

相辅相伴成相生



——黑色岩系中钒与有机质的地球化学特征与伴生机制

□文 / 刘成林 许诺 龚宏伟 柳永军 顿超 童超 徐韵

> 钒元素 视觉中国 / 供

第一作者简介 刘成林，教授，博士生导师，研究方向为油气地球化学与资源评价、非常规油气地质。

亿万斯年，地壳的发展演化一直遵循着特定规律，不停进行着物质循环和能量转化。其中，无机矿物与有机质之间的耦合作用关系，则远比人们之前的认识要丰富得多。本文以钒为例，详叙其与有机质的密切联系，一窥矿物成藏的谜底所在。

与钒初识：钒的应用与分布

钒（vanadium）是一种金属元素，因其化合物色泽鲜艳明亮，故而赋以北欧神话中的美丽女神“凡娜迪丝（Vanadis）”之名。它是具有战略意义的稀有金属，应用领域十分广泛。含钒钢具有强度高、韧性大、耐磨性好等优良特性，广泛应用于机械、汽车、造船、铁路、

航空、桥梁、电子技术、国防工业等行业，约占钒消耗量的 85%。大约有 10% 的钒用于生产航天工业所需的钛合金。钒在钛合金中可以作为稳定剂和强化剂，使钛合金具有很好的延展性和可塑性。金属钒具有熔点高、易加工、耐腐蚀、快中子吸收截面小等特点，主要用于原子能工业、超导合金材料、特种合金的添加剂以及电子工业等方面。钒在化学工业中主要作为催化剂和着色剂。钒还被用于生产可充电氢蓄电池或钒氧化还原蓄电池，等等。

自然界中，钒通常以矿物形式存在，主要有钒钛磁铁矿、钾钒铀矿和石油伴生矿，现在已探明的钒资源约有 98% 存在于钒钛磁铁矿中。根据美国地质调查局不完全统计，2021 年，全球钒资源储量（以钒金属计，可开采量）约 2 400 万吨，其中，中国储量居世界第一，约 950 万吨。俄罗斯、南非和澳大利亚也是钒资源大国。

我国钒矿主要有两种类型，一是与岩浆活动相关的岩浆型钒矿，主要有河北承德大庙黑山钒钛磁铁矿和四川攀枝花钒钛

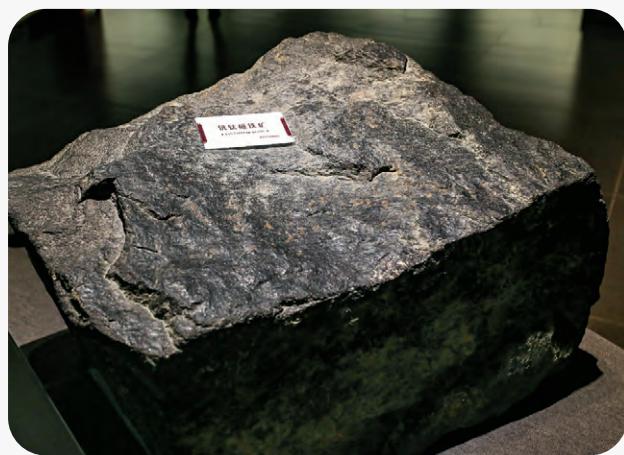


> 红钒铅矿 视觉中国 / 供

磁铁矿；二是与水体沉积作用相关的黑色岩系型钒矿，广泛分布于湖南、湖北、贵州、江西、浙江、河南、陕西、甘肃和新疆等地，其与黑色岩系的分布密切相关。

黑色岩系：矿产之家

黑色岩系在贫氧或缺氧水体中形成，是具有一定沉积学、古生态学和地球化学特征的黑色细粒沉积岩组合。它形成于地球演化中特定的地质环境，具有多类型和成因多样化特点，不同黑色岩系反映出不同地质背景和沉积缺氧环境。普遍具有陆源碎屑、深部热流、生物和宇宙等多种物质来源，主要包括硅质岩、磷块岩、碳质泥岩、粉砂岩、



> 岩浆型钒矿：钒钛磁铁矿 视觉中国 / 供



> 沉积型钒矿：南秦岭干家坪钒矿矿体特征 (徐林刚等, 2022)

石煤、重晶石岩和碳酸盐岩，等等。

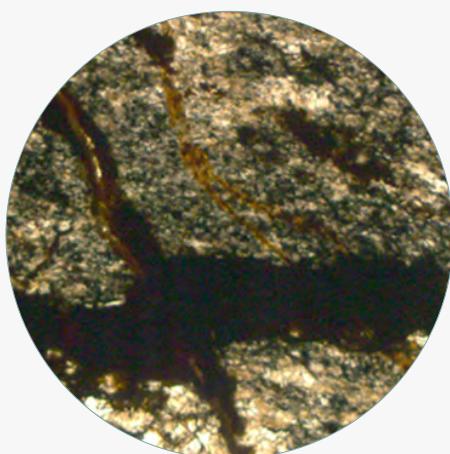
在贫氧-缺氧环境中，水体和营养物质交换受到限制，原始光面球藻、粗面球形藻和网面球藻等浮游藻类、宏观底栖藻类、海绵等浮游动物，以及细菌等生物大量死亡，沉入水底，为有机质和钒元素的富集提供了良好的条件。

黑色岩系能够产出不同类型的金属、非金属矿床与石油、天然气。早在20世纪80年代中后期，国际上兴起并开展“含金属黑色页岩”“有机质与矿产资源”和“重要环境中的有机质”等

国际地质对比计划研究。多年研究认为黑色岩系矿床形成机理包括同生沉积初始富集与沉积、沉积成岩与后生地质作用轻微改造、构造-热液强烈改造、变质与构造-热液改造成矿机理。

黑色岩系广泛存在于沉积地层中，在时间上跨越元古宙和显生宙，在空间上广泛分布于五大洲。例如，俄罗斯西伯利亚里菲系上部以及波兰的前寒武系，印度小喜马拉雅、伊朗、巴基斯坦北部、法国南部、威尔士、英格兰、俄罗斯、阿曼北部、澳大利亚南部、加拿大、蒙古等地的下寒武统，加拿大育空地区的中上泥盆统，英格兰南部、荷兰、德国到中欧诸国的上二叠统均发育黑色岩系。

我国黑色岩系分布广泛，矿床最为集中的有华南中新元古界、震旦系、上泥盆统、下寒武统。



> 青海省北部砂岩微裂隙及粒间孔隙中的碳沥青



> 湖南省西部黑色岩系

钒与有机质：相伴相生

在数亿年的地质时期，钒与有机质一起经历沧海桑田，相互成就，最终赋存在同一空间。海洋生物通过新陈代谢作用摄入一定量的钒供生命活动使用。浮游生物、底栖生物等具有富集金属能力明显的纤维素外壁，从周围环境中不断摄入钒，钒在生物体内不断增加。这些生物死亡后，钒等金属元素与生物遗体共同沉积，缺氧环境也提供了良好的保存条件，在其后的成岩作用过程中，钒通过吸附作用或交代作用在有机质和黏土矿物中慢慢富集。

通过参与有机质生烃反应，钒与有机质形成络合物，携手进入油气，并运移至储层中。由于岩浆热液作用以及金属元素的催化作用，有机质不断发生热演化直至形成碳沥青（一种经受过高温过程、含碳量高的黑色坚硬固体沥青）。钒也相应发生生成矿作用，最终在黑色岩系中等到它们的身影。

笔者曾为之作诗一首：

牵手

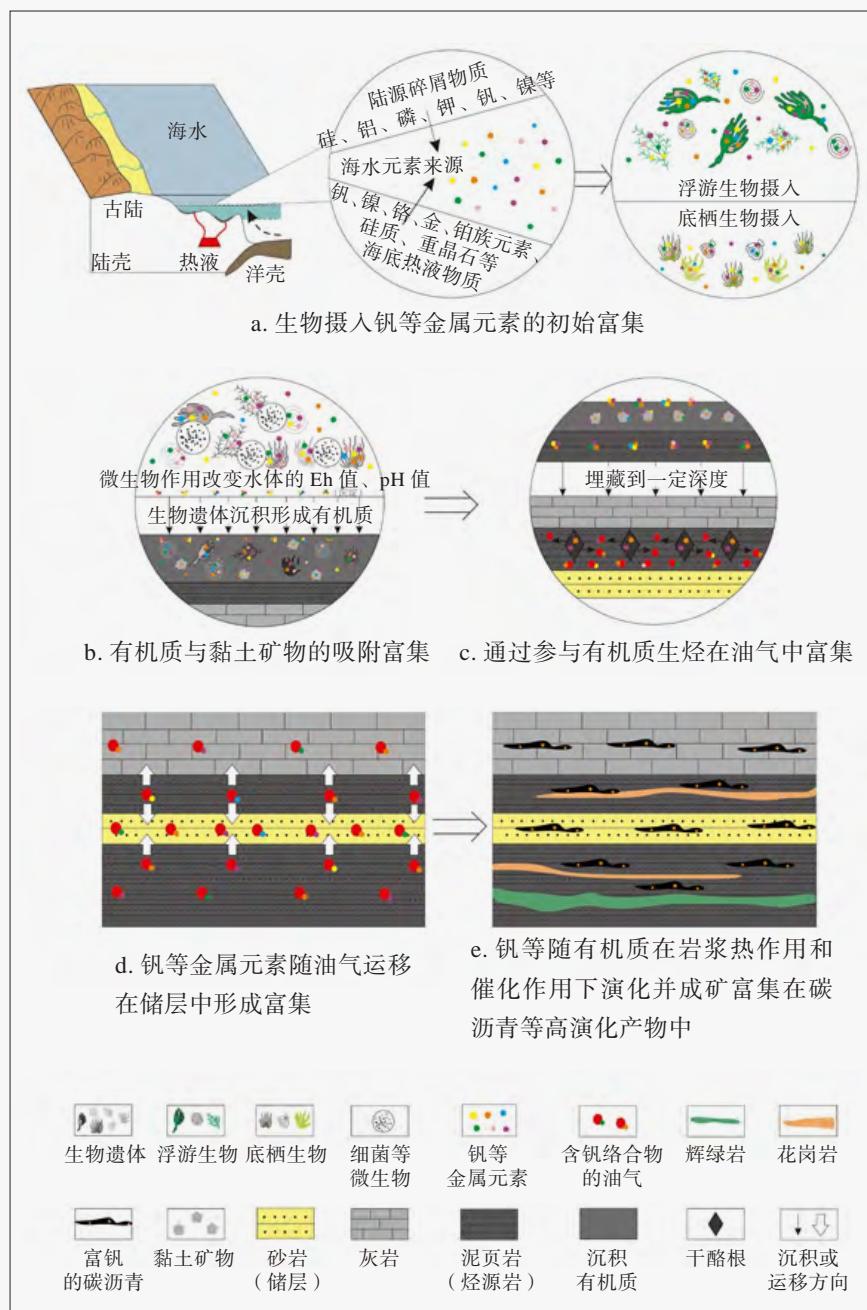
女神居祁连，湘西名钒海。
寻伊路千里，叩问黑色岩。
早古洋浩瀚，热流伴火山。
钒与有机质，牵手亿万年。

见微知著： 服务找矿事业

对黑色岩系的研究，可深化认识地球表层或浅部化学元素的分布规律与机制，尤其是可以揭示地球演化中元素在沉积圈内时空上涌现和聚集的不均一性，特别是环境突变的成因，从而有助于重塑和认识地球演化的历史和过程。

作为油气母质的生物在繁殖、聚集、生油气过程中均会影晌某些特定类型元素的富集和保存，适宜有机质保存的沉积环境同样具备能够稳定保存某些特定元素并助其成矿的优良条件。开展油气资源与一种或多种固体矿产资源之间的协同勘探工作在理论上是可行的，广泛存在的黑色岩系伴生矿床的发现也表明开展协同勘探具有重要的现实意义。

我国大多数沉积盆地不仅具有“上陆（相）、下海（相）”，而且常呈现“有机和无机”的叠合特征，金属形成与油气的生成、演化以及成藏表现出密切联系。兼顾油气、金属、非金属矿产资源的协同勘探模式，为资源类型多样、环境复杂多变地区的勘探工作提供了一种有效思路，可以提高勘探效率，促进多种能源共同勘探开发，更有效地服务于国家找矿事业。



> 钒与有机质的演化及聚集模式

本文由国家自然科学基金项目“碳沥青与钒矿物伴生机理研究（编号：41572099）”资助。

第一作者单位 / 中国石油大学（北京）

（本文编辑：何陈临秋）