

小化眉穿越杂环国

杨德红*, 王坤, 周婉婷†, 李冰†, 冯晓†, 张振明†, 张光慈†, 乔付淇†

中原工学院材料与化工学院, 郑州 450007

摘要: 芳香性是芳烃和芳杂环等芳香族物质的特性, 是有机化学课程中的一个重点和难点。论文以苯和杂环化合物的结构和性质为基础, 加以天马行空的想象, 妙趣横生地讲述了大学生小化眉穿越杂环国, 变身苯公主, 和吡啶、吡咯、呋喃、噻吩四王子一起, 带着丫鬟环戊二烯、书童哌啶和四氢呋喃, 组成八人团, 在万众瞩目下, 顺利通过选拔赛, 获得芳香国选派资格的故事。旨在用生动活泼的方式在类比中加深读者对芳香性的本质、判断依据、芳烃和芳杂环结构、性质及应用的理 解, 引领读者进一步思考芳香性在发展过程中所蕴含的科学思想, 并提醒人们关注芳香族化合物的社会影响。

关键词: 芳香性; 芳香族化合物; 判断依据; 科学思想; 社会影响

中图分类号: G64; O62

Xiaohuamei Travels across Heterocyclic Countries

Dehong Yang*, Kun Wang, Wanting Zhou†, Bing Li†, Xiao Feng†, Zhenming Zhang†, Guangci Zhang†, Fuqi Qiao†

School of Materials and Chemical Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China.

Abstract: Aromaticity is the characteristic of aromatic substances such as aromatic hydrocarbons and aromatic heterocycles, which is both important and difficult in the organic chemistry courses. Based on the structure and properties of benzene and heterocyclic compounds, coupled with wild imagination, this paper wittily tells the story of the college student Xiaohuamei traveling across the heterocyclic country and transforming into princess benzene, forming an eight-member group with the four princes of pyridine, pyrrole, furan and thiophene, the maid cyclopentadiene, the pageboy piperidine and tetrahydrofuran. With the attention of the public, they successfully passed the graduation defense and obtained the qualifications of the aromatic country. The aim is to deepen readers' understanding of the nature, the judgment basis, the structure and properties, as well as application of aromatics and aromatic heterocycles through analogy in a lively way, lead readers to further understand the scientific thought in the development process, and remind people to pay attention to the social impact of aromatic compounds.

Key Words: Aromaticity; Aromatic compounds; Judgment basis; Scientific thought; Social influence

教室里化学老师正在绘声绘色地描述凯库勒先生如何在半梦半醒间参悟出苯分子环状结构的神奇历史, “瞌睡虫”小化眉听得入迷, 大眼睛盯着那幅衔尾蛇图像, 一眨不眨, 只见越来越清晰的蛇, 突然高速飞舞、旋转起来, 让人眼花缭乱到眩晕, 仿佛一股强大的魔力袭来, 瞬间就把人卷入

收稿: 2021-02-24; 录用: 2021-05-07; 网络发表: 2021-05-21

*通讯作者, Email: ydh@zut.edu.cn

†2018 级本科生

基金资助: 2020 年河南省本科高校“战疫”类课程思政样板课建设项目; 2020 年河南省高等学校优秀基层教学组织项目; 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS141)

到深不见底的黑暗中……

醒来的小化眉，化身苯公主，穿越到了杂环国，带着丫鬟环戊二烯，在信科大学堂已经游学三年整了，接下来的一年是毕业实习时间，优秀学子会被选派到芳香国参加新人鉴定会，将有机会和学术大咖们一起迎候新的芳香国成员。今年化学专业选派的人员基本确定下来：苯公主，还有来自杂环国的四位王子吡啶、吡咯、呋喃和噻吩。常伴四位王子身边的是哌啶和四氢呋喃两位书童。

牛年大吉，正逢天资聪颖的苯公主及笄之年，也是风神超群的杂环四王子的弱冠之秋。学校决定大年三十晚上在大礼堂为公主王子们隆重举行成人礼仪式，同时还要对他们进行选拔资格答辩，据说能力达不到的无法胜任芳香国的工作，外派资格会被取消，所以公主和王子们格外重视今晚的活动。

晚上八点，能容纳万人的大礼堂灯火通明，座无虚席，还有巨大的显示屏悬吊四周。想想教授团(表1)、八人团(图1)的撼人阵仗和迷人风采，那魅力谁人能挡？大家对这场大学堂独有的“春节联欢会”翘首以盼。

表1 论文中先后出场的教授团成员展板

成员	身份	相关贡献	成员	身份	相关贡献
Aroma	会议主席	虚拟专家	Baird	加拿大化学家	1972年，贝尔德规则
Faraday	英国物理学家、化学家	1825年，分离苯	Heilbronner	瑞士化学家	1964年，Möbius芳香性
Arene	副主席	虚拟专家	夏海平	厦门大学教授	2019年，芳香性新分类
Fullerene	副主席	虚拟专家	席振峰	北京大学教授、院士	2017年，螺芳香性
Heterocycle	副主席	虚拟专家	吴继善	新加坡国立大学教授	2018年，全局芳香性
韩婴	西汉诗人	韩诗外传	Anderson	牛津大学教授、院士	2020年，纳米级全局芳香性
汪炼成	中国当代学者	2021年，六方之美	Erlenmeyer	德国化学家	1866年，化学判据
王荣民	西北师范大学教授	1998年，五元、六元环结构	陶涛	南京信息工程大学教授	2020年，芳香性进展
Hoffmann	德国化学家	1979年，金属苯	Katritzky	美国化学家	2001年，芳香性概念多维度
Amart和Robinson	英国化学家	1925年，六电子体	蔡德诚	中国当代学者	2016年，科学精神六要素
Kekulé	德国有机化学家	1865年，Kekule式	王钦宏	天津工生所研究员	2019年，生物传感器
Hückel	德国物理化学家	1931年， $[4n+2]$ 规则	邓晔	生态环境研究中心研究员	2019年，生物降解



图1 八人团成员

一曲“追梦之路”的悠扬声线在空中弥漫开来。聚光灯下，苯公主身着一袭白色曳地晚礼服，头头发髻高耸，手牵丫鬟，迤逦前行。

片刻间全场鸦雀无声，紧接着掌声四起，尖叫声不断。会议主席Aroma再三问候大家，现场终于安静下来。

“苯，还记得我吗？”主席台上Faraday首先招呼苯公主。

“当然，先生！当年正是您把我从煤焦油中分离出来，世人才能一睹我容颜，从此开启我石油化工行业宠儿的开挂人生。”苯公主莞尔一笑。

“好浓的芳香味道！真乃国色天香浑然成。”Arene调侃道。

“天生丽质难自弃。很多苯系物都有类似冬青油、茴香油和香草等芳香气味。但是人们现在关注的焦点不再是我们表层的味道，而是我们内在的独特气质——芳香性。芳烃家族中的不少成员也是没有芳香体味的。”苯公主俏皮地应答。

“先自我介绍一下？”Arene顺势追问。

“大家好！我是来自芳烃家族的苯，我是苯系物的母环。除了煤焦油，在原油、香烟烟气或者火山爆发、森林火险之中都有我的影子闪烁。六碳六氢组合成我神奇的正六边形平面结构，高度的对称性让我成为大自然的完美杰作，人称我为苯公主。我有很高的不饱和度，稳定性超级强，烯烃、炔烃没得比，化学性质表现为易取代、难加成、难氧化。这就是我的芳香性。我还是应用广泛的有机溶剂和稀释剂，黏合剂、油性涂料、油墨等都离不开我。”苯公主落落大方。

“芳烃成员在结构上分单环、多环和非苯类，具体介绍一下应用？”Fullerene接着引导。

“甲苯、乙苯、二甲苯、三甲苯、联苯、萘、蒽、菲、蒎、苯并芘等，都是我的苯系姐妹；非苯成员有代表性的18-轮烯、薁、环戊二烯负离子、环庚三烯正离子，这些都属于经典全碳体系；而富勒烯更是家族新贵，在超导、太阳能电池、纳米电子器件、催化、生物医药、化妆品等方面性能优异，应用前景广阔。芳烃属于石油化工的基本产品和基础原料，广泛用于合成树脂、合成纤维、合成橡胶、合成洗涤剂、增塑剂、染料、医药、香料、农药、专用化学品等，其生产技术水平是一个国家石油化工发展水平的重要标志，对发展国民经济、改善人民生活起着重要的作用。此外，芳烃还常用作工业溶剂、汽油添加剂，还是卫生球之类家用产品的主要成分。如果再说到我的表亲们——苯甲醇、苯甲醛、苯甲酸等这些含有苯环的衍生物，那应用几天几夜都说完了，比如苯甲酸和苯甲酸钠是使用极其普遍的防腐剂，不仅在酱油、泡菜、苹果酒、果汁、饮料等食品中很常见，还常用在药物、化妆品、牙膏、香粉、烟叶等物质中^[1]。”苯公主如数家珍、娓娓道来。

“芳香性可以描述环状化合物的特殊稳定性，是芳烃家族成员的共性。除了上述物质，还有哪些具有芳香性？”Heterocycle循循善诱。

“芳杂环！”苯公主兴奋地说。

“杂环化合物是芳香国里非常庞大且重要的一支，其分子中有环状骨架且骨架上有杂原子，最常见的杂原子是氧、硫、氮。90%以上药物和60%以上的有机化合物为杂环化合物，比如为生命提供能量的糖类、为绿色植物进行光合作用的叶绿素、为高等动物体内输送氧的血红素、对DNA的复制起重要作用的核酸等物质^[2]。”看着苯公主侃侃而谈，Aroma微笑颌首。

“杂环国里稳定又常见的单杂环，来看这几位，掌声有请吡啶、吡咯、呋喃、噻吩四位王子！”Heterocycle话音未落，场上人声鼎沸起来。

四位王子高冠博带，一字排开，在两位书童护佑下，恍若仙人，飘然而至。

“请四位王子做自我介绍！”Aroma教授发出指令。

“大家好！我是吡啶，六元芳香含氮单杂环，主要生活在煤焦油、骨焦油和页岩油中。我是生产橡胶、染料、助燃剂、消毒剂、调味剂和粘合剂的原料，还用于制造维生素、磺胺类药、杀虫剂及塑料等。我的许多衍生物是维生素或酶的重要组成部分，还有的是重要的药物，如一线抗结核病药异烟肼家喻户晓^[3]。”

“我是噻吩，五元芳香含硫单杂环，存在于煤焦油和页岩油内，广泛应用于农药、医药以及光学材料中。其实我在许多场合可代替苯公主，做制取染料和塑料的原料，也可用作溶剂。贝尔实验室不久前发现我的聚合物还能制成各种超导塑料，应用于航空、航天、军工等高科技领域^[4]。”

“Hi! 我是吡咯，五元芳香含氮单杂环，天然存在于煤焦油及骨焦油中，我对环境友好，可降解，以我为原料合成的农药受人关注。我还是血红素、叶绿素、胆汁色素、某些氨基酸、生物碱及酶的基本结构单元，如维生素B₁₂就含有氢化吡咯环。我被氧化后还被制成柔性导电高分子薄膜^[5]。”

“大家好！我是呋喃，五元芳香含氧单杂环，普遍存在于各种热加工食品中，是工业上常用有机合成原料和溶剂^[6]。人们常用的呋喃类药物有10多种，如治疗肠胃炎的痢特灵就是硝基呋喃类抗生素。”

王子们说得头头是道，声音清润，冰敲玉打，悦耳动听。

“凡草木之花多五出，雪花独六出。”诗人韩愈摇头晃脑地吟诵怎么显得这么不合时宜呢？观众一脸茫然。

“花开五瓣，雪花六瓣。大家仔细看台上，公主王子丫鬟书童，这八位真乃天人之作，在化学结构上他们不正是五边形、六边形吗？”Heterocycle为大家释惑，台下顿时豁然。

“天上人间，几何万千，常见圆和方。简约、灵动、实用、对称、稳定、多面，唱绝六方之美。”汪炼成^[7]进一步阐明。

“自然万物在漫长的进化历程中，选择并造就了许多美妙的具有五、六边形的几何体作为永恒的造型。正如蜜蜂巧夺天工的蜂窝全由正六边形构成，对生命活动至关重要的很多有机化合物，普遍存在五、六元环；某些有机反应的中间体、过渡态也以五、六元环形式存在。”王荣民等^[8]锦上添花。

“Why? Why? Why?”教授们打趣地问。

“因为角张力小，五、六元环结构稳定，我是六元环(五元环)!”八人团异口同声地回答。

“公主王子和丫鬟书童，自成两组，区别在哪里？”Hoffman问。

“公主王子具有芳香性，我们没有芳香性。”丫鬟书童拎得清。

“两个小组在结构上有啥不同呢？”Armit和Robinson不约而同地问。

“我们都是平面、单环结构，不同点在于公主王子都是六电子体，有离域大 π 键的存在， π 电子数符合 $4n+2$ 规则。我们没有这样的大 π 键呀。”丫鬟书童有点急眼。

“公主王子这六电子体又如何区分？”Kekulé问。

“我们虽然都有六电子大 π 键，但是这6个电子的来源不同。我和苯是六元环，环上6个原子各提供1个电子填充在p轨道中，共轭形成 π 键；我的环上氮原子的孤电子对不参与共轭，畅游在 sp^2 杂化轨道内，显示碱性。而吡咯、呋喃和噻吩是五元环，环上的4个碳原子各提供1个电子，杂原子(氮、氧、硫)提供1对电子，形成大 π 键^[1]。”吡啶王子抢答。

“ π 电子数符合 $4n+2$ 规则的平面、共轭、闭合、单环结构最适用休克尔规则了。你们应用得非常好！”Hückel忍不住夸赞。

“休克尔规则是最经典的判断芳香性的理论依据。公主王子们在书本上主要学习的经典全碳体系和芳杂环的芳香性就是借助它来完成的，它非常适合传统芳香性物质的二维面芳香性判断。而今芳香性这一概念的使用范围在不断扩大：从苯系物到非苯系物，由中性分子到离子，由碳环到杂环，再到不含碳的全无机环状物^[9]，……”Heterocycle这话匣子一打开，教授团立马像炸了锅。

“其实人们早就发现还存在 π 电子数符合 $4n$ 规则的反芳香结构。”Baird大声说。

“含 $4n$ 个 π 电子的Möbius拓扑环具有Möbius芳香性。”Heilbronner更具体。

“与Hückel芳香性相对应的应该是Craig芳香性，而Möbius芳香性只是Craig芳香性中的一类。”夏教授针锋相对^[10]。

“同芳香性！螺芳香性！”席教授喊道。

“三维全局芳香性！”吴教授继续补充。

……

“哇，这么厉害！”公主王子还有观众们对芳香性的新发现和科学家们的新成就^[11-13]惊叹不已，

顶礼膜拜的眼神与大咖们交互碰撞，霎时雷鸣般的掌声如排山倒海般涌来。

“芳香性表述芳香国成员的行为特征。时代进步了，科技手段日新月异，芳香族的队伍不断壮大，芳香性的内涵和外延也在发展，从平面到立体，从局部到全局，从芳香到反芳香，再到同芳香、螺芳香，突破传统芳香性的新颖芳香性成员纷至沓来。芳香性主要表现在：具有独特的化学反应性能、热力学稳定性和光谱性质。芳香性不仅可以解释芳香体系的结构特点、成键特征及稳定性，还可以预测物质反应的方向和指导新功能物质的合成，比如在光电材料领域就大有作为，巨大芳香环类具有成为微纳环超导材料应用到量子计算机上的潜力^[12,14]。”Anderson言简意赅。

“了解芳香性概念的发展历史、作用，理解芳香性的本质和判断依据，认识芳香性物质有哪些物种和重要用途，芳香国又增加了哪些新成员，这是芳香国子民的基本素养。接下来我们继续讨论芳香性的判断依据，请公主王子们结合自身状况陈述。”Aroma发出新指令。

“ π 电子的高度离域会使芳香性物质环内的键长趋于平均化。键长平均化程度越高其芳香性就越强，我的键长完全平均化，所以芳香性最强。C—C、C—N、C—S、C—O的标准键长与苯、吡啶、噻吩、吡咯和呋喃分子中相应的键长之差值，其大小可以用来判断键的平均化程度，差值越大说明键的平均化程度越高，反之越小。据此计算出公主王子们相对应的差值分别是0.014、0.013、0.011、0.009、0.006，所以我们的芳香性大小顺序为苯>吡啶>噻吩>吡咯>呋喃^[15]。”苯公主充满自豪。

“电子离域能是共振杂化体与最稳定的共振结构之间的能量差。电子离域能高，环共轭体系稳定性高，芳香性大；反之，稳定性低，芳香性小^[16]。苯、噻吩、吡咯、呋喃的电子离域能($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)分别为150.6、150.6、121.1、88.7、66.1^[15]，据此排出芳香性大小顺序为苯=吡啶>噻吩>吡咯>呋喃，我和苯公主数据一样出人意料，其实我的芳香性不如苯！”吡啶王子乃谦谦君子。

“核独立化学位移(NICS)可以作为衡量芳香性的指标，非常直观也使用最广泛。可用于判断各种具有环状离域电子体系的芳香性和反芳香性^[17]。NICS数值大于0时具有反芳香性，等于0时非芳香性，小于0时体系才具有芳香性。NICS数值含义为设定的不在原子核位置上的磁屏蔽值的负值，值越小，表明对磁场屏蔽越强，其芳香性越强。噻吩、吡咯和呋喃的一组NICS值^[18]分别是-19.8319、-14.7369、-12.6821，所以芳香性大小顺序为噻吩>吡咯>呋喃。”噻吩王子奋勇争先。

“杂原子与碳的电负性越接近，五元杂环的芳香性越强。碳原子的电负性为2.5，噻吩、吡咯和呋喃的杂原子硫、氮、氧的电负性分别为2.5、3.0、3.5，因此芳香性顺序为噻吩>吡咯>呋喃^[19]。”吡咯王子唯恐落后。

“芳香性的化学判据是取代反应比加成反应更易发生！”呋喃总是垫底，答得有气无力。

“论芳香性，苯公主和吡啶王子比较强。但是，若论环上的亲电取代反应活性，吡咯、呋喃和噻吩三位王子要高得多！”Erlenmeyer爱说公道话。呋喃王子顿时神采飞扬起来。

“公主王子们从结构判据、能量判据、磁性判据和反应判据这四个角度对芳香性进行了比较，主要是对常见平面单环结构芳香性的判断。你们在大学阶段能掌握这些内容已经相当优秀了。实际上这些判据都不是普适性的，都有局限性。环硼氮烷中B—N键键长均为0.143 nm，萘分子中C—C键长并不完全相等，但是萘比环硼氮烷更具有芳香性，所以键长完全平均化的不一定芳香性就好。富勒烯 C_{60} 有立体芳香性，化学性质出人意料：易加成、不易取代。因此对于复杂结构最好联合使用这些判据会比较科学，单一的方法不免粗浅和武断，会影响结果的准确性。”陶教授点评。

“芳香性是一个多维度的概念，单方面的定义或衡量标准都是片面的。”Katritzky强调。

“芳香性或许是某些轨道的特征而非环状分子骨架整体的特征。”夏教授总能语惊四座。

“芳香性发展至今还存在模糊性和不确定性，并没有形成公认的科学定义，因而蜕变成芳香国经久不衰、历久弥新的话题，而不断催生的新物质、新方法和新理论正在揭示这一概念的存在价值和超凡魅力，由此芳香国才得以繁荣昌盛并生生不息！”Aroma总结。

“芳香性的发展史告诉我们：事物都是在不断发展变化的，人类的认知水平也是如此。由浅入深、由表及里、去粗取精、去伪存真，层层递进，步步深入，直到能够准确揭示出事物的本质和规

律,科学的探索历程大抵如此。科学精神可以归纳为六要素:客观的依据、理性的怀疑、多元的思考、平权的争论、实践的检验、宽容的激励。科学发展正是得益于科学理论严密的逻辑性和科学界公正、谦虚和理性的态度。这又何尝不是人类智慧的骄傲和荣光?”蔡先生善于升华^[20]。

掌声如潮。

“接下来我想我们应该讨论一下芳香族对社会的巨大影响,刚才公主王子们对芳烃和芳杂环的应用总结得很全面了。其实人们的衣食住行都离不开我们芳香族的贡献,估算有上千亿美元的市场价值。同时我们还必须认识到事物都有两面性:比如很多食品在热加工过程中,糖、抗坏血酸、脂肪酸、维生素等成分易发生美拉德反应和氧化降解反应,产生呋喃,而呋喃具有致癌风险,这会引发健康忧患。”Aroma话锋一转,教授们七嘴八舌热议起来。

“苯更厉害,是一类致癌物。苯进入人体变身高活性环氧苯,然后代谢为苯巯基尿酸和苯酚类等物质,作用于DNA进而引起细胞功能异常最终导致肿瘤发生。失火、烧荒、抽烟、烟熏、烘烤、焙焦及油炸食品等会产生多种多环芳烃。最富盛名的当属苯并芘,与许多癌症有关,一包烟中的含量大约0.32 μg 。其实以萘、蒽、菲为代表的相当一部分多环芳烃并不致癌,但是它们的衍生物通常具有高致癌性。”

“人们主要通过化学合成和转化生产获取芳香族化合物,而这一过程会产生比较大的环境污染。”

“生态环境中芳烃污染的主要源头:炼焦、石化、燃料、制药、农药、油漆等工业及化石燃料的燃烧排放。”

“芳香族物质尤其是多环类的,水溶性低、难降解且存在诸多‘三致(致癌性、致畸性和致突变性)’因子,由此带来的环境问题正在成为一个棘手的世界难题。”

“有没有好的解决办法?”观众们高声喊道。

“构建微生物细胞工厂实现生物制造芳香族化合物是一种创新和绿色的工业生产方式,而目前生物制造方法研究的目标聚焦在快速准确地找到生产芳香族能力最强的细胞,我们设计的生物传感器可以解决这一难题。”王钦宏研究员信心满满。

“微生物在降解芳香族化合物过程中发挥重要作用,宏基因组学技术的出现极大地促进了研究工作的深入。微生物降解芳香族化合物安全高效、环境友好,是目前最有前途的治理环境污染的方法。”邓教授拨云见日。

“很多人谈苯色变,甚至见到带苯环结构的物质都害怕,这是偏见。苯公主的社会贡献有目共睹,而且像多巴胺、甲状腺素、某些维生素和氨基酸类,还有阿司匹林、扑热息痛和阿莫西林等很多药物都有苯环结构,生活中几乎人人都离不了。自然界中广泛存在的木质素也是稳定的苯环结构。”Arene平心静气地说道。

“对,如果不是聪明的真菌想办法降解木质素,地球上的碳循环将难以为继,我们熟悉的世界就不能完美呈现。生物修复技术好比一把闪光的金钥匙正吸引着科学家们砥砺前行^[21-23]。未来需要你们!也属于你们!”Heterocycle语重心长地说道。

“公主王子和我们的教授团表现都很棒!感谢你们带给大家的这场科学盛宴!投票结果出来了,公主王子全部通过选拔!可以去芳香国报到了!这是送给公主王子们最好的成人礼物!答辩会圆满结束!”Aroma教授最后陈述。

欢呼声不绝于耳,馆内气氛走向高潮。想到明天就能离开校园,到心心念念的芳香国去见识那些美妙绝伦的芳香新成员,苯公主心里乐开了花,不觉笑出了声……

“小化眉,你来给同学们总结一下芳香性的相关内容。”被同桌狠踩了一脚,猛然惊醒的小化眉终于弄清状况:不好!老师准是又看到我睡觉了。不过今天的问题可难不倒我呢。

参 考 文 献

- [1] 高占先. 有机化学. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [2] 张文勤. 有机化学. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [3] 吡啶. [2021-02-18]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%90%A1%E5%95%B6/2220692?fr=aladdin>
- [4] 张鹏兵. 噻吩的溴化反应研究(硕士学位论文). 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [5] 吡咯. [2021-02-18]. https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_CN_CB3852794.htm
- [6] 郝雅茹, 闫苍, 李书国. 食品科技, **2021**, 46 (1), 69.
- [7] 汪炼成. “芯”基建-21: 六方之美: 确认过眼神, 你是我想撩的“形”. (2021-01-12) [2021-02-18].
https://www.sohu.com/a/443960460_120873446
- [8] 王荣民, 何玉凤, 沈邦国, 王云普, 李树本, 魏邦国. 化学教育, **1998**, No. 3, 44.
- [9] 严兢, 宋寅, 彭德高, 李珉. 大学化学, **2007**, 22 (1), 33.
- [10] 夏海平. 关于芳香性重新分类的思考//中国化学会. 第13届全国物理有机化学学术会议摘要集. 第13届全国物理有机化学学术会议, 南昌, 2019年10月25-27日. 南昌, 2019: 9.
- [11] 华煜晖, 张弘, 夏海平. 有机化学, **2018**, 38 (1), 11.
- [12] 黄宝磊, 孙昊, 李欣烨, 范雨亭, 陶涛. 芳香性概念的最新进展. (2020-11-26) [2021-02-20].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1815.O6.20201126.1213.002.html>
- [13] 封继康. 分子科学学报, **2005**, 21 (4), 1.
- [14] 王巧英. 芳香化合物芳香性大小的实验测定及其实验判据(硕士学位论文). 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
- [15] 赵瑜藏, 张运申. 信阳师范学院学报(自然科学版), **2000**, 13 (3), 292.
- [16] 孙喜龙, 许世生. 张家口师专学报(自然科学版), **1997**, No. 6, 68.
- [17] 侯晓燕. 富勒烯C₃₈及其衍生物的芳香性和动力学稳定性研究(硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
- [18] 付伟伟, 邝代治, 张复兴, 庾江喜, 蒋伍玖. 化学教育, **2013**, 34 (6), 55.
- [19] 姚子鹏, 任平达, 高翔. 大学化学, **1999**, 14 (2), 56.
- [20] 蔡德诚. 质疑、争论是鉴别真伪的利器. [2021-04-20]. <http://www.hybsl.cn/beijingscankao/beijingfenxi/2016-04-12/58158.html>
- [21] 哨米. 芳香化合物: 致不致癌看结构. [2021-04-20].
https://zhuanlan.zhihu.com/p/60128144?edition=yidianzixun&utm_source=yidianzixun&yidian_docid=0LYfk1Hv
- [22] 季岩. 中科院天津工生所研发芳香族化合物高灵敏“感应器”. (2019-03-26) [2021-04-15]. http://news.022china.com/2019/03-26/284723_0.html
- [23] 厉舒祯, 邓晔, 张照婧, 曲媛媛. 中国环境科学, **2019**, 39 (6), 2577.