

文章编号: 0254-5357(2012)01-0001-06

国际地球化学研究现状与发展前沿 ——国际地球化学大会 Goldschmidt 2011 印象

罗立强

(国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 对国际地球化学大会 Goldschmidt 2011 的基本情况、5 个大会主题报告和 23 个分会报告作了较详细介绍与评述。这 5 个大会主题报告是: 地幔中的挥发组分对板内岩浆作用的影响, 地球深部挥发组分的循环; 从远古到现代, 利用地球化学信息研究末次冰川消退及其对河流的影响, 外星大气: 一个由热到可居住的世界, 深海中的微生物群落与甲烷氧化作用。23 个分会报告包括: 宇宙化学, 行星形成; 早期地球: 从地核到大气; 地球深部动力学及其演化; 从地幔至地壳: 洋脊与板内岩浆活动; 大陆壳的形成及演化; 循环: 俯冲, 地幔楔与弧火山作用; 地球环境演化; 从纳米到大陆尺度界面与界面过程; 火山与自然灾害地球化学; 地球资源: 能源; 地球资源: 矿; 气候变化; 大气气溶胶的源、汇及影响; 风化、气候、构造与地表过程; 海洋大气: 过去与现在; 人类活动产生的地球化学影响; 生物地球化学: 从微生物到宏观与循环; 分析技术前沿; 计算地球化学前沿; 矿物学与矿物物理学前沿; 水文地球化学与全球水资源可持续发展; 一般主题; 特别议题。文章重点阐述了国际地球化学目前的研究现状、热点领域、未来发展方向三个方面。对生物地球化学的研究现状与发展趋势作了专题评述。

关键词: 地球化学; 生物地球化学; 评述

中图分类号: P59 **文献标识码:** A

A Review of the International Geochemical Conference: Goldschmidt 2011

LUO Li-qiang

(National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: On the basis of Goldschmidt 2011, the advantages of geochemistry research are reviewed in three separate parts. The first parts is a review of five plenary presentations, which includes mainly volatiles in the mantle and deep earth, the last deglaciation and its impact on rivers, exoplanet atmospheres, microbial partnerships and methane-oxidation in deep sea. The second part has 23 themes, which mainly includes cosmochemistry, planet and earth formation, evolution and dynamics of the deep earth, ocean ridge and intraplate volcanism, continental crust formation and evolution, evolution of the earth's environment, interfaces and interfacial processes from the nano- to the continental scale, climate change, atmospheric aerosols, oceans atmosphere, and geochemical impacts of human activity; the main research fields in each theme are described briefly. The subject matter for the third part of the review is biogeochemistry, in which biogeochemical cycling, organic matter turnover, methane cycling in marine and terrestrial environments, microbial catalysis of mineral dissolution and precipitation, bioavailability of trace elements in contaminated environments, biogeochemical processes in redox-dominated environments are the focus for discussion.

Key words: geochemistry; biogeochemistry; review

收稿日期: 2011-12-16; 接受日期: 2011-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(20775018); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA06Z124)

作者简介: 罗立强, 研究员, 从事生物地球化学和 X 射线光谱研究。E-mail: luoliqiang@cags.ac.cn。

国际地球化学大会 Goldschmidt 2011 于 2011 年 8 月 14 ~ 19 日在捷克首都布拉格举行。参会代表总计 3350 人,其中学生约占 30%。共有口头报告 1970 人次,报展 1741 篇。中国科学家与会人数 144 人,中国地质科学院派出了 14 人代表团参加了本次会议。参会人数最多的是美国地球化学家,共有 779 人参会。

本次地球化学大会的主题为“地球、生命与火”(Earth, Life and Fire)^[1]。根据在全球范围内广泛征集的地球化学热点议题,本次地球化学大会共行成了 23 个大会议题。从 8 月 15 ~ 19 日,每天上午第一个为大会报告,之后在不同分会场,就 23 个议题进行口头报告和报展。

1 大会报告

5 个大会报告的题目和主要内容分别如下。

1.1 地幔中的挥发组分对板内岩浆作用的影响

(Volatiles in the Mantle: Impact on Intraplate Magmatism)

原始岩浆中挥发组分 H_2O 、 CO_2 、S、Cl 和 F 在地幔熔融过程和演化中起着主要作用,对于大陆和大洋板块火山作用的影响有可能被大大低估。针对此问题,报告人分析测定了橄榄岩中的熔融包裹体,测定了其中的氧化物、痕量元素及挥发组分 H_2O 、 CO_2 、S、Cl 和 F。研究发现 H_2O 的浓度高于以往报道的浓度值,最高挥发组分的浓度总是在最原始的熔融包裹体中发现,从而表明这些挥发组分源于地幔。痕量元素和挥发组分的变异性,高浓度水的存在以及近期关于 Os 同位素的研究都提供了令人信服的证据,岩浆中的挥发组分和化学不均匀性的产生,其根源是由于古洋壳的再循环而引起的。该项研究表明,挥发性化学组分和痕量元素分析数据的准确获得,Os 同位素分析技术的进步等,无疑为获得地学新认识提供了强有力的技术手段和可靠的分析数据。

这些研究表明,任何革命性的创新,不能离开实验技术和分析数据的有力支撑,加强分析技术的创新性研究,提供更加可靠、更具有挑战性的实验测试技术和分析数据,对于地学和地球化学研究,具有重要意义。

1.2 地球深部挥发组分的循环:从远古到现代

(Deep Earth Volatile Cycles: From Ancient to Modern)

地幔是挥发组分的重要储存地。挥发组分在地

幔和外逸层的流动与交换影响着地球的气候、居住环境和内部动态演化。挥发组分的循环很大程度上是由板块构造过程所控制的。但问题是,目前并不清楚在地球动力学与地球化学演化过程中的这种耦合如何发生,也不清楚彼此是否互为前提条件。起初假定地球的多数挥发组分因为历史的累积和脱气效应而存在于稠密的大气中。地幔水的早期库存量可能会从岩浆中下降,部分大气溶解于岩浆并在无水矿物中浓缩。但含碳组分的低岩浆溶解性则表明早期地幔缺碳。因此,早期的地球应是外逸层低 H/C,地幔高 H/C,这恰恰与经过大洋玄武岩中 H/C 比测定所验证的现代情形相反——地幔有低 H/C,近地表有高 H/C。因此,一些过程将碳保留在了早期的地幔中,或者后期的进化将碳储留在了内部。

这项研究表明,岩浆作用对地球挥发组分循环可能具有重要影响,同时也表明矿物中挥发组分的准确测定对于验证地球化学过程研究中的假设提供了重要的数据基础。

1.3 利用地球化学信息研究末次冰川消退及其对河流的影响 (Geochemical Profiles to Study the Last Deglaciation and Its Impact on Rivers)

末次冰川消退可以用来研究气候变化和冰盖消退。此前的 6000 ~ 21000 年间的气候体系经历了大气、海洋、湖泊、河流等整个生态系统和生物地球化学循环的完全重构。研究陆地和海洋末次冰川消退需要进行准确的定年和比较不同地质特征,亦可以借助测量海岸带环境中的沉积物来获取陆地和海洋来源地的地球化学信息。

近期发展的地球化学分析技术可以提供高分辨的时序性数据,如元素比、有机化合物、同位素等。这些技术和所获取的地球化学信息可以用来研究并解释在末次冰川消退期间海平面上升、古气候变化以及河流复流等的复杂联系。而这正是目前一个处于快速发展的研究领域。我国地球化学家们所正从事的全球气候变化等研究,正应对了这一热点领域,广泛而深入开展基于地球化学分析技术与全球气候变化相关研究,必将推动该研究领域向纵深发展。

1.4 外星大气:一个由热到可居住的世界

(Exoplanet Atmospheres: From Hot to Habitable Worlds)

现代观测技术允许人们探测到广泛的太阳系以外的星体,并测量它们的半径、质量、温度、结构和分子组成等。热气巨星即是一个极端的例子,因为它是一个潜在的“可以居住”的世界,在它的上面,可

能存在人类生存所必须的水。因此,研究、探索其大气特性及其相关性质无疑就吸引了物理和化学家们的广泛兴趣。

1.5 深海中的微生物群落与甲烷氧化作用

(Microbial Partnerships and Methane-Oxidation in the Deep Sea)

目前,微生物地质生物学领域的两个重要挑战在于:如何破译微生物在活体微生物生态系统中的代谢作用以及如何将微生物的新陈代谢和岩石中记录的生命指纹信息建立联系。现代环境研究中,分子生物学方法和稳定同位素分析方法(自然丰度和示踪)的结合,象征着多学科交叉研究的方式已经成为连接特异性微生物及其现场生态生理学的纽带。尤其是微生物研究中基于纳米二次离子质谱仪(SIMS 和 nanoSIMS)的微米尺度的同位素分析技术已经使得人们在研究微生物生态系统的内部活动方面达到了空前水平。将基于稳定同位素分析的SIMS 技术与显微镜和独立培养的环境微生物基因组技术结合,就使得人们可以通过深海微生物和共生微生物群来研究碳和营养物质的利用与代谢,因为这些深海微生物和共生微生物群利用了沉积物和相关自生碳酸盐上的甲烷来获取营养。在利用甲烷循环的古菌和利用硫酸盐还原的细菌方面开展的单细胞特征性研究,揭示了组内和组间稳定碳同位素和氮素利用的显著差异。这些细胞的特定分析为人类带来了更多丰富的同位素变异性,代谢潜能以及单个的微生物细胞与生物群落在甲烷代谢基础上的生态系统的新信息。

总体而言,地幔中的挥发组分的作用与循环、寻找宜居外星体、地球化学与全球气候变化、生物地球化学与深海微生物等研究是大会报告的重点,代表了国际地球化学界取得显著进展的研究领域及当前研究热点。而更为广泛的研究热点,则由大会中的 23 个大会议题所构成。

2 分会报告

分会报告由 23 个议题组成,每一个议题各分为若干专题。这 23 个议题及相关专题数见表 1,从中亦可见相关议题感兴趣的程度。

23 个大会议题涉及的领域十分广泛,简单归纳并介绍如下。

Theme 01 宇宙化学,行星形成
(Cosmochemistry, Planet Formation)
此部分主要包含早期太阳系物质的来源与组

表 1 国际地球化学大会 Goldschmidt 2011 中的 23 个大会议题及相应的报告专题数

议题编号	大会议题	专题数
Theme 01	宇宙化学,行星形成	4
Theme 02	早期地球:从地核到大气	11
Theme 03	地球深部动力学及其演化	6
Theme 04	从地幔至地壳:洋脊与板内岩浆活动	9
Theme 05	大陆壳的形成及演化	8
Theme 06	循环:俯冲,地幔楔与弧火山作用	5
Theme 07	地球环境演化	8
Theme 08	从纳米到大陆尺度界面与界面过程	11
Theme 09	火山与自然灾害地球化学	8
Theme 10	地球资源:能源	10
Theme 11	地球资源:矿	7
Theme 12	气候变化	9
Theme 13	大气气溶胶的源、汇及影响	7
Theme 14	风化、气候、构造与地表过程	7
Theme 15	海洋大气:过去与现在	7
Theme 16	人类活动产生的地球化学影响	7
Theme 17	生物地球化学:从微生物到宏观与循环	14
Theme 18	分析技术前沿	7
Theme 19	计算地球化学前沿	9
Theme 20	矿物学与矿物物理学前沿	11
Theme 21	水文地球化学与全球水资源可持续发展	5
Theme 22	一般主题	4
Theme 23	特别议题——福岛核电站危机	1

成、从气体和尘埃到小行星体的研究,火星和月球探测等内容。内容非常专业,只有 4 个口头报告。但如同寻找宜居外星体一样,宇宙万物从哪里来、到哪里去,是个永恒的主题,也是人类孜孜以求的终极目标。

Theme 02 早期地球:从地核到大气
(Primitive Earth: From Core to Atmosphere)

在这一部分,与地球化学相关的报告主要有早期地幔、海洋和大气的氧化还原演化,太古宙岩石中记录到的微生物活动地球化学迹象,地球挥发组分的来源研究等。地球是目前唯一发现有生命的星体,而生命的起源和微生物活动等与地球化学过程的关系无疑紧密相关,因此,各种化学组分、化学反应如氧化还原等在其中所起的作用就需要进行深入的研究,以揭示相关规律并有所发现。

Theme 03 地球深部动力学及其演化
(Evolution and Dynamics of the Deep Earth)

这部分主要包括利用地球化学等方法计算地幔水平衡,探讨地幔氧化还原作用和深部碳循环,并通过研究高温高压下的稳定同位素特征来探讨地球深部的动力学过程及其演化规律等。

Theme 04 从地幔至地壳:洋脊与板内岩浆活动 (Mantle to Crust: Ocean Ridge and Intraplate Volcanism)

这一部分的主要内容包括:利用高温稳定同位素分析技术研究地幔和地壳作用,关于观测和模拟地幔柱、中洋脊和板块动态过程和交互作用的研究,以及关于影响地幔和岩浆过程不稳定性因素,地幔组成变异性,地幔熔融实验模拟,地球化学观测以及铅同位素在地球演化过程中的作用,循环俯冲物质的地球化学示踪研究。

Theme 05 大陆壳的形成及演化 (Continental Crust Formation and Evolution)

此部分主要探讨了大陆壳的起源、毁灭和再生,以及陆壳形成历史与大陆板块形成的年代学问题。关于岛弧与陆弧在大陆形成中的作用、大陆壳和岩圈地幔间在岩石学和地球化学及构造学间的相关性研究,以及大陆壳的岩浆作用、变质作用、形变和冲蚀作用的热力学演化等也有专题讨论。

Theme 06 循环:俯冲,地幔楔与弧火山作用 (Recycling: Subduction, The Mantle Wedge and Arc Volcanism)

此部分主要探讨了俯冲带中的物质循环、地球化学示踪、地幔楔中的熔体和流体地球化学和地球动力学研究等。

Theme 07 地球环境演化 (Evolution of Earth's Environment)

这部分主要关注地球与海洋的环境演化。例如,因为吸收大气二氧化碳而引起的海洋酸化作用目前受到了广泛重视,生物和地球化学进化交互作用中的痕量元素、早期生命中的同位素与有机生物标志物、生命与环境的协同进化等都是该议题关注的焦点。

Theme 08 从纳米到大陆尺度界面与界面过程 (Interfaces and Interfacial Processes from the Nano- to Continental Scale)

纳米颗粒与地球和生命的相互作用等其意义重大,而作用和长远影响不清,因而本次大会对其足够重视。同时关于自然、合成和偶生纳米颗粒以及它们的表面特性和界面过程,海洋、陆地有机质及环境中的痕量元素运移,矿物-水界面地球化学过程与光谱分析技术等的研究在这部分有较多报道。

Theme 09 火山与自然灾害地球化学 (Geochemistry of Volcanic Systems and Natural Hazards)

该部分主要内容包括与火山活动相关的地球化

学研究及其灾害检测,如利用火山活动的地球化学特性来监测火山喷发、岩浆挥发组分的自然与实验模型等。

Theme 10 地球资源:能源 (Earth Resources: Energy)

这一主题主要涵盖地球化学、生物地球化学在能源开发与利用方面的研究,如页岩气、煤气、致密气等起源的地球化学、生物地球化学、矿物学研究,生物成因的起源和生物地球化学在清洁能源方面所起的作用等。

Theme 11 地球资源:矿(赞助商 SGA) (Earth's Resources: Ores—under the Patronage of SGA)

主要内容包括矿床形成、矿床生物地球化学与地球微生物学,稀土矿的形成与地球化学的相关性及其对环境的影响等。

Theme 12 气候变化 (Climate Change)

全球气候变化共分 9 个专题,主要包括关于二氧化碳与气候变化的关系,碳循环的反馈,以往主要沉积体系的变化模式,气候变化年代学 and 变化速率,陆源至海洋沉积物的分子和同位素示踪技术,海洋有机质的生物成矿作用等研究。

Theme 13 大气气溶胶的源、汇及影响 (Sources, Sinks and Impact of Atmospheric Aerosols)

这一部分在讨论气溶胶的源、汇和影响方面,主要涵盖了混合多组分气溶胶过程中的有机质特征研究,气溶胶和能源与气候、陆地与大气交互关系中的气溶胶作用,海洋气溶胶的形成与运移,以及大气尘埃等研究。

Theme 14 风化、气候、构造与地表过程 (Weathering, Climate, Tectonics and Surface Processes)

这部分内容主要包括景观进化中的地球化学过程,化学风化作用,地球生物地球化学循环中的表面过程与进化,硅酸盐风化与有机碳汇,风化速率与时空相关性等。

Theme 15 海洋大气:过去与现在 (Oceans Atmosphere: Past and Present)

这一议题主要包括过去的深海循环,浅海和深海水热环境中的地球化学和微生物学研究,冰期与间冰期的海洋化学与循环,海洋中的金属稳定同位素等。

Theme 16 人类活动产生的地球化学影响 (Geochemical Impacts of Human Activity)

这一部分有 30 多次的口头报告,60 多篇报

展,120 多人参会。共分 7 个专题,分别为采矿环境中的地球化学过程,在饱和与非饱和地下环境中的金属与放射性核素污染物的命运和转化,在管理环境下的土壤碳动力学研究,地球关键带微污染物 (Micropollutant) 转化动力学评估,环境中的工程纳米材料——环境和生物介质中的纳米材料行为与影响,放射性材料管理和取证中的生物地球化学过程,废水循环的环境启示——在保护土壤和水资源中所面临的挑战。内容十分丰富。

Theme 17 生物地球化学:从微生物到宏观与循环 (Biogeochemistry: From Microbes to Macro and Cycles)

生物地球化学:从微生物到宏观与循环议题共分 14 个专题,是本届国际地球化学会议中专题最多的一个大会议题,这也表明该方向是国际地球化学研究领域的热点。如生物地球化学循环、矿物与生命、甲烷循环、微生物催化作用等。详细内容将在下一节专门介绍。

Theme 18 分析技术前沿 (Frontiers in Analytical Techniques)

这部分的内容主要涉及原位同位素比值测定中的分辨率和准确度研究进展评述,关于可获取前所未有的高精度数据的新的同位素系统,微区光谱分析与微区表面分析技术 (STXM、NEXAFS、AFM、NanoSIMS),生物地球化学过程分析技术与生物地球化学分子分析方法,如新颖的脂类生物标志物、有机化合物稳定同位素及古 DNA 分析方法等研究。这些分析技术与方法在本次会议被视为分析技术前沿。

Theme 19 计算地球化学前沿 (Frontiers in Computational Geochemistry)

环境中的放射性是人类关注的核心问题之一,关于其相关效应、危害及应对措施等是研究热点之一,关于氧化物、硫化物等过渡金属及其界面模型、地球物质动力学模型、地质流体模拟、矿物-水相互作用等研究也受到广泛重视。

Theme 20 矿物学与矿物物理学前沿 (Frontiers in Mineralogy and Mineral Physics)

矿物学与矿物物理学的研究内容十分广泛,例如未修饰的 $P-T-t$ (压力-温度-时间) 轨迹研究和矿物流体的实验与计算机模拟,同步辐射科学在地学中的应用,地幔物质的物理学性质和矿物结构与热动力学研究等。

Theme 21 水文地球化学与全球水资源可持续发展 (Hydrogeochemistry and Global Water Sustainability)

此部分内容包括全球水资源可持续发展,陆地、河流、湖泊、海洋界面的流体与溶质流量,水和环境中的放射性同位素、砷和锑的生物地球化学研究等。

Theme 22 一般主题 (General Sessions)

此部分有低温、高温地球化学、生物地球化学、同位素考古学等 4 个专题。

Theme 23 特别议题 (Special Sessions)

本次大会的特别议题针对福岛核电站核泄露展开。

3 关于生物地球化学的研究

第 17 议题“生物地球化学:从微生物到宏观与循环”共分 14 个专题,专题数量最多,报展和参会人员也非常踊跃,充分显示生物地球化学是目前国际地球化学研究中的重要热点领域。

该议题中的第 1 专题为丘陵地带与湿地中的生物地球化学循环。关于 C-N-S 和 P 生物地球化学循环及其在大气圈、水圈、生物圈和土圈间的相互关系的讨论是该专题的第一个研究内容。森林土壤、生物群、环境与气候变化下的森林生态系统行为,以及痕量元素的扩散路径与生物地球化学循环等也是该领域的关注热点。

第 2 专题聚焦矿物与生命,特别是关注地球关键带中的有机质转化。关键带 (the Critical Zone) 是指维系生命的非均匀近地表环境空间,涉及与岩石、土壤、水、大气、生物等密切相关的物理、化学和生物复杂相互作用,主要研究范围包括地表、植被、水体,涉及土壤圈、饱和与非饱和地下水圈等。矿物如何与生命相关? 这就需要通过研究植物、微生物有机质、矿物表面的相互作用等关键带过程中的决定性因素来回答。植物是光合作用的能源提供者,也是促进地表元素循环的强大推动力,而植物对于风化的影响则很大程度上要受到微生物的控制。生物圈可以深达 4000 m,远超出了根系可以达到的圈层。因此,地球关键带中生物作用、有机质转化过程及其与营养获取、分化和根系微生物矿物相互作用等就成为该领域的研究热点。

海洋与陆地环境中的甲烷循环是第 3 专题,该专题重点关注海洋与陆地环境中的甲烷转化与产

率、元素循环与生态系统间的关系、环境控制与机理研究等。第4专题为限定营养物生物地球化学, 主要关注 N、P、S、Ca、Fe、Mn 等元素的生物地球化学研究。第5专题聚焦陆地和水系氮同位素与氮循环。

矿物溶解和沉淀的微生物催化作用研究是第6专题的主题。生物介导反应与元素循环和地球化学过程, 微生物作用, 生物分子、流体与矿物相互作用等是该专题中所显示出的研究热点。借助于聚焦离子束-透射电子显微镜(TEM/FIB)、扫描透射X射线显微成像(STXM)、X射线光电子能谱(XPS)、NanoSIMS、显微傅立叶红外光谱(μ -FTIR)、拉曼光谱、荧光原位杂交(FISH)、原子力显微术(AFM)等新技术, 开展微生物与矿物相互作用的研究、应用和支撑技术开发, 也受到了与会人员的广泛关注。污染环境中痕量元素的动力学特性、迁移和生物可利用性是该议题中的第7专题。金属元素在污染环境中的行为, 生物群的吸收、危害, 以及它们在生态系统中的生物地球化学循环等, 是这一专题的聚焦点。第8专题则重点关注作为生物营养物和原核生物能量基源的铁的生物地球化学循环。第9专题关注环境中微生物群及天然有机质的组成和活性的定性与定量评估及相关分析技术的有效利用与开发。

氧化还原环境中的生物地球化学过程是该议题中的第10专题。自然氧化还原梯度在控制自然环境中的生物地球化学行为与通量方面非常重要, 这点已在缺氧沉积物和覆盖水或在土壤集聚物内观察到。其中, 冷渗出是沉积物和海洋间热、流体、挥发组分交换的直接途径。它们被高通量的烃所加强, 因此成为微生物和大生物群落的母体和生物地球化学过程的热点。而对与此相关的地球化学过程评估、化学与生物控制技术的研究等, 则是普遍关注的问题。第11专题用于纪念碘发现200年(1811—

2011年)。第12专题为自然稳定同位素在生物医学中的应用, 重点研究如何利用元素体内循环、代谢特性、同位素分馏效应等来解决医学问题。第13专题讨论关于土壤的微尺度、微化学和微生物学特性。第14专题讨论海洋系统中的痕量金属与类金属元素(Ag、Cd、Cr、Cu、Fe、Ge、Mn、Mo、Ni、Re、Se、U、Zn)循环与行为, 以及它们在再构古环境条件中的应用。胶体、腐殖质、有机聚集体在痕量元素循环中的作用? 在海洋生物代谢中哪些痕量金属起的作用更大? 痕量金属在水柱和沉积物中的氧化还原界面都经受了哪些转化过程? 这些都是迫切需要回答而仍悬而未决的疑难问题, 等待研究解决。

4 结语

Goldschmidt 2011大会特点显著。首先, 从会议热点议题、大会报告、口头报告与报展的内容看, 本次地球化学大会涵盖了地球化学领域的所有热点问题, 前沿性与交叉学科协同发展, 成为国际地球化学研究的趋势。没有任何一个传统意义上的单一学科和单一技术能引起地球化学家们的关注与重视; 相反, 总是多方向、多技术、多领域的交互结合研究, 既取得了显著研究进展, 又引起了广大与会代表的浓厚兴趣。其次, 国外学者的研究明显要比国内更为深入, 技术与数据细节挖掘更深, 过程与机理阐述得更为明了。第三, 在整个研究和报告中, 都贯穿了一种思考、推理与质疑。这是他们能够取得与众不同结果的最主要特性, 也值得国内广大地球化学研究者的思考与借鉴。

5 参考文献

- [1] Goldschmidt 2011: Earth, Life and Fire. <http://goldschmidt2011.org/themes> [EB/OL]. Czech Republic: Prague[2011-08-14~19].