•科普• doi: 10.3866/PKU.DXHX202305017 www.dxhx.pku.edu.cn

追踪血氧
——指尖上的光谱仪

陈诺，贾能勤*
上海师范大学化学与材料科学学院，上海 200234

摘要：指夹式血氧仪是一种无创的血氧饱和度监测仪器，已成为家用医疗器械领域的热门产品之一。本文基于血氧饱和度的定义，分析了指夹式血氧仪的工作原理、仪器结构。并针对“手机测血氧”“火腿肠血氧值”等话题进行解析。通过建立本质与现象之间的关系，旨在帮助读者丰富科学知识，发展科学思维，进一步用科学的眼光去认识世界。

关键词：血氧仪；血氧饱和度；朗伯-比尔定律
中图分类号：G64；O6

Tracing Oxygen Saturation: The Oximeter on Your Fingertip

Nuo Chen, Nengqin Jia *
College of Chemistry and Material Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China.

Abstract: The finger clip oximeter has become one of the popular products among home health equipment. This paper analyzes the working principle of finger clip oximeter, the structure of the device, and goes further to explain several controversial topics. The aim is to help readers enrich their scientific knowledge while learning to explicate phenomena with a scientific perspective.

Key Words: Oximeter; Oxygen saturation; Lambert- Beer law

2022年底，随着“沉默性缺氧”一词进入大众视野，指夹式血氧仪销量陡增，甚至一度出现“一仪难求”的局面。

指夹式血氧仪在监测血氧饱和度中起到了关键的作用。血氧饱和度是衡量人体缺氧与否的参数。当机体缺氧时，大部分人会收到来自身体的“警报”，即明显感到疲劳和呼吸急促；但也有以老年人为主的少部分群体不会出现缺氧的征兆，然而身体各项机能随时有可能急转直下，出现生命危险，这就是“沉默性缺氧”。通过指夹式血氧仪，我们可以实时了解自己的血氧情况，针对缺氧问题实现“早发现、早诊断、早治疗”。

指夹式血氧仪的热销也引得好奇与质疑四起——“经由手机摄像头测得的血氧是否具有科学性？”“火腿肠竟也可测出‘血氧值’？”等话题接连引发热议。这一现象的背后，正是大众对于指夹式血氧仪科学普及的需求。

收稿：2023-05-08；录用：2023-05-19；网络发表：2023-06-12
*通讯作者，Email: nqjia@shnu.edu.cn
基金资助：上海市高等学校一流本科课程(沪教委高(2021)5 号)

1 什么是“血氧饱和度”？

足够的O_2是维持生命活动必不可少的物质基础。人体通过肺部吸入外界的O_2后，需要以血液作为媒介，将O_2运送至身体的各个地方。血液中的O_2即称为“血氧”。值得关注的是，O_2作为一种并不易溶于水的气体，又是怎样稳定存在于血液中的呢？

事实上，直接以溶解形式存在于血液中的O_2确实寥寥无几，仅占总量的1.5% [1]；而其余98.5%的O_2需要借助血液中的“O_2快递员”——血红蛋白，并以化学结合的形式，才能被远距离地派送至各个组织中去。其中，携带上O_2的血红蛋白是氧合血红蛋白(HbO_2)，当卸下O_2后则变为去氧血红蛋白(Hb)，它们都属于参与氧运输的血红蛋白。

指夹式血氧仪所检测的血氧饱和度(SpO_2)就是血红蛋白与O_2结合的程度，即HbO_2占氧运输血红蛋白的百分比[2]。根据定义，血氧饱和度可简单表示为：

$$SpO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \times 100\%$$

从上式出发，指夹式血氧仪为测得血氧只需要经过三个步骤：区分出血液中的HbO_2和Hb→分别测得两种血红蛋白的含量→分析数值进行计算。正常情况下，人体内的血氧饱和度应≥ 95%。

经典的血气分析法需要通过人体动脉穿刺采血、对血液进行各项分析，方能得出血氧饱和度。那么指夹式血氧仪该如何在无创的情况下，采得蕴藏在血液中的信息呢？

2 血红蛋白的“化学指纹”

指纹因具有“独一无二”的特点，在无创情况下就能够鉴别出人的身份。延续这一思路，HbO_2与Hb是否也具有特殊的“指纹”，可供我们将两者区分开来？

颜色，是化学中的一种重要性质，常用于简单区分化学物质、判断溶液组成。在人们的普遍认知中，血液是红色的。通过更进一步的观察可发现，血液的颜色会因为其中不同血红蛋白的存在而出现差异：人体富含HbO_2的动脉血是鲜红色的，而以Hb为主的静脉血偏暗红色。

宏观颜色为何可以传递出微观物质的信息？这就要从颜色的实质说起。我们常用“五光十色”形容色彩，其实“色”与“光”之间的关系确实密不可分。世界上本没有“颜色”，只有不同波长的“光”。且无论是太阳光还是普通的灯光，都是由不同波长的光组合而成的。牛顿经典的三棱镜实验就成功将白光中波长为400–750 nm的可见光分了出来(1 m = 1000000000 nm)，显现出我们所熟知的红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七色(图1)。

物质会对不同波长的光进行“选择性”吸收，而未被吸收的那部分光，构成了我们所指的颜色[3]。你可能会有类似的经验——手指捂住闪光灯时会变得通红(图2)。其实这并不是因为光照亮了血液，而是由于血液中的血红蛋白选择性吸收了红光以外的光，从而让剩余的红光透射过手指被人眼所接收。为何血红蛋白会有这样的光吸收性？

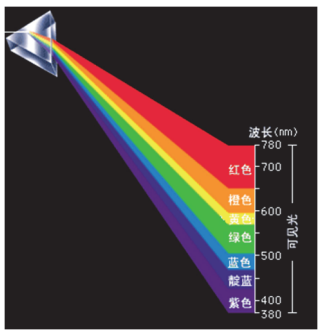


图1 牛顿的三棱镜实验

电子版为彩图

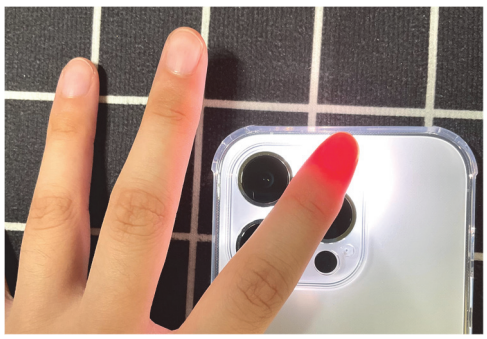


图2 手指捂住闪光灯变得通红

电子版为彩图

这是血红蛋白的分子结构所导致的。血红蛋白是Fe^{2+}与卟啉类配合体结合的配合物，形成的环状结构中包含着大量的共轭双键。这让分子能够吸收到可见光并显现出特定的颜色[4]。在此基础之上，血红蛋白的分子结构会因是否携氧而发生一定的变化(图3)：HbO_2中的Fe^{2+}由于与O_2结合，更容易吸收短波长可见光，随之呈现出红色；当HbO_2脱氧变为Hb后，Hb则吸收较长波长的可见光，显现出了较暗的紫红色[5]。

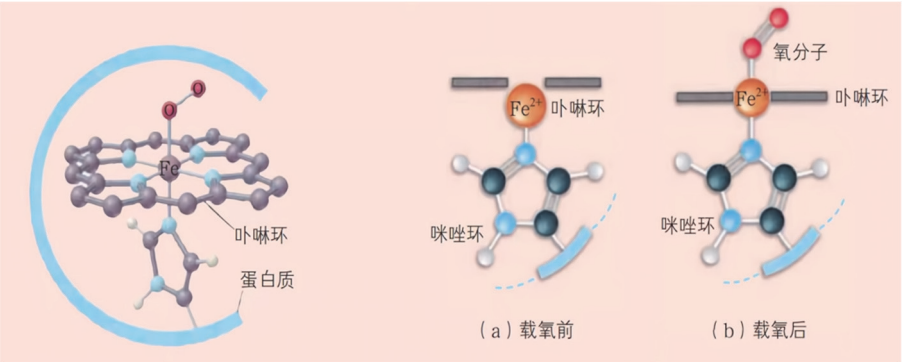


图3　载氧前与载氧后血红蛋白中Fe^{2+}的配位情况[6]

至此可以知道，颜色是物质结构反映出的一种现象。但人眼对颜色的判断具有主观性，需要利用更量化的“光吸收”，才能够精确地区分不同物质。此外，鉴于HbO_2与Hb中都存在关键的铁卟啉结构，导致两者在可见光范围内的光吸收具有一定的相似性。为了更好地区别HbO_2与Hb，我们需要进一步扩大波长范围，探索两者在可见光波段以外的光吸收性。

生物组织光学把波段为600–1000 nm的区间称为生物体光谱之窗[7]。在采用该波段进行光吸收实验并绘制曲线后发现，HbO_2和Hb呈现出了各自独特的吸收光谱，这种光谱就像是血红蛋白的“化学指纹”。

将两者的“化学指纹”进行比对(图4)，我们可获得一些更为细节的信息：在波长为660 nm的红光处，Hb对光的吸收明显比HbO_2强得多；而在波长为940 nm的红外光处，Hb对光的吸收反而弱于HbO_2。因此，利用好血红蛋白在940 nm与660 nm光下的不同光吸收表现，是鉴明HbO_2与Hb身份的关键。

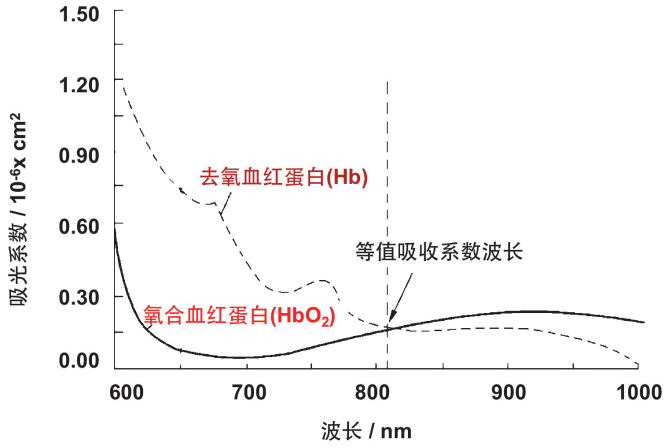


图4　血红蛋白对红光和近红外光的光吸收曲线[8]

3 如何精准读取血红蛋白的浓度

指尖是理想的血氧测量位置。因为指尖分布着丰富的毛细血管网络，能够“以小见大”地反映人体内血红蛋白含量情况。当手指挡在光源前时，光就必须先通过手指才能到达对侧。在这一过程中，一部分光就会被指尖血液中的血红蛋白所吸收。吸收光的多少正与血红蛋白的含量息息相关。

光吸收的基本定律——朗伯-比尔定律(Lambert-Beer law)就描述了这种光的衰减与光所穿过的物质特性的关系。式中A是吸光度，定义为入射光强度I_0与出射光强度I的比值的对数；κ为摩尔吸收系数，由物质本身的吸光特性所决定；b为吸收光程；c为物质的量浓度[9]。由此，通过测量手指对940 nm与660 nm不同波长光的吸收量，即可推导出两种HbO_2与Hb浓度的相对关系。

$$A = \lg\frac{I_0}{I} = \kappa bc$$

但是基于朗伯-比尔定律也可以发现：光程b也会影响吸光度。也就是说“瘦手指”和“胖手指”可能会对测量结果造成影响。同时，人体手指组成中还包括皮肤、肌肉与骨骼等非血液组织。这些非血液组织会对光进行吸收吗？

诚然，手指中的光吸收是复杂的。但针对这些干扰还有一个聪明的解决方案——找出“变与不变”。如图5所示，动脉血是手指中唯一能“跳动”的东西。这是由于心脏收缩向动脉充血，导致手指末梢动脉中血液体积发生变化。当动脉血脉动时，光程才会发生微小的变化，进而产生“变化的吸光度信号”。而手指的粗细或是其他非血液组织，在整个过程中的光程固定不变，故吸光度也不会发生改变。

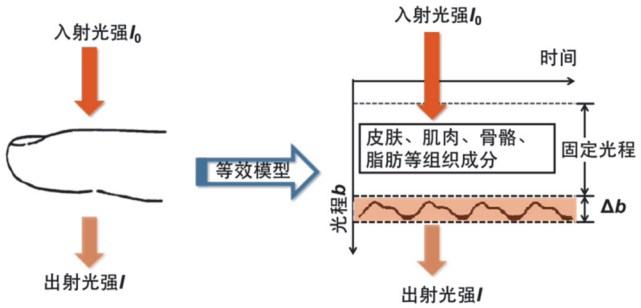


图5 指尖的光吸收模型

灵敏的计算机能从总信号中剔除吸光度信号不变的部分，只剩下“变化的吸光度信号”，从而精准择出因血红蛋白而引起的光吸收，排除了其他因素的影响。

4 构建指尖上的“光谱仪”

利用血红蛋白的“吸光”特性和朗伯-比尔定律，即可判断出指尖血液中HbO_2与Hb的含量比例。为了将测量血氧饱和度的全过程综合于一台仪器中，指夹式血氧仪需要同时满足“能够发出光”“能够检测光”“能够计算光”的三大需求。因此指夹式血氧仪整体可按需进行如下构建(图6)：

首先，需要一个光源，且该光源能够特定发射660 nm红光和940 nm红外光。

其次，需要一个放置手指的空间，让手指作为盛放血红蛋白的容器对光进行吸收与透射。

再次，需要一个检测器，在光源对侧接收透射过手指的红光和红外光，从而判断血红蛋白的光吸收程度。

最后，需要一个数据处理装置，进一步对检测到的信号进行处理、计算血氧饱和度，并最终显示于屏幕上。

光源、吸收池(手指)、检测器、数据处理装置——不仅是构成指夹式血氧仪的核心组件，也是构建各种专业光谱分析器的一般思路。因此，可将指夹式血氧仪视作简易的光谱仪。

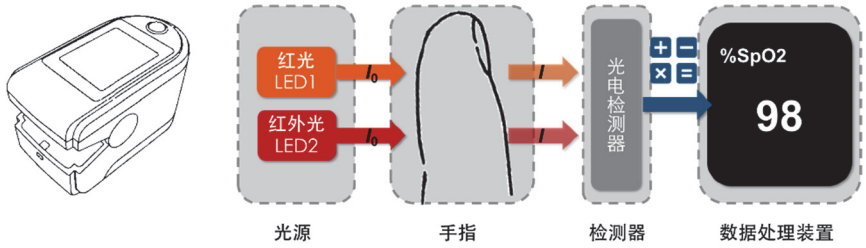


图6 指夹式血氧仪与构造框图

指夹式血氧仪的构成与双波长分光光度计最为相近(图7)。实验室中所使用的分光光度计可广泛应用于水体污染物浓度、食品添加剂含量、重金属超标等各类复杂环境检测。

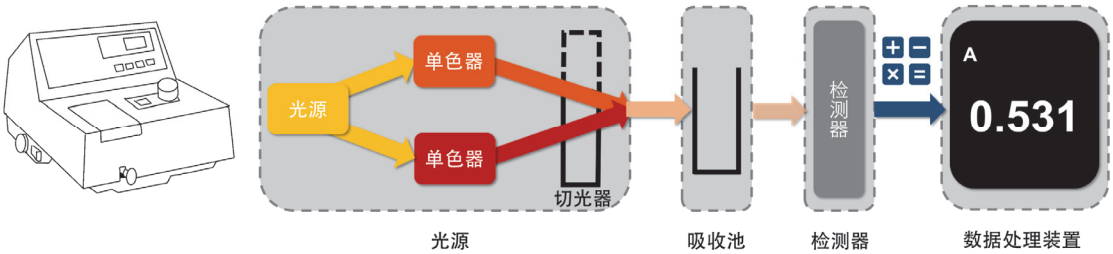


图7 双波长分光光度计与构造框图

5 谨防监测中的“光误差”

“光”作为指夹式血氧仪的技术核心，在使用仪器的过程中应谨防有其他光或其他吸光物质的干扰。

通常，指夹式血氧仪夹层中会加入黑色的硅胶手指垫(图8)，这就与其他光的干扰有关。除了来自仪器LED的光外，环境光也有可能照射到内壁检测器上。因此，通过这一层黑色硅胶，能够使手指更加贴合仪器，减少漏光的可能性。无独有偶，为防止仪器所发出的光信号“淹没”在环境光中，应规避在直射太阳光、红外遥控器旁使用指夹式血氧仪，必要时可再用黑布遮盖仪器。

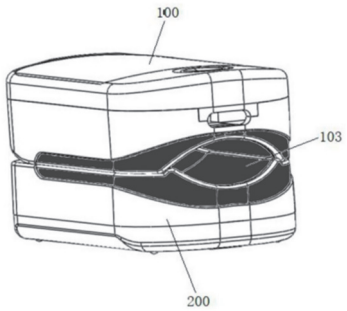


图8 指夹式血氧仪中的黑色硅胶手指垫

在各类手术前，医生会告知有美甲的患者及时将其卸除，这又是为什么呢？事实上，这就与其他吸光物质对血氧仪的干扰有关。当有色指甲油覆盖在甲床上时，其中的色素会对仪器发射光产生额外的吸收。研究表明，黑色和蓝色指甲油最容易影响血氧饱和度监测数值[10]。同理，指甲病变、灰指甲等状况都有可能造成额外的吸光干扰。因此在使用指夹式血氧仪时，应该选用健康的手指进行检测，或在监测时改为侧夹。

6 用科学的眼睛去伪存真

指夹式血氧仪的火爆引发了诸多“异闻”。其中，有关“火腿肠竟也可测出‘血氧值’？”的话题受到了大量讨论，让指夹式血氧仪的科学性遭到了“动摇”。但只要明确指夹式血氧仪的本质是测量物体对光的吸收程度，“奇闻”皆可去伪存真，柳暗花明。

因为当使用火腿肠、红色瓶盖等同样具有吸光能力的物体作为检测对象时，仪器自然会“老老实实”地根据光吸收情况计算出“血氧饱和度”。但这只是“错误输入”导致的“无效输出”，并不能代表指夹式血氧仪对人体的测量是不准确的。就如同使用体温计也可以测出水的温度，然而我们无法称所得数值为“体温”一样。

此外，通过智能手机与相关程序测血氧也引起了较大关注。使用者只需要将一根手指同时轻轻盖住摄像头与闪光灯，等待一两分钟即可测得血氧数值。这又是如何实现的？正如前文所述，闪光灯发出的光在通过手指时，血红蛋白会对其中红光以外的其他光进行吸收，而反射出的红光让手指变得“通红”。此时，手机摄像头能够将发红的手指画面捕捉下来，并对画面中的“红色”进行RGB色度分析。RGB值不仅能够外显肉眼看来相差无几的“红色”间的微妙区别，且有研究表明，可见光的波长与RGB值存在近似线性关系[11]，进而可根据程序计算得出血氧饱和度。因此手机摄像头测氧确实具有一定的合理性。但需要注意的是，手机测试并非严谨的科学仪器，只能短暂救急使用。

7 结语

追踪血氧，有指尖上的这位健康专家——指夹式血氧仪，为我们保驾护航。目前，有关氧饱和度监测的研究已经发展到了其他特定组织器官，如脑氧饱和度可以帮助反映脑供氧的平衡以及帮助诊断一些先天性心血管疾病。从科学认识指夹式血氧仪出发，用科学的眼光去认识生活、认识世界！

参 考 文 献

[1] 朱大年, 王庭槐. 生理学. 第9版. 北京: 人民卫生出版社, 2018: 163.

[2] 朱蕾, 刘又宁, 钮善福. 临床呼吸生理学. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 182–183.

[3] 武汉大学主编. 分析化学(上). 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2018: 317.

[4] 周公度, 段连运. 结构化学基础. 第5版. 北京: 北京大学出版社, 2017: 170.

[5] 大连理工大学无机化学教研室编. 无机化学. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 364–365.

[6] 王磊, 陈光巨. 化学 选择性必修2 物质结构与性质. 济南: 山东科学技术出版社, 2019: 64.

[7] 尹聪, 李文秀. 无线互联科技, **2022,** *19* (15), 106.

[8] 余学飞, 叶继伦. 现代医学电子仪器原理与设计. 第4版. 广州: 华南理工大学出版社, 2018: 14.

[9] 武汉大学主编. 分析化学(下). 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2018: 33.

[10] 冯静, 王春丽, 柏昊. 中西医结合护理(中英文), **2019,** *5* (7), 97.

[11] Approximate RGB Values for Visible Wavelengths. [2022-06-11]. http://www.physics.sfasu.edu/astro/color/spectra.html