

肌球蛋白中金属离子与 ATP 相互作用及其催化 ATP 水解的研究进展

周中英, 吕功煊¹⁾

(中国科学院兰州化学物理研究所 羰基合成与选择氧化国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

关键词: ATP; 肌球蛋白; 金属离子; 相互作用; 催化水解

中图分类号: O643.32 **文献标识码:** A

生物体内细胞在氧化物质的过程中释放出的大量自由能, 这些能量先形成高能磷酸化合物三磷酸腺苷(adenosine 5'-triphosphate, ATP)^[1-3], 当 ATP 水解为 ADP(二磷酸腺苷, adenosine 5'-diphosphate)和无机磷酸时, 释放出大量能量供给需能反应. ATP 分子中任何一个磷酸酯键水解时都可以释放出 30.54 千卡/摩尔能量^[4, 5]. 生物体中的许多生命活动, 如细胞中物质的合成、肌肉收缩、主动转运、神经信息传导以及其它多种生理过程都必须依赖 ATP 才能发生^[6-10]. 如在肌球蛋白中, ATP 水解所释放出来的能量可以直接转化为驱动肌肉收缩的机械能, 而不需要先经过其它能量载体.

化学能如何在生物体中转化成定向机械运动仍是有待阐明的问题. 现在人们知道有一类能利用化学能/化学势进行机械做功的生物大分子, 称其为分子马达. 分子马达依据其作用的方式可分为线性分子马达和旋转分子马达两大类. 线性分子马达是一类将化学能转化为机械能, 并沿着一个线性轨道运动的生物分子; 旋转分子马达是做类似定子与转子形式旋转运动的生物分子. 肌球蛋白是一种线性分子马达, 它是由 Kuehne 在 1864 年发现并命名^[11]. 肌球蛋白参与了包括肌肉收缩、趋化性、胞质分裂、胞饮作用、靶向小包输运及信号传导等多种细胞活动. 目前已经发现有 24 类肌球蛋白^[12], 它们的结构和功能各有不同: 如肌球蛋白 I 在生物体内的作用是细胞运动, 胞饮作用和胞液收缩^[13, 14], 骨骼肌肌球蛋白 II 的作用是使骨骼肌肌

肉收缩, 肌球蛋白 V 功能是靶向小包运输和信使 RNA 的靶向运输^[13, 14, 15-17].

金属离子在肌球蛋白的作用

在肌球蛋白催化 ATP 水解过程中, 金属离子直接或间接地参加了催化反应. Mg^{2+} 作为必不可少的辅因子与 ATP 键合, 形成“ATP 结合腔- Mg^{2+} -ATP”的络合物^[18, 19-30]. 但因为肌球蛋白体系的复杂性和生物体内较多干扰因素的存在, 在分子水平上研究肌球蛋白中金属离子的作用的工作还比较少, 相反在非生物模拟环境中金属离子在生物体内所起到的作用研究更多.

金属离子是生物体内必不可少的物质, 它们通过与蛋白质或核酸的相互作用行使其生物功能^[31, 32]. 例如: 酶的磷酰基转移过程需要 Mg^{2+} 的参与, Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 是过氧化氢酶和细胞色素酶类的辅因子, 丙酮酸磷酸激酶需要 K^{+} 和 Mg^{2+} 的参与. 许多致病机理也涉及到各种金属离子, 如摄入过量的铝会导致老年痴呆, 铅中毒会导致贫血、肾病和高血压^[33, 34], 汞会导致神经系统中毒^[35], Ca^{2+} 是脑神经元代谢不可缺少的重要元素, 缺少钙亦会导致人患骨质疏松病等^[35].

研究发现金属离子能影响 DNA 的氢键结构和碱基间的堆积力, 改变 DNA 的构型. 例如: Ca^{2+} 能使部分 DNA 构型由 B 式转化为 A 式, Cu^{2+} 能作用于鸟嘌呤的 N7 和 O6 位点, 胞嘧啶的 N3 位点, 并使 G-C 碱基对的糖苷键由反式变为顺式^[36]. DNA 和 RNA 聚合酶催化 5'-ATP 反应都需要二价阳离子

收稿日期: 2011-08-10; 修回日期: 2011-10-11.

基金项目: 21173242, 973:(2007CB210204, and 2009CB220003).

作者简介: 周中英, 女, 生于 1983, 博士研究生. zhoujinying_1024@126.com.

1) 通讯联系人, E-mail: gxlu@licp.cas.cn.

如 Mg^{2+} 参与. 在 ATP 合酶催化合成或水解 ATP 过程中, Mg^{2+} 与 ATP 发生键合, 形成“酶- Mg^{2+} -ATP”络合物^[18, 37-43], 或依赖于金属离子的存在^[44-46].

金属离子不同, 核苷酸的种类不同, 所形成的复合物结构也不尽相同. 核苷酸碱基上有多个配点可与金属离子相结合, 如 Mg^{2+} ^[47-80]、 Ca^{2+} ^[68, 81, 82]、 Co^{2+} ^[83-87]、 Al^{3+} ^[88-93]、 Mn^{2+} ^[94-101]、 Ni^{2+} ^[102-104]、 Cu^{2+} ^[105-111]、 Fe^{3+} ^[112]、 Zn^{2+} ^[113-115]、 Cd^{2+} ^[116-121]、 Pt^{2+} ^[122-127]、 La^{3+} ^[128]. Sigel 认为金属离子与 ATP 的相互作用方式存在以下几种形式.

(1) 开环结构: 即 M^{n+} 只与 ATP 的磷酸根作用, 而不与嘌呤环发生作用.

Mg^{2+} 与 ATP 是以典型的开环结构相互作用. Happe 等人^[129] 利用¹⁵N 富集的 ATP 样品研究了 ATP 与 Mg^{2+} 的作用, 发现 ATP 与 Mg^{2+} 作用后¹⁵N 的化学位移没有变化. 同样, Harada 等人^[46] 用同位素¹⁸O 标记的 ATP 样品研究了 ATP 与 Mg^{2+} 的作用方式, 得出 ATP 的嘌呤环基本不参与 Mg^{2+} 的作用, 即使有作用也是十分微弱的. Mg^{2+} 对嘌呤环上的氮原子具有很小的亲和力, 而对磷酸根上的氧原子的结合能力却很强. 在低 pH 值下 Mg^{2+} 与 ATP 作用

存在 α 、 β , β 、 γ , α 、 γ 共存的二齿配合物, 在弱碱的条件下, 存在 β 、 γ , α 、 β 、 γ 二齿和三齿共存的配合方式. 毛希安等^[130] 通过¹H-¹⁵N HMBC、³¹P NMR 技术也证实了这个推断, 他们发现 Mg^{2+} 不仅与 ATP 中的磷酸根作用, 在 $3.75 < pH < 5$ 时还与其嘌呤环上的 N1 存在微弱的作用.

(2) 闭环结构: 即 N-7, P-O 同时与 M^{n+} 相结合, 形成分子内大环配合物.

ATP 的结构存在两种构象, 即反式构象和顺式构象. 当金属离子与 ATP 中嘌呤环上的 N1 配位时, ATP 是顺式结构, 即碱基和糖基相对糖苷键来说是处于同一侧的; 当金属离子与 ATP 中嘌呤环上的 N7 配位时, ATP 是反式的, 即碱基和糖基相对糖苷键来说是处于异侧的^[131]. 一般都认为 ATP 在溶液中倾向于反式结构的, 这样能量更低, 所以大部分金属离子与 ATP 作用是以 N7 配位的闭环结构方式作用的^[132], 如: Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 等. 由于这些金属离子有些是与 ATP 中嘌呤环上的 N7 直接作用, 有些是以水分子为中介间接与 ATP 的 N7 相互作用形成复合物, 因此这些大环复合物又可分为内层 (inner-sphere) 和外层 (outer-sphere) 配位两种模式, 如图 1 所示.

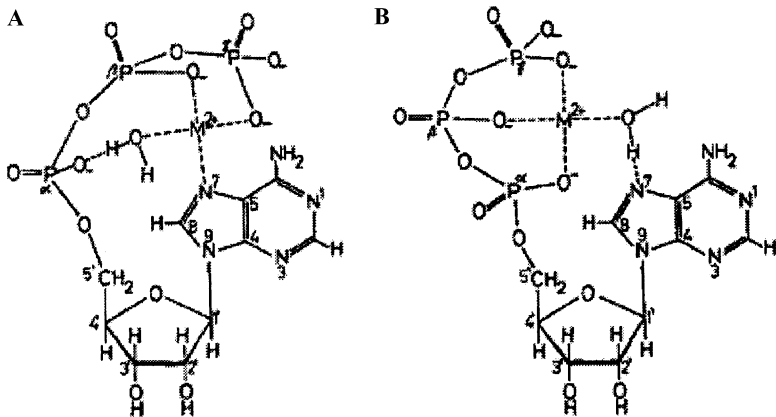


图 1 内层(A)和外层(B)的金属-ATP 配位结构

Fig. 1 Tentative and simplified structures of the macrochelated inner-sphere (A) and out-shpere (B) $M(ATP)^{2-}$ isomers

(3) N-1 配位型闭环结构: 即 M^{n+} 同时与 ATP 中磷酸根和嘌呤环上的 N1 相结合, 形成分子内大环复合物.

ATP 在溶液中是以反式结构存在, 有学者认为如果金属离子要与 ATP 的嘌呤环结合, 应该采取的是 N7 配位模式. 但是近年来毛希安等^[112, 133] 利

用¹H、¹⁵N、³¹P NMR 技术发现在酸性溶液中金属离子 Fe^{3+} 和 Zn^{2+} 与 ATP 作用时倾向于形成 N1 配位复合物, 这一结构对 N1 不可能参与配位作用的传统理论提出了挑战.

(4) 碱基堆积 (base stack) 作用: 即 M^{n+} 同时与一个 ATP 分子的 N7 和另一个 ATP 分子的 O^- 相互作用.

ATP 分子在溶液状态下容易自聚集, 形成碱基堆积的结构. 当加入某些金属离子后 ATP 的碱基堆积更易形成二聚体的结构. 这种配合物一般多数都是以 1: 1 的配位反式共存的. 前面提到的 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 等金属离子与 ATP 相互作用时同时存在 1: 1 和 1: 2 两种配位方式. 当金属浓度很小时, 金属离子与 ATP 相互作用时可能是采取 1: 2 的配位方式. 有些金属离子(如 Mg^{2+})与 ATP 作用时虽不是 1: 2 的配位方式, 但是它们也可以促进 ATP 的堆积作用. 例如: Al^{3+} 曾被认为是以 1: 2 的配位方式与 ATP 相互作用, 而毛希安等利用脉冲梯度场实验证明 Al^{3+} 与 ATP 的作用是 1: 1 的配位方式^[134].

作者曾研究了不同金属离子、各种氨基酸和 ATP 之间的相互作用及其对催化 ATP 水解的影响^[135, 136]. 研究表明赖氨酸与 ATP 通过质子化氨基和羧基与嘌呤环和磷酸链以氢键、静电力发生相互作用, 在 ATP- Mg^{2+} -Lys 三元体系中, Mg^{2+} 主要与 ATP 中的磷酸根基团上的氧原子进行配位, 或通过水分子间接地与 ATP 的嘌呤环发生作用. 而在 ATP- Mg^{2+} -Arg(精氨酸)三元体系中, Mg^{2+} 通过配位、阳离子(Mg^{2+})- π 和静电力不仅间接地与嘌呤环上的 N1 和 N7 相互作用, 而且还与 β -、 γ -P 上的氧原子相配位. 在 ATP- Zn^{2+} -Arg 三元体系中, Zn^{2+} 与 ATP 的作用位点是嘌呤环上的 N1、N7 位点和 α -、 β -、 γ -P 位点, 其作用力为氢键、阳离子(NH_4^+)- π 和静电力. Mg^{2+} (或 Zn^{2+}) 和 Arg 催化 ATP 水解的动力学实验表明在 ATP- Mg^{2+} -Arg 三元体系中的 ATP 水解速率常数是在 ATP 溶液中的 5.1 倍, 是在 ATP-Arg 二元体系中的 4.3 倍. 在 ATP-Arg- Zn^{2+} 三元体系中的 ATP 水解速率常数比在 ATP 溶液中的提高了 1.13 倍, 但在 ATP- Zn^{2+} 二元体系中的 ATP 水解速率常数比在 ATP 溶液中的提高了 12.14 倍. ^{31}P NMR 谱图证实了水解反应经历磷酸过渡态, 反应依照加成-消除反应机理进行.

由于金属离子、氨基酸残基和 ATP 的相互作用对 ATP 水解过程起到十分重要的作用, 已经成为模拟酶催化 ATP 水解研究中的一个研究热点, 特别是其中配体的作用显的越来越重要, 因此, 在分子水平上研究氨基酸、金属离子和 ATP 的相互作用以及催化性质将是一项非常有意义的工作.

参考文献:

- [1] Erecinska M, Cherianl S, Silver I A. *Progress in Neurobiology*[J], 2004, **73**: 397–445
- [2] Ross J. *J. Phys. Chem. B* [J], 2006, **110**: 6 987–6 990
- [3] Hansia P, Guruprasad N, Vishveshwara S. *Biophys. Chem.* [J], 2006, **9**: 127–136
- [4] Lu Gong-xuan(吕功煊). *J. Mol. Catal. (分子催化) (China)* [J], 2006, **20**(5): 435–437
- [5] Wu Sai-yu(吴赛玉). (简明生物化学), (中国科学技术大学出版社)[M]. 2002
- [6] Vale R D, Milligan R A. *Science* [J], 2000, **288**: 88–95
- [7] Zhou Jin-ying(周巾英), Lu Gong-Xuan(吕功煊). *J. Mol. Catal. (分子催化) (China)* [J], 2007, **21**(3): 272–279
- [8] Brien M C O', Flaherty K M, McKay D B. *J. Biol. Chem.* [J], 1996, **271**: 15 874–15 878
- [9] Ma Yan-qing(马彦青), Lu Gong-xuan(吕功煊). *J. Mol. Catal. (分子催化) (China)* [J], 2009, **23**(5): 459–464
- [10] Liu Shu-hua(刘书花), Lu Gong-xuan(吕功煊), Xian Liang(鲜亮). *J. Mol. Catal. (分子催化) (China)* [J], 2006, **20**(1): 57–61
- [11] Seller J R, Goodson H V, Wang F. *Journal of Muscle Research and Cell Motility* [J], 1996, **17**: 7–22
- [12] Bernardo J F, Marc C G, Dominique S. *Proc. Natl. Acad. Sci.* [J], 2006, **103**: 3 681–3 686
- [13] Cope M, Jamie J T V, Whisstock J, et al, *Structure* [J], 1996, **4**: 969–987
- [14] Hodge T, Cope M J T V. *Journal of Cell Science* [J], 2000, **113**: 3 353–3 354
- [15] Mooseker M S, Cheney R E. *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* [J], 1995, **11**: 633–675
- [16] Kreis T, Vale R (Eds). *Guidebook to the Cytoskeletal and Motor Proteins. Second Edition.* Oxford University Press Inc, New York, 1999, ISBN 0 19 859956 0
- [17] Sellers J R. *Biochimica et Biophysica Acta* [J], 2000, **1 496**: 3–22
- [18] Onishi H, Ohki N, Morales M F. *Biochemistry* [J], 2004, **43**: 3 757–3 763
- [19] Yoshikawa K, Shinohara Y, Terada H, Kato S. *Biophys. Chem.* [J], 1987, **27**: 251–254
- [20] Bachouchi N, Garrigos M, Morel J E. *Journal of Molecular Biology* [J], 1986, **191**: 247–254
- [21] Tucker D, Grisolia S. *Biochemical and Biophysical Research Communications* [J], 1960, **3**: 346–349
- [22] Goody R S, Hofman W, Konrad M. *FEBS Letters* [J], 1981, **129**: 169–172

- [23] Shih W M, Gryczynski Z, Lakowicz J R, Spudich J A. *Cell*[J], 2000, **102**: 689 – 694
- [24] Westra H G, Berden J A, Pasman W J, *et al.* *Arch. Physiol. Biochem.* [J], 2001, **109**: 316 – 322
- [25] Stato O, Ogawa Y. *Journal of Biochemistry*[J], 2001, **129**: 881 – 889
- [26] Minehardt T J, Marzari N, Wu Y D, *et al.* *Biophysical Journal*[J], 2001, **80**: 576A – 576A
- [27] Fujime S, Takayama S. *5th international conference on laser applications in life sciences*[J], 1995, **2 370**: 351 – 362
- [28] Kasprzak A A. *Biophysical Journal* [J], 1994, **66**: A195 – A195
- [29] Kastrikin N F. *Doklady Akademii Nauk Sssr*[J], 1977, **236**: 474 – 476
- [30] Kaliman I, Grigorenko B, Shadrina M, Nemukhin A. *Physical Chemistry Chemical Physics* [J], 2009, **11**: 4 804 – 4 807
- [31] Sigel H. *Chem. Soc. Rev.* [J], 1993, **22**: 255 – 266
- [32] Wang Kan(王 刊), Wang Ju-fang(王菊芳). *J. Mol. Catal.* (分子催化)(China)[J], 2009, **23**(1): 73 – 77
- [33] Perl D P, Brody A R. *Science*[J], 1980, **208**: 297 – 299
- [34] Viola R E, Morrison J F, Cleland W W. *Biochemistry* [J], 1984, **19**: 3 131 – 3 137
- [35] 王 夔, 生命科学中的微量元素[M], 1996. 第二版, 中国计量出版社
- [36] Weber J, Hammond S T, Wilke-Mounts S. *Biochemistry* [J], 1998, **37**: 608 – 614
- [37] Braig K, Menz R I, Montgomery M G, *et al.* *Structure* [J], 2000, **8**: 567 – 573
- [38] Yin Chun-hua(尹春华), Tan Tian-wei(谭天伟), Liu Jiang-fan(刘江帆). *J. Mol. Catal.* (分子催化)(China)[J], 2009, **23**(1): 78 – 82
- [39] Weber J, Senior A E. *Biochim. Biophys. Acta* [J], 1997, **1 319**: 19 – 58
- [40] Senior A E, Nadanaciva S, Weber J. *Biochim. Biophys. Acta*[J], 2002, **1 553**: 188 – 211
- [41] Weber J, Hammond S T, Wilke-Mounts S, Senior A E. *Biochemistry*[J], 1998, **37**: 608 – 614
- [42] Wei Xiao-fei(魏晓飞), Du Chuang(杜 创), Wang Ren(王 任), *et al.* *J. Mol. Catal.* (分子催化)(China)[J], 2009, **23**(3): 273 – 276
- [43] Smith R M, Alberty R A. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1956, **78**: 2 376 – 2 380
- [44] Mesecar A D, Nowak T. *Biochemistry*[J], 1997, **36**: 6 792 – 6 802
- [45] Pelletier H, Sawaya M R, Woffle W, *et al.* *Biochemistry* [J], 1996, **35**: 12 762 – 12 777
- [46] Takeuchi H, Murata H, Harada I. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1988, **110**: 392 – 397
- [47] Hammes G G, Maciel G E, Waugh J S. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1961, **83**: 2 394 – 2 395
- [48] Happe A J, Morales M. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1966, **88**: 2 077 – 2 078
- [49] Ling J, Xi-An M. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.* [J], 2001, **57**: 1 711 – 1 716
- [50] Morrison J F, Cleland W W. *Biochemistry*[J], 1980, **19**: 3 127 – 3 131
- [51] Williams N H. Magnesium Ion Catalyzed ATP Hydrolysis. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 2000, **122**: 12 023 – 12 024
- [52] Du Jun-min(杜俊民), Wu Dong(吴 东), Feng Cui-ping(冯翠萍), *et al.* *J. Mol. Catal.* (分子催化)(China)[J], 2009, **23**(4): 372 – 376
- [53] Jencks W P. *Biochemistry*[J], 1990, **29**: 5 172 – 5 179
- [54] Phillips R C, Philip S J, Rutaman R J. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1966, **88**: 2 631 – 2 640
- [55] Mitchell P R, Sigel H. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1978, **100**: 1 564 – 1 570
- [56] Misawa K, Lee T M, Ogawa S. *Biochim. Biophys. Acta* [J], 1982, **718**: 227 – 229
- [57] Huang S L, Tsai M D. *Biochemistry*[J], 1982, **21**: 951 – 959
- [58] Pecoraro V L, Hermes J D, Cleland W W. *Biochemistry* [J], 1984, **23**: 5 262 – 5 271
- [59] Frey C M, E. tuehr J. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1972, **94**: 8 898 – 8 904
- [60] Rimai L, Heyde M E. *Biochemistry*[J], 1971, **10**: 1 121 – 1 128
- [61] Mitchell P R, Sigel H. *Eur. J. Biochem.* [J], 1978, **88**: 149 – 154
- [62] Ramircz F, Marecek J F. *Biochim. Biophys. Acta*[J], 1980, **589**: 21 – 29
- [63] Cini R, Orioli P. *J. Inorg. Biochem.* [J], 1981, **14**: 95 – 105
- [64] Yin Jia-ying(辛嘉英), Yan Ming-fei(阎明飞), Zhou Qi-qiong(周琦琼), *et al.* *J. Mol. Catal.* (分子催化)(China)[J], 2009, **23**(5): 470 – 476
- [65] Scheller K H, Sigel H. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1983, **105**: 5 891 – 5 900
- [66] Sigel H, Tribolet R, Malini-Balakrishnan R, Martin R B. *Inorg. Chem.* [J], 1987, **26**: 2 149 – 2 157
- [67] Glassman T A, Klopman G, Cooper C. *Biochemistry*

- [J], 1973, **12**: 5 013 – 5 019
- [68] Sigel H. *Chem. Soc. Rev.* [J], 1993, **22**: 255 – 266
- [69] Brintzinger H. *Biochim. Biophys. Acta* [J], 1963, **77**: 343 – 345
- [70] Lewis A, Nelson N, Racker E. *Biochemistry* [J], 1975, **14**: 1 532 – 1 535
- [71] WU Xin-ming(武秀明), Zhou Cheng(周 成), Wang An-ming(王安明), *et al. J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2009, **23**(5): 477 – 481
- [72] Glonek T. *International Journal of Biochemistry* [J], 1992, **24**: 1 533 – 1 559
- [73] Hammes G G, Levison S A. *Biochemistry* [J], 1964, **3**: 1 504 – 1 506
- [74] Khan M M T, Martell A E. *J. Phys. Chem.* [J], 1962, **66**: 10 – 15
- [75] Yang Jiang-ke(杨江科), Cao Xiong-wen(曹雄文), Shu Zhong-yao(舒钟瑶). *J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2010, **24**(1): 77 – 81
- [76] Lam Y F, Kuntz G P P, Kotowycz G. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1974, **96**: 1 834 – 1 839
- [77] Lanir A, Yu N T. *J. Biol. Chem.* [J], 1979, **254**: 5 882 – 5 887
- [78] Granot J, Fiat D. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1977, **99**: 70 – 79
- [79] Massoud S S, Sigel H. *Eur. J. Biochem.* [J], 1989, **179**: 451 – 458
- [80] Cohn M, Hughes T R. *J. Biol. Chem.* [J], 1962, **237**: 176 – 181
- [81] Mitchell P R, Sigel H. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1978, **100**: 1 564 – 1 570
- [82] Meng Zhao-wei(孟昭伟), Yuan Qi-peng(袁其朋). *J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2010, **24**(1): 82 – 86
- [83] Granot J, Fiat D. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1977, **99**: 70 – 79
- [84] Wang meng-liang(王梦亮), Yue Zhu(岳 竹). *J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2010, **24**(1): 87 – 92
- [85] Hediger M, Milburn R M. *J. Inorg. Biochem.* [J], 1982, **16**: 165 – 182
- [86] Suzuki S, Higashiyama T, Nakahara A. *Bioinorg. Chem.* [J], 1978, **8**: 277 – 289
- [87] Li Shi-pei(李沛陪), Tong Jin-hui(童金辉), Li Zhen(李 臻), *et al. J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2010, **24**(2): 158 – 170
- [88] Kiss T, Zatta P, Corain B. *Coord. Chem. Rev.* [J], 1996, **149**: 329 – 346
- [89] Rubini P, Lakatos A, Champmartin D, Kiss T. *Coord. Chem. Rev.* [J], 2002, **228**: 137 – 152
- [90] Nelson D J. *Coord. Chem. Rev.* [J], 1996, **149**: 95 – 111
- [91] Kiss T, Martin I. S'ov'ag'o, R B. *Inorg. Chem.* [J], 1991, **30**: 2 130 – 2 132
- [92] Laussac J P, Commenges G. *Nouveau J. Chimie* [J], 1983, **7**: 579 – 585
- [93] Bock J L, Ash D E. *Inorg. Biochem.* [J], 1980, **13**: 105 – 110
- [94] Chang S S, Pratt N C Li, D W. *J. Magn. Reson.* [J], 1975, **18**: 117 – 122
- [95] Zeng Jia-yu(曾家豫), Liu Xiong-xiong(刘雄雄), Kong Wei-bao(孔维宝), *et al. J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2010, **24**(4): 378 – 386
- [96] Jarori G K, Ray B D, Nageswara Rao B D. *Biochemistry* [J], 1985, **24**: 3 487 – 3 494
- [97] Kotowycz G, Hayamizu K. *Biochemistry* [J], 1973, **12**: 517 – 520
- [98] Levy G C, Dechter J J. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1980, **102**: 6 191 – 6 196
- [99] Wee V, Feldman I, Rose P, Gross S. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1974, **96**: 103 – 112
- [100] Wang Meng-liang(王梦亮), Cui Bing-jiang(崔丙健). *J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2011, **25**(5): 427 – 434
- [101] Granot J. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1978, **100**: 2 886 – 2 891
- [102] Lang J, Chmelova K, Stepanek J, *et al. J. Mol. Struct.* [J], 1999, **480/481**: 363 – 367
- [103] Stepanek J, Kowalewski J, Lang J, Mojze's P. *J. Biol. Inorg. Chem.* [J], 1998, **3**: 543 – 556
- [104] Granot J, Fiat D. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1977, **99**: 70 – 79
- [105] Kotowycz G, Suzuki O. *Biochemistry* [J], 1973, **12**: 5 325 – 5 328
- [106] Feldman I, Wee V. *Biochemistry* [J], 1974, **13**: 1 836 – 1 840
- [107] Wang Jing-yun(王静云), Ma Cui-li(马翠丽), Bao Yong-ming(包永明). *J. Mol. Catal.* (分子催化) (China) [J], 2011, **25**(4): 341 – 437
- [108] Berger N A, Eichhorn G L. *Biochemistry* [J], 1971, **10**: 1 857 – 1 864
- [109] Massoud S S, Tribollet R, Sigel H. *Eur. J. Biochem.* [J], 1990, **187**: 387 – 393
- [110] Gasowska A, Jastrzab R, Bregier-Jarzebowska R, Lomozik L. *Polyhedron* [J], 2001, **20**: 2 305 – 2 313

- [111] Lomozik L, Gasowska A, Krzysko G. *J. Inorg. Biochem.* [J], 2006, **100**: 1 781 – 1 789
- [112] Du F, Mao X A, Li D F, Liao Z R. *Polyhedron* [J], 1999, **18**: 2 327 – 2 330
- [113] Bock J L. *The binding of metal ions to ATP*: *J. Inorg. Biochem.* [J], 1980, **12**: 119 – 130
- [114] Bhattacharyya R G, Bhaduri I. *J. Inorg. Nuclear Chem.* [J], 1978, **40**: 733 – 738
- [115] Rimai L, Heyde M E, Carew E B. *Biochem. Biophys. Res. Co.* [J], 1970, **38**: 231 – 237
- [116] Casu M, Lai A, Saba G. *Chem. Phys.* [J], 1986, **109**: 301 – 306
- [117] Biagini S, Casu M, Lai A, *et al.* *Chem. Phys.* [J], 1985, **93**: 461 – 473
- [118] Crisponi G, Caminiti R, Biagini S, *et al.* *Polyhedron* [J], 1984, **9**: 1 105 – 1 108
- [119] Sigel H. *Inorg. Chim. Acta.* [J], 1992, **198 – 200**: 1 – 11
- [120] Sigel H. *Chem. Soc. Rev.* [J], 1993, 255 – 266
- [121] Sajadi S A A, Song B, Gregan F, *et al.* *Inorg. Chem.* [J], 1999, **38**: 439 – 448
- [122] Clore G M, Gronenborn A M. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1982, **104**: 1 369 – 1 375
- [123] Bose R N, Cornelius R D, Viola R E. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1986, **108**: 4 403 – 4 408
- [124] Mansy S, Chu G Y H, Duncan R F, Tobias R S. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1978, **100**: 607 – 616
- [125] Reily M D, Marzilli L G. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1986, **108**: 6 785 – 6 793
- [126] Yamauchi O, Odani A, Shimata R, Kosaka Y. *Inorg. Chem.* [J], 1986, **25**: 3 339 – 3 345
- [127] Odani A, Shimata R, Masuda H, Yamauchi O. *Inorg. Chem.* [J], 1991, **30**: 2 133 – 2 138
- [128] Shyy Y J, Tsai T C, Tsai M-D. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1985, **107**: 3 478 – 3 484
- [129] Happe J A, Morales M. *J. Am. Chem. Soc.* [J], 1966, **88**: 2 077 – 2 078
- [130] Jiang L, Mao X A. *Spectrochimica Acta Part A* [J], 2001, **57**: 1 711 – 1 716
- [131] Sigel H. *Coord. Chem. Rev.* [J], 1990, **100**: 453 – 539
- [132] Sigel H. *Eur. J. Biochem.* [J], 1987, **165**: 65 – 72
- [133] Du F, Mao X A. *Spectrosc. Acta A* [J], 2000, **56**: 2 391 – 2 395
- [134] Huang H, Liu M L, Mao X A. *Spectrosc. Acta. A* [J], 1998, **54**: 999 – 1 005
- [135] Jin-ying Zhou, Gong-xuan Lu. *Spectrochimica Acta Part A* [J], 2011, **78**: 1 305 – 1 309
- [136] Jin-ying Zhou, Gong-xuan Lu. *Journal of Coordination Chemistry* [J], 2011, **20**: 3 441 – 3 453