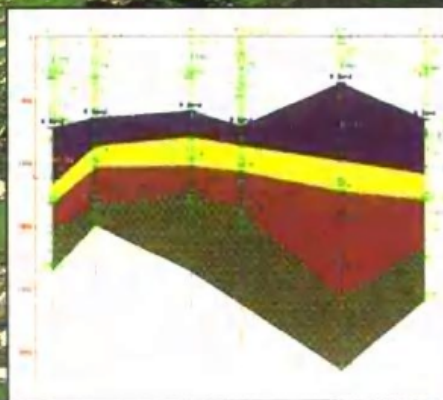
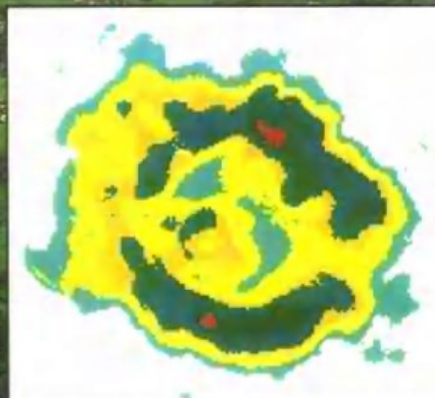
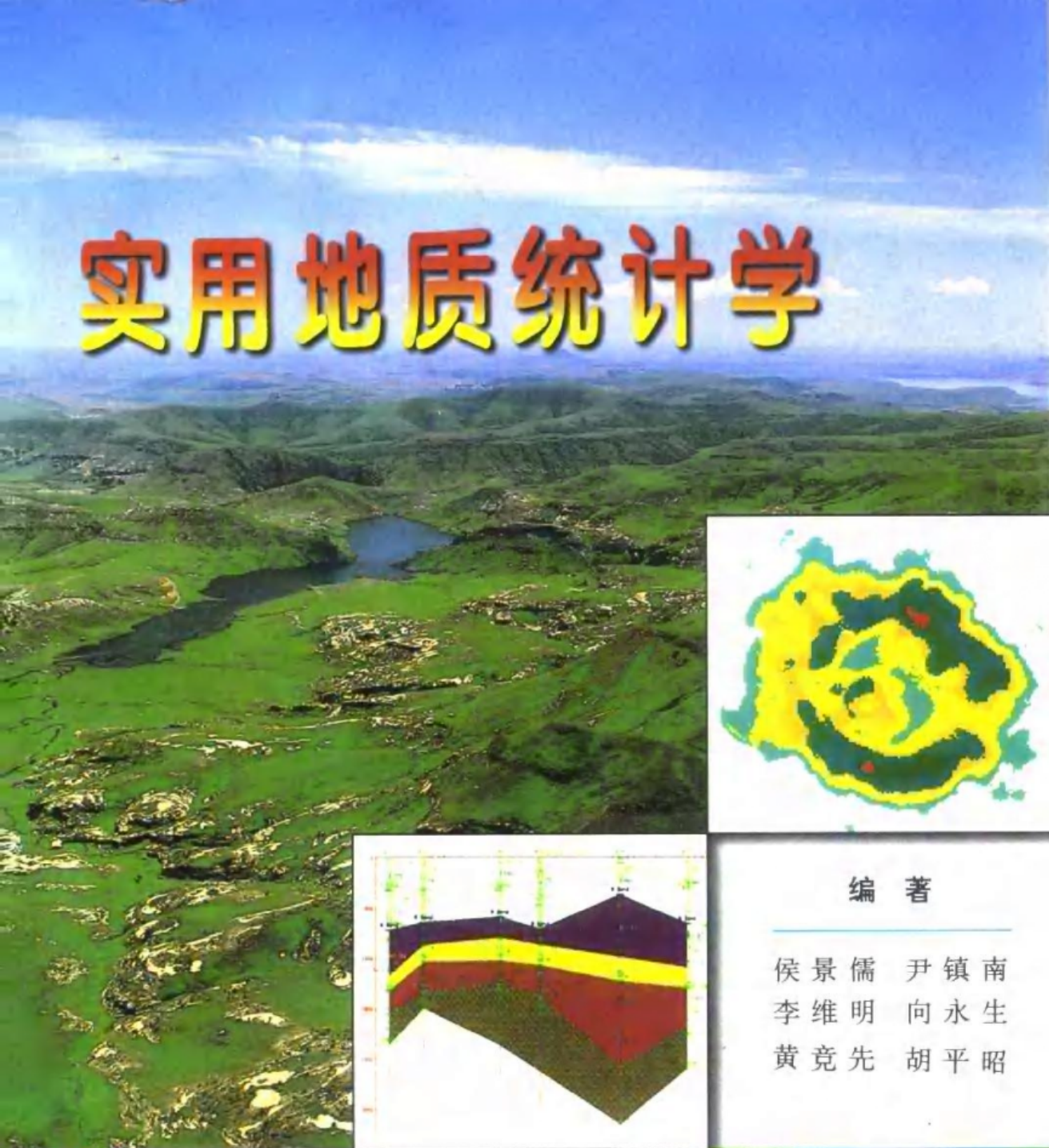


实用地质统计学

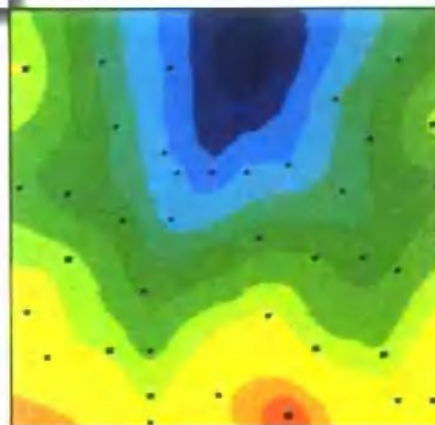


编 著

侯景儒 尹镇南
李维明 向永生
黄竞先 胡平昭



地 质 出 版 社



实用地质统计学

(空间信息统计学)

侯景儒 尹镇南 李维明 编著
向永生 黄竞先 胡平昭

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书详细论述了地质统计学(空间信息统计学)的基本理论、方法及实际应用,特别是对如何应用地质统计学解决有关实际问题方面进行了详细地讨论。全书共分五章:第一章是绪论,介绍了地质统计学在我国发展的现状及对若干问题的看法;第二章是关于地质统计学的一些数学基础知识,回顾了概率论及数理统计中的若干基本概念;第三章是地质统计学(空间信息统计学)的理论方法,包括地质统计学的基本假设、变异函数及结构分析、普通克立格法、对数正态克立格法、指示克立格法、泛克立格法、空间域中多元信息地质统计学——协同克立格法及因子克立格法、时-空域中多元信息地质统计学、可回收储量的总体估计;第四章是地质统计学方法的实际应用,包括应用地质统计学方法计算矿床储量的详细例案及若干计算结果;第五章是有关地质统计学计算程序系统方面的内容,包括国内外地质统计学计算程序系统简介、ISATIS 软件的构成及功能特点、CGESV2.4 构成及功能特点、3D-COKRI 构成及功能特点、地质统计学程序设计提示、有关设备选购和系统构成的建议。

本书可供从事矿产勘查、采矿工程、矿山地质、水文地质及工程地质、灾害地质、环境科学、海洋科学、农林科学等领域的工作者及地质研究、采矿设计人员使用,也可作为高等院校有关专业的研究生及本科生的教科书或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实用地质统计学/侯景儒等编著.-北京:地质出版社,1998.7

ISBN 7-116-02577-4

I. 实… II. 侯… III. 地质统计学 IV. P5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 07682 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:杨友爱

责任校对:田建茹

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:300 000

1998 年 7 月北京第一版·1998 年 7 月北京第一次印刷

印数:1~1000 册 定价:35.00 元

ISBN 7-116-02577-4

P·1893

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

作者的话

1995年10月20日,全国矿产储量委员会办公室(全国矿产资源委员会办公室前身)以“储办发(1995)197号”函颁发了关于“运用地质统计学方法提交地质勘探报告的编写提纲和审查提纲”的试行意见(以下简称“意见”)。该“意见”颁发之后,许多省(自治区、市)矿产储量审批机构的技术管理干部和从事野外地勘工作的地质工作者向笔者反映了以下几点意见:①目前问世的地质统计学著作,在内容上偏重于理论研究和教学的需要,内容过深,不易学习,对掌握其方法要领感到困难;②完整系统地介绍地质统计学关于矿床储量计算的技术方法很少,结合我国矿床储量的计算实例更不多见,往往学了理论不会应用。因此,希望能有一本“深入浅出的、易于学习掌握而又结合我国实际的关于地质统计学的书问世,以便于学习和应用。笔者被广大地质工作者的殷切期望深深感动;同时,也使笔者感到责无旁贷。于是几经筹划,在前几年准备资料的基础上写成此书。在内容的安排上,重点考虑了有利于学习、掌握及应用地质统计学方法,这也是本书与其他类似书的不同之处。全书共分五章。第一章是地质统计学在我国的应用与发展(尹镇南执笔),着重总结了地质统计学在我国的应用与发展。第二章是一些概率论及数理统计的基本知识(尹镇南执笔)。第三章是地质统计学(空间信息统计学)的理论方法(侯景儒执笔),包括地质统计学的重要理论及假设,变异函数及结构分析,普通克立格法,对数正态克立格法,指示克立格法,泛克立格法,空间域中多元信息地质统计学——协同克立格法及因子克立格法,时-空域中多元信息地质统计学,可回采储量的总体估计。第四章是地质统计学方法的实际应用(向永生、侯景儒、黄竞先执笔),讨论了应用地质统计学方法计算矿床储量的详细例案(以CGES软件为例)及在若干矿床应用地质统计学计算储量的计算结果。第五章是地质统计学程序系统(李维明、胡平昭、侯景儒执笔),讨论了国内外地质统计学软件发展现状,CGES V2.4软件特点,SMICKS系统特点,并附ISATIS系统的特点介绍,编写地质统计学程序时的若干提示,以及选购设备和系统构成的建议。

本书是在让读者了解了地质统计学的若干基本原理、理论及方法的基础上,能把地质统计学(空间信息统计学)较好地应用于诸如矿产勘查及储量计算、矿业工程设计、水文地质及工程地质、环境、海洋、农林科学、灾害及气象科学等方面。如果读者能在以上各方面取得较好的经济效益及社会效益的话,这本书的目的也就基本达到了。

由于作者水平有限,书中不足之处,敬请批评指正。

目 录

第一章 地质统计学在我国的应用与发展概述	(1)
1.1 地质统计学在我国的应用与发展	(1)
1.2 地质统计学在我国发展的若干问题讨论	(9)
第二章 概率论及数理统计的若干基础知识	(13)
2.1 概率论基础.....	(13)
2.2 随机变量及其概率分布.....	(16)
2.3 随机变量的数字特征.....	(20)
2.4 大数定理和中心极限定理.....	(23)
2.5 统计推断基础.....	(24)
第三章 地质统计学(空间信息统计学)的理论方法简介	(31)
3.1 地质统计学的若干基本假设及理论.....	(32)
3.2 变异函数及结构分析.....	(36)
3.3 普通克立格法.....	(45)
3.4 对数正态克立格法.....	(50)
3.5 指示克立格法.....	(52)
3.6 泛克立格法.....	(55)
3.7 空间域中多元信息的统计分析——协同克立格法及因子克立格法.....	(60)
3.8 时间-空间域中多元信息的地质统计学研究	(64)
3.9 可回采储量的总体估计.....	(68)
第四章 地质统计学(空间信息统计学)方法的实际应用	(73)
4.1 应用地质统计学方法计算矿床储量的详细例案(以 CGES 程序系统为例) ..	(73)
4.2 我国华南某大型夕卡岩型铁矿床中 Fe、Cu、S 的矿石储量的地质统计学 计算	(117)
4.3 中南某锰矿矿石储量的地质统计学计算	(122)
4.4 关于河北水厂铁矿可溶铁 SFe 结构分析简介	(128)
4.5 某斑岩铜矿可回采储量的总体估计简介	(131)
第五章 地质统计学程序系统	(133)
5.1 地质统计学计算程序系统简介	(133)
5.2 CGES V2.4 地质统计学专业应用软件的系统构成及功能特点	(137)
5.3 空间域多元信息的协同克立格法程序系统——SMICKS	(142)
5.4 附:ISATIS 代表的地质统计学方法研究类软件的构成及功能特点	(183)
5.5 地质统计学程序设计提示	(188)
5.6 有关设备选购和系统构成的建议	(191)
附录 关于“运用地质统计学方法提交地质勘探报告的编写提纲和审查提纲”的 试行意见	(193)
参考文献	(199)

CONTENTS

CHAPTER 1 Application and Development of Geostatistics in China	(1)
1.1 Application and develop of geostatistics in China	(1)
1.2 Some problems about develop of geostatistics in China	(8)
CHAPTER 2 Some fundamental principles of probability and mathematical statistics	(13)
2.1 Some topics in probability	(13)
2.2 Random variables and its probability distribution	(17)
2.3 Numerical character of random variable	(20)
2.4 Law of large numbers and central limit theorem	(23)
2.5 Some fundamental principles of statistical inference	(24)
CHAPTER 3 Theory and methods of geostatistics (statistics of spatial information)	(31)
3.1 General theory and hypothesis about geostatistics	(32)
3.2 Variogram and structure analysis	(36)
3.3 Ordinary kriging	(45)
3.4 Lognormal kriging	(50)
3.5 Indicator kriging	(52)
3.6 Universal kriging	(55)
3.7 Geostatistics of Multivariate information in space domain——cokriging and factor kriging	(60)
3.8 Geostatistics of multivariate information in space-time domain	(64)
3.9 Global estimation of recoverable reserves	(68)
CHAPTER 4 Application of geostatistical methods (statistics of spatial information)	(73)
4.1 A detailed case study A: Calculation of ore reserves by geostatistical tecnology (with CFES programming system)	(73)
4.2 Case study B: Calculation of ore reserve (for Fe, Cu, S) of the skarn iron deposit in Southern China by lognormal kriging	(117)
4.3 Case study C: Calculation of manganese ore reserve in Southern China by cokriging	(122)
4.4 Case study D: Structure analysis of SFe of Shuichang iron deposit in Northern China	(128)
4.5 Case study E: Global estimation of recoverable reserves of the porphyry copper deposit	(131)

CHAPTER 5 A brief discription of geostatistical programming	(133)
5.1 A brief discription of geostatistical software in the world	(133)
5.2 Briefing of CGES V2. 4 and its character	(137)
5.3 Briefing of SMICKS and its character	(142)
5.4 Appendix: Briefing of ISATIS and its character	(183)
5.5 Discussion of some problems about geostatistical programming	(188)
5.6 Some suggestion about geostatistical programming and hardware purchase ...	(191)
APPENDIX	(193)
REFERENCES	(199)

第一章 地质统计学在我国的 应用与发展概述

1.1 地质统计学在我国的应用与发展

1.1.1 发展的背景

地质统计学是法国数学家 G. Matheron 教授于本世纪 60 年代创立并发展的一门集数学与地质采矿为一体的边缘科学。在经过 15 年的发展之后,于 1977 年由美国福祿尔采矿金属有限公司(Flour Mining & Meta Incorporation) H. M. Parker 博士随美中贸易全国委员会矿业代表团来华访问,传入我国,继而得到进一步的发展。地质统计学在 1977 年传入我国是一个偶然的机缘;但从事件发生的原因来看,却存在着必然发生的背景条件。当时,地质统计学已历经 15 年的发展,形成了一套完整的理论和方法体系,并在生产应用中积累了大量的经验。法国矿业界已将其作为储量计算的标准方法,美国、加拿大、英国、澳大利亚和巴西等国家正在大力开展研究与应用。全世界已有 200 个矿山,采用地质统计学方法进行研究。一些有眼光的计算机软件开发公司开始建立和推出地质统计学储量计算方法的软件。在教育界已经有 25 所大学设立了地质统计学课程,工业部门亦开设了多种形式的地质统计学培训班,培养了一批专业骨干人材。1975 年在罗马召开了地质统计学的专业会议,在西方世界的地质和矿业中已有较大的影响。在国际上,业已成熟的地质统计学成为二次大战后随资本主义国家经济发展而得到发展的有力工具。地质统计学为资本主义国家矿业的复苏与发展带来了经济效益,形成了生产力。

从 70 年代后期,地质统计学及其技术逐步为我国管理及从事矿产地质和矿业开发的工业部门及有关单位所重视。地质矿产部、冶金工业部、石油工业部、核工业总公司等工业管理领导部门相继组织力量研究地质统计学的理论、方法,并组织学术交流和进行国际合作。各大地质院校相继开设了地质统计学课程。正是这种良好的社会环境为先进的地质统计学的引入与发展开阔了道路。

传统的地质学在研究地质客体的漫长历史过程中,采用的研究方法主要是描述归纳法。这种方法适应了古老的地质学发展的需要。随着社会生产力的提高,特别是到了 19 世纪末期至 20 世纪初期,随着影响社会进程的近代工业的兴起与发展,对矿产资源的需求大幅度增加,矿业已开始作为一种产业独立于社会之中。社会生产的发展把古老的地质学从单纯的研究地质客体转向以发现矿产资源为己任的目的,于是古老的地质学,为适应社会生产的发展,亟需利用近代自然科学的先进理论、技术方法来武装自己。这就大大地促进了地质学与近代自然科学,如生物学、物理学、化学、力学及数学的结合,结果便相继出现了古生物学、地层学、地球化学、地球物理、地质力学、数学地质等新的地质边缘学科,从而形成了近代地质学。这是地质学发展史上的一次飞跃。这次飞跃集中表现出两大特征:①古老的地质学与近

代科学技术相结合,使得地质学的理论基础更加雄厚,方法更加先进。②随着矿业作为一个独立工业的出现与兴起,地质学的研究内容有了明显的变化,不再是单纯研究地球的理论科学,而是越来越多地需要满足和适应矿业的发展。这样,在研究内容方面便出现了地质学基础理论研究和以寻找及开发矿产资源为目的地质客体的研究。自然,这两方面研究是相辅相成、相互促进的。但这时期在研究方法上,并没有实质性的突破,基本上仍以描述归纳法为主。这种方法属于经验性的定性方法范畴,仍不能适应社会化生产对矿产资源需求量增加的需要,研究方法本身的局限性也限制了地学的发展。譬如,在研究地质事件的随机性方面、在处理日益增多的大量各种信息(数据)方面、对各种地质体在时间、空间的变化上进行定量评价等方面,我国的地质学家和广大地质科学工作者与国外的地质学家一样,感到困惑。从而促使开拓者们开始寻求新的出路和新的方法,于是运用数学方法来研究解决地质问题便是顺理成章的事情。初期,地质学家大都把精力集中在传统统计学(经典概率统计学)与地质学的结合上;后来发现,运用传统统计学有特定的四个基本条件要求:首先是研究对象的纯随机性,即纯随机变量之间在空间位置上不相关;其二,因纯随机变量之间在空间位置上不相关,所以不考虑变量的空间分布;其三,研究的随机变量能够进行无限次重复试验;其四,随机变量的随机事件是相互独立的。这四个基本条件在地质领域里是很难具备的。50年代初,研究者们开始发现并认识到应该把地质领域中随机变量的研究与其空间位置和变量的空间变化关系联系起来。艰苦的探索为地质统计学的诞生与发展奠定了坚实的基础。在这方面,我国的地质学家和广大的地质科学工作者,经过自己的努力,积累了与国外同行有着相同的经验与教训。因此,地质统计学一经传入我国,便立刻为广大的地质科学工作者所认识、所接受了。地质统计学的应用与发展,与计算机技术是紧密联系在一起。在地质领域中,对地质数据处理和解释已扩展为对地质资料的解释推断,它已成为计算机技术在地质矿产领域中最为活跃、发展最快的领域。地质统计学技术的实现是以大量数据的处理为基本条件的,离开了计算机,人工是无法实现的。因此,计算机技术在我国地质矿产领域的应用与发展,为地质统计学的引入创造了物质条件。经济体制的转变对社会的影响是巨大的,也是最为敏感的。敏感的经济工作者和经营者已经意识到,在不远的将来,我国的企业将自负盈亏,以盈利与否作为企业的生存条件。矿山开采的经济效益直接取决于对矿产储量、矿石品位估计的正确程度,矿山企业要求地质勘查单位提供接近客观真实的矿石储量、矿石品位估计。矿山企业表现出的这种倾向,直接影响到地勘单位提交地质勘探储量成果的取向,促进了地勘单位由注重矿产储量规模的倾向向注重提交最接近客观真实矿产储量的方向转变。另一方面,多年来,我国的矿产勘探储量计算、矿山采矿设计储量计算和矿山生产储量计算是脱节的,三个阶段没有形成一个完整的有机生产过程,致使国家对矿产储量的管理与采矿活动脱节。当然,造成这方面的原因是多方面的;但矿产储量计算方法上的局限性,则是一个重要原因。地质统计学储量计算方法弥补了传统矿产储量计算方法上的不足,在地质勘探储量计算、矿山设计和矿山开采三个阶段中,能使其有效地结合起来。它在对矿床品位及储量进行最优局部估计的同时,也可进行整体估计。此外,地质统计学方法在给出块段品位及储量时还给出相应的估计精度、矿床的吨位-品位曲线及对采矿设计十分有用的各种图件及表格,这是十分令人注目的。在社会主义市场经济体制下,矿山生产的客观需要便成为地质统计学在我国得到发展的基础。

1.1.2 地质统计学在我国发展的三个阶段

自1977年地质统计学引入我国至今,大体上经历了三个发展阶段^①。

第一阶段(1977年~1989年11月)。该阶段为起步阶段。宣传普及,学习研讨,发表论文,有关工业部门和个别矿山企业根据自己的需要,独立进行开发研究,构成了该阶段的主要活动内容。

在美国学者 H. M. Parker 将地质统计学的基本概念和内容系统地介绍给我国的数学地质及勘探、矿山设计人员之后,我国有关的学术专业团体的学术活动开展得非常活跃。1980年4月,中国金属学会冶金地质学会在广西桂林召开的第一届遥感地质数学地质学术会议上,有10个单位的代表宣读了他们的地质统计学研究论文。在这次会议上,正式成立了冶金地质系统的“地质统计学协作小组”。随后几年,在中国地质学会数学地质专业委员会,中国金属学会冶金地质学会数学地质、遥感地质及计算机专业委员会,中国核工业部所属学会和中国煤炭学会地质学会,以及矿山地质及采矿工程学会等历届举办的学术会议上,地质统计学的论文不断增多,其地位也日益显著起来。

与此同时,地质统计学的普及工作相继开展起来。地矿、冶金、石油、核工业和煤炭等行业,为普及这门学科,先后以不同的形式举办了学术讲座。地矿部于1980年还设立了地质统计学在储量计算中的应用科研项目,由地矿部储委、北京计算中心、云南地矿局和中国地质大学(武汉)参加,经过四年的研究,完成了专题科研报告,冶金部地质局也设立了地质统计学科研专题,进行地质统计学理论方法研究、程序设计及实际应用,并出版了有关地质统计学专著:《地质统计学及其在储量计算中的应用》(侯景儒、黄竞先,1982,地质出版社),《矿业地质统计学》(侯景儒、黄竞先译,1982,冶金工业出版社)。江西德兴铜矿采用普通克立格法计算了铜矿石储量,并进行了采矿设计,在生产上作了尝试。

此期间,国内外学术交流十分活跃,从1978年起,我国先后派出了许多专家学者到国外学习深造地质统计学。如地矿部中国地质矿产信息研究院李裕伟高级工程师、中国地质大学王仁铎教授、北京科技大学侯景儒教授、有色总公司南昌设计研究院吴庭芳高级工程师、北京有色冶金设计研究总院陈仁宪高级工程师、核工业总公司地质局薛禹选高级工程师等都是这一时期先后派往美国、法国、德国学习的,如今都已成为各单位的这门学科的带头人和骨干。与此同时,国外的地质统计学专家也应邀来华讲学交流。这期间的学术交流有:1984年地质统计学家 Rendu 在安徽铜陵讲课;1985年美国亚利桑那大学 Kim 教授在西安冶金建筑学院作学术报告;1989年4月美国斯坦福大学应用地球科学系主任 A. G. Journel 教授在北京科技大学举办讲座等。

这期间国内出版的关于地质统计学的重要书籍和论文有:《地质统计学》(地质部情报研究所编辑,1980),《地质统计学及其在矿产储量计算中的应用》(侯景儒、黄竞先,1982),《矿业地质统计学》(侯景儒、黄竞先译,1982),《线性地质统计学》(王仁铎、胡光道,1988),《数学地质的方法与应用》(於崇文,1980),《地质统计学及其在储量计算中的应用》(谢锡林、高德秀、谢蕴宏、胡光道,1988)。随着国内外学术活动的开展和有关部门及大专院校教学研究的进展,涌现出一批地质统计学的专家,他们活跃在各条战线上,为地质统计学在国内的

^① 作者在《地质与勘探》1993年第8期上发表的“地质统计学在国内外应用现状”论文中,曾作过发展阶段的初步划分。本书在该基础上,重新进行了更为合理的划分。

深入发展和应用、为开拓我国的地质统计学事业,做出了不可磨灭的历史贡献,如侯景儒教授(北京科技大学)、於崇文教授、蒋跃淞教授(中国地质大学)、李裕伟高级工程师(地矿部)、余金生高级工程师(地科院)、谢锡林高级工程师(地矿部)、王仁铎教授(中国地质大学)、胡光道教授(中国地质大学)、陈仁宽高级工程师(北京有色冶金设计研究总院)、唐昌骏教授(成都理工学院)、陈伯茂教授(成都理工学院)、黄竞先高级工程师(北京有色金属研究院)、薛禹选高级工程师(核工业总公司地质局)、王家华教授(西安石油学院)、李新兴教授(西安石油学院)、李行高级工程师(中国有色金属工业总公司)、李维明高级工程师(武警黄金指挥部地质研究所)、吴庭芳高级工程师(江西有色金属设计研究院)、覃必成(陕西煤田地质勘探公司 186 队)等。

综上所述,该阶段有三个明显的特点:

(1) 大专院校和有关工业部门的研究设计单位是活动的主体,宣传、学术交流和研究应用活动主要是在这个范围内进行。地质、物探、数学和数学地质等专业的一些专家、教授和高级专业技术人员成为地质统计学专业的主力军,侯景儒、黄竞先多次为冶金部等生产部门有关单位举办地质统计学学习班。

(2) 在地质统计学理论方法研究方面,以普通克立格法为主,泛克立格法、对数正态克立格法、因子克立格法也有研究。线性地质统计学是该阶段的主旋律。非线性地质统计学、非参数地质统计学和多元地质统计学等理论领域,涉及得还很少。

(3) 在应用方面,主要是在学习的基础上,各有关单位和有关专业人员结合本职工作,作零星的研究应用。基本属于探索性的开发应用,随意性较大,目的性不强,缺少系统地安排。在地质工作领域里,多应用于物探、化探、遥感数据处理及找矿预测等方面。其它领域涉及得较少。

1989 年 11 月召开的全国第一届地质统计学学术讨论会,标志着地质统计学发展第二个阶段的开始。

第二阶段(1989 年 11 月~1995 年 10 月)。该阶段开始从开发研究与学术交流转向生产实践,与地质勘探和矿山生产相结合。在这一时期,出现了推进地质统计学与生产实践相结合的若干有影响的重要事件。

(1) 1990 年 10 月,西安石油学院与油田结合,研制成功克立格绘图系统,对牛庄油田数据进行了处理,绘出一批地质图件。

(2) 1990 年 12 月,武警黄金指挥部(以下称“指挥部”)黄金地质研究所完成了国家“七五”项目——地质勘探系统软件应用及开发研究。于 1991 年 11 月由国家计委主审通过了项目鉴定。该软件(GEOLOG)是加拿大国际地质技术公司(IGC)研制开发的,指挥部于 1986 年购置该软件英文版软件后,由武警黄金地质研究所进行了全面的汉化开发。经鉴定后的中文版 CGLS、CGES 软件和原 GEOLOG 英文软件都已由中国软件登记中心审定核发了软件著作权证书。该系统软件中的储量计算系统,提供了地质统计学普通克立格法和泛克立格法以及距离反比法。武警黄金地质研究所采用克立格储量计算方法对河北省平泉县洼子店岩金矿、山东省招远县夏甸岩金矿、山东省栖霞县后乔岩金矿、山东省烟台辛安河下游砂金矿和外夹河砂金矿等三个岩金矿床和两个砂金矿床进行了储量计算,取得了满意的结果,在此过程中,还举办了三期克立格法和 CGES 软件培训班,培养软件使用人员 60 余人。

(3) 1991 年 8 月,由地矿部固体矿产勘查评价自动化系统项目(该项目为我国与联合国

开发计划署合作项目)领导小组,为普及地质统计学在固体矿产勘查评价工作中的应用,在北京举办了“地质统计学环境评价软件(GEO-EAS,美国斯坦福大学研制)学习班。由美国地质统计学家 B. L. Gibbs 女士讲授地质统计学原理和 GEO-EAS 软件的使用。同期,国家矿产储量管理局(全国矿产资源委员会前身)又在北京举办了地质统计学短训班,由美国亚利桑那大学 D. E. Myers 教授讲授地质统计学原理和 GEO-EAS 软件。参加上述两次培训班的有 27 个省地矿厅(局)和 18 个省(自治区)储委的技术业务骨干。

GEO-EAS 软件由数据文件管理,数据变量的转换,单变量的统计量计算,变异函数分析,交叉验证,克立格法计算,绘制等值线图、样品分布图、线性回归及散点图等几个相互独立的程序组成。用来进行(二维的普通克立格法)环境评价。

(4) 1991 年 10 月,国家矿产储量管理局在武汉举办“提高矿产地质勘探报告质量研讨班”。在研讨班上,由尹镇南高级工程师普及讲授了地质统计学及储量计算。学员来自地质、储委、冶金、化工、武警黄金指挥部、煤炭、核工业、建材等工业系统 20 多个省(自治区)的基层地质单位。绝大多数地质技术人员来自野外第一线。

(5) 1992 年 1 月,国家矿产储量管理局向各省(自治区、市)矿产储量管理局、矿产储量管理办公室、矿产储量委员会办公室、全国储委油气专委办公室等单位下发了“关于积极支持在矿产和地下水储量报告中应用计算机技术的通知”(国储(1992)7 号文)。“通知”中明确肯定了矿产和地下水储量报告中可以采用新的储量计算理论、方法和计算机技术。实际上,这是对采用地质统计学方法计算矿产储量提交地质勘探报告的肯定,在当时起了积极推进地质统计学储量计算方法的作用。

(6) 1993 年 1 月 13 日,由国家矿产储量管理局牵头成立了有 31 个工业管理部门、研究单位、大专院校参加的“地质统计学应用协调组”,并通过了地质统计学应用协调组组织简则和 1993 年度工作计划。

(7) 1993 年 4 月,在陕西省西安市,在全国矿产储量委员会的支持下,由陕西省矿产储量管理局组织审查,并通过了由国家武警黄金指挥部黄金第十四支队提交的陕西洛南县驾鹿金矿地质勘探储量报告。该报告是全国第一份采用地质统计学储量计算方法及软件系统提交的储量报告,是第一份将地质统计学储量计算方法直接用于地质勘探生产的开创性成果。

(8) 1993 年 8 月,中法合作项目:“地质统计学在中国矿产资源储量评价中的应用”,经地矿部批准立项研究。项目组织单位是全国矿产储量委员会办公室(原国家矿产储量管理局),项目参加单位有德兴铜矿、武警黄金指挥部及北京科技大学等单位。

(9) 1995 年 4 月,由全国矿产储量委员会办公室组织审查,并通过了全国第二份采用地质统计学储量计算方法提交的山西省灵邱县刁泉银铜矿床勘探地质报告(提交单位是冶金部第三地质勘查局三一二队),并同时推出北京科技大学地质系提供的“三维普通克立格法程序系统”。该“程序系统”包括数据库、储量计算及成图三部分内容。

(10) 国家自然科学基金委员会在发展我国地质统计学方面也做了贡献。由侯景儒教授负责的科研项目《多元及非参数地质统计学理论分析及在金属矿床的应用》(1990~1992)得到国家自然科学基金会的资助。该项目在地质统计学理论及应用方面达到了国内领先地位,并通过冶金部鉴定。1993 年,由侯景儒教授负责的另一课题:《空间域及时-空域中多元地质信息的地质统计学理论分析及其应用》(1993~1995)也得到国家自然科学基金会的资助。这

两个科研成果均汇集于他们的两本专著——《矿床统计预测与地质统计学的理论与应用》(冶金工业出版社,1993),《非参数及多元地质统计学的理论分析及其应用》(冶金工业出版社,1994)之中。根据地质统计学发展的现状及地质统计学研究内容的不断扩大,侯景儒教授建议将“地质统计学”扩展为“空间信息统计学”(Statistics of Spatial Information),而且在北京科技大学为本科生、研究生开设了“空间信息统计学”课程。此外,侯景儒教授将若干地质统计学理论成功地应用于冶金部重点科研项目《扬子地台周边及其邻域优质锰矿成矿规律及资源评价》之中,该项目于1997年获冶金部科技进步特等奖。

(11) 1995年10月,全国矿产储量委员会办公室向各省(自治区、市)矿产储量委员会办公室(矿产储量管理局)、全国储委油气专委办、各省(自治区、市)地矿局(厅)、冶金部地质局、中国核工业总公司地质局、化工部地质矿山局、武警黄金指挥部、中国有色金属工业总公司地勘总局地质局、国家建材局地质勘查中心等部门单位,公布了关于“运用地质统计学方法提交地质勘探报告的编写提纲和审查提纲”的试行意见。这个“试行意见”是审查地质勘探储量报告的主管部门关于应用地质统计学方法技术的一个技术性法规文件。标志着地质统计学这一先进的理论、技术在我国业已成熟,得到了国家的承认,在实用的技术方法中有了自己的地位,在应用领域有了自己的位置。这预示着地质统计学发展的第三阶段已经到来了。

第三阶段的特点是:

(1) 为适应生产实践的需要,地质统计学理论的研究更加深入,涉及的方法原理更加广泛,整体理论水平与国际水平接近。除了研究得最为深入的普通克立格法外,非平稳线性地质统计学、非参数地质统计学、多元地质统计学,以及近几年作为地质统计学科前沿的时空域多元信息地质统计学等,都有了较深入的研究。

(2) 在应用方面有了实质性的突破。采用地质统计学方法提交地质勘探成果和开发矿山,已经为生产部门所接受,开始成为地质勘探、油田和矿山开发的实用方法,与生产实践结合得越来越紧密。

(3) 为适应生产的需要,相继开发研制并推出了适于国内生产需要的软件系统。地质统计学的理论研究与相应的软件开发同时并举,把地质统计学的应用推向深入。如德兴铜矿的克立格技术矿山开发系统,西安石油学院的克立格绘图系统KMS,武警黄金地质研究所的地质勘探系统软件,北京科技大学地质系的三维普通克立格法程序系统(3DOK)、三维协同克立格法程序系统(3DCOK)及指示克立格法程序系统(2DIK),地矿部的KPX2.0软件系统。

(4) 地质统计学的应用与发展,已经成为矿产储量管理部门和有关工业主管部门的一项工作内容。

(5) 地质统计学的技术方法已为广大的地质勘探和矿山企业所了解和接受。

第三阶段(从1995年10月开始)。该阶段以全国矿产储量委员会办公室颁发的关于“运用地质统计学方法提交地质勘探报告的编写提纲和审查提纲的试行意见”作为开始,确立了地质统计学的技术性法规地位,进入有计划的发展应用、深入发展的阶段。

该阶段的特点是:

(1) 地质统计学的技术法规将逐步得到完善;

(2) 与生产实践结合得将更加紧密,注重解决实际问题;服务的范围将更加广泛;

- (3) 地质统计学的软件系统将走向成熟,走向市场;
- (4) 无形资源评估将为地质统计学的应用提供更加广阔的市场。

1.1.3 地质统计学在我国的应用概况

1. 在物探、化探、遥感及其他地质数据处理方面的应用

地质统计学用于地质数据处理先于其他领域,有较成功的经验。因为这些数据在大范围内具有方向性的趋势变化,所以常用的方法是泛克立格法。按时间顺序,其应用实例主要有:

- (1) 地质统计学方法简介、计算程序及应用实例(於崇文、侯景儒、蒋跃淞,1978)。
- (2) 地矿部在固体矿产普查进行的1:5万综合调查中,应用对数正态泛克立格法对土壤地球化学测量资料进行了处理(80年代),获得满意效果。
- (3) 华南某地区化探分散流数据处理及异常评价,采用泛克立格法,根据处理结果,将华南某地区划分出四个异常区,并确定出四个异常区的工作顺序(侯景儒、杜百贵,1986)。
- (4) 华北某区化探次生晕数据的泛克格法研究及异常评价(侯景儒、张树泉、张廷勋等,1989)。
- (5) 安徽铜陵地区1:5万化探数据处理的方法技术,根据数据处理结果,对Cu、Au、As、Pb、Zn、Mo、Sn、Ag等八个元素编制了一套对数泛克立格法系列图件,进行成矿预测(宋平玖等,1990)。

(6) 福建某区化探数据的指示克立格研究,验证了高品位区与高概率区相吻合(张树泉、侯景儒等,1992)。

(7) 新疆阿尔泰地区哈巴河幅金矿地球化学异常识别及分数评序方法研究,采用因子协克立格方法(FCK法)圈出Au异常远景区(余金生、蒋金荷、张效民,1993)。

2. 地质统计学在矿产储量计算中的应用

按时间顺序,主要实例有:

- (1) 地质统计学方法在京北某铁锌矿储量计算中的实际应用(侯景儒、於崇文、蒋跃淞,1978)。
- (2) 运用线性地质统计学方法试算南京梅山铁矿、云南金顶铅锌矿北厂矿段某矿体的储量,并相应研制出地质统计学储量计算程序系统(谢锡林、高德秀等,1980~1984)。
- (3) 金堆城钼矿最佳边界品位及其确定的研究(北京有色冶金设计研究总院采矿室,1981)。
- (4) 应用地质统计学方法计算水厂铁矿北山矿体矿石储量的研究(黄竞先、侯景儒、郝欣、任兆平,1982)。
- (5) 德兴铜矿可回采储量总体估计的地质统计学研究(侯景儒、黄竞先,1981)。
- (6) 应用地质统计学计算大冶铁矿尖山(尖林山)矿体的储量(黄竞先、侯景儒、古梅,1984)。
- (7) 采用地质统计学方法,应用计算机绘图软件评价南京梅山铁矿(冶金部鞍山黑色冶金矿山设计研究院,1986)。
- (8) 使用克立格法对南芬铁矿矿石品位与储量的估计(冶金部鞍山黑色冶金矿山设计研究院,1988)。
- (9) 大冶铁矿矿石储量分级的地质统计学研究(侯景儒、古梅,1989)。
- (10) 克立格法在盘古山钨矿储量计算中的应用(吴庭芳等,1989)。

- (11) 加权中位数应用于金厂峪金矿的储量计算(向永生、侯景儒、吴雨沛,1991)。
- (12) 用克立格法计算潼关金矿 505 脉金的储量(高维华,1990)。
- (13) 山西支家地银矿储量的地质统计学估计(据太宗、张树泉、林建阳、侯景儒等,1993)。
- (14) 湖南桃江锰矿储量的地质统计学计算(侯景儒、王志民、潘汉军等,1993)。
- (15) 湖南桃江锰矿最优勘探网度的地质统计学研究(张廷勋,1993)。
- (16) 采用对数泛克里格法,运用“地质勘探系统软件”提交的陕西驾鹿金矿地质勘探储量报告(武警黄金地质所、黄金第十四支队,1993)。
- (17) 采用地质统计学方法编写并提交的山西省灵邱县刁泉银铜矿床勘探地质报告(冶金部第三地质勘查局三一二队,1995)。

3. 在石油及煤田工作中的应用

- (1) 某煤田最优勘查网度的地质统计学研究。研究后提出的勘探网度比原设计节省了 9350m 钻探工作量(陈明阳等,1987)。
- (2) 牛庄油田物探数据的贝叶斯克立格法估计(王家华等,1987)。
- (3) 地质统计学在杉长煤矿区详查中的应用(覃必成、许惠民、任秀娟,1987)。
- (4) 我国北方某煤矿储量的地质统计学估计及其与传统储量计算方法的比较(陈伯茂,1989)。
- (5) 克立格法绘图系统(KMS)在牛庄油田油藏描述技术中的应用(王家华等,1990)。
- (6) 新疆塔里木盆地某石油探区地球化学数据的地质统计学分析(张树泉、侯景儒、李本超,1992)。
- (7) 辽河油田冷东一雷家地区沙三段油藏描述(石油大学(北京)地球科学系石油地质室,1993)。

4. 在环境科学、水文工程地质、农林科学及农田水利中的应用

- (1) 克立格法在灌溉试验站网规划中的应用。选择多年日平均需水量为区域化变量,对灌溉试验站网的最优规划进行选择(张瑞娟,1989)。
- (2) 作物需水量的最优估计(李恩羊、袁新,1989)。
- (3) 作物需水量的空间变异性(袁新、李恩羊,1989)。
- (4) 地质统计学在环境科学研究中的应用(侯景儒、黄竞先,1990)。
- (5) 地质统计学在水文地质及工程地质中的应用(侯景儒、黄竞先,1990)。
- (6) 作物需水量的最优等值线图(李恩羊、余健来,1989)。

从上述应用概况可以看出,1989 年以前,这个时期,地质统计学的应用,基本上属于研究开发性质,真正用于生产,作为一种手段、方法技术提交生产成果,为生产所用比较少,还没有进入生产实践阶段。1990 年以后,情况有了改观,随着在固体矿产勘探储量报告和石油油藏描述技术上的应用,对地质统计学技术方法应用,进入了生产实践阶段,或者说,已为生产所用了。在应用的地质统计学方法技术上,基本上是在线性地质统计学范围,其它方法涉及得还很少。在应用的领域方面,主要用于地质矿产资源范畴,如地质勘探、矿山开发、油藏描述等。在生产应用领域,与国外相比还有一定的差距。

1.2 地质统计学在我国发展的若干问题讨论

1.2.1 与我国矿业开发的适应性问题

地质统计学的创立源于矿业的需要,是随着矿业的发展而发展起来的。地质统计学在我国能否得到长足的发展,从根本上说,完全取决于社会生产实践的需要。在近期一定的时间内,我国矿业开发对其需要的程度,是举足轻重的。我国矿业开发对地质统计学的需要包括两个方面,一是矿业开发本身的需要;二是地质统计学能否适应这种需要。这两个方面缺一不可,缺少其中一个方面,地质统计学都不会发展甚至生存。先谈谈矿业开发本身的需要方面。矿业开发是国民经济的一部分,具有几个不同于其他行业的特点。其一,在矿业开发过程中,围绕着矿权交易的出现,在矿石生产前的地质找矿阶段,矿产勘查不同工作阶段的成果是作为一种商品形式而存在的。也就是说,矿业开发的全过程是一个商品化过程,都可进行商品交易。而有形的产品在未生产出合格的产品之前,是不能作为商品交易的。其二,矿业开发过程中,矿产勘查成果的商品价值是以对矿产资源量和储量的评估来确定的。因此,在矿产勘查成果这一商品中,包含着风险成分,这是一般商品所没有的。其三,矿业开发始终围绕着对未知的矿产资源储量的探索而进行,是一个从未知到真知的过程;由于矿产资源的复杂性、先进科学技术掌握的程度和商品的时空性等因素的影响,对矿产资源储量价值的评估方法呈现多样性,矿产资源储量价值大小往往与不同的评估方法相联系。矿业开发存在的这三个特点,决定了矿业开发的需求,在开发过程中需要有一种技术方法与其正确的价值评估完美地结合起来。要求这种技术方法能够最充分的、科学的、合理有效的利用已取得的信息数据;能够提供评估的可信程度,并把风险性减到最小。地质统计学是研究那些在空间呈现出随机性和结构性的自然现象的科学,它具有最充分利用各种信息量的能力,在方法上能够给出每一估计量相对应的估计方差,而且这种估计是最优化无偏的。这种技术方法上的先进性适应了矿业开发的需要。但是方法理论上的适应并不等于具体生产实践上的适应,这就要求地质统计学不断地完善自己,提高自己,有适应解决具体生产实践的能力,不然遇到的阻力和困难将是不易克服的。

1.2.2 地质统计学在我国地质矿产领域和有关领域产生的影响

1. 在地质矿产领域的影响

首先,地质统计学在数据信息处理上,显示了最大限度的利用信息的能力,并具有科学的处理手段。已成为物探、化探、遥感等数据处理的常用方法之一;在成矿预测和矿产储量计算上,打破了传统储量计算方法一统天下的局面,已被国家主管矿产储量的审批管理机构正式确定为标准储量计算方法之一。以其理论的先进性和方法的科学性,使地质矿产的数据处理的科学水平达到了一个更高的层次。

其二,对地质统计学的应用,深化了对地质勘探工作若干惯用原则的思考。现以勘探工程网度的确定与验证、储量级别与储量误差等问题为例予以说明。在计算储量时,常利用不同级别储量的工程密度,以稀密法得到相对误差来论证储量的可靠程度,并作为储量精度的标准。这是多年来,我国地质勘探工作中惯用的工作方法。近十年来,这种原则受到质疑。全国储量委员会办公室(资源委办前身)还于80年代末组织“矿产储量分类分级”专题组对此问题进行了专题研究,结论是:这种方法缺少科学根据,难以作为衡量储量精度的标准。而在

储量级别与储量误差问题上,人们已经认识到在许多场合下,没有把储量计算误差与空间大小联系起来,其储量误差只是相对误差,并非是储量精度的概念。这类问题的解决,传统的地质勘探工作理论和方法已经无能为力,地质统计学技术方法的出现与应用,使解决这类问题进入一个新的境地。

其三,地质统计学储量计算方法已作为我国的一种标准储量计算方法被确认。它的理论基础、方法原则和技术要求均有别于传统的储量计算方法,原有矿产地质勘探规范的内容,已不能适应该计算方法的需要,需要制定与之适应的地质勘探规范。这种积极的影响,不仅扩展、补充、更新、丰富了我国的地质勘探规范,而且在矿床勘探研究程度要求、勘探类型和勘探工程间距、勘探工作质量要求、储量分类分级、储量计算、矿石工业指标及矿产技术经济评价等若干重要内容方面,起到了重新审议的作用,促进了地质勘探研究工作向更深层次发展。

其四,促进了地质勘探、矿山设计和矿山生产三个工作阶段的一体化。这三个工作阶段应是一个有机的整体。但是,长期以来它们处于相对独立和脱节的状态,这体现在:①矿产储量的脱节。经过矿产储量审批单位批准的地质勘探工作阶段的储量,按工作程序应是矿山设计和矿山开采的储量基础;但是,实际上在矿山储量设计和矿山开采储量计算过程中,相互之间的储量认定并没有受到制约。譬如,批准的1000万t勘探储量,设计储量可能为900万t,矿山开采储量可能有800万t。无形中损失的200万t储量没有受到一点约束,后面的工作阶段,并不对前面的工作阶段负责。②矿石品位上的脱节。其情形与上述情况大体一致。③利用有用元素组分上的脱节。这里主要指的是除主要元素组分外同时还具有工业价值的共、伴生矿床。对这类矿床,设计部门和矿山生产单位主要是依据当时的技术经济条件和主管部门的意见来决定共、伴生有益组分的利用,同样没有严格的制约和约定。往往在矿山生产阶段,改变了原矿山设计中对其伴生矿产的利用要求,这也是常有的事,并没有受到限制。在地质勘探、矿山设计和矿山生产三个阶段,出现的这种独立运行操作的状况,除了矿产资源法规不健全、矿产资源管理机制运行不畅、矿石选冶技术落后等原因外,还有一个重要原因,就是缺少一种实用的技术方法,把矿业开发过程中三个阶段有机的连为一个整体,有效地服务于矿山生产。地质统计学技术方法具备的特点,适应了这种需要。根据地质统计学编制的变差图,使矿床变化性的定量描述成为可能,并利用提供的矿床变化信息,制定合理的勘探方案;根据建立起来的不同大小储量块段的品位-吨位曲线图,将使我们有效地论证块段大小、边界品位、矿石利用、开采成本、利润和开采方法之间的关系,并在计算出全矿床每个最小开采单元储量的基础上,确定出既经济又合理的开采方案,控制矿石产量和质量,进而进行矿石质量预报。地质统计学技术方法的出现,为矿业开发三个阶段连续运作提供了一条可行的途径。

2. 在有关领域产生的影响

地质统计学的理论基础和研究对象是以不同条件下的区域化变量在空间域及时间-空间域的分布规律为内容的。因此,它的适用范围已不局限在地质矿产领域,已发展成为用来研究自然界具有随机性和规律性双重特征变量的具有普遍性的科学方法。应用领域不断扩大,比如,在环境科学、农田水利、土壤学、气象、渔业、森林、海洋等领域已开始涉及,其中在环境科学、渔业、农业土壤等领域已得到了成功的应用。随着应用领域的不断扩大和方法本身的不断完善,地质统计学将发展成为这些学科领域用来研究自身问题的工具。