

Review for Synthesis and Application of Schiff Base and Its Metal Complexes

Yuchan Fang, Qinghua Weng, Jie Kang, Zhizhong Han*

School of Pharmacy, Fujian Medical University, Fuzhou Fujian
Email: *zzhan@fjmu.edu.cn

Received: Jul. 15th, 2019; accepted: Aug. 5th, 2019; published: Aug. 12th, 2019

Abstract

Schiff base is a kind of organic compound containing imide or methimide characteristic group (-RC=N-), which is usually formed by condensation of active carbonyl group and amine compound through a series of reactions. These compounds have broad application prospects, such as medicine, chemistry, biology. In this work, the synthesis method and applications of schiff base and its metal complexes are reviewed, providing reference for relevant researchers.

Keywords

Schiff Base, Metal Complexes, Synthesis Method, Application

席夫碱及其金属配合物的合成与应用综述

方玉婵, 翁清花, 康 杰, 韩志钟*

福建医科大学药学院, 福建 福州
Email: *zzhan@fjmu.edu.cn

收稿日期: 2019年7月15日; 录用日期: 2019年8月5日; 发布日期: 2019年8月12日

摘 要

席夫碱是指含有亚胺或甲亚胺特性基团(-RC=N-)的一类有机化合物, 通常是由活性羰基与胺类化合物通过一系列的反应缩合而成的。该类化合物具有广泛的应用前景, 包括医学、化学、生物等多个领域。本文总结介绍席夫碱及其金属配合物的合成方法和应用, 为相关研究者提供参考。

*通讯作者。

关键词

席夫碱, 金属配合物, 合成方法, 应用

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

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

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



Open Access

1. 引言

席夫碱首次出现在 1864 年, 由 Hugo Schiff 利用水杨醛、苯胺和铜离子合成, 这类带有亚胺基的化合物由此命名为席夫碱[1]。如今, 席夫碱已经成为应用最广泛的有机化合物之一, 它们不仅被用作颜料、染料、催化剂、有机合成的中间体和聚合物稳定剂等[2], 还显示出广泛的生物活性, 包括抗菌、抗疟疾、抗增殖、抗炎、抗病毒等[3]。席夫碱的亚胺或偶氮甲基存在于各种天然和非天然化合物中, 正是这些亚胺基团对它们的生物活性起着至关重要的作用[4] [5]。席夫碱的合成相对容易, 通过灵活的选择各种胺类及带有羰基的醛酮进行反应, 适当改变取代基给予体及其化学环境, 易衍生出一系列不同结构的席夫碱, 席夫碱作为配体还可以与大部分金属元素形成金属配合物[6]。席夫碱以及其金属配合物具有多方面生物活性, 如含硫席夫碱(噻吩类), 因该类席夫碱同时含有 N、S、O 等杂原子而具有较强的配位能力[7], 可与一些过渡金属形成稳定的配合物并显现出良好的配位性能、热稳定性、荧光活性以及抑菌活性, 且配合物的组成可调性等[8]-[13]。近年来席夫碱的研究价值越发重要, 备受广大研究者的关注。本文着重介绍了席夫碱及其金属配合物的常见合成方法, 以及它们在不同领域的应用进展, 希望为相关研究人员提供一份参考。

2. 席夫碱及其金属配合物的合成

2.1. 席夫碱及其金属配合物的合成机理

席夫碱主要通过缩合反应形成 C=N 键, 并涉及加成、重排、消去等过程, 反应物立体结构及电子效应对席夫碱的形成起着重要作用。如图 1 所示, 二胺类化合物结构中的氮原子有孤对电子, 可作为亲核试剂, 在与含有单羰基的醛酮类化合物发生加成反应时, 氮原子会进攻羰基上的碳正离子, 完成亲核加成反应, 形成中间体 α -羟基胺类化合物, 再进一步的脱水形成单席夫碱。形成的单席夫碱在一定的条件下, 可与胺类化合物再次缩合形成双席夫碱。

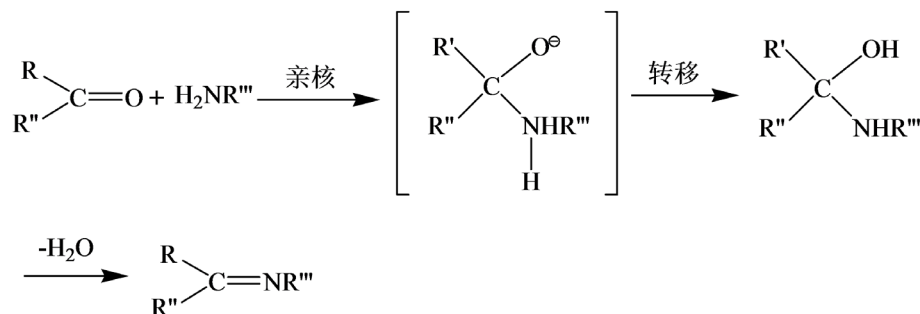


Figure 1. Reaction mechanism of schiff base

图 1. 席夫碱的反应机理

席夫碱中含有 C=N 键, 其杂化轨道上的 N 原子具有孤对电子, 具有良好的灵活性和配位性, 可以与 Zn、Mn、Cu、Ni 等过渡金属元素进行配位反应, 还能与 La、Ce、Pr、Gd 等多种稀土金属元素进行配位 [14] [15]。

2.2. 席夫碱及其金属配合物的合成方法

席夫碱的种类多种多样, 按照结构的不同, 可分为大环类席夫碱、单席夫碱、双席夫碱等, 其中, 双席夫碱可分为对称型双席夫碱和不对称型双席夫碱 [16]。席夫碱还可通过灵活的选择各种氨类及含羰基的不同醛或酮, 缩合得到链状 [17] 或环合 [18], 单齿 [19] 或多齿 [20], 结构各异性能多变的有机配体。以对称的二胺类为反应前体, 由于相同的立体结构和反应活性, 容易形成两边对称的双席夫碱, 但如果严格控制反应条件, 改变反应物摩尔比、改变溶剂、改变反应物取代基团等可实现选择性反应 [21]。对于席夫碱的合成其产率受到投料比、反应时间、反应温度、催化剂等的影响, 考察这些因素的影响有利于席夫碱的工业化生产 [22]。

2.2.1. 常温法

在一定的反应条件下, 将醛酮类化合物、二胺或双胺类化合物以及金属盐按照一定的比例直接加入到制定的反应体系中, 化合物分子可以在溶液中发生一个自组装的过程, 从而得到席夫碱金属配合物的晶体或是沉淀。Pessoa [23] 等将 D-氨基葡萄糖盐酸盐悬浮于甲醇中, 加入 1 份等摩尔量磨细的固体氢氧化钠, 搅拌反应 5 min 后, 过滤掉氯化钠, 然后将水杨醛缓慢地滴加到上述滤液中, 于常温下搅拌反应一段时间, 即有黄色固体沉淀, 将混合物于冰浴中冷却, 滤出, 固体用冰甲醇和水的混合液洗涤, 干燥后即得到席夫碱。采用这种方法, 既简单快速易于操作, 又容易获得非常高的产率, 但缺点是, 在合成过程中易掺杂有原料配体的金属配合物。

2.2.2. 回流法

王宇斌等 [24] 人将 2,5-二羟基苯甲醛和 2-吡啶甲酰肼分别溶于无水乙醇, 于 80℃ 混合加热回流 6 h, 冷却、减压过滤、洗涤并烘干后得黄绿色席夫碱固体。Vrdoljak 等 [25] 人取硫代氨基脲于蒸馏水中完全溶解, 再取邻香草醛, 溶解在含有冰醋酸的乙醇中, 在搅拌下将其加入到前者溶液中, 并在 80℃ 下加热回流 2 h, 制得席夫碱。

2.2.3. 超声辅助法

Parsaee 等 [26] 先合成 4,4'-(己基氮烷)二苯甲醛, 在超声波辅助下用乙醇和 DMF 的混合溶剂溶解该物质, 然后加入 2-氨基-4-甲基苯酚, 反应 120 min 获得黄色席夫碱配体。利用所合成席夫碱配体与不同的金属离子配位, 进行金属离子检测。结果表明, 所制备席夫碱对 Cu^{2+} 有高灵敏响应。

2.2.4. 一锅法

一锅法指的是将原料分批加入, 产生多步反应, 但中间体不分离, 直接获得结构复杂的分子。Chatterjee 等 [27] 人将 1,2-二氨基丙烷溶液滴加到水杨醛溶液中, 搅拌 0.5 h, 制得席夫碱配体; 接着在搅拌条件下加入高氯酸铁(III)溶液, 然后加入 4,4'-联吡啶溶液, 最后持续搅拌 1 h, 过滤得到深棕色席夫碱 Fe(III) 配合物晶体。这种方法不需要对中间体进行处理, 步骤比较简单, 但对实验条件要求比较高, 比如中间产物的产量要较高, 杂质较少等。

2.2.5. 分步合成法

席夫碱金属配合物常采用分步法合成, 即先合成席夫碱配体, 再溶解配制成溶液, 加入金属盐溶液, 在合适的条件下合成席夫碱的金属配合物, 该方法的合成过程可控。曹亚萍等 [28] 人以 2,6-二甲酰基对甲

基苯酚为原料, 与烟酸酰肼进行缩合, 得到双席夫碱探针 L, 用乙醇溶解, 配制成一定浓度的储备液, 同样的将钾盐或钠盐以及碱金属离子, 等用无水乙醇制备成相同浓度的储备液, 一定条件下, 取相同体积的两种储备液混合, 即可制备席夫碱金属离子探针。李运彤等[29]将 3,5-二氟水杨酸醛和丙炔-1,3-二胺在甲醇中混合, 于室温下搅拌反应, 溶液蒸馏再蒸发、重结晶得到双席夫碱 N,N'-双(3,5-二氟亚水杨基)-1,3-二氨基丙烷(H₂L), 在 H₂L 甲醇溶液和硫氰酸铵中加入乙酸锰四水合物甲醇溶液, 将混合物在室温下搅拌, 得到棕色溶液, 蒸发溶剂、过滤、洗涤、干燥即得席夫碱金属配合物。

3. 席夫碱及其金属配合物的应用

3.1. 抑菌、杀菌活性

在第三世界国家, 寄生虫和原生动感染引起的发病率和死亡率正在上升, 耐药性微生物病原体使情况进一步恶化, 合成安全和有效的抗菌杀虫剂是非常必要的。有文献已报道一些席夫碱及其金属配合物具有高效的抑菌杀菌作用, 如 Husain 等[30]人以萘啶酸甲酯与水合肼反应合成一系列 1,8 萘啶类席夫碱, 并进行革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的体外抗菌活性的研究, 发现该类席夫碱均表现出良好的抗菌活性, 特别是对金黄色葡萄球菌等菌群表现出比标准药物氨苄西林更强的抑制作用, 通过破坏菌群的油脂层, 从而产生抗菌和杀虫的作用。

3.2. 抗肿瘤活性

多数席夫碱及其金属配合物具有强大的抗肿瘤活性, Hassan 等[31]以 5-氨基芳基吡啶-4-羧基化合物与芳香族醛在乙醇中回流缩合形成一系列新型席夫碱, 并利用 MTT 法测定它们对两种人癌细胞株 (HepG-2 和 MCF-7) 的抗肿瘤活性, 发现 5-氨基芳基吡啶-4-羧基化合物缩芳香族席夫碱能诱导 HepG2 和 MCF-7 细胞凋亡, 从而发挥抗肿瘤的作用。Sâmia 等[32]人合成的氮芥基席夫碱化验在一组不同的肿瘤细胞中, 能够在不影响非恶性人内皮细胞(HUVEC)生存能力的前提下表现出细胞毒性, 降低黑色素瘤细胞的生存能力, 从而通过坏死诱导细胞死亡。目前, 各种金属配合物, 包括铜、镧、钕等席夫碱金属配合物, 被认为是经典顺铂类药物的替代品, 作为抗肿瘤界的候选药物[33]。

3.3. 抗衰老

已有研究表明一些席夫碱类金属配合物具有超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶活性, 对超氧阴离子自由基有一定的抑制作用, 可以预防 ROS 相关组织损伤, 而引起炎症、衰老的原因之一就是人体内存在过量的超氧阴离子自由基(O₂⁻), Doctro 等[34]人报道其所合成席夫碱锰配合物能够延缓人的衰老。

3.4. 催化作用

席夫碱是一种较为理想的螯合剂, 在一定的条件下可以与大多数金属离子螯合形成席夫碱金属配合物, 已有文献报道席夫碱金属配合物作为催化剂用于棉针织物双氧水低温漂白[35]。在金属元素的过渡置换中, 被广泛应用于工业置换反应[36]; 在化学合成方面, 席夫碱金属配合物可发挥聚合催化、不对称催化、电催化等作用[37]。

3.5. 光学成像示踪剂(荧光探针)

在 Singh 等[38]人的实验中, 氨基酸自身是无荧光的, 苯甲酮类在不同波长下显极其微弱的荧光, 而二者反应生成的席夫碱与锡类金属氧化物配位合成的二甲基锡席夫碱具有很强的螯合荧光活性, 可作为探针以探测自然界中锡类等金属离子。Yang 等[39]人合成一种新型的碳唑基席夫碱作为荧光化学传感器,

用于 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 的选择性检测。因此，席夫碱及其金属配合物具有的荧光性能可作为荧光探针，用于生物体内的金属离子的检测或者作为示踪剂探测生物体内药物的分布。

3.6. 能源应用

席夫碱金属配合物可以被纳入离散的小分子、低聚物或聚合物中，产生具有特殊的机械、热、化学和光电子性能的新功能材料，迄今为止，许多基于金属席夫碱配合物的可溶性共轭材料已经被开发和研究，被应用能源领域。在有机发光二极管和染料敏化太阳能电池中作为光/电信号转换器，能源储存和潜在的导电热材料[40]。卟啉作为一种敏化染料，在染料敏化太阳能电池的研究中发挥重要的作用，但由于卟啉在可见光区的光谱吸收存在缺陷，影响了染料敏化太阳能电池的光电信号转换效率，通过席夫碱与卟啉环的连接，可以拓宽卟啉在可见光区的光谱吸收，从而使得光电转换效率大大提高[41]。同时，利用席夫碱的亚胺连接的二维和三维的不同有机共价材料(COFs)在水条件下依然显示出对气体有很高的潜力吸附和存储[42]。

3.7. 金属防护

由于铜的低腐蚀敏感性，铜及其合金广泛应用于海洋环境，但氯离子的存在会促进铜的腐蚀，而螯合物的形成可以延缓金属的溶解度。利用邻香草醛合成在中性和弱酸性介质中能强抑制腐蚀和阳极溶解的铜席夫碱，席夫碱覆盖在金属铜表面形成金属螯合物，类似一层金属保护膜，从而起到保护内层金属不受腐蚀或延缓腐蚀的作用[43]。Vikneshvaran 等人以色氨酸为前驱体合成三种不同的手性席夫碱，应用于碳钢的防腐[44]。席夫碱在钢材表面同时形成物理和化学吸附，极大降低材料在盐酸中的腐蚀程度。

4. 结语

自从十九世纪席夫碱的首次制备以来，因其具有结构多样性和多种生物化学活性，广泛应用在生物、化学、医药等多个领域，引起科研工作者极大的关注。目前，已有许多文献报道了多种席夫碱的研究制备及应用，如生物活性、抗衰老、催化、医学检测、能源应用、金属防护等。随着合成技术的发展，将会出现更多新型的席夫碱，具有特殊的物理、化学性质，改善现有的应用属性，同时，扩展新的应用领域。

基金项目

福建省科技创新联合资金项目(2017Y9122)。

参考文献

- [1] Silva, C.M.D., da Silva, D.L., Modolo, L.V., *et al.* (2011) Schiff Bases: A Short Review of Their Antimicrobial Activities. *Journal of Advanced Research*, **2**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2010.05.004>
- [2] Dhar, D.N. and Taploo, C.L. (1982) Schiff-Bases and Their Applications. *Journal of Scientific & Industrial Research*, **41**, 501-506.
- [3] Przybylski, P., Huczynski, A., Pyta, K., *et al.* (2009) Biological Properties of Schiff Bases and Azo Derivatives of Phenols. *Current Organic Chemistry*, **13**, 124-148. <https://doi.org/10.2174/138527209787193774>
- [4] Guo, Z. Xing, R., Liu, S., *et al.* (2007) Antifungal Properties of Schiff Bases of Chitosan, N-Substituted Chitosan and Quaternized Chitosan. *Carbohydrate Research*, **342**, 1329-1332. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2007.04.006>
- [5] Souza, A.O., Galetti, F., Silva, C.L., *et al.* (2007) Antimycobacterial and Cytotoxicity Activity of Synthetic and Natural Compounds. *Química Nova*, **30**, 1563-1566. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000700012>
- [6] 贤景春, 哈日巴拉, 李瑞延, 林华宽, 朱守荣. Co(II)、Mn(II)Schiff碱配合物的合成及其对超氧离子的抑制作用[J].

- 无机化学学报, 2000, 16(1): 151-154.
- [7] 曹义, 陆云. 三种水杨醛类席夫碱的合成与性质研究[J]. 化学通报, 2017, 80(6): 539-543.
- [8] Niu, C., Zhao, L., Fang, T., *et al.* (2014) Color- and Morphology-Controlled Self-Assembly of Newelectron-Donor-Substituted Aggregation-Induced Emission Compounds. *Langmuir*, **30**, 2351-2359. <https://doi.org/10.1021/la404436v>
- [9] Liu, H., Song, P., Wei, R., *et al.* (2014) A Facile, Sensitive and Selective Fluorescent Probe for Heparin Based on Aggregation-Induced Emission. *Talanta*, **118**, 348-352. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.09.055>
- [10] Béreau, V., Duhayon, C. and Sutter, J.P. (2014) Supramolecular Control over Recognition and Efficient Detection of Picric Acid. *Chemical Communications*, **50**, 12061-12064. <https://doi.org/10.1039/C4CC05888G>
- [11] Dalapati, S., Jana, S., Alam, M.A., *et al.* (2011) Multifunctional Fluorescent Probe Selective for Cu (II) and Fe (III) with Dual-Mode of Binding Approach. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **160**, 1106-1111. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.09.034>
- [12] Martínez, R., Espinosa, A., Tárraga, A., *et al.* (2005) New Hg²⁺ and Cu²⁺ Selective Chromo- and Fluoroionophore Based on a Bichromophoric Azine. *Organic Letters*, **7**, 5869-5872. <https://doi.org/10.1021/ol052508i>
- [13] Yeh, J.T., Chen, W.C., Liu, S.R., *et al.* (2014) A Coumarin-Based Sensitive and Selective Fluorescent Sensor for Copper (II) Ions. *New Journal of Chemistry*, **38**, 4434-4439. <https://doi.org/10.1039/C4NJ00695J>
- [14] Reiss, A., Chifiriuc, M.C., Amzoiu, E., *et al.* (2018) New Metal (II) Complexes with Ceftazidime Schiff Base. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **131**, 2073-2085. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6832-0>
- [15] Sarkar, S., Nag, S.K., Chattopadhyay, A.P., *et al.* (2018) Synthesis, Structure and Catalytic Activities of Nickel(II) Complexes Bearing N₄ Tetradentate Schiff Base Ligand. *Journal of Molecular Structure*, **1160**, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.01.035>
- [16] Dogaheh, S.G., Khanmohammadi, H. and Sañudo, E.C. (2017) Double-Decker Luminescent Ytterbium and Erbium SMMs with Symmetric and Asymmetric Schiff Base Ligands. *New Journal of Chemistry*, **41**, 10101-10111. <https://doi.org/10.1039/C7NJ01842H>
- [17] Vallina, A.T. and Stoeckli-Evans, H. (2002) Coordination Chemistry of a New Imine-Ether Ligand, N,N'-bis (2-pyridylmethylene)-2,2'-(ethylenedioxy)bis(ethylamine): Mono-Helical and Single-Helical-Strand Coordination Modes Identified by X-Ray Crystallography. *Polyhedron*, **21**, 1177-1187. [https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(02\)01015-X](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(02)01015-X)
- [18] Vicente, M., Lodeiro, C., Adams, H., *et al.* (2000) Synthesis and Characterization of Some Metal Complexes with New Nitrogen-Oxygen Donor Macrocyclic Ligands-X-Ray Crystal Structures of a 26-Membered Reduced Monoprotonated Macrocyclic and a 20-Membered Pendant-Arm Schiff-Base Macrocyclic Cadmium (II) Complex. *European Journal of Inorganic Chemistry*, **2000**, 1015-1024. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0682\(200005\)2000:5<1015::AID-EJIC1015>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0682(200005)2000:5<1015::AID-EJIC1015>3.0.CO;2-U)
- [19] Drabent, K., Ciunik, Z. and Chmielewski, P.J. (2003) Synthesis, Crystallographic and Spectroscopic Studies of Dimeric CuI Complexes with Schiff Base Containing Triazole Ligands. *European Journal of Inorganic Chemistry*, **2003**, 1548-1554. <https://doi.org/10.1002/ejic.200390202>
- [20] Salmon, L., Thuéry, P., Rivière, E., *et al.* (2006) Synthesis, Structure, and Magnetic Behavior of a Series of Trinuclear Schiff Base Complexes of 5f (U IV, Th IV) and 3d (Cu II, Zn II) Ions. *Inorganic Chemistry*, **45**, 83-93. <https://doi.org/10.1021/ic0512375>
- [21] Ōkawa, H., Furutachi, H. and Fenton, D.E. (1998) Heterodinuclear Metal Complexes of Phenol-Based Compartmental Macrocycles. *Coordination Chemistry Reviews*, **174**, 51-75. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(97\)00082-9](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(97)00082-9)
- [22] 赵兰杰, 姚全才, 张媛媛. 含吡啶环 1,2,4-三唑席夫碱的合成[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2018, 34(3): 59-63.
- [23] Pessoa, J.C., Tomaz, I. and Henriques, R.T. (2003) Preparation and Characterisation of Vanadium Complexes Derived from Salicylaldehyde or Pyridoxal and Sugar Derivatives. *Inorganica Chimica Acta*, **356**, 121-132. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(03\)00395-5](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(03)00395-5)
- [24] 王宇斌, 侯玲杰, 葛金印, 双少敏. 检测 Al³⁺的席夫碱荧光探针的合成和性能研究[J]. 分析化学, 2018, 46(12): 1937-1944.
- [25] Vrdoljak, V., Cindrić, M., Milić, D., *et al.* (2005) Synthesis of Five New Molybdenum (VI) Thiosemicarbazone Complexes. Crystal Structures of Salicylaldehyde and 3-Methoxy-Salicylaldehyde-4-Methylthiosemicarbazones and Their Molybdenum (VI) Complexes. *Polyhedron*, **24**, 1717-1726. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2005.05.002>
- [26] Parsaee, Z., Haratipour, P., Lariche, M.J. and Voojod, A. (2017) A Novel High Performance Nano Chemsensor for Copper (II) Ion Based on an Ultrasound-Assisted Synthesized Diphenylamine-Based Schiff Base: Design, Fabrication and Density Functional Theory Calculations. *Ultrasonics Sonochemistry*, **41**, 337-349. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.054>

- [27] Chatterjee, S., Sukul, D., Banerjee P., *et al.* (2018) Phenoxazinone Synthase Activity of two Iron (III) Complexes Comprising the Same Schiff Base Ligand: Biomimetic Functional Model and Mechanistic Investigation. *Inorganica Chimica Acta*, **474**, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2018.01.024>
- [28] 曹亚萍, 吴庆, 胡庆红, 余光勤, 袁泽利. 席夫碱多功能金属离子探针的合成及在生物成像中的应用[J]. 分析化学, 2019(1): 38-48.
- [29] 李运彤, 董婧雯, 芦瑶, 谷易桐, 商超男, 刘芙瑶, 辛雨, 井长玲, 由忠录. 基于双席夫碱配体的两个锰(III)配合物的合成、晶体结构和抑制脲酶活性[J]. 无机化学学报, 2018, 34(6): 1192-1198.
- [30] Husain, A., Varshney, M.M., Parcha, V., *et al.* (2018) Nalidixic Acid Schiff Bases: Synthesis and Biological Evaluation. *Letters in Drug Design & Discovery*, **14**, 103-111. <https://doi.org/10.2174/1570180814666170710151246>
- [31] Hassan, A.S., Awad, H.M., Magd-El-Din, A.A., *et al.* (2018) Synthesis and *in Vitro* Antitumor Evaluation of Novel Schiff Bases. *Medicinal Chemistry Research*, **27**, 915-927. <https://doi.org/10.1007/s00044-017-2113-5>
- [32] Sãmia, L.B.P., Parrilha, G.L., Bertoli, A.C., *et al.* (2019) Investigation on the Cytotoxic Effects of Nitrogen-Mustard-Derived Schiff Bases. Studies on the Reactivity of the N-Mustard Pharmacophoric Group. *Journal of Molecular Structure*, **1178**, 274-284. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.10.029>
- [33] Kaczmarek, M.T., Zabizsak, M., Nowak, M. and Jastrzab, R. (2018) Lanthanides: Schiff Base Complexes, Applications in Cancer Diagnosis, Therapy, and Antibacterial Activity. *Coordination Chemistry Reviews*, **370**, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.05.012>
- [34] Doctrow, S.R., Huffman, K., Marcus, C.B., *et al.* (2002) Salen-Manganese Complexes as Catalytic Scavengers of Hydrogen Peroxide and Cytoprotective Agents: Structure-Activity Relationship Studies. *Journal of Medicinal Chemistry*, **45**, 4549-4558. <https://doi.org/10.1021/jm020207y>
- [35] 张超, 张凯, 谢孔良. 席夫碱金属配合物的合成及低温漂白性能研究[J]. 针织工业, 2014(7): 81-84.
- [36] 马润霞, 王小平. 硫脲型有机催化剂在 Schiff 碱合成反应中的应用[J]. 广东化工, 2016, 43(4): 77-78.
- [37] 路俊宏. 席夫碱反应在化学合成上的应用[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(1): 204.
- [38] Singh, N., Srivastav, N., Singh, R., *et al.* (2018) Fluorescent Biogenic Schiff Base Compounds of Dimethyltin. *New Journal of Chemistry*, **42**, 1655-1664. <https://doi.org/10.1039/C7NJ03731G>
- [39] Yang, L., Zhu, W., Fang, M., *et al.* (2013) A New Carbazole-Based Schiff-Base as Fluorescent Chemosensor for Selective Detection of Fe³⁺ and Cu²⁺. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **109**, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.02.043>
- [40] Zhang, J., Xu, L. and Wong, W.Y. (2018) Energy Materials Based on Metal Schiff Base Complexes. *Coordination Chemistry Reviews*, **355**, 180-198. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.08.007>
- [41] 王振兴. 卟啉衍生物光敏染料的合成及性能[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.
- [42] Segura, J.L., Mancheno, M.J. and Zamora, F. (2016) Covalent Organic Frameworks Based on Schiff-Base Chemistry: Synthesis, Properties and Potential Applications. *Chemical Society Reviews*, **45**, 5635-5671. <https://doi.org/10.1039/C5CS00878F>
- [43] Ma, H., Chen, S., Niu, L., *et al.* (2001) Studies on Electrochemical Behavior of Copper in Aerated NaBr Solutions with Schiff Base, N,N' o-phenylen-bis (3-methoxysalicylideneimine). *Journal of the Electrochemical Society*, **148**, B208-B216. <https://doi.org/10.1149/1.1362543>
- [44] Vikneshvaran, S. and Velmathi, S. (2019) Impact of Halide-Substituted Chiral Schiff Bases on Corrosion Behaviour of Carbon Steel in Acidic Environment. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **19**, 4458-4464. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16367>