

有机质在 MVT 铅锌矿床形成中的作用

李发源^{1,2}, 顾雪祥², 付绍洪^{1,2}, 章明^{1,2}

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: MVT 铅锌矿床与有机质密切相关。本文以有机质生成世代为序, 讨论了有机质低、中、高成熟阶段的产物在 MVT 铅锌矿床成矿过程中的作用。腐殖酸在矿床形成的早期阶段配合、吸附 Pb、Zn 等金属离子, 起到促进成矿源层形成的作用。油田卤水可能成为铅锌多金属元素迁移的主要载体和成矿流体的重要组成部分, 甚至就是形成密西西比河谷型矿床的一种很重要的潜在成矿流体。甲烷在矿床形成晚期充当还原剂。

关键词: 有机质; MVT 铅锌矿床; 油田卤水; 腐殖酸; 甲烷

中图分类号: P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2002)04-0272-05

有机质是沉积改造和沉积浅变质铅锌矿床中的重要组分。有机质及其演化产物在层控铅锌矿床形成过程中起了积极的作用; 主要表现在对成矿元素沉淀过程的控制作用, 如还原、吸附及水溶有机质成分和石油液体对金属元素的迁移和富集作用^[1, 2]。

早在 20 世纪 30 年代, 人们就认识到密西西比河谷型铅锌矿床与有机质有密切联系, Etimanan^[3]、Marikos^[4] 和 Gize^[5] 都曾作过这方面的研究, 刘文均^[6] 发现了花垣铅锌矿床中的沥青以及包裹体内的烃、甲烷等有机质。以前由于没有建立硫化物作为还原剂所必须的物质平衡模式, 也没有明确有机质还原硫化物的温度范围^[7], 所以, 对两者间的联系只是停留在实验阶段。但是随着层控矿床理论的日臻成熟以及研究的深入, 对生物成矿与 MVT 矿床的联系也有了更深的认识^[6, 8-18]。

Aderson^[7, 19] 详细讨论过有机质参与成矿的五种可能方式: 1) 有机化合物(如 CH₄) 在油田卤水中与金属和硫酸盐一起搬运, 由于在搬运过程中的反应, 这种方式难于富集成矿; 2) 有机化合物与金属在卤水中一起搬运, 尔后与石膏或硬石膏反应, 产生方解石和 H₂S, 导致金属硫化物的形成; 3) 矿床与古油藏毗邻, 由于石油的热降解作用, 分解出 CH₄、H₂S 与含矿溶液中硫酸盐及金属反应成矿; 4) 石油二次运

移, 留下的沥青或焦沥青的残余物充当含矿热水硫酸盐的还原剂; 5) 含矿热液带来的热能造成矿化围岩中有机质的热成熟(降解)作用产生的甲烷, 导致硫酸盐的还原和金属硫化物的沉淀。

有机质生成世代是指在沉积有机质演化的不同时期所生成的、具不同表现形式的有机质, 其顺序是: 腐殖酸→低成熟干酪根→有机羧酸→石油→高成熟干酪根→沥青和甲烷→石墨^[20]。不同阶段的产物与 Pb、Zn 有不同的结合方式和作用结果, 下面就以此为序分别讨论各阶段有机质在 MVT 矿床形成中的作用。

1 腐殖酸在矿床形成中的作用

腐殖酸是由不同分子量的有机化合物缩合而成的大分子集合体, 具有很大的比表面积和明显的胶体化学性质, 它在天然水体及沉积物中占有有机质总量的 60%~80%; 它的生物化学稳定性很高, 含有丰富的活泼的反应官能团, 对金属离子有很强的结合能力, 结合方式包括表面吸附、阳离子交换及络合和螯合作用^[21-24], 主要是以 Pb、Zn 的络合物形式存在。腐殖酸与 Pb、Zn 的络合和螯合作用可增大其溶解度, 抑制沉淀反应, 改变化合价态及影响氧化还原反应等^[25, 26]。这在很大程度上影响了 Pb、Zn 在地

收稿日期: 2002-06-27 收到, 08-26 改回

基金项目: 国家自然科学基金(49872038)和中国科学院“百人计划”项目资助

第一作者简介: 李发源(1978—), 男, 硕士研究生, 矿床学专业。

质体中的溶解、活化、迁移、再分配、再循环和沉积富集的地球化学行为。

卢家烂详细研究了腐殖酸与铅、锌的关系(表1),指出:1)腐殖酸对铅、锌有很强的结合力,如 pH = 5 左右,离子强度 0.02 mol CaCl₂ 和 1% 胡啡酸混合溶液中,实验测定有 40% ~ 94% Pb²⁺ (Zn²⁺) 与胡啡酸结合。因此,在表生地球化学循环中,腐殖酸-铅(锌)络合物是十分重要的存在和迁移形式;2)腐殖酸具有络合物和胶体化学的双重特性,实验证明当溶液 pH = 8 且在络合反应络点附近时,在与胡啡酸结合的总铅量中,以络合物形式结合的 Pb²⁺ 量

(67%) 大于以吸附和阳离子交换形式结合的 Pb²⁺ 量(32%);而在胡啡酸与 Zn²⁺ 结合的总金属量中,吸附和阳离子交换形式结合的 Zn²⁺ 量(65%) 远多于以络合物和螯合物形式结合的 Zn²⁺ 量(34%)。因此,腐殖酸与多金属结合的方式和结合力强度将影响到沉积成岩和埋藏变质阶段多金属元素的循环和再分配过程;3)腐殖酸结合铅、锌的能力受溶液 pH 值和有机质成熟度的影响。溶液 pH 值升高有利于铅锌在腐殖酸中的溶解,姚志健等(1989)实验证实有机质存在的弱酸性条件下,方铅矿、闪锌矿的溶解度比在仅有 NaCl 存在的溶液中。

表 1 腐殖酸结合铅、锌的方式及其相应的数量^[6]

Table 1 Combination mode and quantity of humic acids with Pb-Zn^[6]

编号	腐殖酸类型和数量/mg	加入的金属总量/mg	未被腐殖酸结合的金属量/mg	与腐殖酸结合的金属量/mg	由 NH ₄ Cl 解脱出来的金属量/mg	由 EDTA 解脱出来的金属量/mg	残留在腐殖酸中未能解脱出来的金属量/mg
7-A-1	F. A. 50	Pb: 13.505	0.744	12.761	4.156 32.5%	8.594 67.4% ^①	0.011 67.4% ^①
7-D-1	F. A. 50	Zn: 8.625	1.275	7.350	3.375 45.9%	3.733 54.1%	0.237 54.1%
7-F-1	F. A. 50	Pb: 13.420	2.688	10.732	5.156 48.0%	5.563 51.9%	0.013 51.9%
7-G-1	F. A. 50	Zn: 6.086	3.913	2.173	1.425 65.6%	0.438 34.4%	0.310 34.4%

注:①在与腐殖酸结合的金属总量中所占的百分数

可见,由于腐殖酸特殊的物理化学性质,它在矿床形成早期阶段主要起配合、吸附 Pb、Zn 等金属离子的作用,从而富集形成矿源层。

2 油田卤水在成矿中的作用

有机质热演化各阶段的产物对成矿流体的物理化学性质和铅锌多金属元素在成矿流体中存在形式的影响十分重要;作为有机质中等成熟阶段产物的石油亦如此。不同地区和不同时代地层的原油中,金属元素含量差别很大,这可能与其来源有关,可能包括:生物有机质自身继承来的,原油—卤水相互作用以及岩(矿)—卤水—原油反应^[27, 28]。

在油/卤共存条件下,Pb、Zn 在两相中的分配系数与溶液成分、pH 值及阳离子本身性质密切相关(表 2、3)。一般认为,在中—弱碱性条件下,原油对多金属元素具有更强烈的富集趋向。在温度和压力共同作用的压力机条件下,人工双源岩的生烃和排烃模拟实验结果^[8]表明,在 350 °C 和 80 MPa 条件下(R₀ = 0.900% ~ 0.920%),残留源岩的氯仿抽提物、已发生运移的石油,以及有机质热演化产生的水

溶液中均含有高浓度的 Zn、Pb,其中残留源岩氯仿抽提物(即未被运移的石油)含 Zn 52 ~ 769 μg/g,已运移原油中 Zn 达 70 ~ 587 μg/g, Pb 达 70.6 μg/g,排出的水溶液中 Zn 达 19 ~ 22 μg/g, Pb 178 μg/g。可见,石油的生成和初次运移对分散的多金属元素具有强烈的活化和富集能力,可以认为,在一定成熟阶段液体石油和油田卤水都可能成为铅锌多金属元素迁移的主要载体和成矿流体的重要组成部分。

比较油田卤水(表 4)和 MVT 矿床闪锌矿中流体包裹体的成分,可以看出二者之间极其相似。然而也有不同之处,例如 Na/K 值。因此, Sawkins 认为油田卤水本身不可能形成 MVT 矿床,虽然他也意识到 Na/K 值的差异可能是卤水迁移过程中的化学演化所致。事实上,对 MVT 矿床,从蓄水层到成矿地点溶液的 Zn/Pb 值的变化及其矿物共生组合性质都证明,成矿流体向成矿地迁移过程中发生了明显的变化,这种变化使人们在判别油田卤水是否就是潜在的成矿流体问题时产生了错觉。

油田卤水能否成为成矿流体的关键是能否搬运金属元素和硫。McLimans 等的研究表明,在一些

表 2 Pb、Zn 在共存的原油及卤水相中的分配特征^[8]Table 2 Distribution characteristics of Pb, Zn in coexistence phase of crude oil and brine^[8]

编号	原油 /mg	实验前水相中的金属量/ μg			实验后水相中的金属量/ μg			分配系数 $M(\text{oil}/\text{aq})$	
		Pb	Zn	pH	Pb	Zn	Pb	Zn	
94-E-15	200	200	200	2.00	0	9.0	0	0.047	
94-E-16	200	500	500	2.00	0	20	0	0.042	
94-E-17	200	200	200	5.00	56	63	0.389	0.460	
94-E-18	200	500	500	5.00	135	148	0.370	0.420	
94-E-19	200	400	400	5.00	10	10	0.025	0.025	
94-E-20	200	400	400	5.00	6	40	0.015	0.111	

表 3 矿物在油田卤水和 NaCl 溶液中的溶解能力^[8]Table 3 Dissolution capacity of minerals in oilfield brine and NaCl solutions^[8]

编号	矿物(过量)	溶液相				溶解度($\times 10^{-6}$)	
		成分	盐度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	体积/mL	Zn	Pb
94-W-1	方铅矿、闪锌矿	油田卤水	219	7.31	10	81.3	67.5
94-W-2	方铅矿、闪锌矿	油田卤水	219	7.31	10	81.3	62.5
94-W-3	方铅矿、闪锌矿	NaCl、CaCl ₂	219	7.31	10	53.1	45.0
94-W-4	方铅矿、闪锌矿	NaCl、CaCl ₂	219	7.31	10	53.8	45.0
94-W-5	方铅矿、石膏、闪锌矿	油田卤水	219	7.31	10	60.9	53.7
94-W-6	方铅矿、石膏、闪锌矿	NaCl、CaCl ₂	219	7.31	10	35.4	202
94-W-7	方铅矿、闪锌矿	NaAC-HAC	0.1mol/L	7.31	10	1.62	12.5

表 4 流体包裹体和含有重金属的油田卤水成分比较^[31]Table 4 Composition comparison of fluid inclusions with oilfield brine including heavy metal^[31]

项目	流体包裹体	油田卤水
$t/^\circ\text{C}$	100 ~ 150	130 ~ 150
$p/10^5\text{Pa}$	< 500	388 ~ 843
$m_{\text{Cl}}/10^{-6}$	59 000 ~ 120 000	71 520 ~ 207 400
$m_{\text{Na}}/10^{-6}$	27 000 ~ 53 400	29 000 ~ 79 100
$m_{\text{Ca}}/10^{-6}$	17 000 ~ 20 400	4 140 ~ 74 800
$m_{\text{K}}/10^{-6}$	2 500	243 ~ 7 080
Na/K	21 ~ 36	40 ~ 370
Na/Ca	2.7	1.4 ~ 17
Zn/Pb	未测	3 ~ 25

MVT 型矿床中成矿流体同时搬运了金属和还原硫,搬运形式尚不清楚,因为缺少 pH 值资料。在 100℃ 的富氯溶液中,金属和还原硫搬运条件是 $\text{pH} < 7$ 。油田水在成矿温度下是酸性的,因此有搬运金属元素和还原硫的能力。此外,油田卤水中的有机羧酸也可使 Pb 发生有成矿意义的迁移^[29]。有机羧酸是油田卤水的主要有机溶解组分,它控制了 120 ~ 180℃ 的成矿流体的 pH 值,并使体系处于还原状态 ($E_h < -200\text{mV}$)。羧酸还可以溶蚀矿物,改良成矿流体的水动力学条件。随温度升高 ($> 120^\circ\text{C}$) 羧酸分解成 CH_4 和 CO_2 ^[30];其分解温度正是大多数 MVT 矿床的成矿温度 (50 ~ 200℃)。

综上所述,油田卤水由于其高盐度和低 pH 值特征,使其本身具有同时溶解较高含量金属成矿元素和还原硫的能力,在从蓄水层向成矿地点的长距离运移过程中,能不断萃取围岩中的成矿金属组分,而转化为成矿流体。因此,它是形成 MVT 型矿床的一种很重要的潜在的成矿流体。

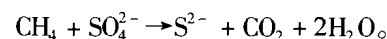
3 甲烷在有机成矿中的作用

甲烷是高成熟干酪根进一步演化的产物,在矿床形成晚期主要起还原硫酸盐的作用。

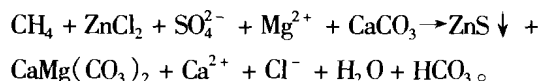
低温低熟环境的细菌降解也产生少量甲烷,但对中低温热液矿床可能没有成因意义,相反可能会破坏部分金属与腐

殖酸的络合物,不利于元素的富集。在干酪根高成熟阶段的热降解时生成大量甲烷^[32]。甲烷是天然气的主要成分之一,天然气在石油中溶解度极大,在高压油层中 1 cm^3 原油可溶解数百甚至上千立方厘米以上的天然气;而天然气在水中的溶解度更大,而且随温度 ($> 80^\circ\text{C}$) 升高与压力的增大而加大;当流体中溶有 CO_2 时还有明显的增溶作用^[32]。甲烷气可以与热液流体或石油共同迁移,因此甲烷气成为成矿流体,尤其是中低温成矿流体中的重要有机组分是完全可能的。

据 Machel(1987) 研究,有机质还原硫酸盐有两期,早期作用发生在 $t < 75 \sim 95^\circ\text{C}$,而且必须有还原细菌参与,这种还原作用产生的 H_2S 不大可能保持到热液成矿期;晚期还原作用发生在 $t > 100 \sim 140^\circ\text{C}$,称热化学还原作用,这种作用随温度升高而加剧。在有合适的催化剂(如 S° 、金属离子、粘土或二氧化硅凝胶)存在条件下反应速度明显加快。有机质先演化成 CH_4 ,再与 SO_4^{2-} 作用生成还原硫:



Barton(1967) 指出成矿温度较高时铅锌等多呈金属氧化物、络合物和亚稳定状态的硫酸盐的含矿热液,当它们遇到甲烷或伴生的有机物时便发生铅锌硫化物沉淀:



Anderson^[7]对密苏里东南铅锌矿带的维布尔鲁姆矿区的研究也证实了甲烷的作用。该区矿床的形成是由于含矿热液带来的热能造成矿化围岩中褐色鲕粒灰岩及叠层藻灰岩中有机质的热降解产生甲烷,导致硫酸盐还原和金属硫化物沉淀而形成的。

4 结 语

本文着重讨论了热液流体中的有机质在成矿中的作用,而对沥青、干酪根等则未提及,但它们在矿床形成过程中的作用也是不可忽视的。许多学者都曾将沥青作为有机质参与成矿的标志,干酪根作为有机质演化的中间产物也是不可或缺的。

此外,也不可忽视细菌和藻类的光合作用和呼吸作用,它们能调节环境中的 CO_2 和 O_2 的浓度,影响环境的 pH、Eh 及盐度,从而对铅、锌元素的迁移、转化和富集产生一定的影响。

参考文献:

- [1] 卢家烂. 金属成矿理论的新认识[A]. 全国第四届矿物岩石地球化学学术讨论会论文摘要汇编[C]. 北京:地质出版社, 1991. 76.
- [2] Mammig D A C, Gize P C. The role of organic matter in ore transport processes[A]. Organic Geochemistry[M]. New York: Plenum Press, 1993. 547-563.
- [3] Etimian H, Hoffman C F. Biomarkers in fluid inclusions: A new tool in constraining source regimes and its implications for the genesis of MVT deposit[J]. Geology, 1989, 17(1):19-22.
- [4] Marikos M A, Laudon R C, Leventhal J S. Solid insoluble bitumen in the Magmont West orebody, southeast Missouri[J]. Econ. Geol., 1986, 81:1983-1988.
- [5] Gize A, Barnes H L. The organic geochemistry of two MVT Pb-Zn deposits[J]. Econ. Geol., 1987, 82:457-470.
- [6] 叶连俊, 卢家烂, 傅家谟, 等. 生物成矿作用研究[M]. 北京:海洋出版社, 1993. 1-5, 127-139, 187-197.
- [7] Anderson G M. Organic maturation and Ore precipitation in Southeast Missouri[J]. Econ. Geol., 1991, 86(5):909-926.
- [8] 叶连俊, 卢家烂, 刘文均, 等. 生物有机质成矿作用[M]. 北京:海洋出版社, 1996. 1-22, 154-167, 207-218.
- [9] 叶连俊, 卢家烂, 傅家谟, 等. 生物有机质成矿作用和成矿背景[M]. 北京:海洋出版社, 1998. 1-41, 417-428.
- [10] Disnar J R, et al. Organic matter in ore genesis: progress and perspective[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1-3):577-599.
- [11] 夏林. 有机质与沉积铅锌矿床成因关系的几个基本问题[J]. 云南地质, 2000, 19(2):179-183.
- [12] 刘文均, 郑荣才, 李元林, 等. 花垣铅锌矿床中沥青的初步研究——MVT 铅锌矿床有机地球化学研究(I)[J]. 沉积学报, 1999, 17(1):19-23.
- [13] 刘文均, 郑荣才. 花垣铅锌矿床包裹体气相组份研究——MVT 矿床有机成矿作用研究(II)[J]. 沉积学报, 1999, 17(4):608-614.
- [14] 刘文均, 卢家烂. 湘西下寒武统有机地化特征——MVT 铅锌矿床有机成矿作用研究(III)[J]. 沉积学报, 2000, 18(2):290-296.
- [15] 卢家烂, 傅家谟, 刘金钟. 腐殖酸与铅锌相互作用的实验地球化学[J]. 矿床地质, 1995, 14(4):362-368.
- [16] 卢家烂, 庄汉平, 刘文均. 有机质在层控铅锌矿床中作用的实验研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2):226-231.
- [17] 庄汉平, 卢家烂, 傅家谟, 等. 原油作为金运移的载体:可能的岩石和地球化学证据[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(6):552-558.
- [18] 胡凯. 金矿床中的有机质及其有机成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(2):71-76.
- [19] Anderson G M. Mississippi Valley Type ore deposit[R]. Ore Deposit Workshop, 1979. 1-13.
- [20] 庄汉平, 卢家烂. 与有机质有成因联系的金属矿床[J]. 地质地球化学, 1996, (4):6-11.
- [21] Jackson K S, Jonasson I R, Skippen G B. The nature of metals-sediments-water interactions in fresh water bodies, with emphasis on the role of organic[J]. Earth-Science Reviews, 1987, 14:97-146.
- [22] 王恩德, 关广岳. 金矿床的有机地球化学研究——腐殖酸对金银迁移沉淀的作用[J]. 地球化学, 1993, 1:55-60.
- [23] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第二卷)[M]. 北京:科学出版社, 1984. 13-69.
- [24] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第三卷)[M]. 北京:科学出版社, 1988. 255-311.
- [25] 卢家烂, 袁自强. 有机-Zn 络合物及其稳定性实验研究[J]. 地球化学, 1986, 1:67-77.
- [26] Gatellier J P, Disnar J R. Au(III)被沉积有机质还原为 Au(0)的动力学和机理[J]. 邓长平, 译. 地质地球化学, 1993, (3):38-44.
- [27] 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1997. 129-134, 314-338.
- [28] 庄汉平, 卢家烂, 温汉捷, 等. 热液成矿流体中的有机物质[J]. 地质地球化学, 1997(1):85-91.
- [29] Hennem R J-C, Crerar D A, Schwartz J. Organic complexes in hydrothermal system[J]. Econ. Geol., 1988, 83:742-764.
- [30] Surlam R C, Crossey L J, Hagen F S, Heasler H P. Organic-inorganic interactions and andstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73:1-23.
- [31] Sverjensky D A. Oil field brines as ore-forming solution[J]. Econ. Geol., 1984, 79:23-37.
- [32] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1989. 1-278.

The Role of Organic Matter in the Formation of MVT Pb-Zn Deposit

LI Fa-yuan^{1,2}, GU Xue-xiang², FU Shao-hong^{1,2}, ZHANG Ming^{1,2}

(1. Chengdu University of Technology, Sichuan, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guizhou, Guiyang 550002, China)

Abstract: There is a close relationship between MVT Pb-Zn deposits and organic matter. According to the generation sequence of organic matter, the function of organic matter in the formation of MVT Pb-Zn deposit during low, moderate and high mature stage is summarized. Humic acids play an important role in the formation of primary ore source through absorbing and combining with Pb^{2+} , Zn^{2+} . Oilfield brine may be a predominant carrier of metal elements and important constituents of ore-forming fluids. At some cases, oilfield brine itself might be the important potential ore-forming fluids. Methane may act as a reducer in the last stage of mineralization.

Key words: organic matter; MVT Pb-Zn deposit; humic acid; oilfield brine; methane

更正

我刊 2002 年第 3 期中存在以下错误:

(1)211 页和 212 页中表 1、表 3 数据更正,以下列表 1、表 3 为准。

表 1 钾长石矿粉 XRD 的物相各成分与 JCPDS 标准卡的对比

Table 1 The comparison of particle components of K-feldspar powder by XRD with JCPDS

实验数据(原矿)			JCPDS 卡片数据							
2θ(°)	d/nm	I/I ₁	KAlSi ₃ O ₈ (19-932)		KAl ₂ (Si ₃ AlO ₁₀)(OH) ₂ (31-968)		SiO ₂ (33-1161)		CaCO ₃ (5-0568)	
			d/nm	I/I ₁	d/nm	I/I ₁	d/nm	I/I ₁	d/nm	I/I ₁
8.8	1.004	10			1.010	100				
17.72	0.5001	5			0.503	80				
20.86	0.4254	33					0.4257	22		
23.46	0.3788	30	0.380	20						
25.62	0.3474	25	0.348	16						
26.6	0.3348	100					0.3342	100		
27.04	0.3294	26	0.329	50						
27.48	0.3243	40	0.324	100						
29.76	0.2999	26	0.2974	14						
34.34	0.2609	10			0.260	100				
39.44	0.2282	7							0.2285	18
41.6	0.2169	11	2.16	30					0.1913	17
47.72	0.1915	4								
50.1	0.1819	11					0.18179	14		

表 3 水浸渣 XRD 的物相各成分与 JCPDS 标准卡的对比

Table 3 The comparison of particle components of mineral residues by XRD with JCPDS

实验数据(浸取后矿液)			JCPDS 卡片数据			
2θ(°)	d/nm	I/I ₁	CaAlSi ₃ O ₈ (12-301)		SiO ₂ (11-3361)	
			d/nm	I/I ₁	d/nm	I/I ₁
20.80	0.4267	25			0.426	20
26.58	0.3350	100	0.337	25		
27.52	0.3238	36	0.321	35		
27.94	0.3190	32	0.320	100		
26.58	0.3350	100			0.334	100
36.48	0.2461	9			0.246	10
45.78	0.1980	7			0.198	40
50.01	0.1819	13			0.182	10

(2)211 页中“2.3 实验流程及测试方法”一节中的“实验流程图”中,“铝硅渣可用于制造建筑材料”的箭头应在“过滤”之下。

特此更正,并向作者和广大读者致歉。

《矿物岩石地球化学通报》编辑部

2002 年 8 月 30 日