

中国学者在数学地质学科发展中的成就与贡献

赵鹏大^{1,2}, 夏庆霖^{1,2}

1. 中国地质大学, 湖北武汉 430074, 北京 100083
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 在过去的四十年里, 中国学者在矿产资源定量预测与评价、非线性地质学等领域取得了大量研究成果, 如提出和发展了地质异常定量预测理论、“三联式”数字找矿理论、综合信息成矿预测方法、混沌边缘成矿理论、多重分形矿产预测理论与非线性信息提取和综合技术(如 $C-A$ 模型和 $S-A$ 模型、模糊证据权模型)等, 并在矿产勘查、环境和地质灾害预报中得到广泛应用。中国学者对数学地质学科的发展做出了重要贡献, 并在国际数学地球科学协会、重要学术期刊和学术会议上担任重要职务。中国数学地质学科已经形成了一些具有较大学术影响的优势领域和特色方向, 并成为当今国际数学地质研究中心之一。

关键词: 数学地质; 成就; 贡献; 中国学者。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0225-07

收稿日期: 2009-02-15

Chinese Scholars' Achievements and Contributions to the Development of Mathematical Geosciences

ZHAO Peng-da^{1,2}, XIA Qing-lin^{1,2}

1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract During the past forty years, in the mathematical geology domains, such as mineral resource quantitative assessment and nonlinear theory and their application in ore geology and mineral exploration, Chinese scholars have developed new theories and new methods which have advanced the relevant subjects. For example, the theory of geological anomaly quantitative prediction and mineral resource assessment, the theory of “three components” digital ore-finding, the idea of comprehensive information for mineral prognosis, the theory of mineral deposit growth at the edge of chaos, the multifractal theories and nonlinear information extraction and integration methods, such as concentration-area model (CA) and spectrum-area model (SA), the model of fuzzy weight of evidence (FWofE), and etc.. All these have not only advanced geomathematics but also provided new ways of applying geomathematical methods in mineral prospecting, environment and geological disaster predicting. Chinese scholars have made significant contributions to the development of mathematical geosciences, and so some of them occupied important posts of International Association for Mathematical Geosciences (IAMG). In addition, Chinese scholars also contribute to IAMG by means of our association as well as to the expertise such as serving as journal editors, conference hosts and council members. China has become one of the current international centers for research in mathematical geology.

Key words: mathematical geology; achievement; contribution; Chinese scholars.

数学地质是一门新兴交叉学科。美国学者 Merriam(1981)提出将电子计算机首次于 1958 年在地质学中应用作为数学地质学科诞生的起点, 而首次应用者——美国沉积学家 W. C. Krumbein 也被公认为国际“数学地质之父”。1968 年在布拉格召开的

国际地质大会上正式成立了国际数学地质协会(现改名国际数学地球科学协会), 可以认为数学地质学科正式得到了国际公认。

我国在 20 世纪 50 年代兴起了用数学方法(主要是概率统计方法)研究地质勘探实际问题的初步

尝试并取得了不少成果。随后,《数学地质引论》(中国科学院地质研究所, 1978)、《数学地质基本方法及应用》(刘承祚和孙惠文, 1981)等的出版, 进一步推动了数学地质的研究和应用。1978年10月, 在杭州召开了第一届全国数学地质学术讨论会, 出席代表195人, 提交论文131篇。1980年5月,《数学地质专辑(一)》由地质出版社出版。1981年4月第二届全国数学地质学术会议在长沙召开, 出席代表300人, 宣读论文213篇。学术交流涉及数学方法在成矿预测及化探中的应用、地质作用过程模拟、地层、沉积、古生物和构造地质等问题的研究, 以及地学数据库等。正是在这次大会上成立了我国数学地质专业委员会。从此, 我国数学地质研究进入一个新的发展阶段。

1 中国已经成为国际数学地质研究中心之一

2007年8月在北京召开了第12届国际数学地质大会, 主题是“数学地质——地学信息与资源—环境—灾害评价”。主办单位是中国地质大学、地质过程与矿产资源国家重点实验室、加拿大约克大学、国际数学地球科学协会、中国数学地质和地学信息专业委员会及中国地质调查局。大会主席为中国地质大学赵鹏大教授和加拿大地质调查局 F. P. Agterberg 教授, 大会秘书长为中国地质大学及约克大学成秋明教授。参会代表来自40余个国家和地区, 中外代表300余人。

从1992年起, 每四年召开一次的国际地质大会数学地质学科的分组会上都有中国学者担任分会场召集人或联合召集人。如在第29届地质大会(日本京都)、第30届地质大会(中国北京)、第31届地质大会(巴西里约热内卢)、第32届地质大会(意大利佛罗伦萨)以及第33届地质大会(挪威奥斯陆)上, 都有中国学者担任分组会议召集人。

每四年改选一次的国际数学地球科学协会理事会, 曾先后有赵鹏大、周蒂、成秋明、周永章等担任专门委员或理事。2008年最新一届理事会中成秋明被选为副主席并暂代行主席职务, 周蒂被选为国际定量地层委员会中国地区主席, 赵鹏大曾被选为国际地质数据委员会中国代表及亚洲(日本除外)地区代表, 周永章被选为国际数学地球科学协会评奖委员会委员, 成秋明被选为国际数学地球科学协会马特

伦论坛委员会主席等。赵鹏大、成秋明及周蒂等还担任国际数学地球科学协会主办的3个学术期刊:《不可再生资源》(现改名《自然资源研究》)、《计算机与地球科学》及《数学地质》(现改名《数学地球科学》)副主编、顾问编委及编委。

1992年及2008年两度有中国学者(赵鹏大、成秋明)荣获国际数学地球科学协会最高奖——克伦宾奖章, 是迄今亚洲仅有的两位获得者。

发展学科, 人才是基础。从1984年起在我国正式由国务院学位委员会批准在中国地质大学(当时为武汉地质学院)、成都理工大学(当时为成都地质学院)及长春地质学院(今并入吉林大学)三校设置数学地质学科博士学位授权点, 现该二级学科与遥感地质、勘查地球物理及勘查地球化学联合组建为新的二级学科“地球探测与信息技术”, 隶属于“地质资源与地质工程”一级学科之下, 从而使我国能独立自主地培养数学地质领域的最高学位的研究生。20世纪80年代在成都理工大学还曾设有数学地质专业培养本科生。虽然在国家专业目录调整后暂没有数学地质专业, 但资源勘查工程专业高年级学生中, 仍有一定数量的人选择数学地质作为其毕业论文的首选方向。目前, 中国地质大学在资源勘查工程专业中设置了资源定量评价方向, 招收本科学生。

多年来, 我国每年举行一次全国数学地质学术会议或与其他专业委员会联合举办专门性学术会议。如1985年4月在广州举办了“数学地质在煤田地质勘探中的应用”学术研讨会。除学术讨论外, 还积极开展各种技术服务和科技咨询活动, 如数学地质及计算机应用服务部(中国地质学会下设的若干咨询服务部之一)开展了青海祁连山石棉矿的预测、吉林镍矿资源总量预测和山东镁铝榴石数据处理等6项活动。此外还举办一些成果与经验交流会, 如1993年5月在西安召开了“全国数学地质及计算机地质应用成果经验交流会”, 参会人员66人, 论文70余篇, 主要内容有: 矿床统计预测方法的理论与实践、地质过程计算机模拟、地质信息系统软件包的开发与应用、地质统计学的发展与应用、非线性科学的初步应用、各种矿产资源评价模型, 以及灰色系统、模糊数学、GIS、网络系统在解决地震预报和矿井水文地质方面的应用经验等。各种学术会议之后, 将部分论文编辑出版, 如1980年5月的《数学地质专辑(一)》和1986年6月的《中国数学地质1》均由地质出版社正式出版。到1997年,《中国数学地质》已正式出版11册。至1999年10月, 第6届全国数

学地质及地学信息学术研讨会在北京举行。可以看出,20世纪以来,数学地质在我国是比较活跃的一个分支学科,她与时俱进,随地质学、数学及计算机等信息科学的发展而不断发展,她与国民经济发展和资源、环境及灾害等重大实际问题紧密结合,她积极参与国际学术交流,所有这些成果和特点已受到国际学术界的重视。国际上著名的数学地质学家大多访问过我国。前国际数学地球科学协会主席、美国堪萨斯大学 J. Davis 教授、前德国波罗的海研究中心主任 J. Harff 博士等在书面或口头上均赞誉中国已经成为世界数学地质研究中心之一。

在国际上,数学地质成果显著,学术影响力较大且活动比较频繁。除每四年一次与国际地质大会同时举行学术会议外,每年都举行世界性学术年会,今年8月将在美国斯坦福大学举行,被认为是国际数学地质研究中心的地区还有:美国堪萨斯州立大学及斯坦福大学、加拿大地质调查局及约克大学、法国巴黎枫丹白露数学形态中心、日本奈良大学及东京大学、俄罗斯科学院及有色金属黄金学院等。

一般说来,某学科成为国际学术研究中心的主要标志或条件是:(1)有一批该学科领域国际知名学者和专家,参与组织领导该学科国际重大学术活动和参与国际学术领导机构;(2)在该学科领域学术活动频繁,能产生一些有国际影响力的学术成果,对推动该学科发展和提高该学科学术水平发挥显著作用;(3)学科发展基础良好,可持续发展的人才条件、物质条件、社会环境及学术环境具有保障,经济发展和科技进步对学科的需求驱动明显,学科对经济发展和科技进步的贡献显著;(4)国际学术交流积极活跃,学术信息渠道畅通,学者交流互动性强,学科特色互补性强,学术创新研发性强,成果共享对等性强。

我国数学地质学科的发展呈现波浪式起伏的特点,在时间上和空间上,发展也是不平衡的。决定一个单位、一个部门、一个地区,乃至一个国家的学科持续发展以及可能达到的高度最关键的因素是人才,是后继有人和新人辈出,而要走向世界,就更需要高水平的国际型人才发挥主导作用。

2 中国数学地质学科的优势领域和特色方向

我国数学地质工作者在许多领域从事卓有成效的工作,在应用于地质领域的数学方法与模型的研究、

在地质数据库与信息系统的开发研制方面,以及在专门领域的数学地质应用研究方面,如定量地层学、矿山地质统计学、沉积与成矿过程模拟、地质专家系统等方面都有很好的成果。总体而言,我国有以下几个优势领域和特色方向。

2.1 矿产资源定量预测与评价

这是在我国开展时间最长、涉及面最广、参与人员最多、成果最显著的一个数学地质应用研究领域。早在1976年我国在宁芜地区即开展了铁铜矿床的统计预测工作,随后在福建、河北、东北等地进行了相当数量的矿床统计预测及综合信息成矿定量预测。1980年,美国数学地质学家 R. 麦坎蒙等来华介绍国际地质对比计划(IGCP)第98号专题,即计算机在矿产资源评价中的应用专题成果,进一步推动了我国数学地质在矿产定量预测和评价中的应用。

赵鹏大等(1983)出版了《矿床统计预测》专著,从理论和方法上总结了矿床定量预测与评价工作。随后又出版了一系列矿产定量预测研究的专著和论文,如《矿产资源评价方法导论》(朱裕生,1984)、《综合信息矿产预测理论与方法》(王世称,2002)、《固体矿产预测评价方法技术》(叶天竺等,2004),以及《基于GMS、DSS和GIS的潜在矿产资源评价方法》(李裕伟等,2007),等等。应该强调的是,国家任务需求驱动了数学地质的普及和发展。1985年第一次在全国范围内进行了铁、铜、金及石灰岩4种矿产全国性资源总量预测,2006年全国又对25种矿产开展资源总量预测工作。数学地质学为这些任务的完成做出了贡献。这是国家任务与学科发展紧密结合、互动双赢的最好例证。

在这一领域的研究工作也取得一些生产实际效果,通过定量预测,发现新的矿产地。如1980年赵鹏大、胡旺亮等在云南个旧采用矿床统计预测法取得成效。1980年云南地质队与武汉地质学院合作,对云南东区北部开展1:10 000成矿预测工作,采用地质类比和数理统计两种方法进行综合预测,圈定远景找矿地段,对两种方法预测重合较好并具有验证条件的预测区及时验证。编制了1981年该矿段深部找矿验证工程设计,经上级批准于同年7月上钻。设计在松树脚锡矿1720m中段芦塘坝矿段采用水平钻孔揭露了厚度较大的富锡、富铅氧化矿体,效果较好,预计远景锡、铅各1~2万吨,肯定了芦塘坝矿段为一个具有工业价值的锡、铅找矿远景区段。在老、马、松矿田之间的空白区的找矿工作,又一次取得了突破性进展。随后于1982年继续进行勘探,于1986年提交报告,初

步探获了一个大型锡多金属矿床. 此外, 在新疆北山地区, 通过定量预测发现铜镍硫化物矿带两条, 在克拉麦里地区发现了清河金矿(李树昆等, 2007)^①.

矿产资源定量预测的特色方向是在我国研究时间较长、应用较广、效果较好、实力较强的若干方法经不断完善而逐步形成的.

2.1.1 “三联式”数字找矿模型及定量预测 这是中国地质大学(武汉)数学地质及遥感地质研究所、矿产普查与勘探教研室及中国地质大学(北京)3S新技术研究室从 1975 年以来长期从事的重点研究方向. 从早期的矿床统计预测到地质异常成矿预测, 再到“三联式”数字找矿及定量预测, 经历了 20 余年不间断的理论研究与预测实践. 先后在江苏、河北、安徽、山东、云南、新疆、湖北等省对铁、铜、锡、铅锌、金、油气等矿产资源进行了不同比例尺(包括 1:20 万, 1:5 万, 1:1 万及 1:2 000)的定量预测与评价, 有部分省预测出的成矿远景区经工程验证已发现新的矿体和矿床. 已编写出版有关成矿定量预测的专著 5 本, 在中外期刊杂志上发表论文近百篇, 培养硕、博士研究生近 50 人. 这一方向的基本特点是深入研究控制成矿的各类地质因素和找矿标志, 对其数字化和定量化, 从而识别、提取和圈定致矿地质异常; 全面研究预测区成矿地质特征, 揭示地区的成矿多样性, 从而为评价矿化丰度和进行综合预测提供依据; 系统研究预测区的成矿规律, 建立地区成矿的空间、时间和成因谱系. 将致矿地质异常、成矿多样性及成矿谱系三者有机结合, 建立地区的“三联式”数字找矿模型, 进行成矿定量预测与评价. 这是将成矿系统与找矿系统、成矿过程与矿化响应、定性分析与定量评价、专门找矿与综合找矿有机结合的一种成矿预测新途径.

2.1.2 综合信息成矿预测 这是吉林大学地学院(原长春地质学院)成矿预测研究所长期从事的研究方向. 他们在预测地质单元划分、地、物、化、遥成矿信息提取, 数量化理论及方法的应用, 综合信息成矿预测等方面具有独特之处. 他们在一些省区, 特别是辽、吉、黑、内蒙、浙江、甘肃等, 以及全国范围内进行过成矿预测和资源潜力评价, 取得了很好的成果(王世称, 2002).

2.2 非线性地质

我国在非线性质地质领域的研究始于 20 世纪 80 年代后期, 1989 年出版的《分形与分维在地球科学

中的应用》(陈颢, 1989)系统总结了当时地学中分形理论与方法研究的成果. 90 年代以后, 非线性地质研究呈现出蓬勃发展的势头, 又有一批颇具影响力的研究论文和专著问世, 如《分形结构因子及其在地质学上的应用》(沈步明, 1993)、《多重分形与 GIS 空间分析: 金矿资源潜力评价》(Cheng, 1994)、《分形——岩石力学导论》(谢和平, 1996)、《矿产勘查中的分形、混沌与 ANN》(李长江等, 1999)、《地质系统的复杂性》(於崇文, 2003)和《矿床在混沌边缘分形生长》(於崇文, 2006)等. 正是经过二十余年不懈的努力, 在非线性和复杂性理论及其矿产勘查应用上逐渐形成我国的特色方向.

2.2.1 复杂性理论与成矿动力学研究 从 20 世纪末对成矿作用与耗散结构(於崇文, 1987)、矿床的分形性质(秦长兴和翟裕生, 1992)等方面的初步探索, 逐步发展为对地质系统复杂性和成矿复杂系统的研究; 从尺度连续性和全局性的分形统计, 逐步发展为对突变性和局部奇异性的研究, 相继提出了成矿动力系统在混沌边缘分形生长和地质作用的自组织临界过程动力学等新理论(於崇文, 2003, 2006), 并将奇异性的定义拓展为在很小的时间—空间范围内具有巨大能量释放或巨量物质形成的现象, 提出成矿等奇异性事件所产生的结果通常具有密度与面积(尺度)分形或多重分形规律, 探讨了评价随机多重分形场(如矿石品位分布)局部奇异性空间分布的数学方法(Cheng, 2005, 2007), 为利用多重分形理论预测矿产和地质灾害的空间分布提供了理论基础. 从而, 将成矿作用等重大基础地质问题的研究提高到非线性和复杂性科学的层次, 初步形成了独具特色的地球复杂性理论体系.

2.2.2 非线性理论及其在资源评价中的应用 这是中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室、国土资源部资源定量评价与信息工程重点实验室的重要研究方向之一. 从多重分形函数的推导到多重分形原理与地质统计学的结合, 从 $C-A$ 、 $S-A$ 、 $N-\lambda$ 和 $W-A$ 等多重分形模型的提出及奇异性证据权和模糊证据权方法的研究到非线性成矿预测理论的形成, 经历了 10 余年不懈的理论探索, 先后在云南、新疆、河北等省对锡、铜、铅锌、铁等矿产进行了定量评价与示范研究, 并在中外学术期刊上发表论文 200 余篇. 该方向的基本特点是将现代非线性理论、矿产资源评价、地学信息获取等学科融合, 研究分形和多重分形的尺度临界性、广义自相似性和局部奇异性, 强调对叠加或混合成矿信息的合理分解,

^①李树昆, 朱琼, 夏云冰, 等, 2007. 云南省有色地质三〇八队志.

以及对矿产勘查弱异常的有效提取. 国际《矿床地质论评》主编、挪威矿床学家 N. J. Cook (2008) 对此做出了“矿产资源勘查中数学、统计学和地学信息的新应用”的评价. 非线性理论与方法在矿产资源定量预测中的应用开拓了一个新的研究领域.

3 学术贡献与影响

对学科发展的学术贡献主要体现于学术思想、学术理论、方法技术及重要应用方面的创新和产生的实际效益与价值; 而学术影响则主要表现于其成果在国内外传播与交流的广度、对创新性成果的认可度、引用率及关注度. 在这方面, 几项主要研究成果如下.

3.1 地质异常定量预测理论与方法

国际数学地球科学协会推荐了四项成果参加 2001 年在韩国首尔召开的第 53 届国际统计学大会, 其中, “地质异常: 地质学中的极值及其在矿产资源定量评价中的应用”在大会的地质学中极值理论分组会上进行报告. 2005 年于加拿大多伦多召开的国际数学地质年会上, 另一篇地质异常的论文——“矿床: 具有高经济价值的地质异常”在大会上宣读. 这两篇论文均从新的角度提出问题和研究问题. 第一篇论文说明: 极值理论是地质异常的数学基础, 而地质异常则是极值在地质学中的体现和应用. 第二篇论文则从新的视角定义了矿床, 也说明了地质异常与矿床的地质—经济属性及其关联性. 有关地质异常方面的论文被引用次数已达到 1 106 次, 其中 1991 年首次发表的“初论地质异常”(赵鹏大和池顺都, 1991) 一文被引用 124 次. 前国际数学地球科学协会主席 Agterberg (2003) 将该成果列为数学地质学科的新生长点和发展方向之一, 并评价说: “赵鹏大提出某些地质环境可以用异常现象(如不同类型矿石的大量浓集)来加以刻画, 而极值分布理论有助于解释这些地质异常.”

3.2 “三联式”数字找矿理论与模型

2001 年 5 月在北京召开了成矿多样性及其预测与评价国际学术讨论会, “三联式数字找矿及评价”一文在大会上宣读. 2003 年, 赵鹏大应邀赴俄罗斯参加莫斯科大学一年一度召开的斯米尔诺夫学术论坛, 在会上作了“三联式数字找矿: 矿产资源定量预测与评价的新途径”报告. 在为参加第 33 届国际地质大会而出版的《中国地质大学学报(英文版)》

上, 在深部矿产勘查定量评价(Zhao *et al.*, 2008) 一文中介绍了三联式成矿预测在云南个旧矿区的实际应用.

以地质异常分析为基础的成矿多样性及成矿谱系研究, 对开展理论找矿、综合找矿、定量找矿及立体找矿为一体的科学找矿具有重要意义.

3.3 地质体数学特征及其意义

自赵鹏大(1982)年发表“试论地质体的数学特征”一文以来, 这一概念和问题已受到相当的关注. 在第 30 届和第 31 届国际地质大会上都分别作为数学地质分组学术会的主题之一. 应该说, 对地质体的定量研究和定量表征是深入揭示地质体成因本质和区分不同成因地质体的一种重要途径. 然而, 并不是任何一种定量表征都能代表该地质体的本质特征, 这需要从不同角度全面深入地研究, 以发现和提取地质体最本质的数学特征. 地质体数学特征的提出加强了数学地质的理论基础, 也为深入研究地质体开拓了新的方向和内容, 因而具有一种普遍的意义.

3.4 非线性理论及其在固体地学中的应用

奇异分析 $S-A$ 模型及成矿异常分解于 2001 年由国际数学地球科学协会推荐到第 53 届国际统计学大会奇异性数据统计学分会. 分形理论、空间统计模型和 GIS 技术则是被推荐到 2004 年在多伦多举行的美—加联合统计学大会资源环境统计分会的三项成果之一. 模糊证据权被推荐作为目前全国矿产资源潜力评价的重要方法之一. 成秋明与 F. P. Agterberg 教授等人合作主编了国际《计算机与地球科学》、《非线性地球物理》、《数学地球科学》等杂志“分形与多重分形”专辑和《数学地球科学进展》丛书(Bonham-Carter and Cheng, 2008). 中国学者在欧洲地学联盟和国际数学地球科学协会非线性固体地学领域长期占有一席之地.

3.5 多重分形模型与方法

CA 多重分形模型的提出, 开辟了将分形理论用于异常与背景分解的研究方向. Cheng *et al.* (1994) 发表在国际勘查地球化学杂志上的 CA 多重分形论文已成为该领域普遍引用的经典方法(论文被引用 128 次), 而关于频率域广义自相似 $S-A$ 模型的论文发表在国际数学地质和国际勘查地球化学杂志上, 并被收录进《国际勘查地球化学手册》和《GIS 在地学中的应用》等丛书, 在全球地球化学基准(GGBP)重大项目和矿产勘查中得到应用. 前国际数学地球科学协会主席 G. Bonham-Carter 教授对此项成果的评价是: “为多重分形理论和矿产资源

研究中的应用研究开辟了空间分析的新领域.提出的新方法(*C-A*、*S-A*)等已经成为区域勘查地球化学以及其他勘查数据处理的标准方法”.而欧洲非线性地学负责人 Lovejoy and Schertzer(2007)则认为“*S-A*分形滤波等新方法具备格外的吸引力,为矿产勘查提供了十分有用的各向异性的滤波器”.

3.6 地学信息系统与地学数据库的研制

20世纪90年代以来,MAPGIS等具有自主知识产权的GIS软件平台的推出,推动了国内地学领域信息化建设的较快发展.GeoDAS、MORPAS、MORAS、GeoExpl、GeoView、MinESoft等一系列二维或三维矿产勘查及资源评价专业软件的开发与推广,进一步完善了矿产勘查地学数据处理、信息提取与综合、空间分析与决策等GIS技术,并成为数学地球科学领域中较为活跃的研究方向之一.

地学基础数据库建设也取得了丰硕成果,为相关领域的科研、生产等提供了有效的支撑与服务.目前已经完成和正在建设的全国性地学数据库有50余种,主要包括:1:500万、1:250万、1:50万、1:20万和1:5万数字地质图空间数据库,全国矿产地数据库,全国矿产储量数据库,全国1:500万和1:20万区域地球化学数据库,全国1:100万和1:20万区域重力数据库,全国1:100万和1:20万航空磁测数据库,全国1:20万自然重砂数据库,全国钻孔及测井数据库,航空遥感影像数据库,全国地质工作程度数据库,1:600万、1:20万和1:5万水文地质、环境地质和灾害地质图空间数据库,全国重大地质灾害数据库,等.

3.7 其他方面

在开发研究新的数据处理和分析方法、人工智能与神经网络、地质统计学等方面,我国学者也做出了有特色的成果和贡献,例如,《数量化理论及其应用》(董文泉等,1979)、《灰色系统》(邓聚龙,1985)、《模糊理论和神经网络的基础与应用》(赵振宇和徐用懋,1996)、《人工智能中的概率统计方法》(张尧庭和杜劲松,1998)、《实用地质统计学》(侯景儒等,1998).此外,中科院数学研究所及有关高校的数学家和统计学家对一些数学地质方法的发展也都做出了重要贡献,如《概率论基础及应用》(王梓坤,1976)等.

References

Agterberg, F. P., 2003. Past and future of mathematical geology. *Journal of China University of Geosciences*, 14 (3): 191–198.

- Bonham-Carter, G., Cheng, Q. M., 2008. *Progress in geomathematics*. Springer, Berlin.
- Chen, Y., 1989. *Application in geosciences of fractal and chaos*. Academic Magazine Press, Beijing (in Chinese).
- Cheng, Q. M., 1994. *Multifractal modeling and spatial analysis with GIS: Gold mineral potential estimation in the Mitchell-Sulphurets area, northwestern British Columbia* (Dissertation). Univ. Ottawa, Canada.
- Cheng, Q. M., 2005. A new model for incorporating spatial association and singularity in interpolation of exploratory data. In: Leuangthong, O., Deutsch, C. V., eds., *Geostatistics banff 2004. Quantitative geology and geostatistics* (14). Springer, 1017–1025.
- Cheng, Q. M., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geol. Reviews*, 32(1–2): 314–324.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109–130.
- Cook, N. J., 2008. Publishing in ore geology: Reflections on 5 years of *Ore Geology Reviews* as an IAGOD journal. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 217–221.
- Deng, J. L., 1985. *The grey system*. National Defence Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Dong, W. Q., Zhou, G. Y., Xia, L. X., 1979. *Quantification theory and application*. Jilin People's Press, Changchun (in Chinese).
- Hou, J. R., Yin, Z. N., Li, W. M., et al., 1998. *The practical geostatistics*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1978. *Introduction to mathematical geology*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, C. J., Ma, S. H., Zhu, X. S., et al., 1999. *Fractal, chaos and ANN in mineral exploration*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. W., Zhao, J. M., Li, C. Y., 2007. *Undiscovered mineral resources assessment based on GMS, DSS and GIS*. Seismic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, C. Z., Sun, H. W., 1981. *The basic methods and application of mathematical geology*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lovejoy, S., Schertzer, D., 2007. Scaling and multifractal fields in the solid earth and topography. *Nonlinear Processes Geophysics*, 14: 465–502.
- Merriam, D. F., 1981. *Roots of quantitative geology*. In: Mer-

- riam, D. F., ed., Down-to-earth statistics, solutions looking for geological problems. *Syracuse University Geology Contribution*, 8: 1—15.
- Qin, C. X., Zhai, Y. S., 1992. Some self-similarities in economic geology and their significance. *Mineral Deposits*, 11(3): 259—266 (in Chinese with English abstract).
- Shen, B. M., 1993. Fractal structure factor and its application in geology. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 268—276 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. C., 2002. The theory and method of comprehensive information for mineral resources assessment. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, Z. H., 1976. Introduction to probability theory and its application. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, H. P., 1996. Fractal in rock mechanics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ye, T. C., Zhu, Y. S., Xia, Q. L., et al., 2004. The method and technology for solid mineral resources prediction and assessment. Land Press, Beijing (in Chinese).
- Yu, C. W., 1987. Ore-forming processes and dissipative structures. *Acta Geologica Sinica*, 61(4): 336—349 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., 2003. The complexity of geo-systems. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yu, C. W., 2006. Fractal growth of mineral deposits at the edge of chaos. Anhui Education Press, Hefei (in Chinese).
- Zhang, Y. T., Du, J. S., 1998. The methods of probability statistics in artificial intelligence. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, P. D., 1982. On the mathematical characteristics of geological bodies. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 7(1): 145—155 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Cheng, Q. M., Xia, Q. L., 2008. Quantitative prediction for deep mineral exploration. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 309—318.
- Zhao, P. D., Chi, S. D., 1991. A preliminary view on geological anomaly. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 16(3): 241—248 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Hu, W. L., Li, Z. J., 1983. The statistical prediction of mineral deposits. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, Z. Y., Xu, Y. M., 1996. Introduction to fuzzy theory and neural networks and their application. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, Y. S., 1984. Introduction to mineral resource evaluation methods. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈颢, 1989. 分形与混沌在地球科学中的应用. 北京: 学术期刊出版社.
- 邓聚龙, 1985. 灰色系统. 北京: 国防工业出版社.
- 董文泉, 周光亚, 夏立显, 1979. 数量化理论及其应用. 长春: 吉林人民出版社.
- 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等, 1998. 实用地质统计学. 北京: 地质出版社.
- 李长江, 麻士华, 朱兴盛, 等, 1999. 矿产勘查中的分形、混沌与ANN. 北京: 地质出版社.
- 李裕伟, 赵精满, 李晨阳, 2007. 基于GMS、DSS和GIS的潜在矿产资源评价方法. 北京: 地震出版社.
- 刘承祚, 孙惠文, 1981. 数学地质基本方法及应用. 北京: 地质出版社.
- 秦长兴, 翟裕生, 1992. 矿床学中若干自相似现象及其意义. *矿床地质*, 11(3): 259—266.
- 沈步明, 1993. 分形结构因子及其在地质学上的应用. *岩石学报*, 9(3): 268—276.
- 王世称, 2002. 综合信息矿产预测理论与方法. 北京: 科学出版社.
- 王梓坤, 1976. 概率论基础及应用. 北京: 科学出版社.
- 谢和平, 1996. 分形——岩石力学导论. 北京: 科学出版社.
- 叶天竺, 朱裕生, 夏庆霖, 等, 2004. 固体矿产预测评价方法技术. 北京: 大地出版社.
- 於崇文, 1987. 成矿作用与耗散结构. *地质学报*, 61(4): 336—349.
- 於崇文, 2003. 地质系统的复杂性. 北京: 地质出版社.
- 於崇文, 2006. 矿床在混沌边缘分形生长. 合肥: 安徽教育出版社.
- 张尧庭, 杜劲松, 1998. 人工智能中的概率统计方法. 北京: 科学出版社.
- 赵鹏大, 1982. 试论地质体的数学特征. *地球科学——武汉地质学院学报*, 7(1): 145—155.
- 赵鹏大, 池顺都, 1991. 初论地质异常. *地球科学——中国地质大学学报*, 16(3): 241—248.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金, 1983. 矿床统计预测. 北京: 地质出版社.
- 赵振宇, 徐用懋, 1996. 模糊理论和神经网络的基础与应用. 北京: 清华大学出版社.
- 中国科学院地质研究所, 1978. 数学地质引论. 北京: 地质出版社.
- 朱裕生, 1984. 矿产资源评价方法导论. 北京: 地质出版社.