

文章编号: 1000- 6524 (2001) 04- 0419- 09

环境演变的矿物标识研究新进展

贾建业^{1,2}, 汤艳杰²

(1. 广东省科学院 广州地理研究所, 广东 广州 510070; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 天然矿物是自然演变的产物, 在其形成和变化的整个过程中, 不同时间和空间尺度上的环境变化都会在矿物中留下烙印, 使得矿物成为环境演变信息的载体。本文对黄土、河流、湖泊、海洋、大气等自然环境中的天然矿物所标识的环境演变规律进行了系统的概括, 揭示了矿物的外部微形貌、内部微结构、化学组成、化学性质、物理性质、谱学特征、成因及其共生组合等方面特征与环境演变的关系, 显示出矿物标识环境演变的信息载体作用。

关键词: 矿物标识; 环境演变; 信息载体; 新进展

中图分类号: P574; X141

文献标识码: A

近几十年来, 人类对自然资源的大规模开发和各种污染物的随意排放, 导致资源匮乏和全球生态环境日益恶化, 严重破坏了人类的生存环境。全球环境保护和持续发展是全人类共同关心的问题, 防治污染、保护环境已日益成为世界各国的一项基本国策^[1]。

环境质量的好坏直接关系到人类的生存, 环境演变规律的科学研究是有效治理环境和保护人体健康的前提。由于天然矿物是各种地质作用所形成的单质或化合物, 是自然演变的产物, 在矿物形成和变化的整个过程中, 不同时间和空间尺度上的环境变化都会在矿物中留下烙印, 使得矿物含有丰富的反映环境演变的信息——特定的矿物共生组合和标型特征, 成为环境演变的信息载体^[2,3]。这些信息具体蕴藏在矿物外部微形貌、内部微结构、化学组成、化学性质、物理性质、谱学特征和成因产状等方面。通过对自然界产出的, 尤其是第四纪以来矿物的发生、发展、变化、消亡等特征与环境关系的研究, 可以揭示记录在矿物中的环境演变信息, 发挥矿物标识环境变化的信息载体作用, 这是环境矿物学领域中目前较为活跃的研究内容之一^[4]。与以往相比, 1998年8月在加拿大多伦多召开的第17届国际矿物大会的一个鲜明特征是增设了环境矿物学(environmental mineralogy)专题^[5]。环境矿物学是在人类赖以生存的地球正面临着环境污染和生态破坏严重威胁的今天应运而生的, 它是研究天然矿物与地球表面各个圈层间相互作用以及矿物反映自然演变、防止生态破坏、净化环境和参与生物作用的科学。本文着重对天然矿物在标识环境演变信息方面的国内外研究现状进行综述, 旨在推动和加强矿物在标识环境演变信息方面的深入研究, 建立和发展环境演变的矿物标识体系, 以便更有效地评价和治理环境。

1 环境演变的矿物标识

1.1 矿物作为环境演变信息载体的依据

自然界中的矿物是一定物理化学条件下的产物。在其形成之后的地质作用过程中, 由于环境条件的改变, 往往会导致矿物的变化与分解, 尤其是在地表条件下, 不稳定的矿物容易发生化学风化作用, 常常表

收稿日期: 2001- 05- 07

基金项目: 广东省科学院优秀青年科技人才基金资助项目

作者简介: 贾建业(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事矿物材料与环境矿物学研究。

现为矿物种的转变或矿物中部分组分的流失,比如,在高温高湿度的热带、亚热带地区,岩浆岩中K、Na、Ca淋失,Al₂O₃、Fe₂O₃、SiO₂等保留,从而形成以三水铝石、一水铝石、多水高岭石、高岭石、褐铁矿等为主的矿物共生组合;在干旱条件下,硅酸盐矿物风化后,K、Na、Ca等呈氯化物及硫酸盐溶解于地下水中,经毛细作用升至地表而形成以石盐、石膏、芒硝等为主的矿物组合。在矿物发生风化作用的过程中,所产生的重金属和阴离子污染物对地表水体与土壤环境质量造成了直接影响。一些金属矿物尤其是含有变价元素的金属矿物表现得更加突出^[1]。相反,人为的或自然因素造成的环境变化也可以引起矿物的外部特征和内部结构等方面发生变化,从而使得天然矿物成为环境演变的信息载体。

硅酸盐矿物表面富硅淋滤层的室内溶解实验已被广泛报道^[6,7],但是关于自然界硅酸盐矿物风化表面存在富硅层的报道则甚少。在英格兰西北部花岗岩中的地衣-矿物界面上发现了这类富硅层^[8,9],它产于覆盖有地衣的碱性长石、斜长石和黑云母颗粒之上,厚度不到10 μm,由黑云母风化后的富硅残留物和斜长石在地衣-矿物界面上经过重新分配组合而成。有意义的是,在碱性长石颗粒内的裂隙和解理缝上有富硅层横跨其中,也可充填于微小空洞中,证实富硅层为生物力学和生物化学成因。该地花岗岩的生物化学风化作用缺乏其他证据,不存在由地衣经生物化学风化而形成的草酸盐,但在碱性长石和黑云母颗粒的解理面和断裂面上均有发生生物风化作用的迹象——侵蚀凹陷,颗粒中的K与Fe及Mg、Al、Ti等组分已被淋滤出,剩下富硅残骸。事实上,地衣也可以保护岩石免受霜冻并和固定矿物碎屑形成富硅层,从而使矿物表面不再进一步遭受生物风化作用。另外,这些富硅层还指示矿物发生了生物力学和生物化学风化作用^[10]。

广泛产于各种成因类型岩石中的长石族矿物,约占地壳总质量的50%,是地壳中分布最广的矿物之一。研究花岗岩和玄武岩发育的红壤、黄壤中的长石风化后得知,长石在土壤中的风化深受气候和母质来源的双重影响。热带和亚热带地区高温多雨,有利于矿物分解和次生矿物的生成。在玄武岩发育的砖红壤中,斜长石经风化转变为非晶质,进而形成高岭石和三水铝石;而在赤红壤和红壤中,斜长石的风化产物先是水云母,继而形成1.4 nm过渡矿物和蒙皂石。虽然长石是一种难风化的土壤原生矿物,但不同种类,其风化程度差异很大,土壤中各种长石的风化顺序是:钠长石 > 钾长石 > 钙长石。进一步的分析发现,矿物风化程度上的差异与水热条件,特别是积温和年平均温度关系密切,在土壤形成过程中,长石的风化状况在一定程度上能够反映出土壤原生矿物的风化程度^[11]。

从20世纪60年代开始,不少学者利用扫描电子显微镜(SEM)对石英砂表面结构进行形态描述,探讨石英砂表面结构的分布特征及其环境意义^[12-16]。在扫描电镜下,观察到多数石英砂粒有较好的磨圆度和大量的机械撞击痕迹。有的颗粒可见成群的各类撞击坑,几乎遍布整个圆化的表面。一些石英砂粒表面,化学溶蚀和沉淀现象也较发育。溶蚀现象以深邃的不规则的溶蚀沟和溶蚀洞为主,还可见到成簇的具方向性的三角形溶蚀坑。石英砂表面的这些结构因沉积作用的不同而有差异,磨圆度、表面形态是反映高能 and 低能环境的灵敏指标,典型环境的特有标志和某种表面结构出现的几率以及这些标志形成顺序的识别,均是对环境判定和解释的正确途径^[15]。

在各种类型沉积岩中,均有粘土矿物分布,它们是母岩物质风化的产物。气候条件不同,风化产物必然有所差异。根据沉积物中粘土矿物组合特征来指示古气候,近30年来已取得较大进展,不少学者利用此法成功地解释了有关地层的古气候变化特征^[17-29]。Biscaye指出绿泥石在高纬度大陆土壤和沉积物中富集,认为绿泥石和伊利石可指示弱风化强度^[21];而在热带,由于淋滤和化学作用较强,土壤中富含高岭石,即高岭石是低纬度的粘土矿物。蒙脱石在南半球海洋中含量较高,因为那里的火山物质比碎屑粘土输入量高,火山物质将会蚀变成蒙脱石^[22-24]。伊利石结晶度指数的变化有助于区分冷干期与暖湿间冰期^[25-27]。构成气候的两个基本要素是温度和湿度,从粘土矿物的成因来看,它们也是控制粘土矿物形成的两个重要因素。在潮湿温暖的气候条件下,淋滤作用较强,母岩风化后,一些碱金属、碱土金属元素容易被淋滤流失,易于形成高岭石;而在干冷气候条件下,淋滤作用较弱,不利于碱土金属元素流失,相反,有利于形成伊利石、蒙脱石(陆源碎屑成因)、伊利石-蒙脱石混层类粘土矿物和绿泥石^[19,28,29]。在整个地史发展过程中,由于古气候不断地进行交替变化,粘土矿物的组合特征也随之发生相应的变化。岩芯中粘土

矿物含量变化与古地磁特征变化的关系对比说明, 粘土矿物的变化与古气候的变化有一定的关系^[19]。

1.2 全球性的环境演变特征与矿物标识研究新进展

对过去全球气候变化的研究是我国“十五”期间优先资助的领域。在全球性环境演变的研究中, 第四纪以来的冰川和黄土常常是人们重点研究的对象, 因为冰川中的重矿物微粒和黄土中的组成矿物分别记载着冰川和黄土形成演变过程中的各种信息^[27, 30-36], 深入研究这些信息载体的特征, 将有助于揭示全球性的环境演变特征和演变规律。以黄土研究为主导而创立的东亚古季风理论是对第四纪环境研究的重大贡献。黄土是风成堆积物, 中国的黄土高原大约在 240 万年前就开始堆积, 此后几乎连续沉积至今。黄土物质主要来源于北方及西北方的沙漠、戈壁以及第四纪冰川地区的地表岩石风化物。因此, 黄土和古土壤是约 240 万年以来气候系统相互作用过程的重要记录, 其粒度、矿物、化学组成及其微形态特征是黄土环境演变的地质证据。黄土和古土壤中重矿物成分复杂, 有来自变质岩的, 如蓝晶石、石榴石等, 也有来自岩浆岩的, 如锂辉石、黝帘石等, 有的保持完好的晶形(如锆石), 有的具有新鲜的贝壳状断口(如石榴石), 大多数为棱角状和次棱角状, 其次为次圆或浑圆状颗粒。不同时期的黄土和古土壤在重矿物组成上有共同特点, 不透明矿物、绿帘石和普通角闪石 3 种矿物的含量都比较高。它们是土壤中的优势重矿物, 具有不同的抗风化能力, 在表生环境下, 它们依次属于稳定、较稳定和不稳定矿物。它们在含量上的变化可以反映黄土、古土壤的形成环境、沉积以后次生变化等方面的差异^[30-34]。

黄土中粘土矿物组合和结构变化特征的研究, 有助于了解黄土堆积过程中环境演变的历史。特别值得指出的是, 伊利石的“结晶度”在土壤剖面上的变化曾被用作划分气候旋回的依据^[37]。黄土中的粘土矿物以伊利石为主, 还有高岭石、蒙脱石、绿泥石、蛭石及少量无序和/或有序混层结构矿物。各时代黄土的粘土矿物组成相似, 只是各种矿物的相对含量有些差异。古土壤与黄土层在粘土矿物方面的差异, 主要表现在伊利石的结构变化及绿泥石和蛭石相对含量的差异两个方面。粘土矿物在成岩过程中随着埋深、温度和压力的增加, 其演化的总趋势是从无序结构向有序结构转化, 从晶格不完整向完整转化, 从膨胀晶层多向膨胀晶层减少、非膨胀晶层增加的方向转化。很多学者报导在成岩过程中粘土矿物的转变为蒙脱石→伊-蒙混层矿物→伊利石。从黄土中粘土矿物, 尤其是伊利石“结晶度”的变化可以看出, 古土壤形成与黄土堆积时的气候条件差异明显, 古土壤形成于降水较多相对湿润的条件下, 而黄土则形成在气候比较干燥的时期。通过各时代黄土形成环境的互相比较, 可以看出午城黄土形成时的气候可能还稍湿润一点, 而到马兰黄土堆积时气候则越趋干燥^[27, 30]。

磁化率随温度的变化特征和等温剩磁测定以及 X 射线衍射实验揭示出黄土和古土壤的主要磁性矿物是磁铁矿, 并包括少量的磁赤铁矿、赤铁矿和黄铁矿或磁黄铁矿以及针铁矿^[36]。一般来说, 在中国黄土高原地区的黄土和古土壤中, 相对较高的磁化系数都是由风成沉积物搬运过程中细粒磁铁矿的沉积和成土作用过程中原地形成的超细粒磁铁矿在土壤剖面中的聚集所引起的^[38-40]。

绿泥石是土壤中的常见矿物, 虽然含量较云母类矿物低, 但由于它在成土作用早期阶段易风化形成土壤粘土矿物而备受重视。现有的研究表明, 绿泥石在化学风化过程中会释放出大量的铁和镁离子, 而铁是磁性矿物形成所必需的元素。因此, 黄土剖面中绿泥石所发生的化学风化作用是铁质矿物演化的重要环节, 为成土自生磁性矿物的发育提供了物质基础, 黄土和古土壤中绿泥石的化学风化、磁性矿物与土壤磁化率的相关关系的研究, 是理解磁化率成因的关键^[41-43]。对 13 万年来洛川黄土-古土壤剖面中绿泥石和云母的分布特征及其与磁化率的关系的研究表明, 黄土剖面中云母/绿泥石比值曲线与磁化率分布曲线十分相似, 两者之间存在密切的线性相关关系^[43]。在黄土-古土壤剖面中, 磁化率的信号已经被作为古夏季风场强度, 尤其是古沉积强度的一个量度^[44-46], 而云母/绿泥石比值能够灵敏地指示黄土-古土壤中古气候因素的细微变化。由此可见, 黄土-古土壤中云母/绿泥石比值是判别黄土高原夏季风场强度变化的又一个代用指标。

矿物及其组合研究是探讨成岩成矿及环境变化的一个重要手段, 也是近年来沉积序列划分以及古环境重建和古气候对比研究中新的探索点。随着高分辨率地层学的发展, 矿物记录古气候、古海洋信息的研究逐渐得到重视, 根据特征矿物含量及矿物组合的深度变化可反映物源和环境随时间演变的特征, 揭示古

气候环境演变的信息^[47]。海洋自生矿物的形成受海洋物理和化学条件的控制,它可以反映海洋温度、盐度、环流等古海洋参数的变化^[48];陆源矿物大部分是周缘陆地不同岩性的岩石经受物理风化或化学风化的产物,矿物类型及单矿物的性质与陆地气候条件密切相关。此外,矿物在风力或河流营力作用下易受到侵蚀、搬运或再沉积,海洋底层环流和重力沉降运动对矿物沉积也有影响。在20世纪50年代,科学家们就试图利用海洋沉积物中的碳酸盐矿物、碎屑矿物和粘土矿物的变化特征、矿物组合及其可能记录的古气候环境演变信息的研究来重建古气候^[49-53]。大量的研究还表明,海洋沉积物中的粘土和土壤中的粘土有着固有的联系,这种联系已经得到充分证明,并且被用于重建古气候和恢复大陆古环境^[52-54]。

晚第四纪以来的碳酸盐旋回因受地球轨道周期的控制,与全球的气候变迁密切相关,海洋沉积物中碳酸钙含量的变化对气候环境有灵敏的指示作用^[47]。根据南海NS93-5柱样的矿物学及矿物沉积序列特征,将该柱样的沉积环境表述为6个矿物沉积序列,反映了末次冰期以来的气候演变特征^[47]。方解石是碳酸钙的主要矿物表现形式,两者的深度变化曲线很相似,而且都与氧同位素变化曲线大致平行,表现为“大西洋型”碳酸盐旋回。陆壳上硅酸盐的风化过程,对于大气中元素(如碳)的地球化学循环来说具有非常重要的意义,全球硅酸盐风化率的研究也已引起人们的重视^[55,56]。

1.3 局部地区的环境演变特征与矿物标识

局部地区的环境演变特征与该区大气、水体和土壤中的矿物特征与变化规律密切相关。若对一个地区的环境质量特征和演变规律开展评价,该地区大气中的矿物浮尘、水体中的沉积物以及土壤中污染物的含量是必不可少的直接研究对象,但要深入研究污染物的产生机理及防治措施,则往往离不开对无机污染物的主要载体——天然矿物进行详细研究,其研究结果能揭示较小空间尺度上环境演变的规律^[57,58]。

由于在采矿、选矿、矿物制品加工生产以及使用等环节所产生的矿物粉尘严重危害人类健康,同时,也导致气候发生变化^[59],降尘还可引起土壤组成和性质的改变,影响植物的生长和品质,因而引起各国的普遍重视。对工业矿物纤维在有机体中的溶解性实验研究发现,水镁石和硅灰石能完全溶解于所有的有机酸中而产生镁和钙盐,在硅灰石中还能形成硅的复杂化合物。海泡石、坡缕石和单斜丝光沸石仅能交换出一些镁和铝离子,而矿物结构并不发生改变,总的溶解量最多可达8%~10%。蛇纹石类石棉不仅阳离子能被溶解出,而且还能溶出二氧化硅。这些矿物的粉尘在溶液中的溶解作用也具有类似特征,溶液作用过程中纤维矿物表面有裂开、凹蚀、脱皮现象并趋向分散或折断,片状粉尘颗粒的溶解速率与台阶步密度或与含铁样品的氧化速率呈正相关关系,溶解总量基本与体系酸度和有机离子的总量成正比。富钙、镁或铝的粉尘溶解速率高于富钾、硅的粉尘,环境的低pH值、高溶解氧量或氧化反应、高盐度溶液等均可以促进粉尘发生溶解作用^[60]。这一研究为解释“尘肺”、“矽肺病”的形成机理和研究类似疾病提供了一种方法,同时对探讨矿物粉尘危害人体健康的问题有所启发,也为粉尘毒性的降低以及工业矿物纤维的安全处理提供了有效的途径^[61]。

研究湖底沉积物及其组成矿物特征是调查水体环境污染来源及演变规律的前提。湖泊沉积记录的冷暖干湿组合及其反映的古湖泊水位波动是对黄土记录的重要补充,也是国际上建立气候模型的重要依据^[62,63]。目前对湖泊沉积物已开展分析的环境指标有孢粉、硅藻、矿物、磁性参数、元素含量及其比值、碳酸盐含量、自生碳酸盐氧碳同位素等,多环境指标的综合判识在恢复古温度、古降水、古盐度和历史时期人类活动影响方面显示出了较强的优势^[64]。

20世纪80年代后期以来,利用湖泊沉积进行环境演变研究已成为十分活跃的领域,对合理开发利用湖泊资源和解决中国当前日益严重的湖泊富营养化、水污染等环境问题进行了积极的探索。由于自然环境的区域差异显著,不同区域的湖泊沉积与环境演变过程存在较大差异。我国浅水湖泊众多,其环境系统复杂,在风浪、入湖水流、人类活动等因素影响下,湖泊沉积过程极不稳定,涉及到营养盐释放、有机质分解、冲淤分布等,使得现代湖泊环境的研究难度很大。湖泊底泥营养盐的研究为揭示湖泊沉积记录的古环境演变规律和现代湖泊环境整治提供了科学依据^[65]。某一地区盐湖的出现,表明该区气候干旱已达使湖水逐渐浓缩到蒸发岩析出的程度,即经历了一次长时间的干旱气候期。根据中国盐湖地区含盐系中矿物学气候指标以及含盐系地球化学特征等,可分析距今2.4万年以来的古气候演变规律。我国盐湖粘土矿

物以伊利石、绿泥石为主要特征,含少量蒙脱石和高岭石等,化学成分与伊利石粘土相似,一般具有冷温带大陆粘土和盐湖粘土化学成分特征。不同地区盐湖和盐湖沉积不同阶段中粘土资料的异同,主要受干旱气候和卤水化学成分所控制,利用粘土的 Al_2O_3/MgO 比值及矿物等资料,可以反映盐湖沉积过程中的相对淡化或咸化,即气候相对干旱或温湿。对内蒙古呼伦湖地区的研究表明,当气候湿润、湖泊水深较大时,泥质沉积物的磁性较高;反之,干旱气候所沉积的砂性沉积物的磁化率较低。深入的岩石学研究证实,在湖泊水位较高、相对还原条件下,泥质沉积物中形成次生的铁磁性硫化铁矿物。该磁性矿物叠加在少量的碎屑成因的磁铁矿上,导致了磁化率的上升。正是由于磁性矿物与磁化率的密切联系,磁化率能够敏感地反映沉积物中的磁性差别,才有可能用它来研究环境演变的规律^[66]。新疆第四纪湖泊沉积物中石膏、赤褐铁矿等矿物的存在,反映了当时的气候条件和沉积环境,为第四纪气候变迁、地理环境演变的研究提供了某些信息^[67]。

沉积物中粘土矿物总量与石英质量分数之间的负相关关系能够反映沉积过程中气候环境的变化对河口响应系统的控制。由珠江口东北岸 SX97 孔的粘土矿物和石英的分析发现,它们所揭示的气候演变规律(高水平面、气候湿热时期与低水平面、气候相对偏干偏凉的时期相互更替)与该地区的海岸沙丘、海滩岩和海相沉积地层的资料能比较好地对应。这些矿物绝大部分来自东江流域,物源区与沉积区的气候环境以湿热为主,但在总体湿热的背景中有一些波动,表明河口地区沉积物中的某些矿物有时也是气候环境变化的标志^[68]。黄河口区全新世沉积物中自生方解石指示淡水环境,自生白云石指示潮坪沉积,其分布受物源、环境、沉积物类型、环境对沉积物改造作用的控制。

有机-生物成因的次生淡水方解石的发现,为油气的细菌降解作用提供了证据。张性构造的发育、大量油气的运移、适宜的古地温和淡水供给,是形成该种成因类型方解石的基本地质地球化学条件^[69]。随着生物矿化研究的深入,微生物在成矿过程中的作用越来越受到重视。细菌可以在自然界任何具有液态水的地方生存,在一些极为苛刻的条件下,细菌往往是惟一的生命形式。实验室培养的淡水生物薄膜和细菌细胞的透射电镜(TEM)分析显示,细菌数量多、形体小,具有相对最大的比表面积,能够在其表面聚集各种金属。微生物与细粒的铁铝硅酸盐的联系普遍密切,是由于在沉积物-水界面上,具有高度反应活性的微生物薄膜可诱导细胞外铁、铝等可溶性组分形成不溶性的氢氧化物。所以,它们在控制水中微环境的化学组成、进而控制水底沉积物的组成方面起到极为重要的作用^[70]。

详细研究粘土矿物、铁锰铝氧化物和氢氧化物矿物等土壤矿物的组成特征,可以揭示它们与土壤中污染物之间具有怎样的吸附与解吸、固定与释放的平衡关系,从而在土壤组成矿物的层次上查明土壤中污染物与具体矿物之间的平衡关系,建立和保护土壤中污染物与矿物之间的环境平衡机制,提高土壤本身的治污能力^[1,57]。不少学者就冰川、雪地、盐湖、河流、黄土、红壤及矿山等较为特殊地区的环境质量与其中存在的天然矿物的发生、发展和变化之间的因果关系进行了系统研究,揭示污染产生的根源,明确提出了环境污染治理的对策。大多数环境工程材料是通过表面作用(吸附或共沉淀)来清除水中的有毒有害物质,用硫化物矿物处理重金属废水的方法便是一例^[71]。在固液交互作用(Solid-Liquid Interaction)过程中,硫化物与重金属间并非简单的物理吸附,而是硫化物表面羟基化和微溶先导致溶液 pH 值的改变,对 Cr^{6+} 而言,还发生了离子反应(氧化还原),于是形成了较多的吸附位,使矿物本身显示出较高的表面活性,随重金属离子种类的不同发生不同的表面反应,从而除去废水中重金属离子。土壤中大量存在铁和锰的铝氧化物及氢氧化物、硅氧化物、碳酸盐、有机硫化物等天然矿物,它们具有还原溶解作用,不仅对有害有毒的无机性还原剂具有良好的净化功能,而且对环境中的有机性还原剂具有氧化降解功能。铁锰氧化物与氢氧化物表面的质子化与羟基化特性可表现出化学吸附作用。利用土壤中广泛分布的天然矿物治理土壤重金属污染物,利用天然硫化物矿物的吸附和沉淀机理治理电镀厂等重金属工业废水等治污措施,都体现了利用天然矿物发挥自净化作用的特色,展示了矿物在环境演变和环境治理过程中的重要作用^[58,72,73]。

2 结 论

综上所述,天然矿物作为环境演变信息载体的研究刚开始不久。天然矿物所具有的良好环境属性日

益受到国内外的重视,环境演变的矿物标识研究有了新的进展。对天然矿物的微形貌、微结构、化学组成、物理性质、成因及其共生组合等方面的标型特征与环境关系的研究在冰川、土壤、河流、湖泊、海洋和大气等环境演变规律的探索中发挥了重要的作用。相信随着人们对全球环境质量的不断重视和研究手段的改进、研究水平的提高,利用矿物所能揭示的环境演变信息的数量与质量必将逐渐增多和增强,环境演变的矿物标识体系会逐步得到完善,矿物作为环境演变的信息载体的应用前景将更加广阔。

参考文献:

- [1] 鲁安怀. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的作用[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(4): 292~ 300.
- [2] 鲁安怀. 矿物学研究从资源属性到环境属性的发展[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 245~ 251.
- [3] Pavich M J. Regolith residence time and the concept of surface age of the Piedmont "peneplain"[J]. Geomorphol., 1989, 2, 181~ 196.
- [4] 曾荣树, 雷加锦. 环境科学新的生长点——环境矿物学[A]. 孙 枢 主编. 地质环境系统研究[C]. 北京: 海洋出版社, 1998, 39~ 46.
- [5] 王立本, 黄蕴慧, 鲁安怀. 国际环境矿物学研究新进展——第17届国际矿物学大会环境矿物学研究综述[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(4): 377~ 383.
- [6] O'Brien C, Plant J A, Simpson P R, *et al.* The geochemistry, metasomatism and petrogenesis of the granites of the English Lake District[J]. J. Geol. Soc. (London), 1985, 142, 1139~ 1157.
- [7] Lee M R, Waldron K A, Parsons I. Exsolution and alteration Microtextures in alkali feldspar phenocrysts from the Shap granite[J]. Min. Mag., 1995, 59, 63~ 78.
- [8] Lee M R, Parsons I. Microtextural controls on weathering of perthitic alkali feldspars[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59, 4465~ 4488.
- [9] Lee M R, Hodson M E, Parsons I. The role of intragranular microtextures and microstructures in chemical and mechanical weathering: direct comparisons of experimentally and naturally weathered feldspars[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62, 2771~ 2788.
- [10] Lee M R, Parsons I. Biomechanical and biochemical weathering of lichen-encrusted granite: textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers[J]. Chem. Geol., 1999, 161, 385~ 397.
- [11] 马毅杰, 罗家贤, 蒋梅茵, 等. 我国南方铁铝土矿物组成及其风化和演变[J]. 沉积学报, 1999, 17(增刊): 681~ 686.
- [12] David H K, John C D. Atlas of quartz sand surfaces textures[M]. Cambridge at the University Press. 1973.
- [13] 吴 正, 廖秉良, 金志敏, 等. 南海北部外陆架残留砂表面结构及其环境意义[J]. 科学通报, 1992, 37(20): 1887~ 1889.
- [14] Li S Q, Liu J, Wang S J, *et al.* Sedimentary sequence and environmental evolution in the eastern south Yellow Sea during the last deglaciation and the Holocene[J]. Chin. Sci. Bull., 1998, 43(9): 757~ 761.
- [15] 张光威, 杨子庚, 王圣洁. 南黄海第四纪时期石英砂表面结构特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(3): 37~ 47.
- [16] 姜学钧, 李绍全, 申顺喜. 南黄海 YSDP102 孔冰消期以来的重矿物组合特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 27~ 31.
- [17] Jacobs M B, Hays J D. Paleoclimatic events indicated by mineralogical changes in deep-sea sediments[J]. Jour. Sed. Petrology, 1972, 42, 889~ 898.
- [18] 王诗俯. 河北阳原盆地粘土矿物特征与古气候演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(4): 77~ 90.
- [19] 何良彪. 海洋沉积岩芯中粘土矿物变化与古气候变迁的关系[J]. 科学通报, 1982, 27(13), 809~ 812.
- [20] 颜秋兰. 松嫩平原莫莫格孔粘粒矿物组合及其古地理意义[J]. 地理科学, 1988, 8(3): 264~ 271.
- [21] Biscaye B E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1965, 76, 803~ 832.
- [22] Griffi J J. The distribution of clay minerals in the world ocean[J]. Deep-Sea Res., 1968, 15, 433~ 459.

- [23] Rateer M A. The distribution of clay minerals in the ocean[J]. *Sedimentology*, 1969, 13, 21~ 43.
- [24] 何良彪, 辛春英. 西赤道太平洋沉积物中的粘土矿物[J]. *科学通报*, 1986, 31(6), 449~ 452.
- [25] Singer A. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments- a review[J]. *Earth- Science Res.*, 1984, 21, 251~ 293.
- [26] 杨献忠. 伊利石的结晶度及其地质意义综述[J]. *沉积学报*, 1993, 11(4): 92~ 98.
- [27] 师育新, 戴雪荣, 李节通. 末次间冰期兰州黄土记录中的粘土矿物及其环境意义探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(1): 87~ 94.
- [28] 张乃娟, 万国江, 马玉光. 威宁草海沉积物中的粘土矿物及其环境记录[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 206~ 211.
- [29] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土矿物组合、化学特征及其与物源气候环境的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4): 336~ 346.
- [30] 刘东升. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 208~ 247.
- [31] Liu X M, Shaw J, Liu T S, *et al.* Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance[J]. *Geophys. J. Int.*, 1992, 108: 301~ 308.
- [32] Xiao J L, Poster S C, An Z S, *et al.* Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the loess plateau of central China during the last 130 000 yr[J]. *Quat. Res.*, 1995, 43: 22~ 29.
- [33] 郭正堂, 丁仲礼, 刘东生. 黄土中的沉积-成壤事件与第四纪气候旋回[J]. *科学通报*, 1996, 41(1): 56~ 59.
- [34] He X B, Tang K L, Lei X Y. Heavy mineral record of the Holocene environment on the Loess Plateau in China and its pedogenetic significance[J]. *Catena (Giessen)*, 1997, 29(3~ 4): 323~ 332.
- [35] Orgeira M J, Walther A M, Vasquez C A, *et al.* Mineral magnetic record of paleoclimate variation in loess and paleosol from the Buenos Aires Formation (Buenos Aires, Argentina)[J]. *J. South Am. Earth Sci.*, 1998, 11(6): 561~ 570.
- [36] 朱日祥, 石采东, Suchy V, 等. 捷克黄土的磁学性质及古气候意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(2): 146~ 154.
- [37] Zheng H H. Paleoclimate events recorded in clay minerals in Loess of China[A]. *Quaternary Geology and Environment of China[C]*. China Ocean Press, 1982. 59~ 66.
- [38] Kukla G, Heller F, Ming L X, *et al.* Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility[J]. *Geol.*, 1988, 16, 811~ 814.
- [39] Verosub K L, Fine P, Singer M J, *et al.* Pedogenesis and paleoclimate: interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess soil sequence[J]. *Geol.*, 1993, 21, 1 011~ 1 014.
- [40] Heller F, Evans M E. Loess magnetism[J]. *Rev. Geophys.*, 1995, 33, 211~ 240.
- [41] 韩家懋, 姜文英, 褚 骏. 黄土和古土壤中磁性矿物的粒度分布[J]. *第四纪研究*, 1997, (3): 281~ 287.
- [42] Proust D, Eymery J, Beaufort D. Supergene vermiculitization of a magnesian chlorite: iron and magnesium removal processes[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1986, 34(5): 572~ 580.
- [43] 季峻峰, 陈 骏, 刘连文, 等. 洛川黄土中绿泥石的化学风化与磁化率增强[J]. *自然科学进展*, 1999, 9(7): 619~ 623.
- [44] An Z S, Liu T S, Lu Y C, *et al.* The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China[J]. *Quaternary Int.* 7, 1991, 91~ 95.
- [45] Heller F, Shen C D, Beer J, *et al.* Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess and palaeoclimatic implications[J]. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 1993, 114, 385~ 390.
- [46] Maher B A, Thompson R. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variation in the Chinese loess and paleosols[J]. *Quaternary Res.*, 1995, 44, 383~ 391.
- [47] 颜 文, 陈 忠, 王有强, 等. 南海 NS93- 5 柱样的矿物学特征及矿物沉积序列[J]. *矿物学报*, 2000, 20(2): 143~ 149.
- [48] 苏广庆, 王有强, 王天行, 等. 南沙群岛及其邻近海区的自生矿物[A]. 南沙群岛及其邻近海区第四纪沉积学[C]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1993, 89~ 106.
- [49] Pinsak A P, Murray H H. Regional clay mineral patterns in the Gulf of Mexico. *Proc. 7th Natl. Conf*[J]. *Clay and Clay Minerals*, 1960, 162~ 178.
- [50] Griffin J J, Windom H, Goldberg E D. The distribution of clay minerals in the world oceans[J]. *Deep-sea Res.*, 1968,

- 15, 433~ 459.
- [51] Gibbs R J. Clay mineral segregation in the marine environment[J]. *J Sediment. Petrol.*, 1977, 47, 237~ 243.
- [52] Johnson L R. Mineralogical dispersal patterns of North Atlantic deep-sea sediments with particular reference to eolian dusts [J]. *Mar. Geol.* 1979, 29, 335~ 345.
- [53] Robert C, Kennett J. Paleocene and Eocene kaolinite distribution in the South Atlantic and Southern Ocean: Antarctic climatic and paleoceanographic implications[J]. *Mar. Geol.* 1992, 103, 99~ 110.
- [54] Gibson T G, Bybell L M, Owens J P. Latest Paleocene lithologic and biotic events in neritic deposits of southwestern New Jersey[J]. *Paleoceanography*, 1993, 8(4): 495~ 514.
- [55] Murphy S F, Brantley S L, Blum A E, *et al.* Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(2): 227~ 243.
- [56] Schroeder P A, Melear N D, West L T, *et al.* Meta-gabbro weathering in the Georgia Piedmont, USA: implications for global silicate weathering rates[J]. *Chem. Geol.*, 2000, 163, 235~ 245.
- [57] 鲁安怀, 卢晓英, 任子平, 等. 天然铁锰氧化物及氢氧化物环境矿物学研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 473~ 483.
- [58] Preda M, Cox M E. Sediment-water interaction, acidity and other water quality parameters in a subtropical setting, Pimpama River, southeast Queensland. *Environ. Geol.*, 2000, 39(3~ 4): 319~ 329.
- [59] Tegen I, Laurs A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils[J]. *Nature*, 1996, 380, 419~ 422.
- [60] 董发勤, 李国武, 霍冀川, 等. 纤维矿物粉尘在 Gambler 溶液中的溶解行为[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(3): 199~ 205.
- [61] 董发勤, 万朴, 彭同江, 等. 纤维矿物粉尘环境矿物学与环境医学研究的新进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(3): 193~ 198.
- [62] Kutzbach J E, Street-Perrott F A. Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18 to 0 kyrBP [J]. *Nature*, 1985, 317, 130~ 134.
- [63] COHMAP Members. Climatic changes of the last 18, 000 years: Observations and model simulations[J]. *Science*, 1988, 214, 1043~ 1052.
- [64] 吉磊. 中国过去 2000 年湖泊沉积记录的高分辨率研究现状与问题[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(2): 169~ 175.
- [65] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. *科学通报*, 1999, 44(6): 579~ 587.
- [66] 胡守云, 王苏民, Appel E, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J]. *中国科学*, 1998, 28(4): 334~ 339.
- [67] 钱亦兵. 新疆第四纪沉积矿物特征及其环境意义[A]. *中国第四纪南北对比与全球变化——第六届全国第四纪学术讨论会论文汇编*[C], 1993, 40~ 41.
- [68] 周厚云, 郭国章, 余素华. 从 SX97 孔矿物特征看气候环境变化的河流响应[J]. *矿物学报*, 2000, 20(3): 257~ 263.
- [69] 张文正, 黄月明, 宋国初, 等. 陕甘宁盆地上三叠统有机-生物成因次生淡水方解石的发现及地质意义[J]. *科学通报*, 1996, 41(18): 1689~ 1691.
- [70] Konhauser K O, Urrutia M M. Bacterial clay authigenesis: a common biogeochemical process[J]. *Chem. Geol.* 1999, 161, 399~ 413.
- [71] 贾建业, 潘兆麟, 谢先德, 等. 用硫化物处理电镀厂废水技术研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1999, 18(4): 316~ 322.
- [72] Lin Z, Puls R W. Adsorption, desorption and oxidation of arsenic affected by clay minerals and aging process[J]. *Environ. Geol.*, 2000, 39(7): 753~ 759.
- [73] Cäbler H E, Schneider J. Assessment of heavy metal contamination of floodplain soils due to mining and mineral processing in the Harz Mountains[J], Germany. *Environ. Geol.*, 2000, 39(7): 774~ 782.

New Progress in the Study of Mineral Indicators for Environment Evolution

JIA Jian_yie^{1,2} and TANG Yan_jie²

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Natural minerals are products of different sorts of evolution in nature. They possess abundant information of environmental changes in different times and spaces during the course of formation and transformation, and hence serve as information carriers of environmental changes. The research of environmental evolutionary laws indicated by natural minerals in loess layers, rivers, lakes, sea and atmosphere can recognize the relationship between environmental changes and micromorphology, microstructure, chemical composition, chemical property, geophysical property, genesis and paragenetic associations of minerals. Minerals can thus be used as information carriers.

Key words: mineral indicators; environment evolution; information carriers; new progress

更正

由于本刊工作人员疏忽, 将 2001 年第 3 期 324 页图 4 误排为 REE 配分曲线, 与图 2 重复, 特向作者及广大读者致歉, 并更正如下:

