率评价系数降低值

存水率  $C$  计算公式可根据含水率与采出程度关系表达式推导。

$$C = \frac{W_i - W_p}{W_i} = 1 - \frac{\exp(\beta + \lambda\alpha R')}{\rho_w} \times \left[ \frac{\exp(\beta + \lambda\alpha R')}{\rho_w} + \frac{B_0}{\rho_0} \right]^{-1}$$

式中,  $W_i$  为累积注入量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $W_p$  为累积产水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $\rho_0$  和  $\rho_w$  分别为原油和水的密度,  $\text{t/m}^3$ ;  $B_0$  为原油体积系数。

同样, 各调整单元存水率和采出程度关系的实际曲线和理论曲线之间存在的偏差, 反映实际开发效果与理论开发效果之间的差距。如果实际存水率小于理论存水率, 那么开发效果相对较差, 反之较好。为了定量地描述综合调整效果, 与定义含水率评价系数类似, 可定义存水率评价系数。

### 1.2.3 平均年增油程度

油田经过综合调整见效后, 产油量增加。而如果不进行调整, 油田产油量曲线将符合某种递减变化趋势。因此, 只要准确地预测该油田的产量递减规律, 就可以评价该油田经过综合调整后获得的增油量。

根据递减指数的不同, 产量递减可分为指数递减、双曲线递减、调和递减 3 种类型<sup>[4]</sup>。考虑到各调整单元评价时间和地质储量的不同, 为了使各调整单元的评价结果具有可比性, 定义平均年增油程度为

$$\Delta\bar{Q}_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta Q_{oi}}{NM} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\bar{Q}_0$  为平均年增油程度, %;  $M$  为评价增油年份数;  $N$  为地质储量,  $10^4 \text{ t}$ ;  $\Delta Q_{oi}$  为第  $i$  年增油量,  $10^4 \text{ t}$ 。平均年增油程度指标能够直观反映目前通过综合调整后的增油状况。

### 1.2.4 采收率增加值

当水驱油田含水率达到一定值后, 累积产水量和累积产油量在半对数坐标系中为直线关系<sup>[5]</sup>。油田综合调整前后, 水驱曲线发生变化。如果水驱曲线斜率降低, 说明开发效果改善, 预测采收率值增加, 反之则降低。

### 1.2.5 耗水量降低值

油田进入中高含水期以后, 随着注水量的不断增加, 注采成本也不断提高, 因此注水量也应作为衡量注水开发效果的一个重要指标。

统计发现, 当油田进入中高含水开发期后, 注入孔隙体积倍数和采出程度在半对数坐标系中呈直线关系。这样, 就可利用该关系曲线计算注入孔隙体积倍数增长率, 从注水角度来评价油田调整效果<sup>[6]</sup>。

注水开发油田进入中高含水开发期后, 具有以下统计规律, 即

$$\lg \bar{W}_i = A' + B'R \quad (4)$$

其中

$$\bar{W}_i = \frac{W_i}{V_p} = \frac{\sum Q_i}{V_p}$$

式中,  $\bar{W}_i$  为注入孔隙体积倍数;  $A'$  为直线截距;  $B'$  为直线斜率;  $V_p$  为孔隙体积,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

对式(4) 两端求导数, 则

$$\frac{d\bar{W}_i}{dR} = 2.30B'10^{A'+B'R} \quad (5)$$

式中,  $\frac{d\bar{W}_i}{dR}$  为注入孔隙体积倍数增长率, 其物理意义可理解为每采出单位地质储量时相应的注入孔隙体积倍数增长的速度。式(5) 表明, 注入孔隙体积倍数增长率随采出程度的增加呈指数上升。

在评价油田调整效果过程中, 由于注入孔隙体积倍数和采出程度的关系直线产生拐点, 直线的斜率和截距发生变化, 因此注入孔隙体积倍数增长率也随之变化。这样, 在同样的采出程度下, 调整挖潜阶段所减少的耗水量  $\Delta Q_i$  为

$$\Delta Q_i = \Delta R V_p \left[ \left( \frac{d\bar{W}_i}{dR} \right)_a - \left( \frac{d\bar{W}_i}{dR} \right)_b \right]$$

式中,  $\Delta R$  为阶段采出程度, %;  $\left( \frac{d\bar{W}_i}{dR} \right)_a$  和  $\left( \frac{d\bar{W}_i}{dR} \right)_b$  分别为综合调整前、后的注入孔隙体积倍数增长率。

### 1.3 经济效益评价指标

利用静态评价方法评价综合调整后的经济效益, 产出投入比  $P$  定义为

$$P = \frac{(C_1 - C_2)\Delta N_p}{(1 + n_1)(n_w + n_o)C_3}$$

式中,  $C_1$  为原油价格, 元/t;  $C_2$  为原油成本, 元/t;  $\Delta N_p$  为总增油量,  $10^4 \text{ t}$ , 利用预测提高采收率计算;  $n_1$  为其他投资(如地面、采油工程投资等)占钻井投资比例;  $n_o$  为新增油井数;  $n_w$  为新增水井数;  $C_3$  为平均单井钻井投资, 万元。产出投入比越大, 说明经济效益越好, 油田综合调整效果显著。

## 2 调整效果的模糊综合评判方法

由于油藏综合调整效果受各种因素的影响, 很难以某一种指标来正确评价综合调整效果, 因此有必要研究一种综合的评价方法来对其进行正确评价。

设有  $n$  个系统, 每个系统含有  $m$  个指标参与评判, 则决策评语集合为  $\underline{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。评价油

藏综合调整效果的所有指标构成的集合作为指标集, 指标因素集合为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ,  $R = (r_{ij})_{m \times n}$  是  $X \times U$  上的模糊关系,  $(X, U, R)$  则构成评判空间。

由于  $X$  中各指标因素的地位未必平等, 因而可用  $X$  上的模糊集  $A = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$  表示权重分配, 其中,  $w_i \geq 0$  且  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。应用模糊关系运算, 可得模糊综合评判的初始模型为

$$B = A \otimes R = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$$

$B$  表示决策集上各种决策的可能性系数, 最大值  $b_j$  所对应的决策  $u_j$  则为评判结果。当评判系统比较复杂时, 可采用多级评判模型, 即将指标因素集合按某种属性分成几类, 先对每一类进行综合评判, 形成中间评价矩阵, 再对其进行类之间的高层次综合评判<sup>[7-8]</sup>。

表2 综合调整效果评价指标评价标准

注采状态评价指标			开发动态评价指标				经济效益评价指标		效果
井网密度变化率/%	注采对应率变化值/%	水驱储量控制程度变化值/%	含水率评价系数降低值/%	存水率评价系数降低值/%	平均年增油程度/%	采收率增加值/%	耗水量降低值	产出投入比	
< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0.02	< 0.1	< -0.1V <sub>p</sub>	< 0	差
0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 5	0 ~ 0.5	0 ~ 1.5	0.02 ~ 0.04	0.1 ~ 0.5	(-0.1 ~ 0)V <sub>p</sub>	0 ~ 1	较差
5 ~ 10	5 ~ 10	5 ~ 15	0.5 ~ 1.0	1.5 ~ 2.5	0.04 ~ 0.08	0.5 ~ 1.0	(0 ~ 0.05)V <sub>p</sub>	1 ~ 2	一般
10 ~ 15	10 ~ 15	15 ~ 30	1.0 ~ 1.5	2.5 ~ 3	0.08 ~ 0.12	1.0 ~ 1.5	(0.05 ~ 0.1)V <sub>p</sub>	2 ~ 4	较好
> 15	> 15	> 30	> 1.5	> 3	> 0.12	> 1.5	> 0.1V <sub>p</sub>	> 4	好

选择层次分析法<sup>[9-10]</sup> 作为确定权重的方法。层次分析法是一种定量与定性相结合, 将主观判断用数量形式表达和处理的方法。同时引入了 Saaty 提出的 1 ~ 9 标度法, 构成判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征根及对应的特征向量, 得到各因素的权重系数。

### 3 综合调整评价方法的应用

胜坨油田为胜利油区典型的整装油田, 1964 年正式投入开发, 目前处于“三高”开发阶段, 即综合含水率高(94.3%, 胜利油区平均为 90.3%)、可采储量采出程度高(88.7%, 胜利油区平均为 77.3%)、剩余可采储量采油速度高(12.2%, 胜利油区平均为 9.9%)。在“十五”期间, 对胜坨油田不同的 12 个单元进行了综合调整, 调整类型包括完善注采井网、完善韵律层、复杂断块油藏调整和井网重组综合调整等。

在建立调整效果综合评价指标体系的基础上, 结合模糊综合评价方法, 对胜坨油田“十五”期间的综合调整单元效果进行了评价(图 1)。

如果综合调整效果为“一般”、“较好”、“好”,

利用综合调整效果评价指标体系的 9 项评价指标建立指标因素集合  $X$ , 同时将综合调整效果用模糊集合  $U$  来描述:

$$U = \{\text{差, 较差, 中等, 较好, 好}\}$$

基于各种综合调整效果评价指标的特点, 确定各评价指标的评价标准如表 2 所示。为了使得确定的隶属函数满足最大隶属度原则、区别性原则、一致性原则及极限原则, 同时考虑油田开发综合调整的特点, 在进行了多次数值实验的基础上, 将传统的岭形函数加以引申。同时, 将非等距的区间线性变化成等距区间, 将隶属度分布密度函数用对称形式的岭形分布表示。在确定隶属度时, 用区间内的平均分布密度来表示该区间的隶属度, 归一化后得到该评价指标  $x_i$  在模糊集合  $U$  各区间的隶属程度。

则认为综合调整有效, 由图 1 可以看出, 胜坨油田成功综合调整 8 个单元, 综合调整有效率为 66.67%, 取得了较好的综合调整效果。

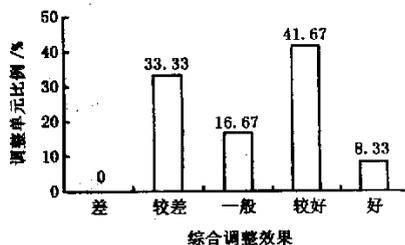


图1 胜坨油田“十五”综合调整效果评价结果

### 4 结束语

建立了特高含水开发期油藏综合调整效果评价指标体系, 分为注采状态评价指标、开发动态评价指标、经济效益评价指标 3 大类, 包括井网密度变化率、注采对应率变化值、水驱储量控制程度变化值、含水率评价系数降低值、存水率评价系数降低值、平均年增油程度、采收率增加值、耗水量降低值、产出投入比等 9 项子指标。结合模糊综合评判原理和层

(下转第 89 页)

## 参考文献:

- [1] IRWIN G R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate[J]. J App Mech, 1957, 24: 1-18.
- [2] WANG C, CHEN Z D. Miscorrelation effects in material fracture and damage[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1991, 38(2/3): 147-155.
- [3] BOWIE O L, FREEZE C E. Elastic analysis for a radial crack in a circular ring[J]. Eng Frac Mech, 1972(4): 315-321.
- [4] BOWIE O L, NEAL D M. A modified mapping collocation technique for accurate calculation of stress intensity factors[J]. AMMRC TR69-28, 1969, 11: 212-219.
- [5] BOWIE O L. Analysis of an infinite plate-containing radial cracks originating from the boundary of an internal circular hole[J]. J Math Phys, 1956, 35: 321-342.
- [6] CLIFTON R J, SIMONSON E R, JONES, A H, et al. Determination of the critical-stress-intensity factor from internally pressurized thick-wall vessels[J]. Experimental Mechanics, 1976, 6: 233-238.
- [7] 尹祥础. 不同方法测定岩石断裂韧度  $K_{Ic}$  的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(4): 328-333.

YIN Xiang-chu. Experimental investigation on the measurement of fracture toughness  $K_{Ic}$  (IC) of rocks using different methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(4): 328-333.

- [8] 陈治喜, 陈勉, 金衍. 水力致裂法测定岩石的断裂韧性[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 108-112.
- CHEN Zhi-xi, CHEN Mian, JIN Yan. Determination of rock fracture toughness with hydraulic fracturing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(1): 108-112.
- [9] 卢国胜, 陈健, 李显寅. 水力压裂测定岩盐的断裂韧度[J]. 化工矿物与加工, 1996, 6: 12-16.
- LU Guo-sheng, CHEN Jian, LI Xian-yin. Determination of rock salt fracture toughness with hydraulic fracturing method[J]. Industrial Minerals and Porocessing, 1996, 6: 12-16.
- [10] AWAJI H, SATO S. Combined mode fracture toughness measure by disk test[J]. J Eng Mater Tech, 1978, 100: 175-182.
- [11] ATKINSON C, SMELSER R E, SANCHZ J. Combined mode fracture via the cracked brazilian disk[J]. Int J Fracture, 1982, 18: 279-291.

(编辑 李志芬)

(上接第 73 页)

次分析法,提出了特高含水开发期油藏综合调整效果的模糊综合评判方法,该方法能综合反映注采状态、开发动态、经济效益等多方面的调整效果。对“十五”期间胜坨油田的 12 个调整单元综合调整效率为 66.67%,效果较好。

## 参考文献:

- [1] 袁谋, 计兆红, 卞松梅, 等. 胜坨油田开发技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [2] 张锐. 评价油田注水效果的两种对比曲线[J]. 石油勘探与开发, 1988, 15(5): 53-59.
- ZHANG Rui. Correlation curve for the evaluation of the effectiveness of water injection [J]. Petroleum Exploration and Development, 1988, 15(5): 53-59.
- [3] 宋子齐, 赵磊, 王瑞飞, 等. 一种水驱开发效果评价方法在辽河油田的应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2004, 19(3): 17-22.
- SONG Zi-qi, ZHAO Lei, WANG Rui-fei, et al. Application of an waterflooding development result evaluation method in Liaohe Oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(3): 17-22.
- [4] 郎兆新. 油藏工程基础[M]. 东营: 石油大学出版社,

1991.

- [5] 童宪章. 油井产状和油藏动态分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981.
- [6] 卢俊. 评价和预测注水开发油田调整挖潜效果的一项新指标[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 62-65, 70.
- LU Jun. A new index used in the evaluation and prediction of the reservoir performance of a water flooding oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 62-65, 70.
- [7] 侯健, 陈月明. 基于模糊综合评判模型的蒸汽吞吐注采参数优化设计方法的研究[J]. 特种油气藏, 1997, 4(3): 15-21.
- HOU Jian, CHEN Yue-ming. Research on the optimizing designing method of injection-production parameters of steam soak on basis of fuzzy comprehensive judgment model [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 4(3): 15-21.
- [8] 汪诚义. 模糊数学引论[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [9] 许树伯. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [10] 赵焕臣. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

(编辑 李志芬)