



金属中的贵族——黄金^{*}

肖景丹^{1,2}, 谢卓君^{1**}

(1 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

黄金, 一种象征着神圣、财富、权利和荣誉的“高贵”金属。自从人类在12000多年前发现黄金以来, 人们对其追求的热情便从未消减。史前人类对这种能够散发出太阳般光芒和色泽的黄金进行膜拜, 将其视为神的化身。物以稀为贵, 历代帝王将其占为己有, 并逐渐将其发展为权利和财富的象征。随着人类社会不断发展, 黄金也不再被“神化”和“权化”, 开始转向至高无上的荣誉象征。现今, 黄金除了荣誉这种精神象征以外, 其在世界货币与经济、饰品、电子工业、医学等领域发挥着不可替代的作用。人们对黄金的认识和利用映射出人类从原始到现代、从愚昧到文明的历史变化, 可以说没有任何一种物质能够像黄金一样在人类历史进程中留下如此深刻的烙印。

1 金的介绍

金的化学符号Au, 源于拉丁语中的黄金词语“Aurum”, 意思

是“灿烂的黎明”(李鹏, 2009)。Au位于元素周期表第一副族, 质子数为79, 原子量为197, 原子半径为1.79 Å(图1)。Au在自然界只有一种同位素, 面心立方结构, 室温下的密度为每立方厘米19.32 g, 熔点1064°C, 沸点2966°C, 在地壳中的丰度仅为 0.0011×10^{-6} 。

Au原子之间的键合方式为金属键, 这种键合方式会造成Au原子核“畅游”在电子“海洋”中(电子海模型), 使其具有强延展性和高导电性。同时, Au原子核对电子的吸引力非常强, 核外电子若想停留在自己的轨道上, 其运行速度需达到光速的一半, 高速运行的电子会使其轨道

发生变形(相对论效应), 一些原本应该吸收紫外光谱中的光转而吸收蓝色光, 反射光谱中的其余光, 这些反射的光混合一起形成特有的金色。Au原子之间的键合强度使其原子键不易断开或与其他元素发生作用, 使得黄金青春永驻, 绝不褪色(Rebecca et al., 2016)。

2 金的来源

科学家们发现重元素可由轻元素聚合而成, 其产出过程是利用恒星这座元素加工厂, 通过核聚变将元素由氢变成氦, 最后一直演变到铁(Fe)为止。由于Fe-56的比结合能是原子中最高的, 造成了Fe失去了再发生核聚变的可能(<https://new.qq.com/rain/a/20210426A0C5AW00>)。Au的原子序数远大于Fe, 要产生比Fe更重的元素, 需要在极高的温度和压力条件下通过“中子俘获”的方式实现, 也就是超新星爆发(图2a)。大部分的Au是由该途径产生, 少量的Au则

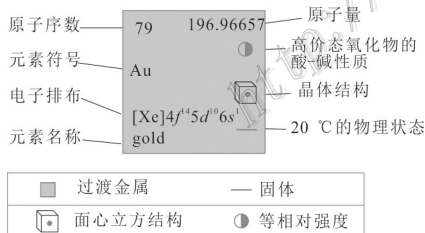


图1 Au元素的性质(修改自Encyclopaedia Britannica)

^{*} 本文得到国家自然科学基金(编号:42073044、U1812402)、贵州省科技计划项目(编号:黔科合基础[2020]1Z034、黔科合支撑[2021]一般403、黔科合平台人才-CXTD[2021]007)、贵州省地质勘查资金(编号:520000214TLCOG7DGTNRG)和中科院青创会会员项目(编号:2022402)联合资助

第一作者简介 肖景丹, 男, 1994年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: xiaojingdan@mail.gyig.ac.cn

^{**} 通讯作者 谢卓君, 男, 1987年生, 副研究员, 主要从事卡林型金矿研究。Email: xiezhuojun@mail.gyig.ac.cn

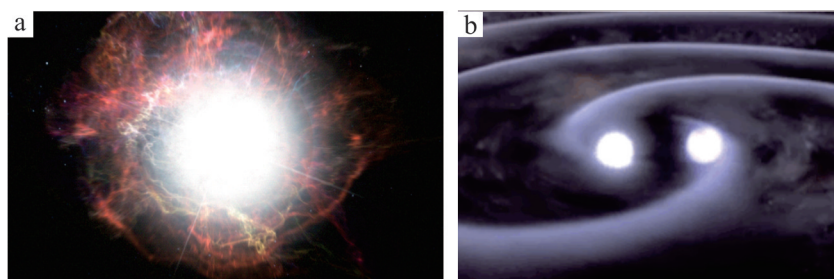


图2 金的来源

a. 超新星爆发(图片来源网络); b. 中子星合并(图片来源网络)

通过中子星合并(图2b)方式实现。

通过超新星爆发和中子星合并产生的Au, 90%以上都藏在了地核里,其次是地幔,最少的是地壳(不到1%)。目前人类开采的黄金62%来源于砾岩型和造山型金矿;13%为浅成低温热液型金矿;10%为斑岩型金矿,8%为卡林型金矿等(图3, Frimmel, 2008)。

尽管金矿的种类多样,但是将这些金矿石转变成金灿灿的黄

金谈何容易。砂金是大自然通过河水冲刷,将金矿石进行了金提纯,因此是所有这些金矿中相对好开采的(Falconer et al., 2009)。日常所听到的狗头金(图4a),其本质便是砂金。世界上最大的狗头金“欢迎你陌生人”(Welcome stranger)于1869年在澳大利亚维多利亚州被发现,人们从这块狗头金中提炼出71 kg纯Au(Rebecca et al., 2016)。除了砂金矿石中为肉眼可见的较为纯净的Au颗粒外,其他类型金矿中的Au,大多

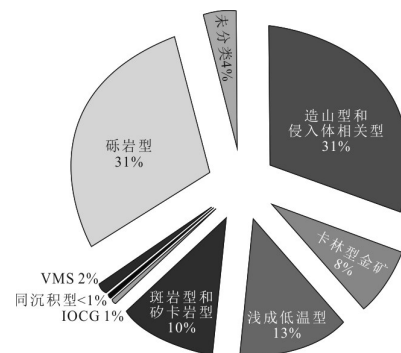


图3 不同类型金矿的产出占比(修改自 Frimmel, 2008)

(异常富集的金矿体除外,图4b)需要借助像放大镜、光学显微镜、电子显微镜等仪器才能观察到(图4c)。这些金矿中的Au常与石英、贱金属硫化物共生在一起(图4b、c)。特别有意思的是卡林型金矿(图4d),其金的赋存状态为不可见Au(显微镜和扫描电镜均未能观察到),Au隐藏在其宿主矿物黄铁矿的晶格中(图4e、f),

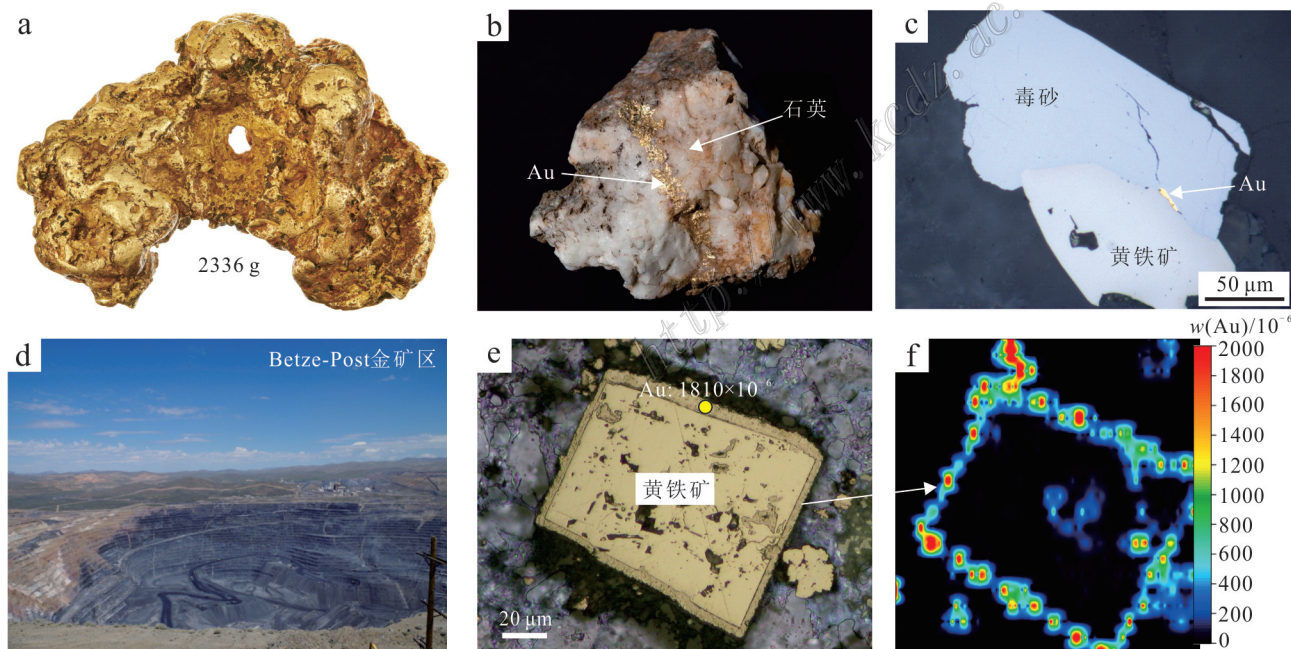


图4 狗头金(a,图片来源网络)、矿石手标本上显示出Au和石英共生(b,图片来源网络)、光学显微镜下显示出Au和硫化物共生(c)、世界上储量最大的卡林型金矿采坑(d,美国内华达州Betze-Post金矿,Au储量:1250 t)、卡林型金矿中的载金黄铁矿(e,Au含量为电子探针分析所测得;Xie et al., 2018)和Au元素分布图(f,Au含量通过激光电感耦合等离子质谱仪获得;Xie et al., 2018)

不易被人们发现(Xie et al., 2018; Pokrovski et al., 2019)。

3 数说黄金(数据引自世界黄金协会)

22-迄今为止,世界上开采出的所有黄金只能放入一个边长为22 m的立方体箱子中。

37-人体温度为37℃,黄金拥有良好的导热性,可以迅速达到人体体温。这是它成为首饰制作材料的重要原因之一。

40-人类历史上所开采过的黄金中有约40%来自于南非兰德砾岩型金矿。

49-现今所开采的黄金有大约一半(49%)被制作成首饰,金饰仍然是黄金的最大用途。

79-黄金的原子序数为79。

1064-黄金的熔点(开始熔化温度)为1064℃。

2808-黄金的沸点为2808℃。

15000-地球海水中所含的黄金总量为1.5万t。

4 黄金的用途

黄金因为其稀有性、优良的物理化学性质(如色泽靓丽、延展性好、质地软、抗腐蚀)和人文属性,被广泛应用到世界货币和经济、饰品、电子工业、医学、化学试剂等领域(图5)。

世界货币和经济:马克思在《资本论》里提到“货币天然就是金银”,这句话强调了金银能作为货币的属性。黄金具有体积小、价值大,抗磨损和耐腐蚀,容易分割等优点,是其他金属所不能同时具备的,确保了黄金的稳定流通。近十年所开采的黄金中每年有约568 t被世界各国央行所储备

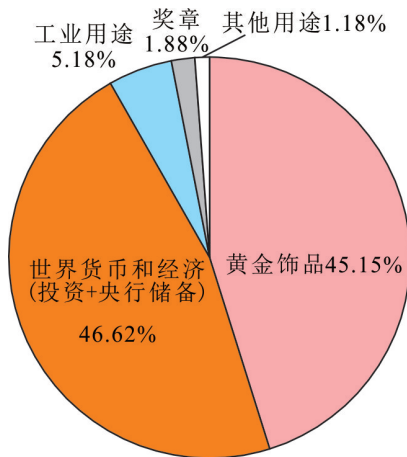


图5 2022年全球黄金在各个领域的消费占比(数据来源于世界黄金协会)

(2013~2022年平均值,世界黄金协会数据)。其中,2022年世界各国央行的黄金需求量创下了55年来的最高纪录,达1136 t,是2021年450 t的2倍多(中国黄金协会数据)。这进一步表明黄金在世界货币与经济中扮演了越来越重要的角色。

黄金满足硬通货应具有的基本特性:国际信用好、币值稳定、汇价(汇率)坚挺,因而能成为世界硬通货。国际信用方面,古今中外,在漫长的历史岁月中,人们对黄金产生了信任。黄金是货币信誉的支撑,推动了货币的国际化。币值稳定方面,信用货币(主要为纸币)的发行量可以人为操作,通货膨胀或者金融市场的动荡也会造成贬值,而黄金则不一样,由于无法高效且经济地通过物理或者化学方法合成,加上储量和产量有限,这使得其价值相对稳定。汇价(汇率)坚挺方面,即使在世界经济疲软、股市动荡等条件下,黄金仍表现出强劲势头。世界黄金协会数据表明,2010~2021年金价起伏,但无论经历如何的低谷,金价仍旧

会高涨,坚挺不倒,是可靠的抗风险投资(图6a)。

黄金饰品:现今所开采的黄金中大约有一半被制作成首饰,如项链(图6b)、戒指等。黄金之所以被广泛用于首饰中,和其本身的物理化学性质及历史传承有关。物理化学性质上:①黄金的高延展性使其易于锻造;②稳定的化学性质使得黄金首饰不易氧化而掉色或变色。历史传承上:①人们常将黄金视为财富的象征,并进行传承;②黄金的金色和太阳一样,古人崇拜太阳,将太阳视为至高无上的象征,使得黄金有一种高贵感;③黄金已成为人们宣誓爱意的象征(比如婚嫁中的“三金”),因为黄金具有耐腐蚀性,寓意为“情比金坚”,象征两人爱情的永恒;④民间寄予黄金美好寓意,认为黄金具有招财、驱邪作用。

在黄金首饰中,常用“成色”(Au/(Au+Ag)×1000)来表示含金量(Hough et al., 2009),日常所听到的K金、足金等其本质是指成色的高低。国家标准GB11887-89规定,每开(德文Karat的缩写,常写作“K”)含金量为4.166%(成色41.66‰)。以18K金为例,含金量约为75%(成色为750‰),首饰上常标记为AU750或G750或G18K。值得说明的是24K金(欧美的称谓)是指99.99%(成色999.9‰)纯黄金。国内也称24K金为足金(>990‰),千足金(>999‰)或者万足金(>999.9‰)。

工业用途:黄金在工业上的用途约占每年金产量的5.2%,其中,在电子工业上的用途占其工业用金的90%以上,主要用于电子仪器、集成电路等。日常所见

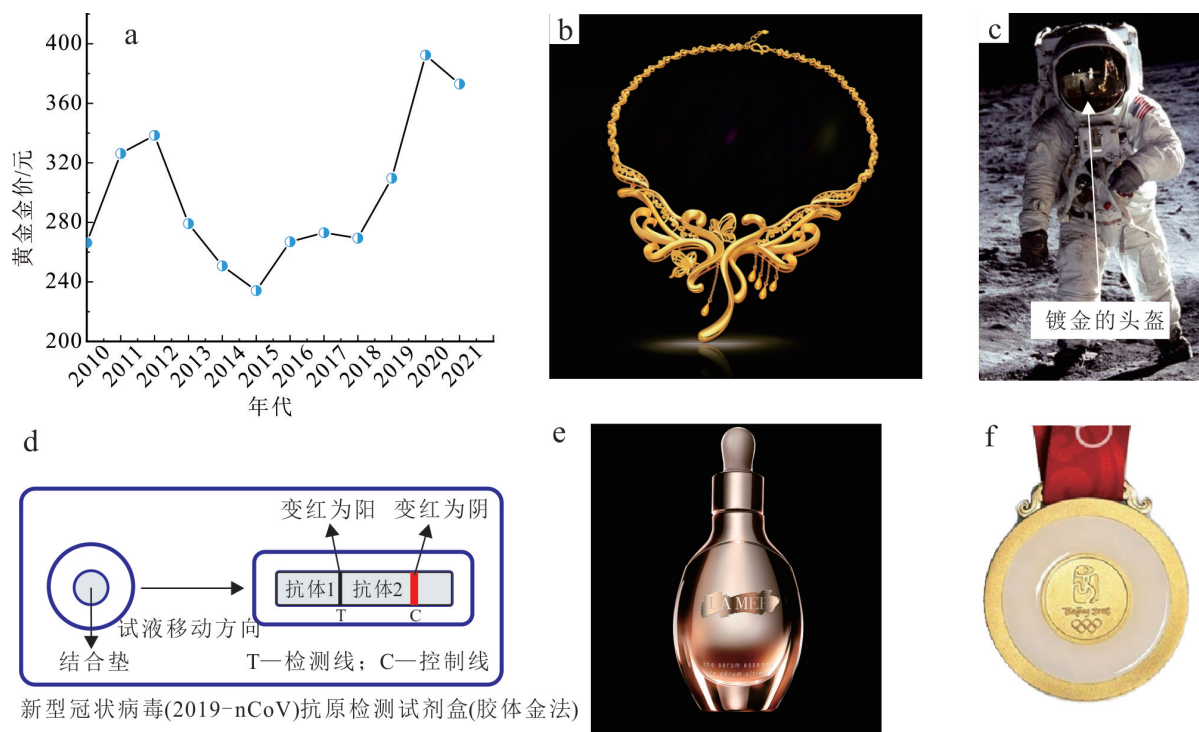


图6 黄金的用途

2010~2021年来的黄金金价走势(a,数据来自世界黄金协会)、黄金项链(b,图片来源于网络)、镀金的头盔(c,图片来源于网络)、抗原检测示意图(d,胶体金法)、鎏金焕颜精华眼霜(e,图片来源于网络)和2008年奥运会金牌(f,图片来源于网络)

的电子产品(比如手机)大多有黄金的身影。之所以不用铜、铁等大宗矿产来代替黄金,主要原因是黄金所特有的高延展性和高传导性。1 g 纯金可拉成直径小于1 μm (微米),长度为66 km的金丝。精密仪器、电路板常需要极细的导线连接,而黄金所具有的高导电性和高延展性正好满足此需求。导线越细意味着更易损耗和不耐用,黄金的高抗氧化和抗侵蚀性延长了黄金导线的使用寿命。此外,黄金还是电磁辐射的优良反射体,宇航员头盔上的玻璃镀上一层薄金(图6c),能有效防止紫外线辐射的损伤。

医学领域:纳米金具有良好的生物相容性和特定的分子识别性,因而在医学领域得到了广泛应用,如纳米金能够通过靶向投递的方式来传递药物,杀死肿瘤

(Van Lehn et al., 2013; Hočevár et al., 2019)。近几年,在新冠病毒肆虐全球的时代背景下,“胶体金”检测法在新冠病毒抗原检测中发挥了重要作用(图6d)。新冠病毒抗原检测的基本原理是抗体-抗原反应。胶体金在弱碱性条件下带负电荷,当胶体金与带正电蛋白质基团相遇后,由于静电作用而结合在一起,同时也不影响蛋白质的生物特性,因此可将胶体金作为示踪标志物。当胶体金示踪抗体在结合垫处和新冠抗原蛋白结合后,会在毛细作用下向前移动,在T线(检测线)处被抗体1(该抗体只识别新冠病毒抗原)捕获而进行聚集,显示为阳性(T线和C线同时变红);多余的试剂会继续向前移动到C线(控制线),被C线处抗体2(无论是否含有新冠病毒抗原,都会被该抗体识别)

捕获而呈现出红色,显示为阴(仅有C线变红)(参考新冠病毒抗原检测(胶体金法)原理简介)。

化学试剂:黄金由于其价值高、颜色靓丽,因而可以提高产品的奢侈感。如有些化妆品中添加少量的黄金化学试剂,可以营造出炫目的感觉,提升产品的档次感(如鎏金焕颜精华眼霜,图6e)。目前有些广告声称黄金可以作为着色剂和助滑剂添加在化妆品中,这是缺少科学证据支撑的。市面上常见的金箔酒或金箔糖,黄金也仅为装饰而已。所谓的可食用金箔,并不是说黄金本身可以食用,而是金箔体积小,不会对身体造成物理伤害,同时也不会被身体消化吸收,因此金箔属于无害无益的“食品”。

奖章:由于黄金象征着至高无上的荣誉,将黄金加入奖牌中

来奖励行业中的佼佼者已经成为社会共识,如奥运会金牌(图 6f)和诺贝尔奖牌等。

5 金的克星

俗话说“真金不怕火炼”,这句话一方面说明了金的熔点高(1064°C),另一方面也说明了金的化学性质很稳定。即便如此,黄金仍旧会与王水(浓盐酸和浓硝酸的体积比为 3:1)、氯化物或者氰化物溶液、汞等发生反应。

1940 年希特勒带领德军入侵匈牙利时,纳粹军队率先洗劫了犹太人的化学实验室。化学家乔治-德赫维西正是利用王水能溶解金的特性,将两块诺贝尔金牌放置在王水中($\text{Au}+4\text{HCl}+\text{HNO}_3=\text{H}[\text{AuCl}_4]+\text{NO}+2\text{H}_2\text{O}$),使其免遭纳粹士兵的发现而保留至今。

氯化法提金始于 1848 年,该方法的优点是浸出速度快,易从溶液中回收金。19 世纪出现的氰化法提金工艺,具有费用低,能重复使用等优点,因此广泛用于从含金矿石中提取金。氰化法的优越性造成早期的水溶液氯化法退出市场。后因氰化物含有剧毒物质,会对环境造成严重的污染,氯化法才被重新重用。

6 血染黄金-黄金的血与泪

二战期间,德国纳粹对其占领国中央银行的巨额黄金进行疯狂掠夺,甚至连集中营“囚犯”中金牙也不放过。狂热的纳粹徒将这些沾满鲜血的黄金纳入自己国家的黄金储备,以此来作为购买战争原料的经济来源。

同一时期,日本在亚洲战场将无所不抢表现的淋漓尽致。日本秘密组建了山百合会,专门负责搜刮转移隐藏珍宝。据不完全统计,日本在南京大屠杀事件中至少抢夺了 6000 t 黄金;而在东南亚地区获取的“战利品”中,仅黄金就有 6 万多 t(李鹏,2009)。

7 黄金梦-狂热的黄金潮

19 世纪初,世界上的黄金产量逐渐降低,加上金本位制的实行,全世界的人民对于黄金这种象征财富和权利的迷恋程度超过历史上任何一个时期,各地都呈现出淘金热,其中以美国加利福尼亚的淘金热和澳大利亚维多利亚淘金热最为典型。

(1) 美国加利福尼亚淘金热(图 7a):自 1848 年,詹姆斯-马歇

尔在美洲河发现黄金以来,数以万计的人们离开家乡,带着发财梦蜂拥而至,开始了历史上最为著名的一次淘金热。为了获取更多的黄金,人们利用水力泵和挖泥船来淘金,仅 1852 年就淘出 121 t 黄金,因此,美国加利福尼亚州也被称为“金州”。

(2) 澳大利亚维多利亚淘金热(图 7b):自 1854 年,人们只能在加利福尼亚淘到一些金粉或者细颗粒,这里的淘金热潮开始出现降温趋势。澳大利亚的探矿人爱德华-哈格雷福斯在加利福尼亚没有淘到黄金后,便回到了维多利亚,并深信在澳洲也能找到黄金。功夫不负有心人,当他在巴瑟斯特附近找到大量黄金的消息传出以后,世界各地的淘金者便转战澳大利亚,从此开启了澳大利亚淘金的辉煌历史。

8 金色未来

世界黄金协会数据表明,目前世界上每年产金约 3420 t(2012~2021 年平均值)。中国已经连续 12 年(2010~2021 年)年产量稳居世界第一。以 2022 年为例,中国的年产黄金量为 372 t(数据来源于中国黄金协会)。尽

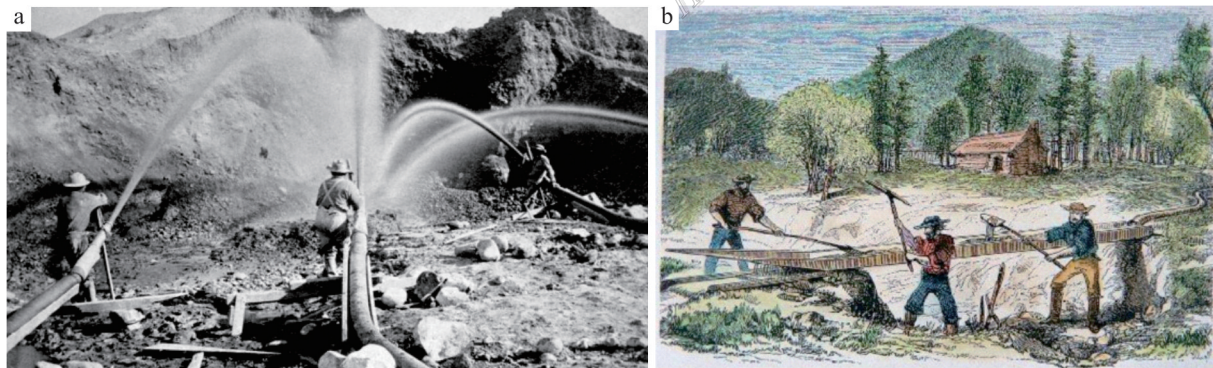


图7 加利福尼亚淘金热(a,图片来源于网络)和维多利亚淘金热(b,图片来源于网络)

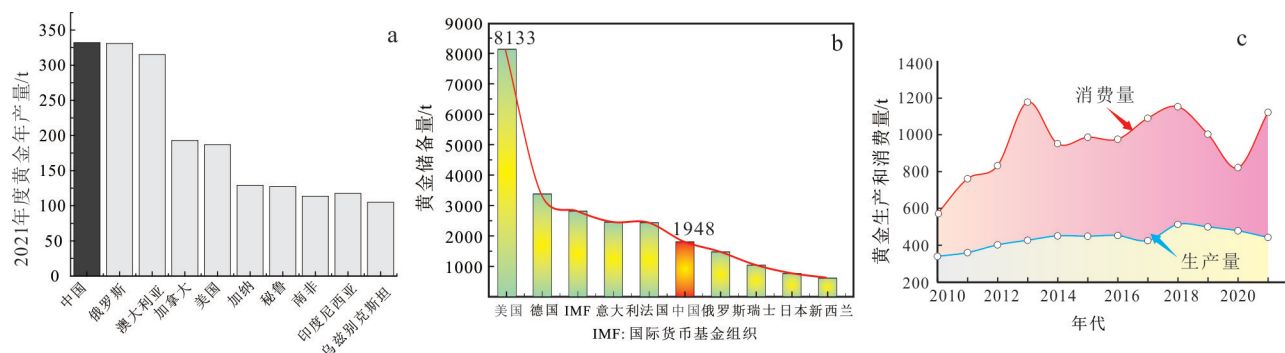


图8 2021年度世界前十产金国及其黄金产量(a,数据来源于世界黄金协会)、黄金储备量世界前十的国家和组织(b,截至2022年9月数据,世界黄金协会)和2010~2021年中国的黄金消耗量和生产量(c,数据来源于中国黄金协会)

管年产量领先(图8a),但中国人民银行2022年10月末发布的中国大陆黄金储备量仅为1948 t,远低于美国的8133 t(图8b)。造成产量和储备量严重失衡的重要原因是国内的消耗量远大于生产量(图8c)。历史的经验告诉我们,黄金对政权的建立及巩固都有着至关重要的作用。后疫情时代,世界局势变化莫测,大国之间的竞争也表现得更为突出,这加剧了各国之间对存量资源的争夺。黄金作为一种重要的涉及国家安全的战略资源势必会进入各国竞争视野。为保障国家经济安全、国防安全和战略新兴产业发展需求,2016年中国国土资源部(现为自然资源部)将黄金列为24种战略性矿产资源之一。截至2020年,世界上已开采出201 296 t黄金,而已探明的地下未开采储量仅为53 000 t(世界黄金协会数据),依照世界年平均产量3420 t为参考,可供开采年份仅为15年。鉴于地表金资源的不断枯竭和金矿分布的不均一性,可以预见,未来黄金仍然是矿产资源中的“明星”,将长期是各国所追求和关注的重要矿产资源。

致谢

中国科学院广州地球化学研究所赵太平研究员,中国科学院地质与地球物理研究所范宏瑞研究员,北京大学陈衍景教授对本文提出了宝贵意见和建议;中国地质大学(北京)李伟博士提供了部分图件,在此一并感谢。

参考文献(References)

- Encyclopaedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/gold-chemical-element>
- Falconer D M and Craw D. 2009. Supergene gold mobility: A textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand[J]. *Economic Geology Special Publication*, 14: 77-93.
- Frimmel H E. 2008. Earth's continental crustal gold endowment[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 267: 45-55.
- Hočevar S, Milošević A, Rodriguez-Lorenzo L, Ackermann-Hirschi L, Mottas I, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B, Bourquin C and Clift M J D. 2019. Polymer-coated gold nanospheres do not impair the innate immune function of human B lymphocytes in Vitro[J]. *ACS Nano*, 13 (6): 6790-6800.
- Hough R M, Butt C R and Fischer-Bühner J. 2009. The crystallography, metallography and composition of gold[J]. *Ele-*

ments, 5: 297-302.

- Li P. 2009. The history of gold[M]. Harbin: Harbin Publishing House. 1-191(in Chinese).
- Pokrovski G S, Kokh M A, Proux O, Hazemann J L, Bazarkina E F, Testemale D, Escoda C, Boiron M C, Blanchard M, Aigouy T, Gouy S, De Parseval P and Thibaut M. 2019. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system[J]. *Ore Geology Reviews*, 109: 545-563.
- Rebecca Z and Michael W P. 2016. Gold nature and culture[M]. The University of Chicago Press. 1-224.
- Van Lehn R C, Atukorale P U, Carney R P, Yang Y S, Stellacci F, Irvine D J and Alexander-Katz A. 2013. Effect of particle diameter and surface composition on the spontaneous fusion of monolayer-protected gold nanoparticles with lipid bilayers[J]. *Nano Letters*, 13(9): 4060-4067.
- Xie Z J, Xia Y, Cline J S, Koenig A, Wei D T, Tan Q P and Wang Z P. 2018. Are there Carlin-type gold deposits in China? A comparison of the Guizhou, China, deposits with Nevada, USA, deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 20: 187-233.
- 李鹏. 2009. 黄金的历史[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社. 1-191.
- 新冠病毒抗原检测(胶体金法)原理简介网址: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_18178965