

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2011.09.003

# 多气源天然气互换性研究中的配气问题

□ 同济大学机械工程学院 (201804) 吕赵键 秦朝葵 戴万能

**摘要:** 在多气源天然气的互换性试验中,配气是十分关键的准备工作。本文介绍了国标中的相关规定以及配气计算原则,提出了使用管道天然气掺混单一气体、利用AGA指数法和Weaver指数法来判定配气精度的方法。同时还讨论配气操作中的一些具体问题以及相应的解决措施。

**关键词:** 互换性 配气计算 判别方法

## Gas Blending Problem during Experimental Research of Multi-source Natural Gas Interchangeability

College of Mechanic Engineering, Tongji University, Shanghai Lv Zhaojian, Qin Chaokui, Dai Wanneng

**Abstract:** Gas blending is an important preliminary work during experimental research of natural gas interchangeability. Some related provisions in national standards, and calculation principles for blending processes, were introduced. A method based upon pipeline natural gas mixed with pure gases, followed by AGA and Weaver indices was put forward to analyze precision of blending. Also discussed were some detailed difficulties and proposed solutions.

**Keywords:** natural gas interchangeability gas-blending calculation judgement method

### 1 引言

作为最为清洁的一次能源,天然气日益受到重视。随着天然气需求量的不断增加,国内许多地区出现了多气源供应的局面。如上海,目前已有西气东输一线、东海天然气、进口LNG、川气4种气源,即将引入西气东输二线;到2020年,广东省天然气管网也将出现海上天然气、陆地天然气、进口LNG三大种类九大气源联供的局面。

多气源天然气可显著改善供应的可靠性,但由此带来了互换性和燃具的适应性问题。为解决这个问题,最为可靠的方法就是进行实验。由此引出了如何在实验室内精确配制各种不同组分天然气的问题。

相关国标中对于燃气配制问题已有一些要求。GB/T13611-2006《城镇燃气分类和基本特征》中规定:配制试验气的华白数与给定值的误差应在 $\pm 2\%$ 规定范围内;GB 6932-2001《家用燃气快速热水器》规定:在试验过程中燃气的华白数变化范围应在 $\pm 2\%$ 之内;GB 16410-2007《家用燃气灶具》规定:试验过程中燃气低热值华白数变化范围应在 $\pm 2\%$ 之内。GB/T13611-2006明确规定了用以配制燃气的各单一气体纯度: $N_2$ 不低于99%; $H_2$ 不低于99%; $CH_4$ 不低于95%; $C_3H_6$ 不低于95%; $C_3H_8$ 不低于95%; $C_4H_{10}$ 不低于95%;并且当甲烷、丙烯、丙烷和丁烷供应有困难时,可根据情况分别用天然气或液化石油气代替,但配制试验气的华白数W与给定值的误差应在

± 2%规定的范围内。

图1列出了上海与广东省一些气源的华白数和燃烧势，其整体变化并不大，除LNG富组分外均落在国标12T范围之内（华白数45.67 ~ 54.78MJ/m<sup>3</sup>，燃烧势36.3 ~ 69.3，图1中两条直线中间的范围即为国标中12T的华白数范围。）其中最贫的是川气，最富的是珠海LNG富气（表1）。若按照95%的CH<sub>4</sub>纯度来配制川气和珠海LNG（富），即单一气体CH<sub>4</sub>含有95%的CH<sub>4</sub>和5%的C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>，则配制的川气和珠海LNG（富）之华白数将增加，分别为49.22和53.93，偏差为1.73%和1.3%。显然，若考察不同来源天然气的组分不同所导致的燃气具性能变化，1.73%和1.3%的偏差无法满足实验要求，必须采用精确的配气方法。

## 2 常用配气方法及配气原则

对于多气源天然气的互换性和燃具适应性研究，可考虑传统的三组分配气法和原组分配气法。前者仅保证配制气与目标的华白数和燃烧势相同，后者可保证各单一组分、燃烧势、华白数均一致，但对单一气体的纯度要求较高。

### 2.1 三组分配气

常规的三组分配气法，即用CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>或C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>两组原料气进行配气。碳氢化合物热值和比重都较大、燃烧势较小；H<sub>2</sub>热值和比重较小、燃烧势较大；掺混惰性气体N<sub>2</sub>可调整华白数和燃烧势。利用这3种气体，基本上可配制出与目标气华白数和

表1 广东省两种天然气的组分

	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	H <sub>2</sub>	He	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	华白数 (MJ/m <sup>3</sup> )	燃烧势
川气	97.07	0.15	0.01	0	0	0.03	0.01	2.02	0.71	48.39	38.47
珠海LNG（富）	89.51	5.73	3.25	0.76	0.64	0	0	0	0.11	53.24	41.46

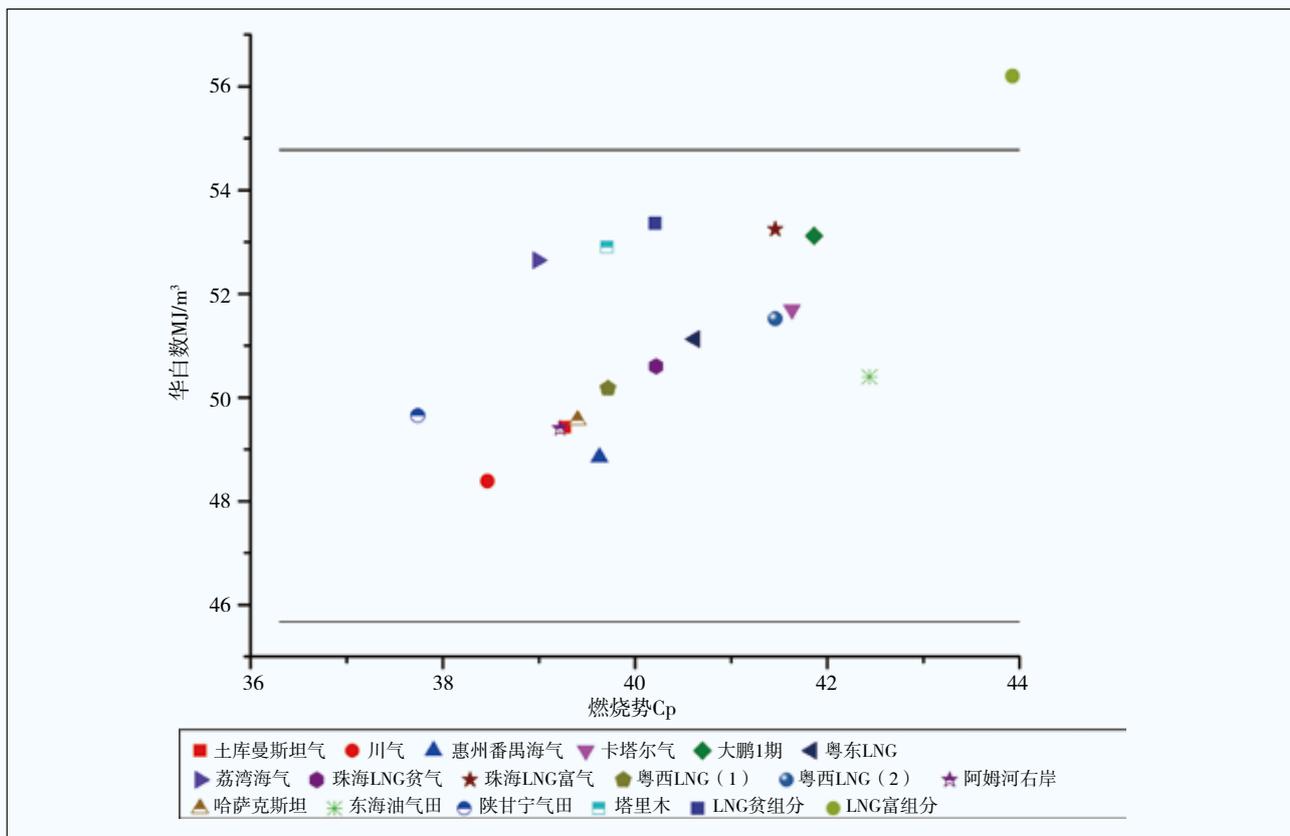


图1 上海和广东省天然气的华白数和燃烧势

燃烧势相同的任何燃气。在实际应用中,有的配制气虽然与目标气华白数和燃烧势相同,但燃烧特性却有较大的差异。

配气计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_o = \frac{H_{C_m H_n} C_m H_n + H_{H_2} H_2}{\sqrt{d_{C_m H_n} C_m H_n + d_{H_2} H_2 + d_{N_2} N_2}} \\ CP_o = \frac{1.0 H_2 + k C_m H_n}{\sqrt{d_{C_m H_n} C_m H_n + d_{H_2} H_2 + d_{N_2} N_2}} \\ C_m H_n + H_2 + N_2 = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中:  $CP_o$ 、 $W_o$ ——目标气的华白数 ( $MJ/m^3$ ) 和燃烧势;  $C_m H_n$ 、 $H_2$ 、 $N_2$ ——碳氢化合物、氢气、氮气体积分数;  $H_{C_m H_n}$ 、 $H_{H_2}$ ——碳氢化合物、氢气的高热值 ( $MJ/m^3$ );  $d_{C_m H_n}$ 、 $d_{H_2}$ 、 $d_{N_2}$ ——碳氢化合物、氢气、氮气的相对密度; 当  $C_m H_n$  为甲烷时,  $k=0.3$ ; 当  $C_m H_n$  为丙烷时,  $k=0.6$ ;

研究资料显示,用  $C_3H_8$ 、 $H_2$ 、 $N_2$  三组分配制天然气,黄焰指数偏差太大,配制气与目标气的试验结果有较大的偏差<sup>[1]</sup>。在这种情况下,怎样判断配制气与目标气是否完全互换是一个必须回答的问题。在此,可考虑使用AGA指数法和Weaver指数法来判断配制气与目标气之间的互换性。

AGA对热值大于  $32MJ/Nm^3$  的燃气互换性进行了研究,得出了离焰  $I_L$ 、回火  $I_F$  和黄焰  $I_Y$  3个指数的表达式。Weaver指数是表征燃气置换时燃烧不正常现象相对倾向性的近似表达,包含热负荷因数  $J_H$ 、引射因数  $J_A$ 、回火指数  $J_F$ 、脱火指数  $J_L$ 、CO生成指数  $J_I$  和黄焰指

数  $J_Y$ 。

下面以西气东输二线的土库曼斯坦气为例说明“三组分配气”。采用  $CH_4$ 、 $H_2$ 、 $N_2$  进行配气计算无法得到同目标气华白数和燃烧势一致的配气计算解。所以,在此采用  $C_3H_8$ 、 $H_2$ 、 $N_2$  为原料气时的配气方法。表2是以  $C_3H_8$ 、 $H_2$ 、 $N_2$  为原料气时的配气结果。表3是以目标气为基准气,配制气为置换气时计算得到的A.G.A指数和Weaver指数。

由表3可知:用“三组分配气法”计算的配制气代替目标气时,黄焰指数和CO指数均不在允许范围内(表格中的红色字体代表超出互换范围),配制气的实验结果和目标气的实验结果势必会有很大的偏差。即配制气不能在黄焰特性和CO特性方面代替目标气。

## 2.2 纯组分配气

可考虑纯组分配气以保证配制气与目标气的华白数、燃烧势以及各单一组分均完全一致。此时,配气成本将大大增加,且常温下呈液态的重烃气体也很难配入。仍以土库曼斯坦气为例。表4给出了每种纯组分的价格,并给出一次配气  $5m^3$  的最小成本。每配制  $5m^3$  的土库曼斯坦天然气,需花费近900元。对于需要大量燃具样本反复测试的天然气互换性研究来说,必须考虑配气方案的经济性。

## 3 管道天然气结合纯组分的配气方法

简单的三组分配气,不能保证配制气与目标气的

表2 “三组分”的配气计算举例

组分	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	$C_5H_{12}$	$H_2$	$CO_2$	$N_2$	Ws	CP
目标气	92.60	3.93	0.33	0.20	0.21	0	1.89	0.85	49.43	39.27
配制气	0	0	56	0	0	9.59	0	34.41	49.41	39.28

表3 目标气与配制气的A.G.A指数和Weaver指数

	A.G.A指数			Weaver指数					
	$I_L$	$I_F$	$I_Y$	$J_A$	$J_H$	$J_L$	$J_F$	$J_Y$	$J_I$
允许范围	$\leq 1.1$	$\leq 1.2$	$\geq 0.86$	0.8~1.2	0.95~1.05	$\geq 0.64$	$\leq 0.26$	$\leq 0.30$	$\leq 0.05$
数值	1.043	1.163	0.701	0.994	1.000	1.107	0.122	0.957	0.098

表4 一次配气成本 (5m³)

气种	价格 (元/瓶)	气瓶规格	纯度 (%)	配5m³气需要体积 (L)	配5m³气体的成本 (元)
甲烷	1 000	40 L (水容积)	99.9	4 629.97	772
乙烷	1 200	40 L (水容积)	99.6	196.73	40
丙烷	600	3 kg	99.95	16.51	58
丁烷	600	3 kg	99.5	9.78	11
氮气	40	40 L (水容积)	100	42.37	0.3
二氧化碳	60	40 L (水容积)	100	94.26	1
总计	882.3元				

燃烧特性完全一致；采用纯组分配气又使得大量实验时的成本很高。在进行天然气互换性研究时，可采用已有管道天然气结合纯组分的方法，在保证配制气与目标燃烧特性基本相同的前提下，尽可能降低实验用纯组分的成本。管道天然气作为配气用原料气，使用前必须测定其组分含量。

由于使用了管道天然气，配制气和目标气的组分往往不会完全一致。此时可用色谱分析仪的精密度来确定每一组分的允许偏差值，并用AGA指数法和Weaver指数法来判断配制气是否可在燃烧特性上完全替代目标气。当配制气中的某种组分与目标气中该组分的偏差在气相色谱仪的精度以内，即认为这种组分

是一样的。表5是GB/T 13610-2003中规定的每种组分浓度允许的偏差值。

仍以土库曼斯坦气为例。表6是按“管道天然气结合纯组分气体”的配气方法计算得到的管道天然气和各纯组分气体的比例以及配制气的组分、华白数和燃烧势。表7是目标气与配制气的A.G.A指数和Weaver指数。

由表6可知：采用“管道天然气结合纯组分”的配气方法可将纯甲烷的使用量减少了一半，采用这一方案配制5m³土库曼斯坦气的成本仅为407元，可大幅度降低试验费用。而且此配气方案保证各个组分的允许偏差均在气相色谱仪的检测精度以内。由表7可

表6 “管道气结合纯组分气体”的配气计算

	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ws	CP
目标气	92.60	3.93	0.33	0.20	0.21	1.89	0.85	49.43	39.27
配制气	92.68	3.98	0.40	0.26	0.03	1.87	0.78	49.42	39.37
管道天然气	93.41	3.58	0.62	0.20	0.05	0.65	1.49	50.04	39.79
配气方案	CH <sub>4</sub> =43.63%, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =2.1%, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =0.07%, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> =0.16%, CO <sub>2</sub> =1.53% 管道天然气=52.5%								

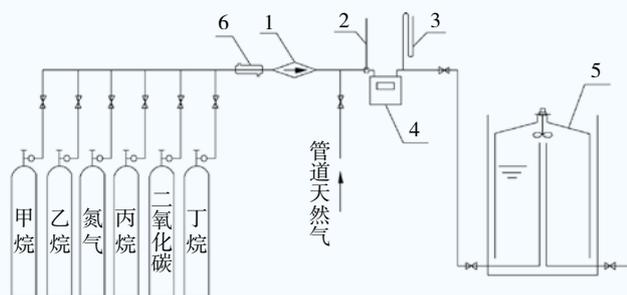
表7 目标气与配制气的A.G.A指数和Weaver指数

	A.G.A指数			Weaver指数					
	I <sub>L</sub>	I <sub>F</sub>	I <sub>V</sub>	J <sub>A</sub>	J <sub>H</sub>	J <sub>L</sub>	J <sub>F</sub>	J <sub>V</sub>	J <sub>I</sub>
允许范围	<=1.1	<=1.2	>=0.86	0.8~1.2	0.95~1.05	>=0.64	<=0.26	<=0.30	<=0.05
目标气为基准气	1.000	1.016	1.008	0.999	0.999	0.999	0.001	-0.004	-0.001
配制气为基准气	1.000	1.016	0.992	1.001	1.001	1.001	-0.001	0.004	0.001

知, AGA指数和Weaver指数均在“完全可互换”范围内, 即配制气可以完全替换目标气。

#### 4 影响配气精度的一些细节

图2为采用上述配气方案时的流程示意图。纯组分气体由钢瓶减压后, 首先经过水浴套管和减压器, 再经膜式燃气表计量, 进入内置搅拌器的5m<sup>3</sup>湿式储气罐。



1 调压器; 2 水银温度计; 3 U形压力计; 4 膜式燃气表; 5 湿式储气罐; 6 水浴套管

图2 配气系统示意图

在配气操作中, 有一些细节会影响最终的配气精度, 简述如下:

(1) 配气管路中的流量计。天然气中甲烷的含量均在90%左右, 其他成分所占比例很少, 有些甚至只有千分之几。此时所需对应纯组分的用量就非常少, 配气流程中用于监测的流量计的量程变得十分关键。

理想情况下燃气表计量误差是零, 但是流量计均存在实际误差曲线。按照设计图生产的一批燃气表, 误差曲线应该是一样的, 但是, 因为实际生产工艺、装配等因素影响, 实际上每一台表的误差曲线是不同的<sup>[2]</sup>。图3为某一膜式燃气表的实际典型的误差曲线, 其中横坐标X轴为检定的流量点, 纵坐标Y轴为相对误差值(%)。

(2) 储气罐中的死体积。每次配气之前都要对储气罐进行清洗工作, 防止上次配气未用完的残气对本次配气造成影响。可用管道天然气进行清洗。但是储气罐内有一定体积的气体始终无法排出, 称为储气罐的死体积。在配气计算中一定要把洗气剩下的死气体计算在内, 否则会出现配气错误。

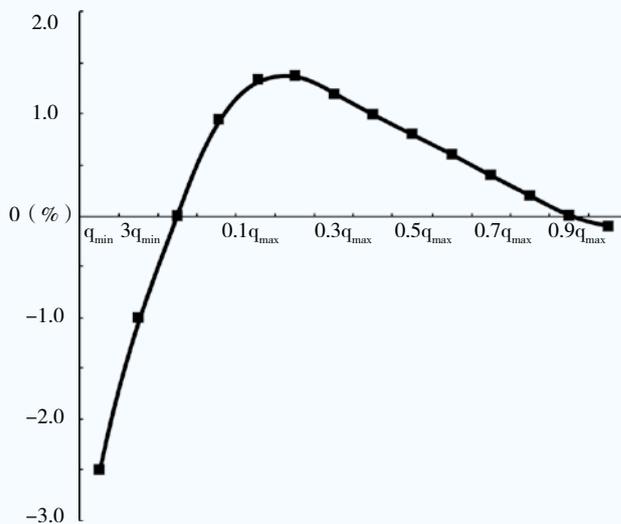


图3 某一膜式燃气表的实际误差曲线

(3) 储气罐中的密封油。湿式储气罐常用水密封, 为避免CO<sub>2</sub>溶解在水中造成不可控制的配气后果, 可在水面上方加注一定量的密封油。由此可避免CO<sub>2</sub>溶解于水的问题, 但造成了所配气体中的重烃组分与密封油之间可能发生溶解和稀释的问题。表8为C<sub>4</sub>及C<sub>4</sub>以上各组分的沸点常数。天然气中重烃的含量很小, 所以分压力也很小, 因此当温度高于5℃时, C<sub>4</sub>(甚至C<sub>5</sub>)都处于气体状态。但当温度低于某组分的液化临界温度时, 该组分就会溶解到密封油中<sup>[3]</sup>。除了C<sub>4</sub>及C<sub>4</sub>以上组分会因为液化与密封油发生溶解现象外, 天然气中的气体组分包括在储气罐实际储存条件下不易液化的C<sub>3</sub>及其以下组分, 在储气罐中也存在溶解释放平衡过程。

表8 天然气中某些成分的沸点常数

项目	沸点常数/°C
丁烷	-0.5
异丁烷	-11.7
正异丁烯	-6.9
反丁烯	0.9
顺丁烯	3.7
异戊烷	29.9
正戊烷	36.1

密封油与天然气的接触面积和接触时间都会影响溶解速度。因而可以通过缩短每次所配气体的使用时

间（即提高单次配气的使用效率）和组分含量相近的气种集中配气来降低所配气各成分在密封油中的溶解程度。

（4）配制气中含水问题。天然气本身不含有水蒸气，但由于储气罐中水分的蒸发导致配制气中含有了一定的水分。在试验测试过程中可利用冰柜对配制气降温、除湿，以显著降低配制气中的水蒸气含量。

（5）进气顺序的确定。由于各原料气的密度不同，在储气罐内存在重气下沉、轻气上升的现象。若进气口在储气罐的下端，应先进重气、再进轻气；反之，若进气口在其上端，则应先进轻气、再进重气。这样在没有罐内搅拌器的情况下，可利用进气过程加强混合，避免出现分层现象。对天然气多气源互换性实验，配气过程中应对每种原料气采用多次进气的方法。阀门开关按要求及先后顺序严格进行。每种原料气在进气管道上的安装先后顺序应该保证进气前管内气体成分和进气完成后管内残留的气体成分相同，并能减小因管路容积造成的配气误差。配气完成后，根据配气量静置2h~8h。如果储气罐内有搅拌器，则在用气前需强制循环混气，此时更利用气体的混合。

（6）配气过程的气相色谱监测。每次配气时，先按照需要的组分，依次进气，但总体积并不是储气罐的容积，而是小于该容积的某个量。在所有组分全部输入、搅拌一段时间后，取样分析最终得到的配制气，根据分析结果来确定是否需要再补充少量的某组分。

## 5 结论

在研究多气源天然气的互换性问题时，可考虑采用传统的三组分配气法和纯组分配气法。前者仅可保证配制气和目标气的华白数、燃烧势相等，并不能保证配制气与目标气在燃烧特性上的一致性。后者需耗费昂贵的纯组分气体，实验工作量较大时，纯组分气体成本巨大。

本文提出了一种将实验室内的管道天然气与纯组分结合的配气方法，以气相色谱仪的精度作为单一组分之间的允许偏差，并辅以AGA指数法和Weaver指数法来判断目标气与配制气的可互换性。经过有针对性的设备改装与操作，可实现低成本、高复现性的配气工艺，用于多气源天然气的互换性实验研究。

### 参考文献

- 1 王启，高文学等.燃气配气的问题探讨[J].中国土木工程学会 城市燃气分会 应用专业委员会 2008年年会论文集，2008
- 2 杨有涛，徐英华，王子刚.气体流量计.中国计量出版社，2007；09
- 3 王海燕等.干式气柜密封油闪点变化趋势及影响因素分析.石油商技，2009；5

## 工程信息

### 广东樟木头燃气规划通过评审

2011年7月29日，《樟木头镇燃气规划2011—2020》通过专家评审。从今年开始，广东樟木头将投入6 000多万元，加快管道天然气的建设步伐，越来越多的市民将告别瓶装气时代，逐步用上安全洁净、价格低廉的管道天然气。

《樟木头镇燃气规划2011—2020》分为近期规划和远期规划，其中2011年至2015年是高

速发展阶段，樟木头在这期间将投入6 512万元，建设LNG储配站和CNG加气站，铺设燃气管网21.5km。届时，管道天然气将覆盖全镇，每个家庭都将用上安全洁净、价格低廉的天然气。预计到2015年，樟木头全镇年用气量达4 519万m<sup>3</sup>，是2010年的7倍。

（本刊通讯员供稿）