

## 预测燃气互换性的各种方法论述 (续)

中国市政工程华北设计研究院 (300074) 李猷嘉

### 3 评述与讨论

燃气工业先行的发达国家,根据自身的需要,对燃气互换性预测问题的研究,经过近百年的努力所达到的水平和取得的成果已如前述。至今还难说哪一种方法已达到了十分完善的程度,原因是其内在的复杂性,发达国家面对众多的燃气用户和类别众多的燃具,已不是一张白纸,可以任意摆弄。我国燃气工业的大规模建设虽刚开始,但导向一定要正确。

#### 3.1 互换性研究的与时俱进和不断发展

从上述各种互换性预测方法的介绍可知,百年来已做了大量的工作,涉及到方方面面。首先涉及的指数是热输入量指数(沃泊指数),它既是一个燃具能力的指标,也是燃具的主要性能指标,是长期运行中必须确保的。典型的简单说明是<sup>⑥</sup>:如果供应的是一种高甲烷含量的燃气,原来使用燃具的情况令人十分满意,即火焰的状况良好,CO的生成量很低;如果在这样的燃气中添加了乙烷和丙烷气,沃泊指数就增大,一次空气引入量虽无变化,但完全燃烧所需的空气量增大了,因而一次空气系数下降,于是在火焰的扩散区需要有更多的空气进入才能完成燃烧过程,由于火焰的拉长,更多的冲击和接触冷的加热器表面,又抑制了伸长的火焰,导致产生更多的CO。实验室工作表明,沃泊指数与CO生成量有直接的关系。沃泊数增加1.5MJ/m<sup>3</sup>(40Btu/cf),CO的生成量会增加1倍。如过分的减小沃泊数,首先也减少了供给的热量,也易引起火焰的稳定问题,并产生离焰(可参看本刊上期P12图4)。这是以沃泊数及其不同表达方式作为单一指

标预测互换性的由来。随着燃气种类的增加,研究范围的扩大,又考虑到气质对喷嘴流量系数的影响,又出现了校正的沃泊指数(德尔布法)和有效沃泊数(霍姆维斯脱法)等。在燃烧特性方面,也开始进行深入和定量的探讨,开始时只涉及与火焰速度有关的火焰稳定性,如离焰、回火,以及用CO代表的不完全燃烧程度。随后又发展到与C原子游离有关的黄色焰端和结碳问题。到上世纪的中期,已有的互换性预测方法(Existing Interchangeability Methods)所涉及的指数有6个,即:热输入量、离焰、回火(即较微回火Light flashback)、黄色焰端(尖)、结碳和不完全燃烧。到上世纪的后期,又考虑到沃泊数变化引起的管网压力变化的问题,出现了压降指数(PDI—Pressure Drop Index),即 $PDI=100 \left[ \left( \frac{W_a}{W_s} \right)^2 - C \right]$ 等。

在关于互换性的术语中,指明沃泊数的含义是在相同的压力下。美国的评论指出<sup>①</sup>:早在100年前就已知道,采用燃具调压器的方法可达到这一目的,但到目前为止,能做到这一点的国家仍为数甚少。

100年来,互换性预测的研究工作者已从不同的角度对燃烧特性的指数作了探讨(见本刊上期P7表1),真是各有千秋,但根据各国气源发展的规律,仍在单一指数和多指数法(包括图解法)之间徘徊。多指数的内容也在不断扩大,如NO<sub>x</sub>的排放指数等正在建立;理论上较为完善的格鲁姆法等,尚停留在燃烧的稳定性的方面,要满足多指数的要求还需时日。从上世纪末到本世纪初,在比较各种方法的基础上,又提出了互换性逻辑框图(In-

terchangeability limit box) 的方法和思路,并在不断的发展中。当前,在节能和减排以及生态、环境的要求日益严格的情况下,决策中的一点差错,都会造成多年(供气合同至少是几十年)的能源损失和环境问题。

当我国的燃气工业发展到一定的规模后,可参考图1(本刊上期P5)所示的美国情况,首先对本国的气源资源以及补充燃气和调峰燃气的情况进行研究,并消化吸收已有的国外方法,做出适合本国情况的研究计划。就我国目前的状况来看,与发达国家的差距甚大,仅从提出图1所示的相同基础资料,还有许多困难,但必须创造条件,急起直追,为研究工作创造条件。

当前国际上又产生了燃气的贸易界和燃气使用界之间的矛盾,贸易界考虑燃气的互换性要求较少,于是争论迭起,在我国也经常听到“能用不能用拿个燃具来试试就行”的流行语。美国总结燃气工业的状况是<sup>①</sup>:“燃气工业现在被非专业人员和其他领域的工程师们用充满委婉的说法所策划以隐藏未经处理的真相”(The gas industry is replete with euphemisms designed to hide the raw truth from the laymen, even to engineers from other fields)。我国的城市燃气长期处于弱势地位,常被各种误导信息和意见相左右,只有加倍努力,才能在短期内逐步改变这种状况。

### 3.2 燃气的互换性预测研究是行业的基础工作

基础研究和试验工作要求十分严格,资金、人员的投入量很大。从发达国家的研究状况看,由于资金原因,试验工作也是时断时续。虽然,研究工作首先要明确目标、范围和方法问题,但在做试验之前,要先制定试验标准和规范,统一试验方法,如,确定试验燃烧器和燃具,即所谓火焰特性指示器(Flame characteristics indicators (Test burner)),包括精密试验燃烧器(Precision test burner)、热导气体分析仪(Thermal conductivity gas analyzer)和空气-燃气比例分析仪(Air-gas ratio analyzer)等,以及其他流量、热值、压力等精密测试仪器和对设备的规定(Equipment specifications)。其次,要有描述火焰特性的规范(Code for Describing Flame Characteristics),如美国规范将火焰分成11个等级<sup>②③</sup>(从-5-0-+5),回火是指轻微回火

(Light flashback)<sup>④</sup>等,且为试验人员所掌握,有统一的认识。再次要根据试验目的规划好置换气的试验气和配制方法的标准;要定出试验环境的标准,如体积的参照状态就有25℃、15℃和0℃等多种,不同条件下的试验结果也不同。记录的数据要有几位同时进行试验的人员签字确认,保证试验结果具有复现性(防止所谓伪造数据)。研究人员均有较高的素质,如美国、英国的许多研究人员均曾在美国资源局(U.S. Bureau of Mines)国际燃烧学会之父刘易斯(Bernard Lewis)领导下工作过。诸如此类的人,财、物等方面的条件均不是一般部门在短期内所能具备的。美国的A.G.A实验室能将试验数据分成4册公开出版,是其过硬之处,详细可参见文献2,3,4,8等。是我们学习的榜样和努力的目标。

### 3.3 现有互换性预测方法的应用

在当前我国尚未对本国气源资源变化作出全面评价和深入进行互换性预测方法的研究之前,只能根据国际上现有的方法开展评估工作。

现有的互换性预测方法都是根据本国的气源状况通过试验实践发展起来的。如果从互换性研究的角度出发,则对每一方法均应消化吸收,掌握其特点和研究人员的思路,以期有所创新;但如果从应用的角度出发,则实际上可用的方法并不多,如果再限于天然气的范围则方法更少。后者在多指数法中以美国的A.G.A36号公告和韦弗法为代表,图解法中则以德尔布法(法国)、修订后的吉-普法(英国)和达顿法(英国)为代表。在天然气组分变化不大的国家,也有仍用单一指数法的。由于互换性的定义各国均一致的,因此在作出气源变化能否互换这一重大预测决策时,通过多种方法的分析比较后再做出结论可以避免重大的错误发生,也可以尽可能的补充做些试验,这是当前比较可行的方法。

值得注意的是,图解法必须按图求解,上述3种方法还只有H类天然气的互换性预测图,L类天然气的尚未见到。由于德尔布法发表较早,当时尚未提出燃气分类中关于界限气的概念,所以图象中没有反映出互换范围与界限气的关系;而修订后的吉-普法和达顿法发表的时间较晚,已说明了互换范围与界限气的关系,概念十分清晰,不会产生误导。互换性预测法作为一种方法没有国际标准。如

上所述, 国际标准化组织 (ISO) 提出制定“质量标识或规定”的要求中, 也只是指出包括天然气的质量参数和互换性的信息, 具体做法由各国自定。

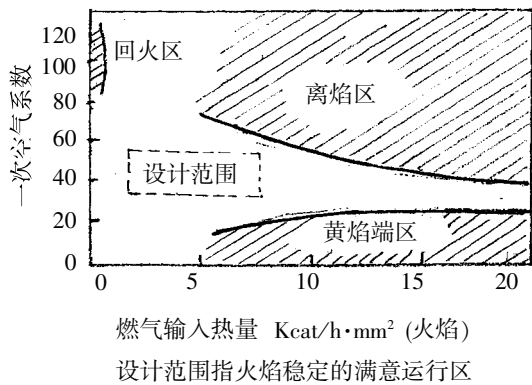


图11 天然气的离焰, 黄焰和回火特性 (燃烧器为单排火孔, 直径2.7mm, 孔道距离6.35mm)

参考文献8中, 在论及互换性原理时, 一开始就希望参考燃烧器的设计要求 (见图11), 提示在互换性研究中讨论几条界限曲线变化时, 不要忘记燃烧器设计工作者所熟知的设计原理, 避免以界限气的范围作为燃烧器设计依据的导向。

燃气互换性预测研究的本质在于对气源燃气质量的要求。在美国11本巨著——GEOP丛书中, 燃气供应卷讨论补充燃气和调峰燃气时涉及到燃气的互换性, 在输气卷中也涉及到, 要求充分了解燃气质量变化对终端用户产生影响的重要性。

## 4 燃气分类与互换性关系中若干问题的考证

### 4.1 初期概况 (1964年前)

作为燃具标识的燃气分类由来已久, 由粗而渐细。上世纪50年代, 已根据燃气的燃烧特性将燃气分成3族; 即第一族为人工气, 第二族为天然气, 第三族为液化石油气。参考文献9中总结了1964年以前的情况。概述如下:

(1) 日本的旧方法: 以C、N、B (p) 分别代表3族燃气 (p为丙烷代号)。每族中各有3类, 涉及的项目有: 燃气组成, 热值和相对密度。

日本的新方法: 以A、B、C代表燃烧速度慢、

中间和快的3族燃气, 每族中也分成若干类, 涉及的项目有沃泊指数 (最大和最小值) 和燃烧势CP值。

### (2) 英国的分类

对第一族燃气, 按吉尔伯特和普里格的互换性预测图分成G<sub>4</sub>、G<sub>5</sub>、G<sub>6</sub>和G<sub>7</sub>4类, 涉及的项目有: 平均沃泊指数和沃泊指数的范围。

### (3) 法国的分类

按沃泊指数将燃气分成3族:

第一族 (4 500kcal/m<sup>3</sup>—9 000kcal/m<sup>3</sup>)。对于按热值为4500kcal/m<sup>3</sup>燃气设计的燃具, 燃气的校正沃泊数W'和燃烧势CP值应位于德尔布互换预测图三角形的极限范围之内 (基准气的W'=6 200; CP=93)。黄焰指数I<sub>1</sub><85; 结碳指数I<sub>ch</sub><160。扩散火焰的稳定性: 含H<sub>2</sub>量<35%。

第二族 (9 000kcal/m<sup>3</sup>—14 000kcal/m<sup>3</sup>)。燃气的W'和CP值应位于德尔布以拉克天然气为基准气的互换预测图范围之内 (参见本刊上期P11图3和P12图4)。火焰的稳定条件: 在某些燃具上, 应避免使用H<sub>2</sub>>10%的燃气。黄焰指数I<sub>1</sub><230, 最好<210, 无结碳指数规定。

第三族 (18 000kcal/m<sup>3</sup>~22 000kcal/m<sup>3</sup>)。因德尔布未对第三族燃气做过互换性预测的研究, 未提出适用范围。

### (4) 其他国家的分类

比利时: 德尔布法, 互换性的允许范围: 沃泊数±5%, CP±10%; 荷兰: 德尔布法, 沃泊数±2.5%; 意大利: 德尔布法, 互换范围按德尔布的互换预测图; 瑞典: 德尔布法及霍姆维斯脱法, C<sub>k</sub>=320±10%, 有效沃泊数587±5%; 西班牙: 沃泊数或诺氏数, 范围为+10%。澳大利亚: 德尔布法、沃泊指数和韦弗测试器; 沃泊数范围±4.5%, CP值70—95。美国: A.G.A法。

从以上燃气分类的初期情况看, 主要是根据当时已有的燃气互换性预测图。如英国的第一族燃气的吉-普法, 法国的第一、第二族燃气的德尔布法, 缺少对第三族燃气的互换预测图。

### 4.2 欧洲共同市场4国的试验气状况 (1964)

1964年。欧洲共同市场发表了法国、德国、意大利和荷兰4国的试验气情况, 首次提出了包括基准气在内的试验气概念。但4国所采用的基准气和

试验气各不相同。例如,对第二族燃气,法国的基准气为 $\text{CH}_4$ —95%, $\text{C}_2\text{H}_6$ —3%, $\text{C}_3\text{H}_8$ —1%, $\text{N}_2$ —1%;德国为 $\text{CH}_4$ —95%,其余为 $\text{N}_2+\text{O}_2+\text{C}_2$ ;意大利基准气为 $\text{CH}_4$ —93.4%, $\text{C}_n\text{H}_m$ —6%, $\text{N}_2$ —0.6%;荷兰基准气为 $\text{CH}_4$ —92%, $\text{N}_2$ —8%。试验气包括的内容有:正常(卫生的)燃烧、回火、离焰、黄焰、结碳等项;参数特性包括试验压力、沃泊数 $W$ 、校正的沃泊数 $W'$ 和燃烧势 $CP$ 值。试验气中回火与黄焰、结碳项,已开始偏离德尔布互换预测三角形的范围,但总的来说仍以德尔布法为依据。

这一时期,互换性的预测研究也有进展。当时欧洲正准备迎接天然气的到来,英国正在由哈里斯-洛弗雷斯(1968)和哈里斯-威尔逊(1974),探索用试验气的方法修订只适用于第一族燃气的吉尔伯特-普里格方法。到1974年已形成并公开公布了图5(见本刊上期P13)所示的互换预测大三角形。这说明试验气的形成也不是偶然的。

#### 4.3 1976年的IGU/E-76报告

1976年,在英国伦敦召开的第13届世界燃气会议上发表了“民用与公用事业燃气分委员会的报告”(IGU/E-76),评述了各国所采用的基准气,其组成比1964年的情况相去甚远。IGU/E-76的译文可详见我国“城市煤气简讯”1978年第四期24—28页;该报告的内容也可参见参考文献7。参考文献9(1978年)认为“现在是否已全部改用1976年发表的新基准还不清楚”。

该报告明显具有燃具标识的性质,除对基准气和试验气有规定外,还有牌号的规定,也是后来成为我国燃气分类标准的重要依据,因此,值得我们进行分析研究。该报告形成了IGU第一族的燃气试验气,IGU第二族燃气试验气和第三族燃气试验气等3个表。报告的主要特点是:燃烧特性栏中仅3个参数,即:燃气的高热值,相对密度和沃泊指数。十分引人注意的是,完全扬弃了以前一直采用的德尔布校正沃泊数和燃烧势 $CP$ 值。

后来,在我国的燃气分类标准中又加上了 $CP$ 值,原因是“燃烧速度计算起来比较麻烦,法国德尔布博士用燃烧速度指数 $CP$ (燃烧势)代替燃烧速度作为一个燃烧稳定性指标。法国、日本等国家都采用这一简化指标”(见1990年3期(总第32期)《城镇燃气标准》中〈城市燃气分类〉标准编制说

明(报批稿)》。改动后,该报批稿中使用的标题仍为“IGU基准燃气及界限气”,使未看到原文的读者觉得这是IGU/E-76的真正文本而确信无疑,从而可能产生误导(沃泊数却未改为校正沃泊数 $W'$ )。

笔者发现这一情况后揣测,扬弃一直沿用的 $CP$ 值的原因可能是:

(1)规定的界限气已超出了德尔布互换预测图三角形的范围,或受到了哈-洛和哈-威互换大三角形的影响,可以与已有的互换方法相脱离(见图5),但图5中的横坐标是韦弗火焰速度因素( $S$ ),所以不再用 $CP$ 值。这就避免了德尔布法一直强调要符合其互换三角形的矛盾;而图5因发表不久,尚未经过检验。

(2)沃泊数与德尔布的校正沃泊数是有差别的,不提校正的沃泊数可以解决状态参照条件上的矛盾。因为法国德尔布的互换预测图是按 $0^\circ\text{C}$ 制作的,与标准中采用的 $15^\circ\text{C}$ 完全不同,可以由读者自审,任何人均无权任意改变德尔布的互换图。

(3)如果在IGU的燃气分类中加上了燃烧势 $CP$ 值,可能会使读者认为用这样的界限气范围来预测互换性就是应用的德尔布法,从而产生误导。

(4)德尔布从未对第三族燃气做过互换性研究,因此以前的燃气分类中从未对第三族燃气引用过 $W'$ 和 $CP$ 值,当然在1976年IGU/E-76的报告中,对第三族燃气也不能引用。

以上是从时间程序上考证燃气分类与互换性的关系,仍为界限气是根据燃气互换性的要求提出的论点提供依据。但这一考证也可能是错误的,可以从1976年至今20余年的燃气分类发展及互换性的研究成果得到佐证。

#### 4.4 1976年—至今的变化

1976年以来,燃气分类中的试验气与互换性预测图中的关系已逐步清晰。

(1)如上所述,鉴于哈里斯-洛弗雷斯和哈里斯-威尔逊的互换性预测图是在英国大规模使用天然气和天然气燃具正式投入使用之前预先制定的<sup>①</sup>,经过几年的实践又发现,规定的互换范围不适用于当时广泛使用的燃具,于是不得不缩小互换范围<sup>②</sup>。1982年对二维互换判定图进行了修正和精细的改进,于是便形成了图6(见本刊上期P13)所

示的对第二族燃气的互换性预测图。这一预测图已十分清晰的表示出试验气与互换范围的关系，两者虽有联系，但概念完全不同。由于历史的原因，也未能再看到德尔布或其继承者提出其互换范围与试验气之间关系的任何信息。

(2) 1978年，达顿 (Dutton) 等人的研究提出了由沃泊数与燃气当量组分构成的二维及三维互换预测图 (见笔者本刊2009.6一文中的图1) 更为详细的说明了试验气与互换范围的关系，不能按试验气的规定范围来进行互换性的预测。

(3) 众所周知，国际燃气联盟 (IGU) 是一个非政府性和非盈利性的国际组织，其所有的意见都是属于参考性的，没有任何法律效果，标准和规范应由各国自己制定。从1976年起，其分委员会的报告也未能再提出任何有关燃气分类和互换性的信息。笔者查阅后得知，美国未参与过去报告的研究工作。

(4) 由于欧盟的建立，希望统一欧洲的燃气市场，开始沿着《燃具导刊》 (“Gas Appliances” Directive C90/396 IEEC) —试验气—天然气的质量标准 (Common Business Practice-Harmonisation of Natural Gas Quality) 的路线，根据欧洲的情况制定为燃具标识服务的燃气分类标准，即EN437，1993年发行第一版。该标准的特点是：

a. 只适用于欧洲标准化委员会 (CEN) 的成员国 (1993年版为18国，2003年版为22国)。该文件是根据欧洲委员会、欧洲自由贸易协会和满足“燃具导刊 (90/396/EEC)” 指令要求的支持所制定的，已明确规定是为燃具标识服务的。

b. 试验气的状态条件规定为 15℃ 和 1 013.25mbar 的干气。试验燃气包括：基准气和不完全燃烧、离焰、轻微回火和结碳的界限气 (无黄端焰项)；试验气的标识号及组分，高、低热值和相应的高、低沃泊数，燃气的相对密度和规定的试验压力，但无W'和CP值等。

c. 文本中从未提到任何互换性预测的问题。术语中界限气的定义与图6和本刊2009.6图1 (笔者一文) 完全相同，而与我国标准GB/T 13611-2006则完全不同。

d. 有燃具类别的标识规定，如 $I_{2H}$ 表示在所供供应压力下，燃具仅适用于第二族H类的天然气； $II_{2H3B,4}$

表示燃具可使用第二族H类的天然气和第三族的丙烷-丁烷混合气。可参阅EN437的原文，其内容十分丰富，值得深入研究。在美国燃气研究院的主持和资助下，也在进行这类标准的综合和研究，包括美国、日本等国以及EN437在内，如日本工业标准 (JIS)，美国的ANSI-Z21等<sup>⑥</sup>，其不同的视野和意见均可参考。

e. EN437和欧洲燃气能量交换合理化协会 (EASEE-gas) 为通过发展和推广燃气质量公共商务准则 (CBP-Common Business Practice)，从而简化风险投资人之间的商业过程而制定的天然气质量标准 (Harmonisation of Natural Gas Quality) 公布后，在欧洲内部所产生的不同意见，笔者在本刊已有介绍和论述，在此不再赘述。

如果IGU/E-76报告中未提到任何互换性预测中所用的方法和指标本来就是为以后制定类似于EN437标准所做的准备工作，则我们把这一报告加上CP值后奉为预测燃气互换性的圭臬，从而产生误导的责任也不能归于IGU/E-76报告，本文所作的论证也就失去意义，但值得吸取教训。

## 5 后记

在燃气工业中，燃气互换性的预测研究是一项重要的基础工作。处理不当会对气源资源的合理利用造成恶化、对环境保护产生不利的或发生不安全的后果。从研究的进程来看，它是与时俱进的，随着科技的进步，不断从粗放到集约，今后还会有进展，且空间很大。因此，密切注意国际上在这方面的进展，很好的消化吸收十分重要。

本文处处提到“预测”两字，英语词汇中用 Prediction 表示，属于轨迹预测一类，笔者看到用同一词汇表达的，还有地震预测，它与常见的天气预报 (Forecasting)，所谓区间预测不同，更不同于一般的定性预测 (Futuring)，需要用刚性指标表示，值得我们注意。

本文主要讨论的燃气互换性的预测方法，并不涉及到燃具的某些运行中的适应性试验 (Operating-flexibility tests) 和燃具的标识标准。原因是这两个问题的内涵也很丰富，各国都有不同的见解，美国燃气研究院也在进行汇总和研究。

限于篇幅，笔者在本文中对近年来出现的互换

性范围逻辑框图 (Interchangeability limit box) 也未作介绍。

文中已写明出处的资料未列入参考文献中。

参考文献

- 1 E.O. Rossbach, S.I. Hyman, P.E. 《INTERCHANGEABILITY: WHAT IT MEANS》 A.G.A Distribution Conference Denver, Colorado, May 22, 1978. Revised July 1984.
- 2 Elmer R. Weaver 《Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases》 Journal of Research of the National Bureau of Standards. Vol. 45, NO.3, March 1951.
- 3 Louis Shnidman 《Gaseous Fuels-Properties, Behavior, and Utiligation》 second Edition, American Gas Association, 420 Lexington Avenue, New York 17, N, Y, 1954. (我国曾有影印本)
- 4 《Interchangeability of Other Fuel Gases with Natural Gases-Research Bulletin number 36》 Conducted Under Supervision of (Committee on Mixed Gas Research) joint Committee of

Natural gas Department and Technical Section. American Gas Association Testing Laboratoris.

- 5 《各种燃气互换性的研究》燃气互换性调查委员会的工作报告—国际燃气互换性委员会, 第八届国际燃气大会, 1961, 瑞典, 斯德哥尔摩。见建筑译丛《城市建设》1966.3 建筑工程部建筑科学研究院技术情报所, 李猷嘉译自俄文版本。
- 6 GEOP (Gas Engineering and Operating Practices) A Series by the Operating Section. 《UTILIZATION》 Volume V, Book U-1 Residential/Commercial. The American Gas Association Arlington, Virginia 1994.
- 7 姜正侯主编.燃气工程技术手册.同济大学出版社, 1993.
- 8 E.J. Weber 《Interchangeability of Fuel gases》 Gas Engineers Handbook. 12/239-252. New York Industrial Press (1965)
- 9 浦镛修.预测煤气互换性图解法的探讨.城市煤气简讯, 第9期城市煤气情报网编.1978.9.10.
- 10 A.G.A. Interchangeability program Catalog NO. XH9301 Copyright 1993 American Gas Association.

·广告·

粘贴式 地下管线标志牌



- 采用新型耐磨高分子聚合材料制作, 嵌入式文字图案, 清晰美观, 经久耐磨。
- 配备专用胶粘剂, 粘贴于城市各种路面, 粘贴强度高, 施工简便。已在众多城市应用多年。

南京夜视丽公路标志材料有限公司

地址: 南京市铁心桥恒丰园工业区  
 电话: 025-52454809 (传真) 手机: 13305195806  
 E-mail: njhongli@sohu.com http://www.njysl.com