doi:10.3724/j.issn.1007-2802.20240166
·简报·

东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿的发现、研究与意义

王建平[1,4],李开文[1,3],张正伟[1,2],方怀宾[1,3],左鹏飞[1,4*],吴承泉[2*],黄业豪[1,3]

1. 超纯矿物新材料产业技术研究院, 郑州 450016; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081; 3. 河南省地质研究院, 郑州 450016; 4. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000

4N8级以上的高纯度石英是半导体、光伏等产业的关键基础材料,其天然原料是稀缺的战略性矿产。作为全球4N8级以上高纯度石英原料主要供应地的美国北卡罗来纳州Spruce Pine矿山,矿体规模大且稳定,其石英纯度高,杂质元素具有特殊结构比例,晶格杂质铝(Al)、钛(Ti)含量呈现特定数值,对材料性能起着关键影响,使之难以被其他类型的原料取代(超纯矿物新材料产业技术研究院,2024)。近年来,中国在地质找矿以及高纯石英砂制备技术层面均取得了重要进展(汪灵,2019;张海啟等,2022a;唐春花等,2024),但在半导体产业的单晶硅生产环节中,坩埚用石英砂的供应难题长期未能攻克;光伏产业所需石英坩埚的内层砂供应问题,也始终未能得到有效解决。基于该现状,中国迫切需要找寻有关的工业原料矿床。东秦岭地区与美国Spruce Pine矿山所处的地质条件相似(张正伟,1991;王建平和裴放,2002),很有可能找到类似的高纯石英原料矿床。基于此,超纯矿物新材料产业技术研究院组织研究开发团队,在东秦岭地区展开了系统的调查研究工作,在古生代花岗岩体中成功识别出高分异花岗岩,其中部分判定为白岗岩单元,并在白岗岩单元中开展了普查、详查和勘探工作,提交了国内首个白岗岩型高纯石英原料矿床,经过对该矿床原材料制备所得的高纯石英砂检验,各项指标均达到半导体产业的使用标准。本文对这一研究作一简要报道。

1 白岗岩的识别与岩石特征

根据前人研究资料,高分异(高演化)花岗岩大多经历强烈分异作用,矿物组合主要由长石、石英和白云母构成,含少量或不含暗色矿物,呈浅色或白色(吴福元等,2017),它们产出的地质背景常与造山带密切相关。在高分异熔浆体系的分异结晶过程中,岩石组合呈现出从黑云母花岗岩向二云母花岗岩再向白云母花岗岩的演化趋势(吴福元等,2023)。岩石由酸性向超酸性演化,致使SiO_2含量逐渐升高,甚至会出现白岗岩或高硅花岗岩。

东秦岭的主要地质单元是一个复合型造山带(王建平和裴放,2002),古生代花岗岩显著出露,较大的岩基分布于灰池子和漂池一带,主体岩性有二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和钾长花岗岩类(张正伟,1991)。最近的调查研究显示,在灰池子和漂池岩基中可以分解出高分异岩石单元(超纯矿物新材料产业技术研究院,2024),其岩石组合包括二云母花岗岩、白云母花岗岩、似伟晶岩(图1a、1d、1g)以及细晶岩和花岗伟晶岩。不同岩石类型的主要矿物组成没有明显区别,主要矿物为斜长石、石英和白云母以及少量钾长石(图1b、1e、1h);次要矿物有黑云母和绿帘石族矿物等,以及少量石榴子石、磷灰石、电气石、榍石、锆石、黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿,但在岩石类型之间副矿物分布有一定差异,如在似伟晶岩中分布有较多的石榴子石、磷灰石和电气石,在二云母花岗岩中含有较多的黑云母和榍石,而在白云母花岗岩中少见石榴子石、磷灰石和电气石。岩石结构包括花岗结构、粗粒-中粒-细粒不均匀混杂结构和似斑状结构,岩石构造主要有块状构造和斑杂构造。

岩石中石英呈半自形-他形粒状,含量20%~30%;斜长石的聚片双晶发育良好,双晶纹细密且近平行消光,多为钠长石、更长石;钾长石多为条纹长石、微斜长石,颜色以浅肉红色为主,少数呈灰白色。其中石英颗

收稿编号:2025-0024,2025-02-06 收到,2025-02-24 改回
基金项目:超纯矿物新材料产业技术研究院(河南省按照省实验室管理的科技创新平台)2024年重点研究项目
第一作者简介:王建平(1964—),男,博士,教授级高级工程师,研究方向:矿产资源勘查. email: hnwangjianping@163.com
*通信作者简介:左鹏飞(1988—),男,博士,副教授,研究方向:矿床学. email:zuopf@hpu.edu.cn
吴承泉(1987—),男,博士,副研究员,研究方向:矿床地球化学. email:wuchengquan@mail.gyig.ac.cn

引用此文:
王建平,李开文,张正伟,方怀宾,左鹏飞,吴承泉,黄业豪. 2025. 东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿的发现、研究与意义. 矿物岩石地球化学通报,43(2):448–452

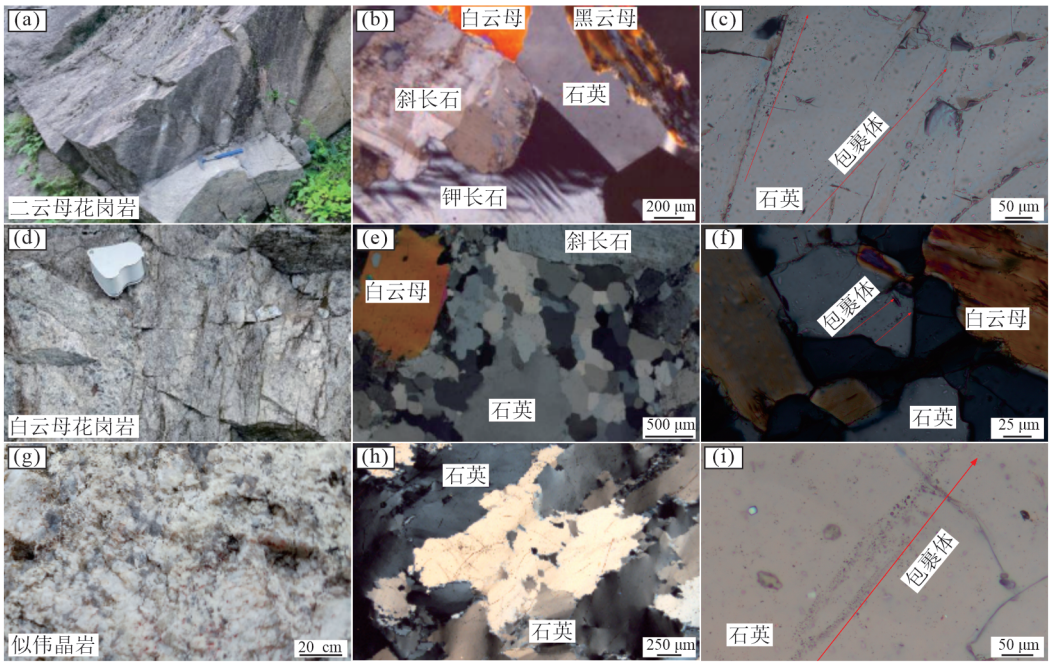


图1　东秦岭地区典型白岗岩野外和镜下照片

粒内部的矿物包裹体较少,可见云母类、磷灰石、长石,偶见闪石类、金红石、锆石。石英内的流体包裹体也较少,主要为气液两相包裹体,呈串珠状分布,粒径大多小于5 μm,个别包裹体粒径较大,约5~10 μm(图1c、1f、1i)。

全岩SiO_2平均含量为72%~75%,部分在75%以上(表1),显示富SiO_2、Al_2O_3、K_2O,贫CaO、MgO,属于强过铝质岩石和钙碱性系列;富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,稀土元素具有四分组效应,Na/Ta-Zr/Hf图解中具有明显的演化趋势(超纯矿物新材料产业技术研究院,2024),在演化程度上相当于高分异花岗岩(吴福元等,2023)。岩石单元之间无明显接触界限,尤其在浅部区域,似伟晶岩和伟晶岩大量出现在岩体内,且呈混杂状分布。因此,根据岩石的颜色、矿物成分、结构构造以及岩体产状特征厘定其为白岗岩。

2　白岗岩型高纯石英原料矿床勘查评价

基于白岗岩的识别和区域上资源调查研究,首选漂池岩体(河南省卢氏县)的白岗岩分布区作为勘查评价靶区(图2a),分两个阶段开展勘查评价。第一阶段进行普查及详查,按照石英纯度4N(以Al、B、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、P、Ti、Zn等15种杂质元素含量折扣而来的$SiO_2 \geqslant 99.99\%$)的边界指标圈定高纯石英原料矿体,并按相关工业指标计算高纯石英原料矿矿石量。第二阶段的勘探工作,按照50 m×50 m网度进行了加密控制,形成更高级别的资源量,在自然

表 1　东秦岭地区典型白岗岩主、微量元素分析结果（平均值）

样品号	岩性	含量/%									
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	$Fe_2O_3^*$	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
03	二云母花岗岩	73.63	0.09	13.55	1.01	0.03	0.15	0.87	3.34	5.16	0.12	1.48
06	白云母花岗岩	74.43	0.02	14.37	0.34	0.04	0.07	0.80	4.90	3.32	0.08	1.31
12	似伟晶岩	72.77	0.02	14.99	0.27	0.01	0.05	0.40	3.82	6.39	0.08	0.94

样品号	岩性	含量/($\times 10^{-6}$)																	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Nb	Ta	Zr	Hf
03	二云母花岗岩	32.40	70.46	8.32	28.56	7.19	0.30	6.87	1.14	6.74	1.27	3.47	0.50	3.30	0.48	37.07	29.05	3.48	84.57	3.75
06	白云母花岗岩	3.27	7.00	0.80	3.23	0.87	0.08	0.88	0.15	1.03	0.21	0.56	0.14	1.21	0.23	4.99	15.97	0.88	16.62	1.08
12	似伟晶岩	2.42	3.75	0.52	2.12	0.80	0.12	1.45	0.29	2.39	0.43	1.31	0.20	1.56	0.24	11.84	13.30	1.44	7.97	0.59

注:全岩主量和微量元素测试工作在中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成,分别采用X射线荧光光谱仪(X-RARL Perform′ X 4200)和等离子体质谱仪(Plasma Quant MS Elite)测定;LOI为烧失量,*为全铁含量。

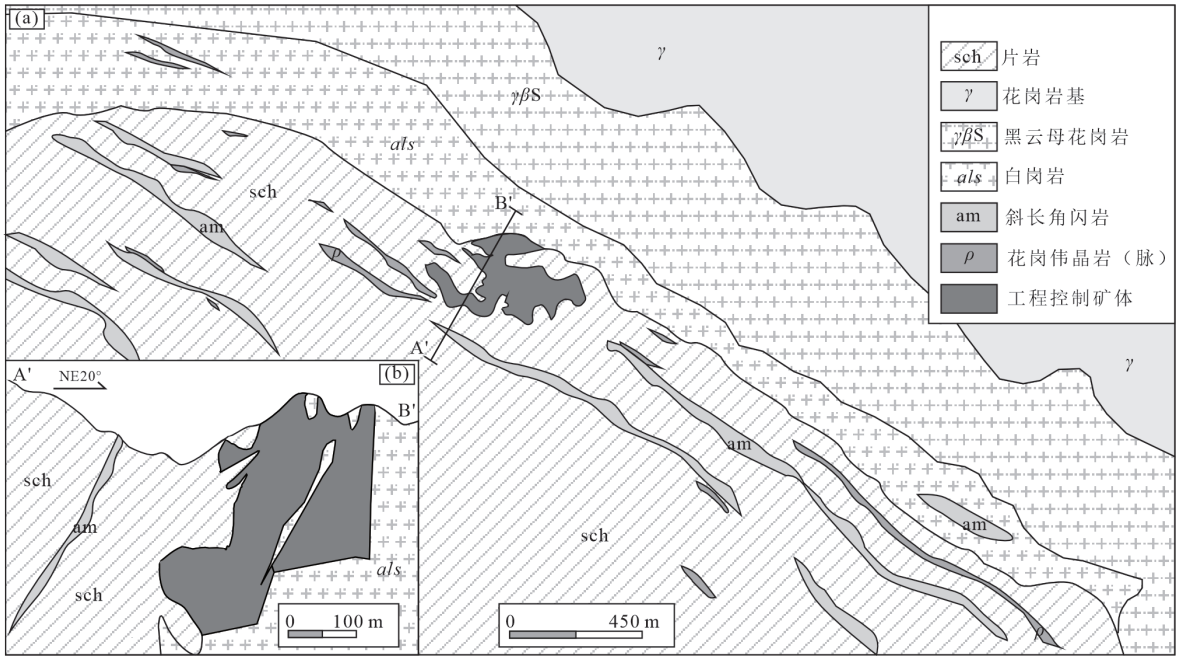


图2 东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿区岩性分布(a)和矿体形态剖面示意图(b)

资源管理部门完成储量评审备案的高纯石英原料矿石量3668万t,其中探明资源量706万t,控制资源量矿石量1150万t,推断资源量矿石量1811万t(超纯矿物新材料产业技术研究院,2024)。

总体上,矿床具有如下特征:赋矿母岩为白岗岩,岩石组合主要包括二云母花岗岩、白云母花岗岩及似伟晶岩。矿体形态和产状受岩体大小和岩相变化控制,局部岩相带整体上可圈为矿体。矿石类型按岩石类型划分,主要有二云母花岗岩、白云母花岗岩以及似伟晶岩型。矿石矿物石英呈半自形-他形粒状,脉石矿物主要为斜长石、钾长石和白云母等,还有少量石榴子石、磷灰石、电气石、黑云母、绿帘石族矿物、榍石,局部含少量黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿。矿石结构主要为花岗结构和半自形-他形粒状结构等,矿石构造主要为块状构造等。从成因角度看来,矿床不仅赋存于白岗岩,而且矿体与岩体关系密切,它们共同受制于白岗岩的分异演化,故将矿床类型划分为白岗岩型高纯石英原料矿床。

勘探成果最重要的进展证实了两个设证:其一,可以按照石英纯度4N8(以Al、B、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、P、Ti、Zn共15种杂质元素含量折扣而来的SiO_2≥99.998%)的边界指标圈出高纯石英原料矿体(图2b),证实在特定地质条件下可以形成4N8级以上高纯度高纯石英原料矿床;其二,白岗岩型高纯石英原料矿床杂质元素具有特殊结构比例,晶格杂质铝(Al)、钛(Ti)含量呈现特定数值(表2),这种情况与美国Spruce Pine矿山相似(超纯矿物新材料产业技术研究院,2024)。

3 白岗岩型高纯石英原料分离提纯

利用东秦岭白岗岩型高纯石英原料,在超纯矿物新材料产业技术研究院实验室开展了精细分离—深度纯化—定向除杂等工序的分离提纯实验。精细分离试验主要采用磨矿分级、高梯度磁选、浮选等物理分选方法实现石英、长石、云母和其他矿物之间的分离。深度纯化试验对经过精细分离的石英砂样品进行一次酸洗、煅烧水淬、二次酸洗,确定该样品的提纯潜力。定向除杂试验利用石英的晶型转变,采用氯化焙烧工艺对化学性质活跃的碱金属元素进行定向去除。经以上工序加工提纯后,可稳定制备4N8级高纯石英砂(图3),代表性样品的检测结果(经过具有相关资质的第三方机构检测)15项总杂质含量为13.02×10^{-6},SiO_2纯度为99.9987%(表2)。批量制备出的4N8级高纯石英砂,SiO_2纯度在99.998%以上,各项理化指标符合国际公认的IOTA-CG标准和国内GB/T 32649-2016标准,可适用于光伏用高纯石英砂的质量要求,并具备符合IOTA-4标准以及半导体制程用高纯石英砂的应用潜力。

在分离提纯实验基础上,还开展了吨级中试、千吨级工业试验。总体结论:东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿以岩体形式产出,规模大且岩性岩相稳定;矿物组成相对简单,主要矿物为斜长石、石英、白云母、钾长石,含有少量石榴子石、磷灰石;石英嵌布特征相对简单,流体包裹体很少且呈串珠状,利于分离提出过程中

表 2　白岗岩型高纯石英原料矿代表性样品分离提纯试验结果

元素	Al	B	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Li	SiO_2
含量/($\times10^{-6}$)	9.10	0.02	1.41	0.02	0.01	0.21	0.53	ND	99.9987%
元素	Mg	Mn	Na	Ni	P	Ti	Zn	总计	
含量/($\times10^{-6}$)	0.10	0.01	0.24	ND	0.45	0.89	0.02	13.02	

注:样品测试在超纯矿物新材料产业技术研究院实验室完成。

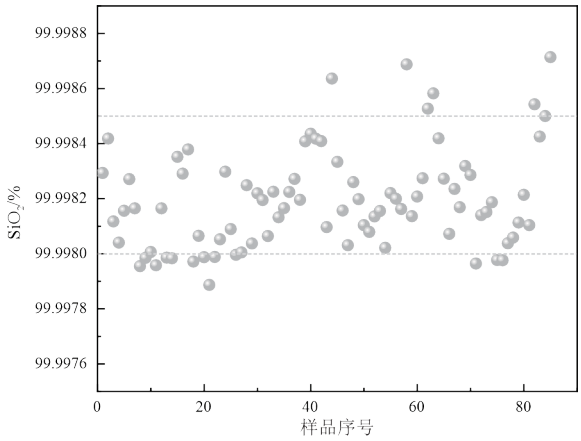


图3 漂池矿区某矿体矿石样品经分选处理后的石英砂纯度检测结果

的定向解离。另外,还对花岗伟晶岩、石英岩、石英脉型高纯石英原料矿进行了对比实验,结果显示,这些原料矿的矿物组成复杂,杂质元素含量变化大,导致工业化提纯与矿物解离难度增加,影响石英砂产品稳定性。

4　问题讨论

东秦岭造山带与阿巴拉契亚造山带南部区域具有相似的构造演化历史,在加里东期-海西期,两个地区都经历了俯冲和造山过程,并且都伴随了超高压变质岩片的折返。由此推测,相似的地质背景有可能导致相似的成岩成矿作用。美国北卡罗来纳州Spruce Pine矿山的高纯石英原料矿床,虽常被称之为花岗伟晶岩型,但主要赋存于白岗岩。东秦岭地区,虽然在花岗伟晶岩型高纯石英的相关研究和找矿工作取得快速进展(赵金洲等,2022;张海啟等,2022b;李开文等,2023;赵海波等,2024),但在白岗岩型高纯石英原料矿发现方面还属新的突破性进展。根据东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿床特征与Spruce Pine矿山对比,矿物学图解均投影于花岗闪长岩区域,按照淡色矿物含量划分,可以归为淡色(浅色)花岗岩,同时也属于白岗岩。矿体赋存的白岗岩体,外围分布大量花岗伟晶岩脉,内部也发育似伟晶岩且呈渐变过渡关系。矿石矿物组合以石英、斜长石(更长石)和碱性长石(条纹长石、微斜长石)为主,含石榴子石、磷灰石及电气石等特征副矿物。地球化学特征显示二者均属过铝质系列,经过高分异演化,所处的地质环境相似。特别在石英品质方面,东秦岭矿区所产石英砂纯度及晶格杂质铝(Al)、钛(Ti)含量呈现特定数值,也与Spruce Pine矿山所产石英砂相似。因此,随着研究和勘探工作的深入进行,东秦岭地区很可能形成与Spruce Pine矿山类似的白岗岩型4N8级以上高纯度高纯石英原料矿山。

5　结论

(1)在东秦岭古生代造山带识别出高分异花岗岩单元,并在这些岩石单元中分解出白岗岩,岩石组合主要包括二云母花岗岩、白云母花岗岩和似伟晶岩。这对于研究区域岩浆演化和成岩成矿作用都具有重要意义。

(2)通过区域资源调查优选找矿靶区,选择漂池白岗岩体开展高纯石英原料矿勘查与评价,精准圈定出4N8级高纯石英原料矿体,提交高纯石英原料矿石量3000多万吨,确认了东秦岭地区存在白岗岩型高纯石英原料矿床。

(3)利用东秦岭白岗岩型高纯石英原料开展了系统的分离提纯实验,批量制备出4N8级高纯石英砂,各项理化指标符合国际公认的IOTA-CG标准和国内GB/T 32649-2016标准,这对于解决半导体和光伏坩埚内层砂等高端原料的关键来源,满足半导体用高品质高纯石英砂的需要具有重要价值。

作者贡献声明: 王建平、张正伟、左鹏飞,论文构思、撰写、修改、指导及数据分析、图件绘制;王建平、方怀宾、李开文、吴承泉、黄业豪,野外勘查、样品采集、分析测试。

利益冲突声明: 作者保证本文无利益冲突。

致谢: 本次研究工作得到胡瑞忠院士、成秋明院士的全程指导,在研究推进过程中诸多专家、学者贡献了宝贵智慧与经验,在此一并致谢。

参考文献 (References):

超纯矿物新材料产业技术研究院. 2024. 东秦岭白岗岩型高纯石英原料矿勘查成果报告. 北京(未发表)

李开文, 方怀宾, 李晓宇, 张正伟. 2023. 河南省花岗伟晶岩地质特征及对高纯石英资源的制约. 第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文

摘要集, 429–430
唐春花, 张生辉, 袁晶, 陈艳, 钱正江, 刘小龙, 孙超, 周渝. 2024. 江西宁都白云母伟晶花岗岩型高纯石英用硅质原料矿床特征与资源潜力. 地质通报, 43(5): 667–679
汪灵. 2019. 石英的矿床工业类型与应用特点. 矿产保护与利用, 39(6): 39–47
王建平, 裴放. 2002. 东秦岭古生代古生物区与古地理变迁. 地质论评, 48(6): 603–611
吴福元, 郭春丽, 胡方泱, 刘小驰, 赵俊兴, 李晓峰, 秦克章. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿. 岩石学报, 39(1): 1–36
吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745–765
张海啟, 谭秀民, 马亚梦, 陈丛林, 张生辉, 王利, 刘磊, 朱黎宽, 郭理想, 张宏丽, 刘广学. 2022a. 新疆阿尔泰伟晶岩型高纯石英矿床地质特征及4N8级产品制备技术. 矿产保护与利用, 42(5): 1–7
张海啟, 张宏丽, 马亚梦, 朱黎宽, 郭理想, 刘广学, 郭峰, 王守敬. 2022b. 伟晶岩型高纯石英资源全链条调查评价体系的建立与实践: 以北秦岭地区调查评价为例. 矿产保护与利用, 42(5): 15–21
张正伟. 1991. 东秦岭灰池子花岗岩基岩石地球化学特征及其成因. 岩石学报, 7(3): 88–94
赵金洲, 张驰, 张森森, 王安书, 吴承泉, 张正伟. 2022. 东秦岭花岗伟晶岩中高纯石英矿物的可利用性研究. 矿物岩石地球化学通报, 41(6): 1305–1308
赵海波, 王红杰, 张勇, 马驰, 朱黎宽. 2024. 东秦岭伟晶岩型高纯石英矿地球化学、锆石U-Pb及Hf同位素研究: 对高纯石英找矿方向的探讨. 中国地质, 51(1): 42–56

（本文责任编辑：李溪遥）

•亮点速读•

人工智能语言模型模拟5亿年的生命演化

在地球漫长的地质时间尺度上，随机突变与自然选择塑造了蛋白质的多样性。这些蛋白质的序列、结构和功能记录了生命演化的历史，反映了生物学中隐匿于深处的内在规律。当下，随着基因测序技术的进步，科学家已经收集了数十亿条蛋白质序列和数百万个蛋白质结构数据，揭示了生命多样性的模式。这些数据表明，蛋白质的进化背后可能隐藏着一种“生物学语言”，而人工智能语言模型正成为解码这种语言的关键工具。

由美国人工智能公司Evolutionary Scale、旧金山Arc研究所和加州大学伯克利分校联合开发的“Evolutionary Scale Model 3（ESM3）”模型，可同步解析蛋白质的序列、三维结构与功能。其核心技术是生成掩码语言模型，即通过随机遮蔽部分信息（如掩去某段序列或结构片段），让模型基于剩余数据推理生成缺失内容。训练中使用了31.5亿条序列、2.36亿个结构和5.39亿功能注释数据，获得了最大规模为980亿参数的模型。

绿色荧光蛋白在生物学研究中是非常重要的工具，用于标记和跟踪细胞内的分子与结构。然而，现有的荧光蛋白大多数来自自然界，且其突变通常限制在已有序列周围，很难大幅度改变其序列。经过一系列的生成和优化步骤，研究人员获得了多个新的绿色荧光蛋白（green fluorescent protein，GFP），其中一个特别的设计被命名为“esmGFP”。这个全新的蛋白质与现有的荧光蛋白之间的序列相似性为58%，与最接近的天然蛋白之间的序列差异为107个氨基酸，序列相似性为53%。研究人员还进一步验证了生成的绿色荧光蛋白是否具有实际的荧光功能。结果表明，尽管esmGFP发光特性有所延迟，成熟时间较长，但最终的荧光亮度与已知的绿色荧光蛋白相似，且具有稳定的荧光特性。

研究团队为验证esmGFP的进化跨度，构建了一套基于自然界蛋白质的校准系统。研究使用了包含六个珊瑚虫荧光蛋白及其对应物种的扩展数据集。这些数据具有精确至最近共同祖先的时间估算和荧光蛋白的序列同一性信息。研究者们构建了一个简单的估算模型，将荧光蛋白间的序列同一性与物种间进化时间（百万年）相关联，以此校准自然进化过程。基于此分析，研究人员估计esmGFP与自然界中发现的最接近天然蛋白之间的差异，相当于超过5亿年的自然进化等效时间。

［以上成果发表在国际著名科学期刊***Science***上：Hayes et al. 2025. Simulating 500 million years of evolution with a language model. Science, 0, eads0018DOI:10.1126/science.ads0018］

（夏群科 编译）