

# Theoretical Study and New Concept of Microwave Catalytic Chemical Reaction

Zhaoxi Hu<sup>1,2</sup>, Xuanping Yang<sup>2</sup>, Wenxiang Hu<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Jingdong Xianghu Microwave Chemistry Union Laboratory, Beijing Shenjian Tianjun Academy of Medical Sciences, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Xianghu Science and Technology Development Co., LTD., Beijing

<sup>3</sup>Space Systems Division, Strategic Support Troops, Chinese People's Liberation Army, Beijing  
Email: \*huwx66@163.com

Received: Feb. 27<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 13<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 20<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Macrowave finds wide application in our daily life. In this paper, the theory of microwave catalytic chemical reaction and some new concepts in the field of catalysis are discussed. Three leaps of catalytic technology, application of new concepts such as physical catalysis, combined catalysis, relay catalysis, simultaneous catalysis, inert catalysis, solvent catalysis and precise catalytic control will cause revolutionary changes and development in the field of catalytic chemistry. The popularization and application of various combined catalytic methods, whether or not its mechanism has been profoundly clarified, will have a wide and far-reaching influence in chemistry and related fields.

## Keywords

Microwave Catalysis Theory, Physical Catalysis, Combined Catalysis, Relay Catalysis, Simultaneous Catalysis, Precise Catalytic Controlling

---

# 微波催化化学反应理论研究及催化新概念探索

胡墨玺<sup>1,2</sup>, 杨萱平<sup>2</sup>, 胡文祥<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>北京神剑天军医学科学院京东微波化学联合实验室, 北京

<sup>2</sup>北京祥鹤科技发展有限公司, 北京

<sup>3</sup>中国人民解放军战略支援部队航天系统部, 北京

Email: \*huwx66@163.com

收稿日期: 2020年2月27日; 录用日期: 2020年3月13日; 发布日期: 2020年3月20日

---

\*通讯作者。

## 摘要

微波在日常生活中获得了广泛应用。本文研究了微波催化化学反应的相关理论及探讨了某些催化领域的新概念。催化方法技术的三次飞跃,以及物理催化、组合催化、接力催化、同时催化、惰性催化、溶剂催化 and 精准催化控制等这些新概念的运用,必将引起催化化学领域的革命性变化和发展。多种组合催化方法的推广应用,无论其机理是否得到深刻的阐明,将在化学及其相关领域产生广泛而又深远的影响。

## 关键词

微波催化理论, 物理催化, 组合催化, 接力催化, 同时催化, 精准催化控制

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

微波化学作为化学领域中一门新兴的交叉边缘学科,具有快速高效、操作简便、节能降耗、处理过程中不会产生二次污染物等诸多优点。近三十多年来,微波等离子体化学、微波无机、有机、分析、材料化学等各方面进展十分迅速,在未来更将方兴未艾,蓬勃发展,前景可期,将有力推动相关领域的科技进步[1] [2] [3] [4] [5]。

人类用加热来促进物质的变化起源于炼金术时代,而微波加热方式与千年的传统加热方式不同,微波将能量直接作用于被加热物质,一般情况下空气和器皿基本上不会损耗微波能量,这保证了能量的快速传递和充分利用。

我国微波化学的开拓者北京祥鹤科技发展有限公司及国内外一些公司现有敞开式、密闭式、回流式、管道流动式四类几十种不同类型的微波反应仪器装置,并已进入清华大学、北京大学、澳门大学、台湾大学及南非、日本、美国等国内外 2000 多家实验室,并将逐步进入药厂、化工厂和其他有关企业。

微波有机合成化学与微波药物合成化学没有本质的区别,只是后者对象限制在药物和生物活性分子及其中间体等范围内[6] [7]。当然会有些特殊的研究方法,如微波氘标记方法及后来我们发展的微波组合化学等方法技术。

微波化学的应用研究在国内外发展非常迅速,而微波化学的理论研究落后了许多,现在该是迎头赶上的时候了。当然,微波化学理论研究需要电磁场与物质相互作用理论、热力学和动力学理论、统计学理论、量子化学理论及数值模拟技术等多领域的专家通力合作,才有可能到达微波化学理论的光辉顶点。

## 2. 微波催化化学反应机理

微波是指频率为 300~300,000 Hz 范围内的电磁波,介于红外线和无线电波之间,是一种传播方向与电磁场振动方向相互垂直的横波,和超声波等机械波(纵波)与物质分子的作用机理(拉伸和压缩局部空气或液体——空穴效应)完全不同。

民用微波频率一般采用 2450 MHz,所对应能量大约为 0.96 J/mol,能量属于范德华力(分子间作用力)

的范畴，与化合物键能相差甚远。

微波催化化学反应一般机理的形象描述：微波是一种非离子化辐射能，与物质相互作用主要是两种方式：极性分子在微波电磁场中快速旋转和离子在微波场中的快速迁移。由于微波的频率与分子转动的频率相当，微波的能级恰好与极性分子的转动能级相匹配，当它作用于分子上时，促进了分子的转动运动，微波能可以被极性分子迅速吸收，产生瞬时极化，并以 2.45 亿次/秒的速度做极性转换运动，产生化学键的转动、撕裂和粒子之间的相互摩擦、碰撞并发热，从而与平动能发生自由交换，使活化分子能量增加、反应活化能降低，进而使物质反应活性大为提高，反应速度大大加快[8]。

微波萃取有机药物有效成分的一般机理：微波辐射过程是高频电磁波穿透萃取介质，到达物料的内部维管束和腺胞系统。由于吸收微波能，细胞内部温度迅速上升，使其细胞内部压力超过细胞壁膨胀承受能力，细胞破裂。细胞内有效成分自由流出，在较低的温度条件下萃取介质被捕获并溶解，通过进一步分离，便获得萃取物料。另一方面，微波所产生的电磁场加速被萃取部分成分向萃取溶剂界面扩散速率，例如用水作溶剂时，在微波场下，水分子高速转动成为激发态，这是一种高能量不稳定状态，或者水分子汽化，加强萃取组分的驱动力；或者水分子本身释放能量回到基态，所释放的能量传递给其它物质分子，加速其热运动，缩短萃取组分的分子由物料内部扩散到萃取溶剂界面的时间，从而提高萃取速率，同时还降低了萃取温度，最大限度保证萃取的质量[9] [10]。

### 3. 微波催化化学反应的热力学研究

一般说来，反应时间比较长、体系比较容易达到热平衡状态，反应产物较多的是热力学控制的稳定产物，即低能量状态的产物；反之，反应时间比较短、常有局部过热效应的反应，除生成稳态产物外，也可以比较容易生成次稳态的产物，微波催化化学反应属于后一种情形的居多，许多情况下属于动力学控制。

#### 3.1. 微波催化焓效应和熵效应

根据热力学公式：

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

其中， $\Delta H$  为热效应， $\Delta S$  为熵效应，反应自由能  $\Delta G$  等于反应焓  $\Delta H$  减去温度与熵之积  $T\Delta S$ 。

一般说来，热效应就是与温度相关的效应，非热效应是与温度关系不大的效应。

早在 2003 年由科学出版社出版的《协同组合化学》专著中，我们已将微波的热效应对应于热力学的焓效应，将微波的非热效应对应于熵效应，这样可以阐明许多反应的机理[11] [12]。

#### 3.2. 分子温度与胡氏不等式

自 1985 年本实验室和 1986 年 Gedye RN 等实验室分别报告了微波辐射在有机化学反应中的应用以来，微波辐射在有机化学中的应用得到了蓬勃的发展。然而，微波加速有机化学反应的机理，却一直存在较多争论。

一种观点认为：微波化学反应加速反应原理主要归于微波辐射对极性分子的选择性加热，即微波的热效应。由于微波的热效应，反应体系温度升高，反应物分子运动速度增加，平均动能增加，从而活化能降低，从而加快反应速度。

另一种观点认为：反应物分子吸收了微波的能量，反应分子被激发，能量增高而引起了化学反应，即微波非热效应。由于微波的非热效应，反应体系可在较低温度发生反应，这是常规加热法不能达到的。

### 3.2.1. 分子温度假设

常规加热法中的化学反应，反应体系热平衡后，局部温度和体系温度相等，即： $T_l = T_s$ ，局部分子和体系分子同时越过活化能垒发生反应；微波辐射下的化学反应，存在局部过热现象， $T_l > T_s$ ，局部高温，而体系处于常温或较低温度，局部分子的平均能量可能接近或高于反应活化能，容易越过活化能垒，使反应发生，反应从局部分子开始弥漫至整个体系，宏观上表现为：微波辐射下的化学反应在较低温度下即可进行(其中： $T_s$ 表示整个体系的宏观温度， $T_l$ 表示局部分子的温度)。

用“分子温度”来表征单个分子能量[13]。分子温度  $T_m$  是一个微观物理量，是单个分子动能的标志，微波的非热效应可能是提高了局部单个分子的动能(即分子温度)，而发生化学反应，这个体系的温度没有太大改变。因此，宏观角度上的非热效应在微观角度上也可以归结为局部单个分子的热效应。

值得指出的是：传统热力学包括经典热力学和统计热力学认为：温度是大量分子无规则运动能量的一种量度，而没有单个分子温度的概念。量子力学中的海森堡测不准原理说：不能同时精确测定微观粒子的位置和动量。也就是说，在不要求精确测量位置的情形下，人们是有可能精确测定分子等微观粒子的动量的，从而精确得到分子等的能量，因此得到单个分子的温度，因此单分子温度概念并不违反量子力学测不准原理。

### 3.2.2. 胡氏不等式

分子温度  $T_m$  是单个分子的动能的标志，是一个微观的物理量；局域温度  $T_l$  是局部分子平均动能的体现；体系温度  $T_s$  是整个体系分子平均动能的体现，是一个宏观的物理量。在一个热平衡的体系里三种温度数字基本相等(可能偶尔有涨落)；在热不平衡的体系里，例如在微波反应体系里，被微波激活的分子温度  $T_m$  大于热点处的局域温度  $T_l$ ，大于体系温度  $T_s$ ，可表示为

$$T_m > T_l > T_s \quad (2)$$

这是微波等物理技术催化有机化学或催化化学中温度关系表达式，这一不等式通常称为胡氏不等式。这能帮助阐明微波或红外或超声波等物理催化手段等加快化学反应的机理，在催化化学中具有重要意义[14]。

## 4. 微波催化化学反应的动力学研究

### 4.1. 活化能理论

根据阿伦尼乌斯活化能理论，反应速率常数  $k$ ：

$$k = A * \exp(-E/RT) \quad (3)$$

热效应对应活化能： $E$ ，非热效应对应指前因子： $A$ 。

### 4.2. 电磁场理论研究

场效应假设：根据麦克斯韦的电磁场理论，某些情况下，电场分能量  $E$  是磁场分能量  $H$  的 377 倍，所以微波热效应往往对应于电场效应，微波非热效应往往对应于磁场的定向等效应。

电磁效应： $E = 377 H$ 。

热效应：往往相当于电场效应；非热效应：往往相当于磁场效应、半导体效应、压电效应、超导效应等。

### 4.3. 共振效应与类光效应假说

共振效应与类光效应假说：微波产生的作用在特定对象情况下，可以产生共振效应或类光效应。所

谓类光效应就是与光类似的化学效应。

一般来说, 能级次序是: 核能级  $\Delta E_N$  远大于电子能级  $\Delta E_e$  大于振动能级  $\Delta E_v$  大于转动能级  $\Delta E_r$  大于平动能级  $\Delta E_t$ 。

$$\Delta E_N \gg \Delta E_e > \Delta E_v > \Delta E_r > \Delta E_t$$

$$10kT \quad 10^{-2} kT \quad 10^{-19} kT \quad (4)$$

这里  $k$  表示玻尔兹曼常数(Boltzmann constant), 是指有关于温度及能量的一个物理常数( $1.380649 \times 10^{-16}$  erg/K)。

微波能量  $E$  与转动能级  $\Delta E_r$  相当:

$$E \approx hv = 6.626 \times 10^{-27} \times 2.45 \times 10^9 = 1.62 \times 10^{-17} \text{ erg}$$

$$\Delta E_r \approx 1/100 \times 1.38 \times 10^{-16} \times 300 = 4.14 \times 10^{-16} \text{ erg}$$

发生类光效应:  $\Delta E_e$  很小; 发生共振效应:  $\Delta E_v$  较小。

#### 4.4. 过渡态理论与微波催化动力学方程

微波催化化学绝对反应速率公式: 依据绝对反应速度理论(过渡态理论), 反应速率常数  $k$  表达式为:

$$k = \exp(-\Delta H/RT) * \exp(\Delta S/R) * RT / (Nh) \quad (5)$$

(5)式中:  $N$  是阿伏伽德罗常数,  $h$  是普朗克常数,  $R$  是气体常数,  $T$  是绝对温度,  $\Delta H$  为反应焓,  $\Delta S$  为反应熵。(where  $h$  is the Planck's constant and  $N$  is the Avogadro's number.)

可得微波催化的动力学方程反应速率常数  $k$  表达式:

$$k = A * \exp(-\Delta E_h / RT) * \exp(-\Delta E_n / RT) \quad (6)$$

(6)式中:  $\Delta E_h$  表示热效应能级, 一般情况下, 等于反应焓  $\Delta H$ ;  $\Delta E_n$  表示非热效应能级, 一般情况下, 等于反应熵负值与温度之积 ( $-T\Delta S$ )。

一般情况, 由于热效应能级  $\Delta E_h$  较小, 对应于转动能级, 不易发生反应, 需要积累达到一定程度甚至热平衡状态, 热效应占主导地位; 当非热效应能级  $\Delta E_n$  足够小时,  $\Delta E_n \ll \Delta E_h$ , 在这样的特定条件下, 则非热效应占了主导地位, 例如, 对于微波功率比较小, 低温下的含氧、氮或羟基、氨基或胺基的共轭体系等, 电子能级或振动间隔较小, 或者固体能带间隔小, 较易产生非热效应[15] [16]。

## 5. 溶剂效应与溶剂催化

### 5.1. 溶剂极性

溶剂极性愈大、介电常数愈大, 吸收微波的能力和能量就愈大, 见表 1 和表 2。

**Table 1.** High, Medium and Low Microwave Absorbing Solvents  
**表 1.** 高中低吸收微波溶剂

High:	DMSO, EtOH, MeOH, Propanol, Nitrobenzene, Formic Acid, Ethylene Glycol.
Medium:	Water, DMF, NMP, Butanol, MeCN, MEK, Acetone, Nitromethane, DCE, Acetic Acid, TFA, o-Dichlorobenzene, 2-methoxythanol
Low:	Chloroform, DCM, Carbon Tet, Dioxane, THF, Glyme, EtOAc, Pyridine, Hexane, Chlorobenzene

**Table 2.** Loss tangent equation:  $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ **表 2.** 损耗角正切方程

Solvents	$\varepsilon'$	$\tan \delta$	$\varepsilon''$
Water	80.4	0.123	9.889
Acetonitrile	37.5	0.062	2.325
Ethanol	24.3	0.941	22.866
Chloroform	4.8	0.091	0.437
Toluene	2.4	0.040	0.096

## 5.2. 溶剂催化

常用有机溶剂化身催化剂，实现温和高效的氯化反应。北京大学的焦宁教授团队以廉价易得的 N-氯代丁二酰亚胺(NCS)作为氯化试剂，有机溶剂二甲基亚砜(DMSO)作为催化剂活化 NCS，实现了一系列(杂)芳香烃的高效、高选择性亲电氯化。反应不仅适用于简单结构的分子，还能完成复杂天然产物及药物分子、多肽的后期修饰。相关研究成果发表在 Nature 旗下子刊 Nature Catalysis [17]上。

## 6. 惰性与催化作用

最近，英国牛津大学的 Dermot O'Hare 教授、Shik Chi Edman Tsang 教授与清华大学的李隽教授团队合作，意外发现实验室常用的惰性保护气  $N_2$  竟可作为催化反应的促进剂加速反应进行。在  $TiO_2$  负载的金属钌(Ru)催化剂(Ru/ $TiO_2$ )的作用下， $N_2$  可显著降低对甲基苯酚氢化脱氧(HDO)的活化能，提高催化反应活性。相关研究结果发表在 Nature 子刊 Nature Catalysis [18]上。

关于“惰性”问题点评说明以下八点：

一、氮气平时用作惰性保护气体，发现其在某些金属表面上的催化作用令人惊叹(惰性催化)！

二、黄金作为等值储备货币，主要是因其储量少、惰性和闪闪金光三个原因，其实金元素也不是非常惰性的！人民大学陈自立教授等用金做催化剂做了很漂亮的反应，形成了金属有机化学中的热门领域 [19] [20]！

三、因合成氨哈伯法(打开 NN 三键这一惰性化学键)而获 1918 年诺贝尔化学奖的弗里茨·哈伯未去领奖，可能原因是他负责率领德国军方于第一次世界大战期间(1914.7.28~1918.11.11)生产和使用了毒气。如哈伯担任化学兵工厂厂长时负责研制、生产氯气、芥子气等毒气，并用于战争之中，造成近百万人伤亡，遭到了美、英、法、中等国科学家们的谴责。

四、自上世纪六十年代合成化合物六氟铂以后，元素周期表中第 VIII 族惰性气体并不惰性了，表明：惰性具有相对性！

五、上世纪八十年代，生物固氮比较热门，厦门大学和中科院福建物质结构研究所等单位在这方面做了许多有益探索。如果参考 Ru 类催化剂，是否可以打开氮资源(地球空气中含氮约 78%)利用的通路？

六、在极性体系中，即使使用惰性气体，微波也可能起催化作用，其他波也应该可以！

七、人类天生具有一定的惰性，即有点懒(需要制订目标、计划或依靠督促来克服之)，图省事，因此，未来“懒人经济学”发展迅速，诸如网购之类的经济繁荣，使得马云、马化腾 2019 年成了中国首富和二富！

八、从整个宇宙来看，惰性具有普遍性和相对性！从科学性、社会性、相对性和哲学上探讨惰性之特征及其变化规律，可称为：惰性学或惰性相对论！

## 7. 催化方法技术三次飞跃

本世纪 80 年代初期胡文祥曾提出：化学、生物和物理三大类催化方法合理相互组合运用，可以克服单一方法的不足之处，充分发挥有关方法的长处。

通过实验和理论探索，建立了微波催化与化学催化、超声波催化与化学催化、超声波催化与酶促合成等相结合的方法，提出了“微波组合化学”、“超声组合化学”及“催化方法组合学即组合催化”等新概念。

例如在二取代羧酸与甲醇或乙醇发生酯化的反应中，用浓硫酸作为化学催化剂，常规回流搅拌 4 h 方可使反应完成，倘若在微波的反应器中回流 3~5 min 即可达到同样收率。研究发现，脂肪酶在 50℃ 以下超声波作用 1 h，酶的活力仍然保持完好状态，这就为建立酶(或微生物)促-超声波催化联用方法提供了依据。例如在用二苯羟乙酸活化酯与单糖或双糖进行选择性酶促酯化反应时，要达到同样产率，超声波只需 0.5~1 h，而常规搅拌反应则需 6 天。

磁场与酶促、磁场与化学催化(包括相转移催化)、磁场与超声或微波、电场与超声、光与超声催化等相结合的方法，以及红外、微波与其它方法的组合运用等将会有广泛的应用前景，可大大提高科研效率，节省经费。显然这些催化方法的合理运用或组合运用可以取长补短，从而达到更有效地催化有机、药物及生物化学反应的目的。

随着对微波技术进行广泛的横向研究(在不影响通讯的情况下)，必将会为人们提供更多的技术手段，合理地组合运用微波、红外、磁场、超声波等物理催化手段及新的化学催化方法和生物(酵母、脂肪酶、酯酶、蛋白酶及我们首次提出的“糖酶”等)催化方法，将极大地改变现有化学合成反应(尤其是药物合成和材料化学)的现状，并在将来得到更加广泛的应用。

催化方法技术第一次飞跃

——从单一化学催化或单一生物催化飞跃到单一物理催化。

催化方法技术第二次飞跃

——从单一催化飞跃到同类组合催化，包括组合物理——物理接力催化或同时催化，组合化学——化学接力催化或同时催化，组合生物——生物接力催化或同时催化等。

所谓同时催化，就是两种或以上的方法同时或协同催化同一步反应。

所谓接力催化，就像接力赛跑一样，一步用一种方法催化，另一步即用另外一种方法催化等，如果人们能做到一步基元反应用一个催化方法，二步基元反应用两个催化方法，如此类推，一一对应，就真正达成了精准催化控制化学反应之目标，这将标志着催化化学迈进了新时代！

催化方法技术第三次飞跃

——从同类催化飞跃到不同类别混合组合催化，包含不同类别的接力催化或者同时催化。将有  $C_3^2 + C_3^3 = 4$  大类别：包括一、组合物理、化学二大类别混合组合催化；二、组合物理、生物二大类别混合组合催化；三、组合化学、生物二大类别混合组合催化；四、组合物理、化学、生物三大类别混合组合催化。

## 8. 结语

微波催化化学简称微波化学，是一项跨学科的、系统的科学探索工程，其宗旨在于加快化学反应速度，减少副产物的生成，节能减排，大大提高生产效率……

在微波应用于化学领域的具体探索研究中建立的新概念、新机理、新策略、新技术和新方法，构成了交叉科学领域新的边缘学科——微波化学。

微波催化化学反应往往可在较低温度时完成，常常可以避免高温高压等比较苛刻的反应条件，对于

安全科研与安全生产均可发挥极其重要的作用。

微波催化反应理论研究离不开其催化新概念的探索，建立微波催化反应理论和探索催化新概念是新时代的呼唤。在其理论的指导下，强化微波催化反应的总体设计技术和组合方法研究，对于推动微波化学的发展具有重要的现实意义。

微波化学的应用已经大大超前于微波化学的理论研究[21]-[28]。微波化学的热力学、动力学和反应机理及微波作用于化学体系的电磁场理论等方面的研究工作，进展较为缓慢，大大落后了，必须迎头赶上，以促进微波化学的全面发展，推动相关领域的科技进步和社会发展！

#### 附：同心战疫情诗三首

一、一日之计在于晨，一年划谋在于春。疫情假期忙攻关，微波化学炼丹心。学子著书构愿景，富平帷幄定乾坤。母校家乡大战疫，不负韶华不负君。

二、自由诚可贵，爱情价更高，若为抗疫情，两者皆可抛。

三、为什么我的眼中常含泪水，因为我对家乡这片热沃土地爱得十分深沉！

为什么我的心中常起波澜，因为我对母校怀有感谢、感激、感动、感恩之情！

## 致 谢

解放军防化研究院原副院长孙玉波教授提出了有益的意见，武汉工程大学的博士研究生胡红兵同志校对了全文，在此一并表示衷心感谢！

## 参考文献

- [1] 胡墨玺, 王存文, 闵清, 尤进茂, 马密霞, 胡文祥. 微波化学研究进展——京东祥鹤微波化学联合实验室微波化学领域相关研究成果目录及部分论文集[M]. 武汉: 汉斯出版社, 2019.
- [2] 秦宁, 闵清, 阮新志, 吴云韬, 杨萱平, 胡文祥. 书评: 《微波化学研究进展》[J]. 微波化学, 2019, 3(3): 29-35.
- [3] 郝静远, 王存文, 胡文祥. 书评: 《微波化学》[J]. 微波化学, 2019, 3(2): 15-27.
- [4] Hu, W.X. (2018) Catalytic Synthesis and Substituent Effect. Hans Publishers, Wuhan.
- [5] 李明, 郭维斯, 王书文, 等. 有机化学实验第二版[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [6] 陆模文, 胡文祥, 恽榴红. 有机微波化学研究进展[J]. 有机化学, 1995, 15(6): 561-566.
- [7] 胡文祥, 胡文辉, 王建营, 丁景范, 恽榴红. 微波催化药物合成研究进展[J]. 中国药物化学杂志, 1999, 9(1): 70-78.
- [8] 胡文祥, 刘明, 弓亚玲. 微波催化有机药物反应机理及其应用研究[J]. 压电与声光, 2008, 30(2s): 9-11.
- [9] 韩谢, 吴元欣, 邵开元, 胡文祥. 微波萃取技术在天然产物提取中的应用[J]. 微波化学, 2017, 1(1): 3-7.
- [10] 马密霞, 秦宁, 闵清, 胡文祥. 微波超声波联用萃取花生芽中白藜芦醇及其含量 HPLC 测定[J]. 化工学报, 2019, 70(s1): 124-129.
- [11] 胡文祥, 王建营. 协同组合化学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 付梦蕾, 曲有乐, 马密霞, 韩谢. 书评: 《协同组合化学》[J]. 比较化学, 2018, 2(1): 11-15.
- [13] 王陆瑶, 胡文祥. “分子温度”与微波的非热效应[C]//中国化学会全国微波化学学术研讨会论文摘要集. 咸宁: 湖北祥鹤, 2005: 156.
- [14] 《千桥飞梦》编写组. 千桥飞梦——胡文祥哲学宇宙学社会科学相关思考录[M]. 第三卷, 武汉: 汉斯出版社, 2019.
- [15] 胡文祥. 反恐药物战. In: 肖军华, 盛任农, 主编, 李方, 胡文祥, 李文君, 单大国, 聂福德, 副主编, 公共安全中的化学问题研究进展[M]. 第四卷. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2015: 515.
- [16] 胡文祥. 微波催化化学反应热力学与动力学[C]//第三届全国公共安全化学会议邀请报告. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2011: 769-792.
- [17] Song, S., et al. (2019) DMSO-Catalysed Late-Stage Chlorination of (Hetero)arenes. *Nature Catalysis*, 3, 107-115.

- <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0398-0>
- [18] Duan, H.H., *et al.* (2019) Molecular Nitrogen Promotes Catalytic Hydrodeoxygenation. *Nature Catalysis*, **2**, 1078-1087. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0368-6>
- [19] Li, G.H., Zhou, W., Li, X.X., Bi, Q.W., Wang, Z., Zhao, Z.G., Hu, W.X. and Chen, Z.L. (2013) Gold Catalyzed Enantioselective Intermolecular [3+2] Dipolar Cycloaddition of N-allenyl Amides with Nitrones. *Chemical Communication*, **49**, 4770-4772. <https://doi.org/10.1039/c3cc41769g>
- [20] 魏国强, 徐高, 胡文祥. 金催化化学概况及新进展[J]. 化学通报, 2011, 74(2): 99-105.
- [21] Liu, M. and Hu, W.X. (2013) Recent Progress of Microwave Irradiation in Synthesis and Diagnosis Treatment. *Advanced Material Research*, **616-618**, 1711-1716. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.1711>
- [22] 胡文祥, 何林涛, 等. 反恐技术方略[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [23] 胡文祥, 刘明. 阿片受体分子药理学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [24] 秦宁, 闵清, 邵开元, 胡文祥. 间甲基苯甲胺盐酸盐的合成研究[J]. 化工学报, 2019, 70(s1): 242-247.
- [25] Liu, Z.Z., Deng, B.Q., Li, S.L. and Zou, Z.R. (2018) Optimization of Solvent-Free Microwave Assisted Extraction of Essential Oil from *Cinnamomum camphora* Leaves. *Industrial Crops & Products*, **124**, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.016>
- [26] Yang, B.W., An, Q.F., Zhao, Z.G., Shao, K.Y. and Hu, W.X. (2019) Research on Chemical Reactivity of Nitrotriazolam in Its Process of Preparation. *Chemical Research in Chinese University*, **35**, 680-685. <https://doi.org/10.1007/s40242-019-8339-7>
- [27] Shen, X.Z., He, H.J., Yang, B., Zhao, Z.G., Shao, K.Y. and Hu, W.X. (2017) Studies on the Activities of Electrophilic Sites on Benzene Ring of 4-Substituted Anilines and Their Acyl Compounds with Multiphlicity Descriptor. *Chemical Research in Chinese University*, **33**, 773-778. <https://doi.org/10.1007/s40242-017-7112-z>
- [28] 胡墨玺, 喻长远, 陈禹宝, 许立达, 李博, 马密霞, 胡红兵, 杨博文. 交叉科学研究进展——胡文祥交叉科学相关研究部分论文集[M]. 武汉: 汉斯出版社, 2020.