

文章编号:1000-582X(2010)04-049-05

## 低浓度煤层气多孔射流扩散燃烧的数值模拟

唐 强<sup>1</sup>, 李建雄<sup>1,2</sup>, 王丽朋<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030; 2. 河南机电高等专科学校, 河南 新乡 453002)

**摘 要:**采用  $k-\epsilon$  湍流双方程模型、非预混燃烧模型和 P1 辐射传热模型, 对低浓度煤层气扩散燃烧过程进行了数值模拟。比较了不同结构形式和不同射流参数对低浓度煤层气燃烧过程的影响。结果表明:燃气喷口与燃烧空间中心轴线的距离、燃气向空气偏转角度、空气和燃气的速度比对煤层气扩散燃烧有很大影响。当燃气喷口与中心的间距为 30 mm, 燃气向空气偏转角度为  $45^\circ$ , 空气和燃气的速度比为 2 时, 燃烧效果较好。

**关键词:**能源与动力工程; 煤层气; 扩散燃烧; 多孔射流; 数值模拟

中图分类号:TK229.1

文献标志码:A

## Numerical simulation on multi-jet diffusion combustion of low concentration coal bed methane

TANG Qiang<sup>1</sup>, LI Jian-xiong<sup>1,2</sup>, WANG Li-peng<sup>1</sup>

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

2. Henan Mechanical and Electrical College, Xinxiang 453002, Henan, P. R. China)

**Abstract:** It is important to utilize coal bed methane to achieve the safe, environmental and economic benefits. The authors simulate the processes of multi-jet diffusion combustion of low concentration coal bed methane using  $k-\epsilon$  turbulence model, non-premixed combustion model and P1 radiation model. The influences of different geometrical structures and operating parameters on the combustion process are compared with each other. The results show that the distance between the gas nozzles and central axis, the angle of gas deflected from air, the velocity ratio of air to gas have important impacts on the combustion. When the distance, the deflection angle and the velocity ratio are 30 mm,  $45^\circ$  and 2, respectively. The best combustion result can be achieved.

**Key words:** energy and power engineering; coal bed methane; diffusion combustion; multiple jets; numerical simulation

煤层气是赋存在煤层中以甲烷为主要成分、以吸附在煤基质颗粒表面为主、部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体。甲烷既是一种优质的洁净能源, 同时也是一种重要的温室气体<sup>[1-6]</sup>。我国煤矿为保障安全生产, 大多将煤层气直接排向大气, 这样不仅浪费了能源, 还污染了环境。因此开

发利用煤层气有利于优化能源结构, 改善煤矿安全, 保护大气环境。2008 年我国发布了《煤层气(煤矿瓦斯)排放标准》, 要求禁止排放甲烷比例超过三成的瓦斯, 以促进煤层气的利用, 因此研究低浓度煤层气利用技术刻不容缓。

通过对重庆几个煤矿的调查分析, 发现由于煤

收稿日期:2009-12-20

基金项目:重庆市重大攻关项目(CSTC, 2008AC2051)

作者简介:唐强(1973-), 男, 重庆大学副教授, 博士, 从事燃烧与环保研究, (Tel)023-65103114;

(E-mail)tangqiang@cqu.edu.cn。

层渗透率较低,其煤层气平均浓度在30%~40%之间,其它为 $N_2$ 和 $CO_2$ 等惰性不可燃气体。目前煤层气的利用主要集中在民用或燃烧发电领域。低浓度煤层气热值较低,着火温度较高且一般压头较小,另外由于含有较多惰性成分,燃烧速度慢,所以其着火性能及火焰稳定性差。因此有必要研究低浓度煤层气燃烧特性,使之能够高效稳定燃烧。

数值模拟方法现已成为研究燃烧、流动等问题的常用方法,许多学者采用这种方法得到了与实际相符的结果<sup>[7-15]</sup>。为了加强燃气与助燃空气的混合,目前的研究主要集中在旋流燃烧,空气通过涡壳旋流进入与燃气混合。而直流扩散燃烧方式不易发生回火与脱火,且系统结构简单,在工业上也有着广泛应用。朱彤等人对低热值煤气全直流扩散高温燃烧过程进行了数值模拟,比较了不同预热温度和不同空气过量系数对燃烧过程的影响<sup>[6]</sup>。

扩散燃烧的快慢主要取决于燃料与空气的混合强度,当燃烧室的几何结构一定时,如何调整喷嘴的几何位置、喷射角度和速度等来实现高效燃烧,是组织炉内燃烧过程的关键<sup>[5]</sup>。笔者采用数值模拟方法,研究了低浓度煤层气直流扩散燃烧过程,主要分析了这几方面因素对着火及温度场的影响并对参数进行了优化。

## 1 物理模型

燃烧室结构如图1。煤层气与助燃空气入口均采用四喷口周向对称布置形式,内侧为煤层气喷口,外侧为空气喷口,燃气与空气分别进入燃烧空间,边扩散混合边燃烧。前面扩口部分长度为400 mm,端面直径分别为400 mm、600 mm,后面圆筒形空间尺寸为 $\Phi 1\ 000 \times 3\ 100$  mm。坐标原点设置在入口面中心处,燃烧空间轴向方向为 $X$ 正方向。燃烧器进口对面设为烟气出口。设定燃气喷口与空气喷口之间距离为 $a$ ,燃气喷口与中心轴线之间距离为 $b$ 。煤层气成分设为30%甲烷与70%氮气组成,热值为 $10\ 772\ \text{kJ}/\text{Nm}^3$ 。燃烧器功率0.75 MW,燃气与助燃空气进口温度均为 $25\ ^\circ\text{C}$ ,燃气消耗量为 $305\ \text{m}^3/\text{h}$ ,过量空气系数为1.05。

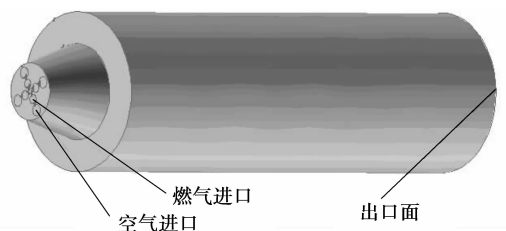


图1 燃烧室结构简图

## 2 数值模拟计算方法

燃气与空气从喷口分别喷入燃烧空间,流动模型采用标准 $k-\epsilon$ 湍流双方程模型,对近壁处的粘性流动处理采用标准壁面函数。采用非预混燃烧模型,对系统化学反应的描述采用平衡假设模型。采用P1辐射传热模型求解辐射传热方程,采用灰气体加权平均模型计算吸收系数。

计算区域的网格划分均采用结构化六面体网格,对喷口出口区域网格进行加密。总网格数约为36万,经过网格无关性验证,说明划分的网格大小能满足计算精度要求。燃气及空气进口边界条件均设为速度进口;出口处边界条件设为自由出流。壁面采用无滑移定壁温边界条件, $T=200\ ^\circ\text{C}$ 。采用Simple算法求解压力-速度耦合问题,对流项和扩散项采用二阶迎风格式进行离散求解。

## 3 模拟结果与分析

采用数值模拟方法,研究了空气与燃气喷口的间距 $a$ 、燃气喷口与燃烧空间中心轴线的间距 $b$ 、燃气向空气方向的偏转角度及空气与燃气的速度比等因素对煤层气燃烧过程的影响。通过对燃烧过程中速度场、温度场及组分浓度场的分析,得到能实现高效燃烧的参数。

### 3.1 燃气与空气喷口间距影响

空气流向为水平轴向,在燃气向空气方向偏转 $30^\circ$ ,燃气速度为 $8\ \text{m}/\text{s}$ ,空气与燃气的速度比为2,喷口与中心间距 $b$ 为 $25\ \text{mm}$ 条件下,改变燃气喷口与空气喷口之间距离 $a$ 来考察其影响。

为考察燃烧空间温度变化情况,沿轴向方向在燃烧空间前段每隔 $100\ \text{mm}$ ,后部每隔 $200\ \text{mm}$ 作20个横截面。图2为 $a$ 值不同时各横截面质量加权平均温度沿轴向变化曲线。从图中可以看出,燃气喷入炉膛后,温度沿轴向方向迅速升高,并在约 $2\ 000\ \text{mm}$ 处达到最大值,随后温度略有降低。喷口间距 $a$ 在 $5\sim 20\ \text{mm}$ 变化时,燃烧空间温度分布变化不大。扩散燃烧过程的燃烧速度取决于氧气向燃气的扩散速度,因此燃气与空气的混合效果对燃烧过程影响很大。由于燃气射流有一定偏角,加强了燃气与空气的混合效果,因此,喷口间距影响变小。另外模拟结果还表明,在燃烧空间中心轴线上,喷口出口一段距离内都存在一定负向速度,这说明出口中心都存在回流区域。而且随间距 $a$ 增大,回流区长度及回流强度均增大。回流强度增大使高温烟气回流量多,加热入口的低温燃气与空气,使着火燃烧速度加快,这也在一定程度上抵消了间距增大减弱气流相互作用对燃烧的影响。

模拟结果表明在  $a$  值不同时,各横截面的甲烷质量分数沿轴向方向的变化基本相同,这也进一步说明了喷口间距对燃烧影响较小。

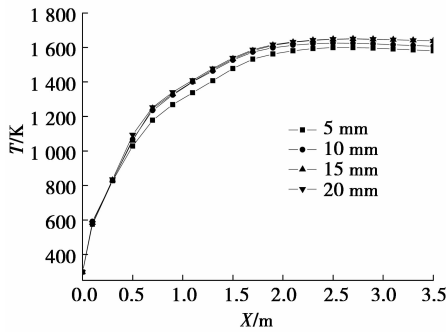


图 2  $a$  变化时轴向温度分布

### 3.2 喷口位置的影响

在燃气和空气喷口间距  $a$  为 5 mm,燃气向空气方向偏转  $30^\circ$ ,燃气速度为 8 m/s,空气与燃气的速度比为 2 条件下,改变燃气喷口与中心的距离  $b$  来考察其影响。

图 3 为  $b$  值不同时燃烧室中心轴线上的轴向速度分布。从图中可以看出,在喷口出口一段区域内存在负向速度,说明中心区域存在一个回流区,而且回流区尺寸与回流强度随着  $b$  值增大而增大。图 4 为  $b$  值不同时燃烧空间各横截面的质量加权平均温度分布,图 5 为燃烧空间轴向方向上甲烷质量分数

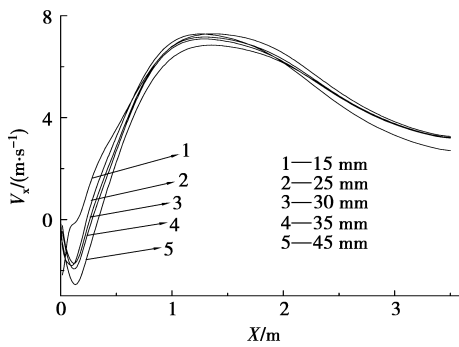


图 3  $b$  变化时燃烧室中心轴线上轴向速度分布

变化情况。从图中可以看出,间距  $b$  越大时,燃烧空间前段温度上升较快,甲烷质量分数下降也越快。这主要是由于喷口为周向布置,在喷口中心部位会形成一个负压区,当负压达到一定值时,会在中心形成回流区域,使燃烧空间中心部位部分高温烟气回流,加热进口的燃气与空气,从而加快着火燃烧过程。但从图中看出间距增大到 30 mm 以上时,温度场基本不再变化,说明再增大间距对燃烧影响已不大。

### 3.3 射流角度的影响

前述的模拟结果表明,燃气向空气方向偏转时

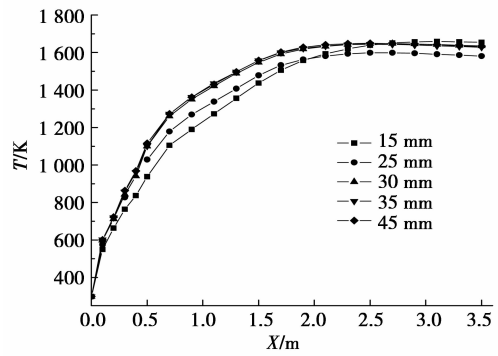


图 4  $b$  变化时各横截面温度分布

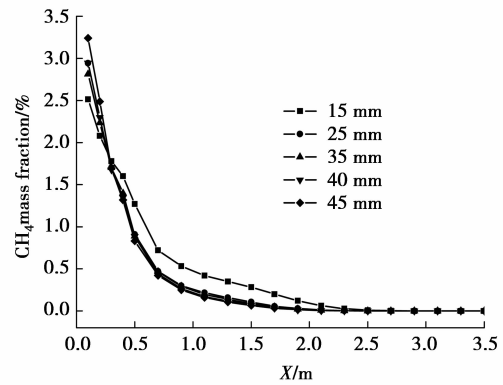


图 5  $b$  变化时各横截面甲烷质量分数分布

能够改善燃烧效果,因此,在间距  $a$  为 5 mm,间距  $b$  为 25 mm,空气速度为 16 m/s 条件下,保持燃气流量不变,考察燃气向空气方向偏转角度变化的影响。

图 6 为燃气向空气方向偏转不同角度时,各横截面质量加权平均温度沿轴向方向的分布。从图中可以看出,随着偏转角度增大,温度上升加快,偏转角度为  $45^\circ$  时上升最快。在燃烧空间后部,随着放热量增加,截面温度有所下降。图 7 为燃烧空间中心轴线的轴向速度分布。从图中可以看出,偏转角度为  $15^\circ$  时,回流区尺寸最小,随着偏转角度增大,回流区尺寸稍微增大,强度也越大。图 8 为喷口轴线上的甲烷质量分数变化曲线。在偏转角度为  $45^\circ$  时,甲烷质量分数下降速度明显大于另外两个工况,说明在角度增大的情况下,燃烧速度相应加快。扩散速度主要取决于燃气与助燃空气的混合强度,燃气与空气射流有一定夹角时,两者能够更好的混合。燃气射流向外偏转,又促进了中心回流区的形成,高温烟气回流加热了进口的燃气与空气。因此,燃烧区域前部的燃烧速度加快,温度上升快。燃烧区域后部,只有少量甲烷燃烧放热,而烟气不断向壁面放热,烟气温度下降。

### 3.4 空气与燃气速度比的影响

在间距  $a$  为 5 mm,间距  $b$  为 25 mm,燃气速度

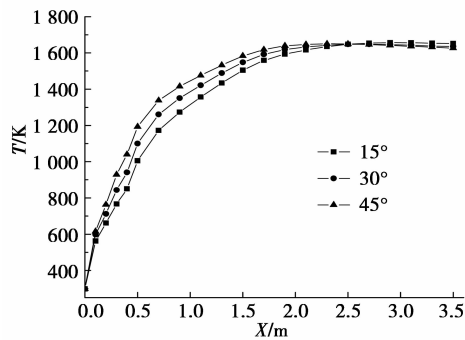


图6 不同偏转角时轴向温度分布

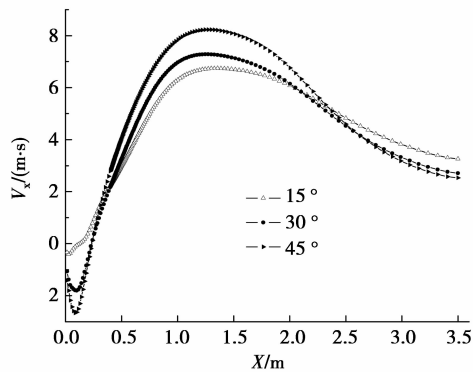


图7 不同偏转角时轴向速度分布

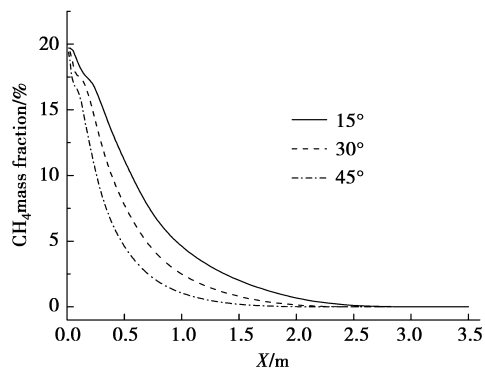


图8 不同偏转角时轴向甲烷质量分数

为 8 m/s, 燃气向空气方向偏转  $30^\circ$  条件下, 通过改变空气入口面积从而改变空气速度, 考察空气与燃气的速度比对煤层气燃烧的影响。

图 9 为不同速度比时, 各横截面质量加权平均温度沿轴向分布曲线。从图中可以看出, 在速度比为 1.5 时, 温度一直上升, 说明燃烧放热比外界吸热量要大; 随着速度比增大, 初期温度上升加快。这是因为速度比增大时, 空气对燃气的卷吸作用增强, 两者实现了较好的混合, 着火燃烧加快。温度升到一定值后在燃烧空间放热量大, 出口烟温降低。但空气速度也不能太大, 否则火焰会产生漂移, 燃烧不稳定, 模拟结果表明速度比为 3 时中心平面上温度会出现不对称情况。另外速度比大时所需的空气压力较高。模拟表明在速度比为 2 时燃烧效果较好。

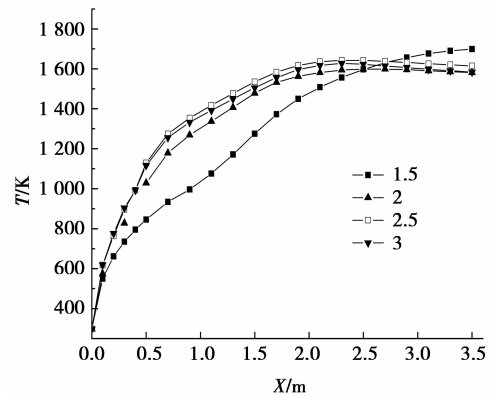
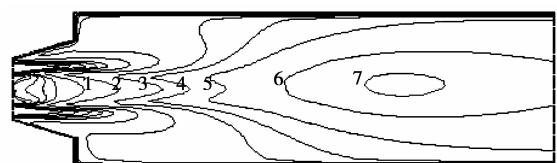


图9 不同速度比时轴向温度分布

### 3.5 优化结果

通过详细的模拟各种条件下的燃烧过程, 比较分析各参数的变化, 在间距  $a$  为 5 mm, 间距  $b$  为 30 mm, 燃气向空气方向偏转  $45^\circ$ , 空气与燃气的速度比为 2 时, 燃烧效果较好, 模拟结果如图 10 和图 11 所示。图 10 为燃烧空间中心  $Z=0$  平面的温度分布。在喷口出口 200 mm 处温度上升到 820 K, 燃气着火燃烧较早, 高温区域在燃烧空间中心部位且高温区域较小, 整体温度比较平均; 出口面平均烟温为 1460 K, 出口烟温较低。图 11 为各横截面甲烷质量分数沿轴向分布的曲线。在距离喷口 900 mm 的横截面上, 甲烷质量分数降到 1% 以下, 出口平面甲烷质量分数为  $2.86 \times 10^{-8}$ , 甲烷燃烧效率在 99.99% 以上。



1 为 1 000 K; 2 为 1 200 K; 3 为 1 400 K; 4 为 1 500 K;  
5 为 1 600 K; 6 为 1 700 K; 7 为 1 758.92 K

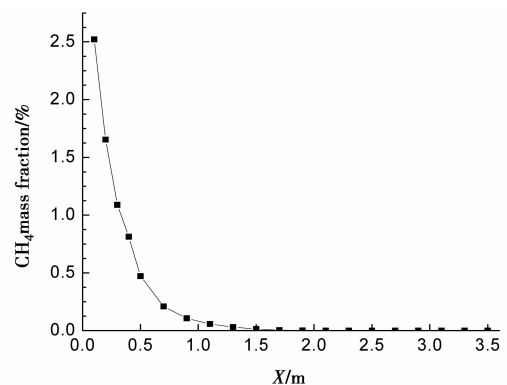
图10  $Z=0$  平面温度分布

图11 轴向方向甲烷质量分数

## 4 结 论

采用数值模拟方法研究了低浓度煤层气在不同工况下的燃烧,得到了其速度场、温度场和浓度场,并得出以下结论:

1)在燃气与空气射流有一定夹角的情况下,燃气与空气喷口之间的距离变化对燃烧的影响较小;

2)当燃气喷口与中心距离增大时,产生的中心回流区的尺寸与强度随之增大,但间距增大到30 mm以上后,继续增大间距对燃烧的影响减小;

3)燃气射流向空气射流偏转一定角度时,有利于中心回流区的形成,加速低浓度煤层气燃烧。偏转角度为45°时,燃烧效果较好;

4)空气与燃气的喷射速度有一定差值时能够产生卷吸作用,从而有利于燃烧。空气与燃气的速度比为2时效果较好。

### 参考文献:

- [1] SU X, BEACH A, GUO H, et al. An assessment of mine methane mitigation and utilisation technologies [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, 31(2):123-170.
- [2] HOHNSON P W, NOVAK T, MEMBER S, et al. Use of mine ventilation exhaust as combustion air in gas-fired turbo-electric generators[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34(2):399-405.
- [3] KONTOGEORGOS D A, KERAMIDA E P, FOUNTI M A. Assessment of simplified thermal radiation models for engineering calculations in natural gas-fired furnace [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(25/26):5260-5268.
- [4] 林宗虎. 煤层气——一种亟待开发利用的清洁能源[J]. *工业锅炉*, 2006(3):1-5.  
LIN ZONG-HU. Coal bed methane——A kind of clean energy resource to be urgently developed and utilized [J]. *Industry Boiler*, 2006(3):1-5.
- [5] CHACON J, SALA J M, BLANCO J M. Investigation on the design and optimization of a low NO<sub>x</sub>-CO emission burner both experimentally and through computational fluid dynamics (CFD) simulations [J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(1):42-58.
- [6] 朱彤,张毅劼,刘敏飞,等. 低热值煤气高温空气燃烧数值模拟[J]. *同济大学学报*, 2002, 30(8):932-936.  
ZHU TONG, ZHANG YI-MENG, LIU MIN-FEI, et al. Numerical simulation of high temperature combustion for low heat value gas [J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(8):932-936.
- [7] GOSIEWSKI K J, WARMUZINSKI K. Effect of the mode of heat withdrawal on the asymmetry of temperature profiles in reverse-flow reactors. Catalytic combustion of methane as a test case [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62:2679-2689.
- [8] ISHII T, ZHANG C, SUGIYAMA S. Numerical simulations of highly preheated air combustion in an industrial furnace [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1998, 120(4):276-284.
- [9] 王宗明,段希利. 旋流稳焰瓦斯燃烧器湍流扩散火焰的数值模拟[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2003, 27(5):68-72.  
WANG ZONG-MING, DUAN XI-LI, SUN TAO, et al. Numerical simulation on turbulent diffusion flame of gas burner with spinning air [J]. *Journal of the University of Petroleum. Edition of Natural Science*, 2003, 27(5):68-72.
- [10] 吴德飞,毛羽,江华,等. 复杂结构气体燃烧器三维流场和燃烧状况数值模拟[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2003, 27(2):93-97.  
WU DE-FEI, MAO YU, JIANG HUA, et al. Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow and combustion in gas burner with complication structure [J]. *Journal of the University of Petroleum Edition of Natural Science*, 2003, 27(2):93-97.
- [11] MANICKAN M, PERRY J, SCHWARZ M P. CFD modelling of waste heat recovery boiler [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1998, 22(10):823-840.
- [12] LIAKOS H H, FOUNTI MA, MARKATOS N C. Modeling of stretched natural gas diffusion flames [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2000, 24(5/6):419-435.
- [13] LINDSTEDT R P, VAOS E M. Transported PDF modeling of high-Reynolds-number premixed turbulent flames [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145(3):495-511.
- [14] 唐强,罗渝东,张力,等. 低热值煤层气燃烧器的影响因素及优化的数值模拟[J]. *动力工程*, 2007, 27(3):344-348.  
TANG QIANG, LUO YU-DONG, ZHANG LI, et al. Numerical simulation of influencing factors and a way of optimizing burners for coal-bed gas of low calorific value [J]. *Power Engineering*, 2007, 27(3):344-348.

(编辑 张小强)