

Research Progress of Sensors for the Detection of Potassium Ions

Zijia Sun¹, Honghai Sun^{2*}

¹College of Chemical Engineering and New Energy Materials, Zhuhai College of Jilin University, Zhuhai Guangdong

²College of Chemical Engineering, Daqing Normal University, Daqing Heilongjiang

Email: sunzijia_723@163.com, ^{*}Sunhonghai99@163.com

Received: Jun. 15th, 2020; accepted: Jun. 26th, 2020; published: Jul. 3rd, 2020

Abstract

Potassium ion is an important mineral to maintain and regulate body function. It is involved in many kinds of metabolism. It is closely related to glycogen and protein synthesis. It can regulate osmotic pressure of liquid inside and outside cells, acid-base balance and affect excitability of neuromuscular tissue. The abnormal concentration of potassium ion has a great influence on the function of cell membrane, which can cause serious dysfunction of nerve, smooth muscle and myocardium, and is related to many diseases. Therefore, the detection methods and high accuracy of potassium ions have attracted more attention. It is necessary to develop a rapid, reliable and quantitative method for the analysis of potassium ions for medical diagnosis.

Keywords

Detection, Potassium Ion, Sensor Research

用于检测钾离子的传感器的研究进展

孙梓嘉¹, 孙洪海^{2*}

¹吉林大学珠海学院化工与新能源材料学院, 广东 珠海

²大庆师范学院化学工程学院, 黑龙江 大庆

Email: sunzijia_723@163.com, ^{*}Sunhonghai99@163.com

收稿日期: 2020年6月15日; 录用日期: 2020年6月26日; 发布日期: 2020年7月3日

摘要

钾离子是维持和调节身体机能的重要矿物质, 参与多种新陈代谢, 与糖原和蛋白质合成有密切关系, 能调节细胞内外液体的渗透压及酸碱平衡和影响神经肌肉组织的兴奋性。钾离子浓度异常, 对细胞膜的功能

*通讯作者。

能影响很大, 可引起神经、平滑肌、心肌等严重的功能障碍, 与多种疾病相关。因此, 钾离子的检测方法和高准确度倍受关注, 需要开发快速、可靠、定量分析钾离子的方法对于医学诊断是重要的。

关键词

检测, 钾离子, 传感器

Copyright © 2020 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. 引言

钾离子在人体内最重要的元素之一, 对身体功能(如维持细胞外渗透压、酶的活化、胶原蛋白或弹性蛋白的形成、血压调节和 pH 平衡)至关重要。正常成年人血清钾离子在 3.5~5.5 mM 之间, 正常尿钾在 10~100 mM/24 h 的范围内。钾水平的轻微变化可以影响健康, 钾离子浓度变化导致肾脏功能、神经肌肉、心脏疾病、癌症等疾病。因此, 快速的、可靠的、定量的测定钾离子的含量对于医学诊断是重要的。目前, 钾离子的检测主要使用电化学方法、荧光法、原子吸收/发射光谱法、比色法、离子色谱等, 本文将近几年来检测钾离子的方法进行阐述。

2. 修饰脱氧核糖核酸(DNA)类 - 荧光生物传感器

2016 年 Shan Zhang 等[1]利用双标记凝血酶寡核苷酸适配体的衍生物来检测血清中的钾离子。在凝血酶寡核苷酸与钾离子形成 G-四联体之后, 通过两端的荧光基团实现荧光共振能量转移(FRET)来检测钾离子。如图 1 所示(图片来源: Specific detection of potassium ion in serum by a modified G-quadruplex method)。

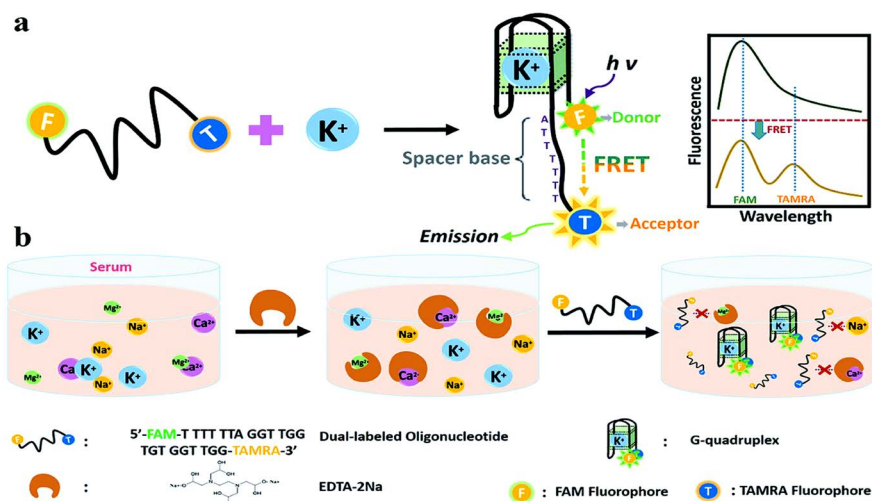


Figure 1. Schematic description of K⁺ detection based on the formation of G-quadruplex induced FRET. (a) G-quadruplex formation of dual-labelled TBA oligonucleotide derivative in the presence of K⁺ formation induced occurrence of FRET between FAM and TAMRA; (b) Eliminate the interference of Ca²⁺ and Mg²⁺ ions using EDTA as chelating agent to realize sensitive and selective K⁺ detection

图 1. 钾离子检测且 G-四链体诱导 FRET 示意图。(a) 在钾离子形成的存在下, 双标记 TBA 寡核苷酸衍生物的 G-四链体形成, FAM 和 TAMRA 之间发生 FRET; (b) 用 EDTA 作为螯合剂消除钙离子和镁离子的干扰, 从而实现灵敏且选择性检测钾离子

考虑到钙离子、镁离子也会与凝血酶寡核苷酸结合形成 G-四联体, 用 EDTA 作为螯合剂避免了生理浓度下钙离子和镁离子的干扰。同时, Shan Zhang 等在不同 pH 和温度下进行了测试, 测试结果表明 pH 基本不会对结果产生干扰, 不过值得注意的是 FRET 的效率会随着温度的升高而降低, 不过在人体体温 36.5℃~37.5℃ 区间影响不大。

3. 免标记 - 脱氧核糖核酸(DNA)类 - 荧光生物传感器

2015 年 Zhengbo Chen 等[2]报道了一种基于双链 DNA (dsDNA)构象变化和 PicoGreen 染料(一种不对称的菁染料)荧光性质的敏感、选择性和几乎通用的无标记荧光适体方法。该传感系统采用非对称菁染料 PicoGreen、ssDNA 适体及其互补单链 DNA (ssDNA)。在没有互补链的情况下, PicoGreen 不能诱导荧光, 将互补链添加到混合物中, PicoGreen 插入 ssDNA 双链并导致荧光强度显著增加, 荧光强度与浓度成正比。如图 2 所示(图片来源: Superior fluorescent probe for detection of potassium ion)。这种方法的检测限为 2.37 pM, 并具有成本低、灵敏度高、特异性强、商品化程度高等优点。

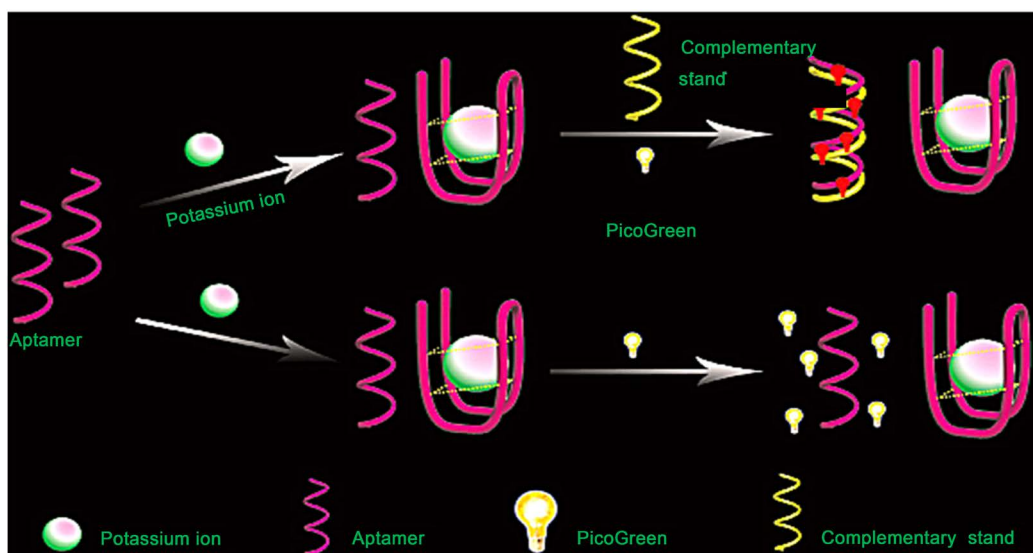


Figure 2. Schematic illustration of the label-free fluorescent strategy for K^+ based on aptamers and PicoGreen dye
图 2. 基于适配体和 PicoGreen 染料的无标记荧光方案的示意图

2015 年 Shujun Zhen 等[3]使用氧化石墨烯, ssDNA 和荧光团吡啶橙(AO)免标记的方法进行钾离子检测。当溶液中没有钾离子情况下, ssDNA 和 AO 通过 π - π 堆积[4] [5]的作用力吸附在 GO 的表面上, AO 的旋转是与整个结构耦合的, AO 荧光得到增强;当溶液中有钾离子时, ssDNA 与钾离子形成 G-四联体, AO 可以与 G-四联体可以稳定结合, 并且由于核苷酸碱基与氧化石墨烯结构之间的 π - π 堆积减少, 会远离氧化石墨烯表面[6] [7], 由于 AO 与 G-四联体的复合物尺寸相对较小, AO 的荧光显著下降。如图 3 所示(图片来源: Graphene oxide amplified fluorescence anisotropy for label-free detection of potassium ion)。这种方法可以在 10 μ M~2 mM 范围内进行测试。

2016 年 Jingjing Dong 等[8]利用 3,4,5-三甲氧基苯乙二醛(TMPG, 是一种特殊的化学荧光试剂)和 ssDNA 进行钾离子的测试。在水溶液中 TMPG 可以与鸟嘌呤立即发生反应[9], 富含鸟嘌呤的 ssDNA 可以与 TMPG 反应产生很强的荧光[4], 但是当 ssDNA 折叠形成 G-四联体后, 荧光会显著降低。如图 4 所示(图片来源: Rapid and sensitive detection of potassium ion based on K^+ -induced G-quadruplex and guanine chemiluminescence)。这种方法可以检测尿液中的钾离子, 并且检测过程可以在 5 分钟内完成, 检测限为 9 μ M。

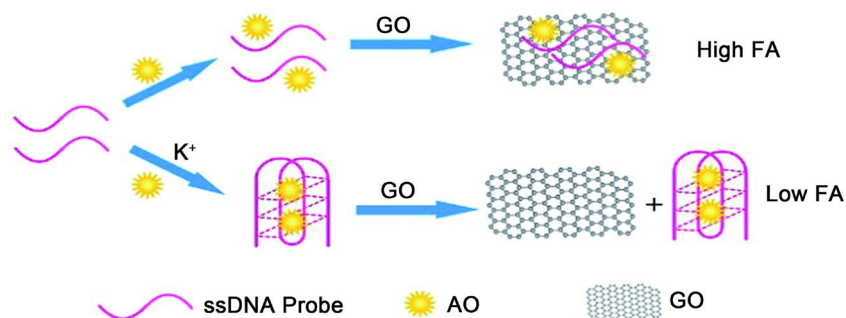


Figure 3. The concept and principle of GO amplified fluorescence anisotropy for the label-free detection of K^+
图 3. GO 放大荧光各向异性的概念和原理用于无标记检测 K^+ 的示意图

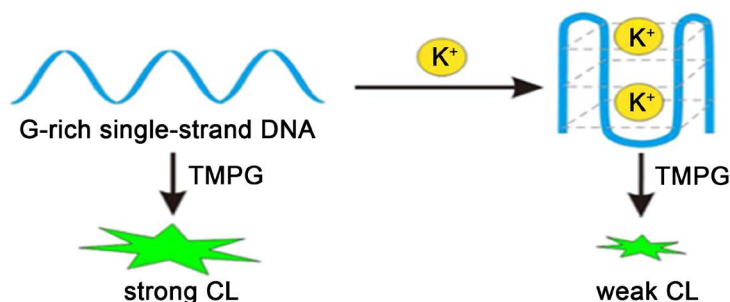


Figure 4. The chemiluminescence (CL) strategy for K^+ detection. TMPG 3,4,5-trimethoxyphenylglyoxal
图 4. K^+ 检测示意图。TMPG 3,4,5-三甲氧基苯乙二醛

2016 年 Le Yang 等[5]首次使用一种基于 G-四联体的检测方法,能够直接通过荧光方法检验血液中的钾离子。为避免受到背景吸收和血液自身荧光的干扰,使用两个光子激发的配体 EBMVC-B[(乙基-4-[3,6-双(1-甲基-4-乙烯基吡啶碘)-9 氢-咪唑-9-基]丁酸乙酯]作为荧光报告分子。钾离子可以诱导 G-四联体的形成,并与 EBMVC-B 进行结合。如图 5 所示(图片来源: Direct Fluorescent Detection of Blood Potassium by Ion-Selective Formation of Intermolecular G-Quadruplex and Ligand Binding)。这种方法线性响应范围为 0.5~10 mM, 血液中钾离子浓度范围匹配。

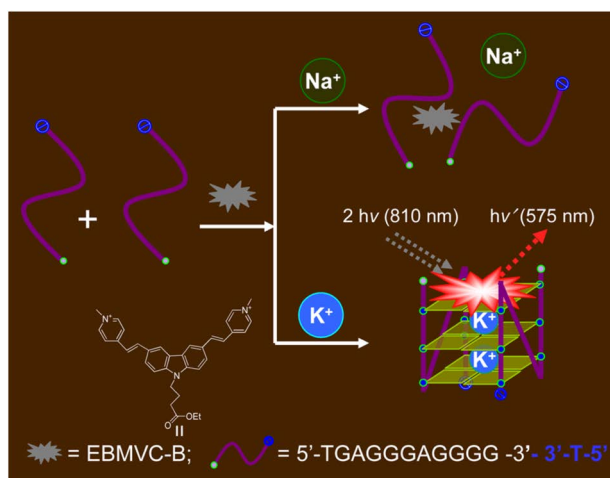


Figure 5. Schematic illustration for highly selective detection of blood potassium based on K^+ -Dependent formation of intermolecular g-quadruplex and two-photon ligand binding
图 5. 基于分子间 G-四联体和双光子配体结合 K^+ 的高选择性检测血钾的示意图

4. 碳点 - 荧光生物传感器

2015年 Lingyang Zhang 等[6]利用碳点作为荧光探针来检测血清中钾离子。独特的碳点可用作荧光探针, 无需任何预处理即可灵敏地检测人血清中的生理钾水平。

利用碳点表面的-OH 和 COO-可能形成氢键, 从而形成一种环状结构, 这种结构类似于冠醚, 对金属离子具有敏感和选择性结合特性[7] [10], 在钾离子与空腔结合后, 钾离子和氧供体原子的孤对电子之间的强相互作用可以产生更稳定的结构, 由此导致碳点的荧光猝灭。如图 6 所示(图片来源: Carbon dots as a fluorescent probe for label-free detection of physiological potassium level in human serum and red blood cells)。此方法检测限为 1.0×10^{-12} M。其结果与目前临床诊断中使用的离子选择性电极法获得的结果基本一致, 具有需样量少、成本低廉、精度良好、易于检测等优点, 但也存在荧光强度随着 pH 值的增加而降低, 碳点的随着激发波长的改变其产生的荧光也会有所改变的缺点[11]。

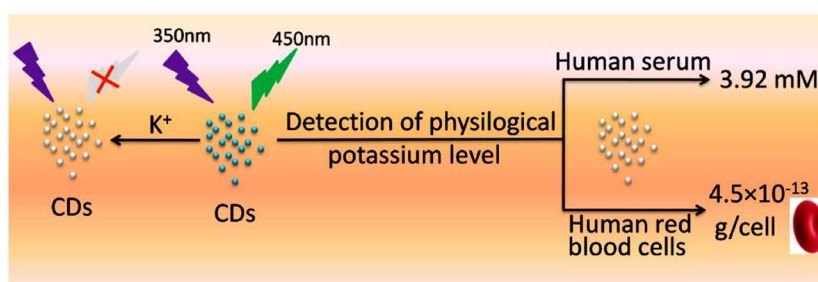


Figure 6. Schematic illustration of detection of physiological potassium level in human serum and red blood cells based on fluorescent CDs

图 6. 碳点作荧光探针检测血清中钾离子示意图

2016年 Marta Jarczewska 等[12]开发了 DNA 适配体作为识别层, 用来检测钾离子的电化学传感器。通过 Au-S 键将硫醇化的适配体探针固定在金电极上, 比较氧化还原指示剂亚甲基蓝(MB), 蒽醌-2-甲基磺酸钠(AQMS)和 $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ 的电流变化, 使用方波伏安法(SWV)测定钾浓度。如图 7 所示(图片来源: Direct Fluorescent Detection of Blood Potassium by Ion-Selective Formation of Intermolecular G-Quadruplex and Ligand Binding)。研究表明, 与钾离子结合的适配体序列中, 当 15-mer 凝血酶适配体对钾的亲合力最高, 适配体在 10^{-8} 至 10^{-5} M 范围内表现出线性响应, 检测限为 2.31×10^{-9} M。

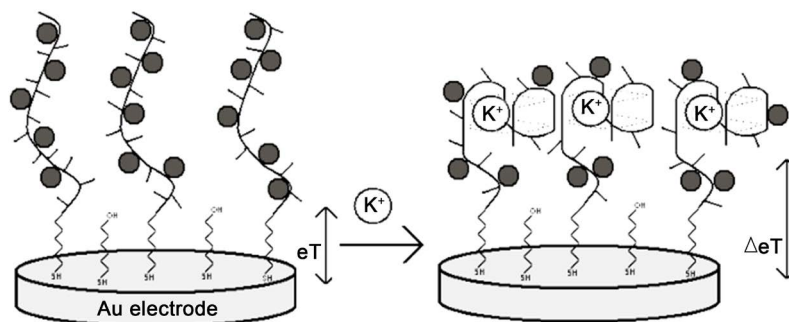


Figure 7. Aptamer-based biosensor behaviour in the presence of potassium ions

图 7. 在钾离子存在下适配体生物传感器的行为

5. 电化学阻抗谱传感器

2014年 Peng Miao 等[13]利用钾与特异性适配体结合和 RecJ_F核酸外切酶来检测钾离子。在金电极上

修饰具有茎环结构的 DNA 探针, 钾离子可以特异性结合适配体并形成 G-四链体结构, 破坏了茎环结构。5' 末端可以通过 RecJ_f 外切核酸酶进一步反应, 释放钾离子, 释放的钾离子可以与电极上的另一个 DNA 探针结合, 在由钾离子引发的 RecJ_f 外切核酸酶切割循环后, 电化学信号强度显著降低, 可用于确定钾离子的浓度, 检测限为 50 nM。如图 8 所示(图片来源: An aptasensor for detection of potassium ions based on RecJ(f) exonuclease mediated signal amplification)。

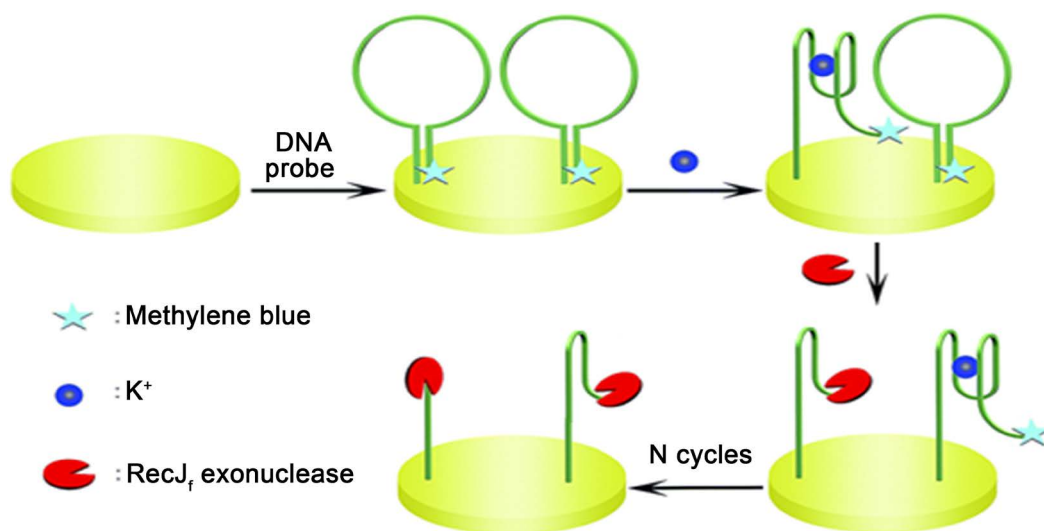


Figure 8. Illustration of the aptasensor for K⁺ with RecJ_f exonuclease mediated signal amplification

图 8. 用 RecJ_f 核酸外切酶介导使信号放大示意图

2019 年 H. X. Zhang 等[14]研究结果表明, 1-氮杂-18-冠-6(1-aza-18-crown-6)通过亲核加成反应成功地氧化石墨烯(GO)功能化, 形成了碳氮共价键。然后将冠 GO 复合材料作为电极改性材料, 采用电化学阻抗谱(EIS)方法检测钾离子。在 EIS 测量中, 1-aza-18-crown-6 起着分子识别探针的作用, 它捕获钾离子, 石墨烯复合材料增加了结合钾离子的能力。随着钾离子浓度的增加, 修饰电极表面的电荷转移电阻(R_{ct})逐渐减小。根据 R_{ct} 的变化, 可以间接测定钾离子浓度。这种超灵敏电化学传感器对钾离子的线性响应范围为 10⁻⁷~10⁻¹³ M, 检测限为 10⁻¹⁵ M。

6. 比色法

2018 年 Mahboube Naderi 等[15]在适配体传感器中利用金纳米颗粒和阳离子染料去检测钾离子。利用反应后出现的不同颜色(橙色和绿色之间)来区分溶液中有无钾离子。众所周知传感器改变颜色是由金纳米颗粒溶液的离子强度所影响, 金纳米颗粒的大小与离子电势有关, 离子电势越大, 聚集越多, 随后颜色向蓝色范围移动。最初, 吸附有适配体的金纳米颗粒加入染料后呈现橙色, 这可能是由于混合颜色(红色的金纳米颗粒和黄色的染料, 在 420 nm 和 530 nm 处可观察到紫外-可见峰), 加入钾离子后, 与适配体之间的高亲和力导致适配体与金纳米颗粒表面解离, 钾离子与适配体形成 G-四链体结构, 由于阳离子染料引起的金纳米颗粒的聚集, 添加染料后颜色从橙色变为绿色, 这可能是蓝色(聚合的金纳米颗粒的颜色)和黄色的组合, 紫外光谱通过 530 nm 的吸收峰降低和 700 nm 的吸收强度增强所致。如图 9 所示(图片来源: Naked-eye detection of potassium ions in a novel gold nanoparticle aggregation-based aptasensor)。这种传感器不需要将核酸固定到纳米颗粒上, 也不需要添加过量的盐, 并且在染料的作用下, 不同浓度钾离子溶液的颜色变化会更加明显, 此方法检测限为 4.4 nM。

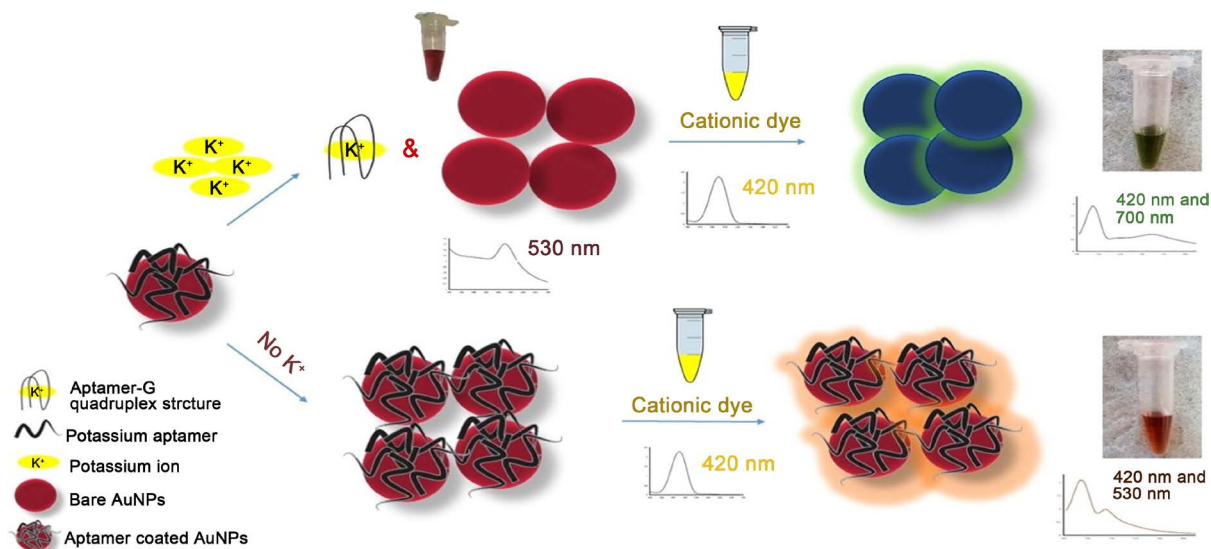


Figure 9. Schematic illustration of the potassium sensing system

图 9. 钾离子传感器示意图

2019年 Jiaoyan Qiu 等[16]通过冠醚改性金纳米粒子检测钾离子。其原理是冠醚可以通过 Au-N 键固定在金纳米粒子表面，钾离子与冠醚可以进行螯合作用，从而诱导了金纳米颗粒的聚集。金纳米颗粒溶液的颜色从酒红色变为灰色，并在 620 nm 附近出现一个特征吸收峰；也就是说，4-氨基苯并-18-冠-6(ABC)和钾离子之间形成 2:1 的稳定三明治复合结构，由于尺寸匹配，会诱导 ABC 修饰的金纳米颗粒的聚集。如图 10 所示(图片来源: Rapid colorimetric detection of potassium ions based on crown ether modified Au NPs sensor)。通过金纳米颗粒的聚集和表面等离子共振(SPR)吸收峰的变化，用于钾离子的定性和定量分析，此方法肉眼检测限为 40 μM ，紫外可见光谱检测限为 5.24 μM ，并且仅需 20 分钟即可完成检测。通过进行尿液样品的测试后，与电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测的结果较为一致。

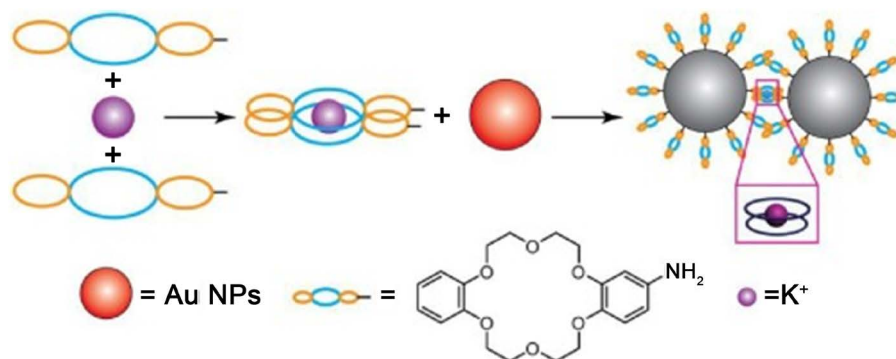


Figure 10. Mechanism of the colorimetric detection method for K^+ based on ABC modified AuNPs

图 10. ABC 修饰的 AuNPs 比色检测钾离子机理

2019年 Gang Shen 等[17]利用手性菁染料/TBA 配合物的组装和拆分，建立了一种高选择性、高灵敏度的直接检测钾和铅离子的方法。通过紫外-可见光谱测量，染料 DMSB(3-乙基-2-[3-(3-乙基-3-苯并硒偶氮-2-亚立德)-2-甲基丙-1-烯基]苯并硒偶氮溴化物)可被凝血酶结合适体(TBA)G-四链结构激活。只有在 K^+ 存在下形成的 TBA-g4plex 能强烈诱导 DMSB 的 J-聚集信号。由于 Pb^{2+} 离子能以比 K^+ 更高的效率结合和稳定 TBA 的 G-四链，当 Pb^{2+} 存在时，DMSB 的 J-聚集信号急剧下降。结果表明，DMSB 的组装和拆

卸可分别对 $10\ \mu\text{M}\ \text{K}^+$ 和 $20\ \text{nm}\ \text{Pb}^{2+}$ 进行选择检测, 即使竞争性钠离子(Na^+)高达 $145\ \text{mM}$ 。在 $0.5\sim 5.0\ \text{mM}$ 和 $200\sim 2000\ \text{nM}$ 范围内, J-集料强度与 K^+ 和 Pb^{2+} 浓度呈线性相关。如图 11 所示(Direct detection of potassium and lead (II) ions based on assembly-disassembly of a chiral cyanine dye/TBA complex)。此外, 本方法还测定了人血清样品中 K^+ ($\sim 3\ \text{mM}$) 和 Pb^{2+} ($20\ \text{nm}$ 以下) 的浓度, 与电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)一致。这项工作不仅为进一步开发基于 G-四极体的复杂实际系统的 aptasensor 打开了一扇门, 而且为临床离子检测提供了一个简单、通用的传感平台。

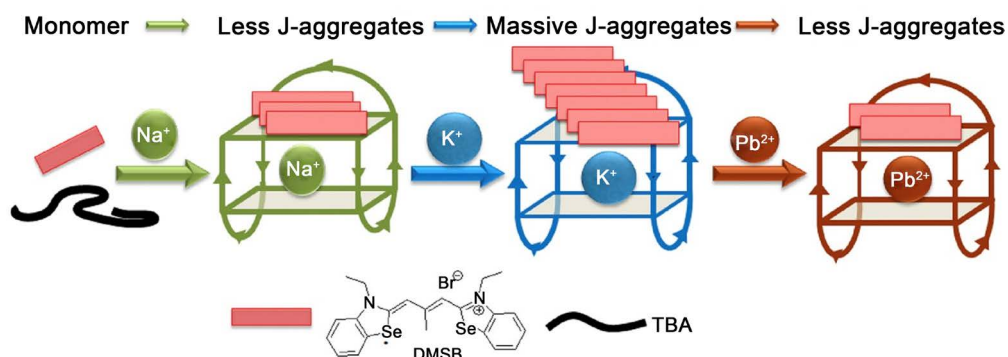


Figure 11. Schematic representation for the detection of K^+ and Pb^{2+} ions
图 11. K^+ 和 Pb^{2+} 离子检测示意图

本方法具有三个重要的特点: 1) 在不受其它金属离子干扰的情况下, 对 K^+ 和 Pb^{2+} 具有良好的选择性。最重要和有趣的是, 即使在 $145\ \text{mM}\ \text{Na}^+$ 存在下, $10\ \mu\text{M}\ \text{K}^+$ 和 $20\ \text{nm}\ \text{Pb}^{2+}$ 也可以很容易地被检测到; 2) 它简单, 省去了 DNA 共价修饰的需要, 大大降低了成本; 3) 可用于人血清中 K^+ 和 Pb^{2+} 的测定。这些重要的特性使这种新型的无创传感器在临床研究和诊断中具有广阔的应用前景。

7. 拉曼散射光谱

2016 年 Hongyang Su 等[18]首次使用了在疏水表面使用拉曼散射的方法用于检测人血清中的生理钾离子。其原理是通过聚四氟乙烯的疏水表面, 当一滴水溶液置于该表面上时, 其溶质在溶剂蒸发过程中被浓缩, 液滴将保持球形。利用钾离子和铵离子定性亚硝酸钴钠试剂, 在酸性介质或中性条件下, 可以进行钾离子和亚硝酸钴钠的反应:

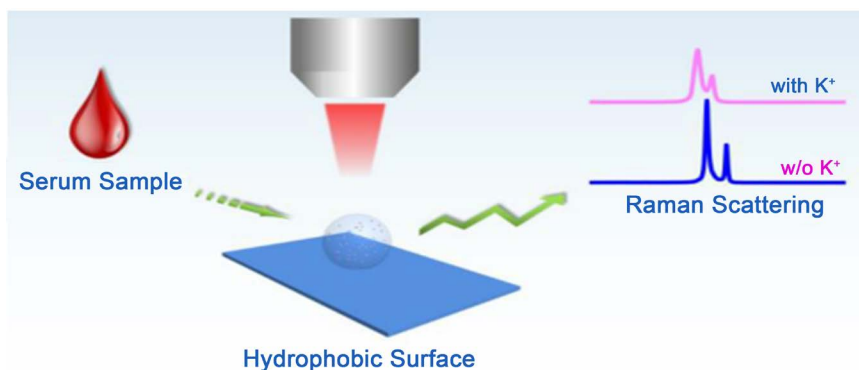


Figure 12. Raman spectra of potassium-sodium cobaltinitrite (A) and sodium cobaltinitrite (B)
图 12. 钴亚硝酸钾钠(A)和钴亚硝酸钠(B)的拉曼光谱

这种方法可以实现钾离子的定性检测, 并且结合反应和拉曼散射光谱, 可以实现钾离子的定量检测。检测时样品无需经过预处理。钾 - 亚硝酸钴钠的特征拉曼峰在 827 cm^{-1} 处, 可以通过此特征峰来证明钾离子的存在, 具有良好的重复性和重现性, 检测线可以达到 0.01 mM , 可用于钾离子的定量、定性分析, 并且整个检测过程仅需要 2 分钟就能完成。这是一种用少量样品进行快速检测含有大量钠离子的人血清中钾离子含量的方法。如图 12 所示(图片来源: Detection of physiological potassium ions level in human serum by Raman scattering spectroscopy)。

8. 展望

人们在检测钾离子方面已经得到实际进展, 例如检测限、敏感度和选择性, 但是检测钾离子的传感器的可重复利用、储存稳定性、便携性、小型化仍然是一个挑战。在实际工作中, 样品的复杂环境必定会对其测定结果产生影响, 随着研究的深入, 必定会出现不需要复杂处理过程, 准确度和灵敏度高的生物传感器, 用于检测钾离子。相反, 钾离子传感器也可用于 DNA 检测, 利用荧光法、比色法等制成可以检测病毒核酸的试剂盒, 用于快速检测病毒的存在。

参考文献

- [1] Zhang, S., Zhang, R., Ma, B., Qiu, J., Li, J., Sang, Y., Liu, W. and Liu, H. (2016) Specific Detection of Potassium Ion in Serum by a Modified G-Quadruplex Method. *RSC Advances*, **6**, 41999-42007. <https://doi.org/10.1039/C6RA04046B>
- [2] Chen, Z., Tan, L., Hu, L. and Luan, Y. (2015) Superior Fluorescent Probe for Detection of Potassium Ion. *Talanta*, **144**, 247-251. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.015>
- [3] Zhen, S.J., Yu, Y., Li, C.M. and Huang, C.Z. (2015) Graphene Oxide Amplified Fluorescence Anisotropy for Label-Free Detection of Potassium Ion. *The Analyst*, **140**, 353-357. <https://doi.org/10.1039/C4AN01433B>
- [4] Miao, J., Cao, Z., Zhou, Y., Lau, C. and Lu, J. (2008) Instantaneous Derivatization Technology for Simultaneous and Homogeneous Determination of Multiple DNA Targets. *Analytical Chemistry*, **80**, 1606-1613. <https://doi.org/10.1021/ac7022553>
- [5] Yang, L., Qing, Z., Liu, C., Tang, Q., Li, J., Yang, S., Zheng, J., Yang, R. and Tan, W. (2016) Direct Fluorescent Detection of Blood Potassium by Ion-Selective Formation of Intermolecular G-Quadruplex and Ligand Binding. *Analytical Chemistry*, **88**, 9285-9292. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b02667>
- [6] Zhang, L., Chen, S., Zhao, Q. and Huang, H. (2015) Carbon Dots as a Fluorescent Probe for Label-Free Detection of Physiological Potassium Level in Human Serum and Red Blood Cells. *Analytica Chimica Acta*, **880**, 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.057>
- [7] Li, Y., Huszthy, P. and Kunsági-Máté, S. (2012) Effect of Molecular Vibrations on the Selectivity Character of Pyridino-18-Crown-6 Derivatives towards Potassium Ion. *Chemical Physics Letters*, **533**, 45-49. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2012.03.023>
- [8] Dong, J., Zhao, H., Zhou, F. and Li, B. (2016) Rapid and Sensitive Detection of Potassium Ion Based on K(+)-Induced G-Quadruplex and Guanine Chemiluminescence. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **408**, 1863-1869. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9285-y>
- [9] Kai, M., Kishida, S. and Sakai, K. (1999) A Chemiluminescence Derivatization Method for Detecting Nucleic Acids and DNA Probes Using a Trimethoxyphenylglyoxal Reagent That Recognizes Guanine. *Analytica Chimica Acta*, **381**, 155-163. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00724-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00724-7)
- [10] Wei, W., Xu, C., Ren, J., Xu, B. and Qu, X. (2012) Sensing Metal Ions with Ion Selectivity of a Crown Ether and Fluorescence Resonance Energy Transfer between Carbon Dots and Graphene. *ChemCommun (Camb)*, **48**, 1284-1286. <https://doi.org/10.1039/C2CC16481G>
- [11] Qu, K., Wang, J., Ren, J. and Qu, X. (2013) Carbon Dots Prepared by Hydrothermal Treatment of Dopamine as an Effective Fluorescent Sensing Platform for the Label-Free Detection of Iron (III) Ions and Dopamine. *Chemistry*, **19**, 7243-7249. <https://doi.org/10.1002/chem.201300042>
- [12] Jarczewska, M., Górski, Ł. and Malinowska, E. (2016) Application of DNA Aptamers as Sensing Layers for Electrochemical Detection of Potassium Ions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **226**, 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.11.139>
- [13] Miao, P., Tang, Y., Wang, B., Han, K., Chen, X. and Sun, H. (2014) An Aptasensor for Detection of Potassium Ions

Based on RecJ(f) Exonuclease Mediated Signal Amplification. *The Analyst*, **139**, 5695-5699.

<https://doi.org/10.1039/C4AN01350F>

- [14] Zhang, H.X., Huang, Z.X., Zhao, P.Y., Hou, Y., Guo, J.J. and Wu, Y.C. (2019) Crown Ether Functionalized Graphene Oxide as Ultrasensitive Electrochemical Sensor for Detection of Potassium Ions. *Materials Research Express*, **6**, Article ID: 125095.
- [15] Naderi, M., Hosseini, M. and Ganjali, M.R. (2018) Naked-Eye Detection of Potassium Ions in a Novel Gold Nanoparticle Aggregation-Based Aptasensor. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **195**, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.01.051>
- [16] Qiu, J., Zhang, Y., Dong, C., Huang, Y., Sun, L., Ruan, H., Wang, H., Li, X. and Wu, A. (2019) Rapid Colorimetric Detection of Potassium Ions Based on Crown Ether Modified Au NPs Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **281**, 783-788. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.10.139>
- [17] Shen, G., *et al.* (2019) Direct Detection of Potassium and Lead (II) Ions Based on Assembly-Disassembly of a Chiral Cyanine Dye/TBA Complex. *Talanta*, **201**, 490-495. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.04.032>
- [18] Su, H., Ruan, W., Ye, S., Liu, Y., Sui, H., Li, Z., Sun, X., He, C. and Zhao, B. (2016) Detection of Physiological Potassium Ions Level in Human Serum by Raman Scattering Spectroscopy. *Talanta*, **161**, 743-747. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.09.010>