

# 埋地燃气管道泄漏失效与数据库研究进展

郑文茹, 杜翠薇, 刘智勇, 李晓刚, 李月强  
(北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** 从埋地燃气管道泄漏失效和管道数据库两个方面论述了燃气管道事故的研究现状。并分别从事故原因、泄漏检测以及风险评估三个角度对燃气管道泄漏失效事故研究展开讨论;同时,通过总结国内外已有管道数据库的结构和功能,指出我国发展管道数据库的必要性和重要性。

**关键词:** 燃气管道;失效分析;泄漏检测;风险评估;管道数据库;结构和功能

中图分类号: TG174; U177 文献标志码: A 文章编号: 1005-748X(2013)08-0723-04

## Research Progress in Leakage Failure and Database of Buried Gas Pipelines

ZHENG Wen-ru, DU Cui-wei, LIU Zhi-yong, LI Xiao-gang, LI Yue-qi

(Institute of Advanced Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The researches on gas pipeline accidents are discussed based on the leakage failure of buried gas pipelines and the pipeline database. The leakage failure of gas pipelines is studied in terms of the accident causes, leakage detection and risk assessment. The structure and functions of pipeline database at home and abroad are summarized, and the necessity and significance for developing the pipeline database are pointed out.

**Key words:** gas pipeline; failure analysis; leakage detection; risk assessment; pipeline database; structure and function

随着全球管道建设的发展,国内外燃气管道失效事故屡见不鲜。美国在 1999—2010 年间共发生 2840 起天然气管道失效事故,加拿大近 20 年间的油气管道干线年均事故数达 30~40 起<sup>[1]</sup>,欧洲输气管道事故数据组织(EGIG)统计 1970—2004 年间输气管道事故高达 1123 起。我国管道建设虽起步较晚,但失效事故也屡有发生。1970—1990 年,四川气田共发生 108 起输气管道爆裂事故,而仅在 1994 年 3 月 1 日至 1995 年 3 月 30 日间我国就发生了 8 起压力管道重大事故,造成 56 人死亡,直接经济损失达 2304 多万元。燃气管道失效事故具有易发性和严重性,极易造成人员伤亡和经济损失<sup>[2-6]</sup>。BP (British Petroleum)世界能源统计年鉴统计数据,2011 年中国大陆地区天然气的消费量为  $30.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,居世界第四。我国天然气消费量急剧增长极大促进了我国燃气管网的建设发展。因此,开展

燃气管网泄漏研究,实现快速、准确分析管道事故原因,并及时采取有效措施,一直是燃气企业追求的目标,也是政府和人民的关心所在。

针对管道泄漏的研究,目前国内外已取得了一些成果,主要有燃气管道泄漏失效事故原因分析和对策、燃气管道泄漏检测以及风险评估等。同时,为更好地进行管道泄漏事故的处理与预防,国外的一些学者在燃气管道泄漏研究的基础上已开始着手建立管道数据库,为开展燃气管道泄漏事故研究提供大量的可靠数据,但国内这方面的研究还很少,亟需进一步发展。本文根据燃气管道泄漏失效研究的发展,拟从管道泄漏失效(包括管道泄漏事故分析、管道泄漏检测和风险评估)和管道数据库发展现状两大方向进行分析和讨论。

## 1 燃气管道泄漏失效

### 1.1 燃气管道泄漏事故分析

城市地下燃气管道多采取直接埋设方式,管道受周围环境及调压站、阀门井等设施影响,存在着泄漏隐患。综合考虑各方面因素,本文将燃气管道泄漏事故的原因总结为以下几个方面:

收稿日期:2012-09-18

基金项目:公益性行业科研专项(201010025-03);科技基础性工作专项(2012FY113000)

通信作者:杜翠薇,教授,博导,dcw@ustb.edu.cn

(1) 第三方破坏 第三方破坏主要有以下三种形式<sup>[7]</sup>:①某些单位施工时,在不明管道埋设位置或了解位置却未能避开管道施工,在进行挖、钻、铲等操作时人为损坏燃气管道而导致燃气泄漏;②建筑施工大面积开挖,使管道失去基础支撑,从而引发管道断裂泄漏;③重型机械在埋有燃气管道的路面行驶,或在管道上方地面违章堆积重型器物,从而造成燃气管道承受过重的冲击和挤压,受力不均引起管道断裂漏气。相关研究表明,第三方破坏是燃气管道泄漏最主要的原因,近些年第三方破坏作为直接原因的事故发生率已超过60%<sup>[7-8]</sup>。

(2) 腐蚀 燃气管道发生腐蚀穿孔的主要形式包括以下四种<sup>[7,9]</sup>:①外壁防腐蚀保护层由于施工质量或外来破坏等原因形成破损,使管壁外部与土壤环境直接接触,发生化学和电化学腐蚀;②阴极保护失效或不足造成的管壁腐蚀;③内部传输介质中腐蚀性成分造成的管壁腐蚀;④发电站、变电站、矿山、铁路等场所电气设备漏电接地,在土壤内形成杂散电流循环,造成管道发生杂散电流腐蚀。

腐蚀是引发管道泄漏的原因中次于第三方破坏的重要原因之一。相关统计表明,腐蚀作为直接事故原因的概率为7%~10%。此外,腐蚀会减小管壁的强度并降低其抵御外部破坏的能力。由此可见,腐蚀是管道泄漏失效事故的一个重要间接原因,同样严重威胁着管道运营安全。

(3) 管道缺陷 管道缺陷分为管道制造缺陷和管道施工缺陷两种。管道制造缺陷主要包括材料本身的质量缺陷、焊缝缺陷,以及施工过程中由操作者、承包商或第三方引起的凹痕或划痕等机械损伤缺陷。管道施工缺陷是指管道铺设过程中环向焊接导致的缺陷、弯曲、折皱,以及铺设时造成的表面划伤等。

(4) 自然因素 自然因素包括季节变化因素和自然灾害。季节变化因素表现在低温使管材脆性增加,加之温度变化引起管道附近土层的冰冻或解冻、膨胀、升降,导致燃气管道受外力作用而发生损坏<sup>[9]</sup>。自然灾害包括暴雨引发的地面塌陷致管道悬空受力断裂,地震将管道震裂,泥石流、滑坡致管道受力变形、断裂、设施损坏等。

(5) 老化 设施老化或维护不及时造成泄漏事故,如密封圈老化失效致接头处漏气;管道超过使用年限,材料老化,发生腐蚀穿孔、断裂等。

(6) 违章操作 违章操作主要是管网在新投

运或检修时现场施工人员的不规范作业,管线未竣工或停运后进行的盲目投运,以及用户使用不当,私自改接、维修等。

## 1.2 燃气管道泄漏检测与风险评估

管道泄漏的检测和定位方法。根据测量媒介可分为直接检测法(直接检测燃气泄漏)和间接检测法(检测泄漏引起的流量、压力、声音等物理参数的变化)<sup>[10-11]</sup>。直接检测法主要有直接观察法<sup>[12]</sup>、泄漏检测电缆法<sup>[12]</sup>、空气取样法<sup>[13]</sup>等。现今国际上采用的直接检测新技术有美国手持式检测器RMLD(Remote Methane Leak Detector)、基于FTIR(Fourier Transform Infrared)的扫描成像光谱测定法、美国利用管道磁通量漏损装置(Magnetic Flux Leakage)——智能清管器检测<sup>[14]</sup>等。间接检测法主要包括质量平衡法、压力波分析法、实时模型法、统计检漏法等<sup>[15]</sup>。间接检测新技术有荷兰壳牌(Shell)公司的Zhang提出的一种气体和液体管道的统计检漏法<sup>[16]</sup>、美国的Ferrante等提出的采用小波分析的检漏方法等<sup>[17]</sup>。

燃气管道的风险评估始于20世纪70年代,美国借鉴其他领域的风险分析技术来评价油气管道的风险性。1985年,美国Battelle Columbus研究院发表了《风险调查指南》,在管道风险分析上运用了评分法<sup>[18]</sup>。1992年美国Muhlbauer编著《管道风险管理手册》,详细介绍了管道风险评估模型和评估方法,是目前世界上最具权威性的燃气管道风险评估手册。我国的燃气管道风险评估,开始于1995年潘家华全面介绍美国的《管道风险管理手册》。

国内有研究针对腐蚀缺陷管道风险进行的有限元模拟<sup>[19]</sup>。该研究采用线弹性有限元模型对管道腐蚀缺陷参数进行计算分析,得到腐蚀缺陷管道内压、缺陷厚度以及缺陷处应力间的关系,从而对腐蚀缺陷管道进行了初步的风险评估。

我国燃气管道风险评估起步较晚,目前的主要目标是获取真实可靠的原始数据,建立我国特有的风险因素和定量风险评估概率模型。其中,获取真实可靠的原始数据是实现目标的基础,因此,建立全国性的数据库系统、丰富燃气管道的运行数据势在必行<sup>[20]</sup>。

## 2 管道数据库发展现状

美国、加拿大和西欧等国家和地区都十分重视管道事故数据的收集和统计。美国运输部管道安

全办公室、美国管道危害物质安全运输管理办公室、欧洲输气管道事故数据库、加拿大能源局等,本着创建全球共享数据库的原则,对所属地区管道事故数据进行了收集整理,并建立起相应的管道数据库,为进一步开展管道事故深入分析研究提供了大量基础资料。

欧洲地区 6 家气体输送公司于 1982 年发起了一项收集管道输送系统意外事故数据的活动。1992 年,8 家西欧主要气体输送管道系统的公司参与了这项活动;到 2005 年,12 家欧洲主要天然气管道公司加入了这项活动,成立了欧洲输气管道事故数据库(EGIG)。对 1970—2004 年间该组织范围内所属输气管道进行了事故调查和统计,共调查管道  $2.77 \times 10^6$  km,统计事故 1123 起。在此基础上,EGIG 建立了失效管道数据库,为提高管道安全性提供了丰富的信息资源。

美国于 20 世纪 90 年代末起着手建立数字化 GIS(地理信息系统)数据库,即全美管道绘图系统(NPMS)。GIS 数据库包含全部的地理空间信息,数据涉及美国海陆天然气管道、液化天然气设施和有害液体介质管道的地理位置及相关属性<sup>[21-22]</sup>。2013 年美国有 800 万美元预算用于建立国家管道信息交流系统,扶持 PHMSA 开发出管道安全信息综合数据库。加拿大国家能源委员会(NEB)本世纪初的统计数据显示,近 20 a 加拿大年均管道失效事故数目为 30~40 起,而腐蚀和应力腐蚀在加拿大输气管道失效事故中占有很高比例<sup>[23]</sup>。基于上述情况,加拿大能源管道联合会(CEPA)建立起应力腐蚀数据库,收集了广泛和详细的应力腐蚀资料,为管道失效事故的分析研究提供了大量数据,促进了现役管道的安全评价发展,减少了事故发生的可能性。

我国在管道数据库建设方面起步较晚,目前正面临着数据凌乱、缺乏规范的统计方法等问题。中国的国家质量监督检验检疫总局、中国特种设备检测研究院以及中国石油天然气管道局等单位,开展了管道失效事故数据调查分析的相关工作。魏立新等<sup>[24]</sup>应用 SQL Server2005 和 VisualC#, .NET 软件建立了油气混输管道数据库,开发出的数据库管理平台分为计算、数据库查询、数据库维护、系统维护四大模块,存储用户、管道、油气、生产、环境和材料 6 类信息,能够实现管道数据的录入、修改、删除和查询,同时具有温度、压力的计算和修正等功能。这些工作的展开,为我国建设较完整的管道数

据库奠定了基础。

孙成等<sup>[25]</sup>在油气储运公司现有的地面数据库资料基础上,根据石油天然气行业标准 SY/T0087—1995《钢质管道及储罐腐蚀与防护调查方法标准》,进行了资料分析和现场调查,补充、增加了腐蚀损伤度、外防腐涂层、外加电流阴极保护效果评价等相关信息,开发建立了腐蚀与防护基础数据库,结构如图 1 所示。在此基础上,还建立了腐蚀与防护信息系统的分析评价与预测系统,根据管线运行年限、防腐涂层绝缘电阻值、防腐涂层类别、管体状况、保护状况等检测数据及历史数据,运用趋势预测数学模型对管线防腐涂层老化趋势进行预测,为用户对管道现状作出及时、准确的处理提供了依据。

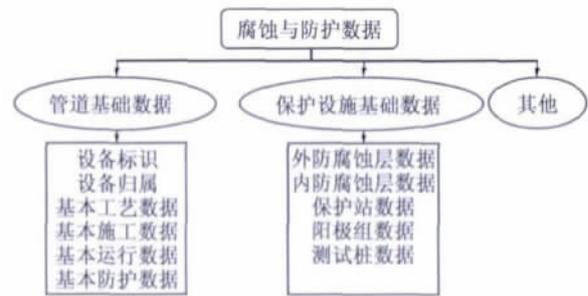


图 1 腐蚀与防护基础数据库结构

此外张福涛等人<sup>[26]</sup>开发了胜利油田管道腐蚀数据库。数据库结合胜利油田管道腐蚀与防护的现状和需要,采用 Access 软件建立,用 ASP 技术访问,用 VB 实现管道寿命预测功能。胜利油田管道腐蚀数据库主要由网站、数据库和预测分析三个系统组成。数据库系统包括腐蚀结果、腐蚀试验、国家标准、文献查询、腐蚀类型、材料性能和腐蚀防护六个分数据库。预测分析系统可通过“选择参量”和“输入数据”,计算出用户选择的服役管线腐蚀剩余寿命。

目前,国内针对燃气管道失效事故的数据库建设研究仍然较少,已有的数据库研究多存在定义缺乏统一规范、信息不够全面等问题,无法为我国管道泄漏事故研究提供可靠的资料标准平台。全面调查统计管道失效事故数据,建立起全国范围的管道失效数据库,能够为管道失效事故的分析 and 诊断提供基础数据资料,指导实际工程中管道的设计、铺设、维修等工作。此外,管道完整性管理概念的提出及其发展、应用,为提高管道运行安全性掀开了崭新的一页,而管道完整性管理需以 GIS 和数据库为基

础<sup>[23,27-28]</sup>。由此可见,管道失效数据库的建立,对于减少管道失效事故和防止类似事故的重演,保障管道企业的正常生产、国家能源的安全供应,保护人民的生命财产安全和促进我国管道事业的发展都具有非常重要的现实意义。

### 3 结束语

(1) 燃气管道事故起因可划分归纳为第三方破坏、腐蚀、管道缺陷、自然因素、管道老化以及违章操作等六个因素。其中,第三方破坏、腐蚀、管道缺陷是管道事故中重要的直接原因。由于腐蚀会降低管道抵御外来侵害的能力,使之成为管道安全中一个重要的潜在威胁因素。燃气管道一旦泄漏不仅造成重要经济损失,更会威胁管道安全,因此,对运行中的燃气管道需进行定期的泄漏检测,一旦发现问题应尽快处理和维修,尽可能减少不必要的损失和危害。此外,为了防范于未然,要对管道可能存在的危险因素进行评估。目前燃气管道的风险评估方法主要包括定性法、定量法以及综合法。

(2) 我国在燃气管道失效事故数据统计方面虽已起步,但开展较晚,面临数据凌乱、统计方法缺乏规范等问题。在管道事故数据调查统计分析的基础上,开发建立信息较为健全的管道失效数据库,为事故的防范及事故调查研究提供基础数据,可以有效减少和防止管道失效事故的发生,对管道的实际工程、工作具有重要的指导意义,同时,对于保障管道企业的正常生产,保障国家能源的安全供应,保护人民的生命财产安全和促进经济发展,也都具有非常重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 李鹤林. 油气管道失效控制技术[J]. 油气储运, 2011,30(6):401-410.
- [2] 杨清蓉. 韩国大邱市管道煤气爆炸事故的启示[J]. 煤气与热力, 1996,16(1):29-33.
- [3] 孙立国,周玉文. 埋地燃气管网泄漏规律及其次生灾害预防研究[J]. 煤气与热力, 2010,30(1):38-42.
- [4] 尤秋菊,朱伟. 地下燃气管网事故的致因理论分析[J]. 煤气与热力, 2010,30(4):30-33.
- [5] Montiel H, Vilchez J A, Amaldos J, et al. Historical analysis of accidents in the transportation of natural gas[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 51(1):77-92.
- [6] 徐妍. 地下燃气管道漏气原因分析及对策[J]. 城市管理与科技, 2005,7(2):72-74.
- [7] 魏军甫,徐姜,李帆. 城市燃气管道泄漏的原因分析与对策[J]. 煤气与热力, 2004,24(2):105-107.
- [8] 孙安娜,安跃红,段常贵,等. 地下燃气管道第三方影响事故树模型[J]. 煤气与热力, 2005,25(1):1-5.
- [9] 刘宝荣,王丹. 城市燃气管道泄漏成因分析及对策[J]. 安全科学技术, 2006,8(4):17-20.
- [10] 廖可兵,周荣义,刘爱群. 城市燃气管道泄漏检测方法探讨与评价[J]. 工业安全与环保, 2001,33(2):27-29.
- [11] 李军,玉建军. 燃气管道泄漏检测技术探讨[J]. 安全, 2007,8(1):11-13,17.
- [12] 李文军,王学军. 油气管道泄漏检测与定位技术的现状及展望[J]. 炼油技术与工程, 2005,35(9):49-52.
- [13] 常景龙,李铁. 输气管道泄漏检测技术的选择和优化[J]. 油气储运, 2000,19(5):9-13.
- [14] Mandayam S, Udpa L, Lord W. Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images[J]. NDT&E International, 1997,30(5):297-303.
- [15] 李军,徐永生,玉建军. 燃气管道泄漏检测新技术[J]. 煤气与热力, 2007,27(7):56-59.
- [16] Zhang X J. Statistical leak detection and liquid pipelines[J]. Pipelines International, 1993, 33(7):26-29.
- [17] Ferrante M, Bruno B. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests[J]. Advance in Water Resources, 2003,26(1):107-116.
- [18] 高文学,李建勋,王启,等. 故障树分析法在城市燃气管道安全评价的应用[J]. 煤气与热力, 2009,29(12):B29-35.
- [19] 张伟,王勇,毕凤琴,等. 腐蚀缺陷管道风险评估有限元模拟研究[J]. 腐蚀与防护, 2007,28(12):652-654,656.
- [20] 孙永庆,张晓庆,张峥,等. 我国燃气管道风险评估现状、差距及对策[J]. 天然气工业, 2004,24(5):113-115.
- [21] 张然,戴钧,何涪. 长输管道安全管理方法和技术发展简述[J]. 化学工程与装备, 2010,39(6):228-229,227.
- [22] 史志彬. 油气管道安全评价综合数据库的建设[J]. 油气田地面工程, 2008,27(5):57-58.
- [23] 赵新伟,李鹤林,罗金恒,等. 油气管道完整性管理技术及其进展[J]. 中国安全科学学报, 2006,16(1):129-135.
- [24] 魏立新,蒋华莎. 油气混输管道数据库管理平台开发[J]. 管道技术与设备, 2010,18(3):6-8.
- [25] 孙成,齐文元,林文孚,等. 地下管道腐蚀与防护数据库及预测系统[J]. 全面腐蚀控制, 2010,24(9):35-40.

(下转第 738 页)

分公司在此情况下未监测到明显腐蚀,可能与高温下管线内结焦形成保护层有关。

### 5.3 321/304 材质

288 °C 以下,321/304 材质管线的腐蚀速率 $\leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;温度更高时腐蚀速率有所增加,但并不明显。根据 API581,酸值 $\leq 3.0 \text{ mg KOH} \cdot \text{g}^{-1}$ 、硫含量 $\leq 1.5\%$ 、360 °C 以下时 321 材质的腐蚀速率 $\leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,监测值与估计值基本相符。

API581 同时指出,流速大于  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,高温、高流速情况下环烷酸腐蚀将明显加剧,腐蚀速率要放大 5 倍。茂名 321 材质的部分常压高速转油线,温度 360 °C、流速接近  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,腐蚀速率可达  $0.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2008 年底已更换为 316L 材质。因此茂名常压转油线的监测值与估计值也基本相符。

321/304 材质在低流速下耐腐蚀性较好。但用在常、减压转油线等高流速部位则腐蚀严重,因此高温、高流速部位应使用 316L 材质。也有企业发现 304 材质用做 290 °C 左右减三中线的高温管束腐蚀严重,需升级到 316L。

### 5.4 316L 材质

316L 材质的高温管线未监测到明显腐蚀减薄,高温、高流速的常、减压转油线也腐蚀轻微,绝大部分 $\leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。少数转油线腐蚀速率介于  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  之间,但完全满足使用要求。根据 API581,对于低流速的高温管线,400 °C 以下腐蚀速率 $\leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,监测值与估计值基本相符。

考虑到已有加工高酸原油的企业在运行一个周期后发现减压塔及填料腐蚀严重,减压转油线有明显的点蚀和冲刷腐蚀,因此建议装置每次停工时都应进行仔细检查。

## 6 结论

(1) 20# 钢在温度超过 220 °C 时即可发生明显腐蚀,220~240 °C 的管线实际监测腐蚀速率可达  $0.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 288 °C 以下 321 和 304 材质的腐蚀速率 $\leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,与 API581 估计值相符,满足加工高酸原油的需要。288 °C 以上高温、高流速的转油线中腐蚀明显,需升级到 316L。

(3) 288 °C 以上选用 316L 材质基本能够满足加工高酸原油的需要,监测管线的腐蚀速率与

API581 估计值基本相符。但在气液冷凝部位如减压塔腐蚀案例较多,有的企业减压转油线也发生了明显腐蚀,因此装置每次停工时都应进行仔细检查。

(4) 焦化装置的高温管道一般为 Cr5Mo 材质,加工高酸原油对其有明显影响,应做好腐蚀监测。部分 340~365 °C 的 Cr5Mo 管线发生了明显腐蚀减薄和非均匀腐蚀,应升级到 18-8 或 316L 材质。

致谢 本工作得到中石化炼油事业部和四家企业很多领导和专家的大力支持和帮助,在此表示感谢!

### 参考文献:

- [1] Slavcheva E, Shone B, Turnbull A. Review of naphthenic acid corrosion in oil refining[J]. British Corrosion Journal, 1999, 34(2): 125-131.
- [2] Tebba S, Kane R D. Assessment of crude oil corrosivity[C]//Corrosion 98, Houston: NACE International, 1998: 578.
- [3] Kane R D, Cayard M S. A comprehensive study on naphthenic acid corrosion [C]//Corrosion 2002, Houston: NACE International, 2002: 02555.
- [4] Groysman A, Brodsky B, Pener J, et al. Low temperature naphthenic acid corrosion study[C]//Corrosion 2007, Houston: NACE International, 2007: 07569.
- [5] Dettman H D, Li N, Luo J. Refinery corrosion, organic acid structure, and athabas bitumen[C]//Corrosion 2009, Houston: NACE International, 2009: 09336.
- [6] 梁春雷, 陈学东, 艾志斌, 等. 环烷酸腐蚀机理及其影响因素研究综述[J]. 压力容器, 2008, 25(5): 30-36.
- [7] Dean F W H, Powell S W. Hydrogen flux and high temperature acid corrosion [C]//Corrosion 2006, Houston: NACE International, 2006: 06436.
- [8] API 581 - 2008 Risk-based inspection technology [S].

(上接第 726 页)

- [26] 张福涛, 鲁玉祥, 王炳英, 等. 胜利油田管道腐蚀数据库的开发[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2004, 21(5): 55-56.
- [27] 董绍华, 杨祖佩. 全球油气管道完整性技术与管理的最新进展[J]. 油气储运, 2007, 26(2): 1-17.
- [28] 李力耘, 姜晓红, 付桂英. 我国油气管道的完整性管理[J]. 油气储运, 2005, 24: 54-56.