

海南师范大学学术著作出版项目资助

Study on the Ecological
Geochemistry of Heavy Metals
and Health of People

李 勇◎著

重金属的 生态地球化学与人群健康研究

Tl Sb Cu
Hg Cd Zn Cr As Pb
Ni



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

海南师范大学学术著作出版项目资助

Study on the Ecological
Geochemistry of Heavy Metals
and Health of People

李 勇◎著

重金属的

生态地球化学与人群健康研究

Tl

Sb

Hg

Cd

Cu

Zn

Cr

As

Pb

Ni



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

• 广州 •

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

重金属的生态地球化学与人群健康研究/李勇著. —广州: 中山大学出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 306 - 04967 - 4

I. ①重… II. ①李… III. ①重金属污染—地球化学—研究 ②重金属污染—影响—健康—研究 IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 164685 号

出版人: 徐 劲

策划编辑: 廖丽玲

责任编辑: 廖丽玲

封面设计: 林绵华

责任校对: 黄浩佳

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84110283, 84111996, 84111997, 84113349

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 12.25 印张 267 千字

版次印次: 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

序

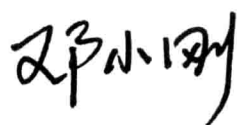
环境问题是一个全球性问题，是社会经济发展过程中不可承受之痛。发达国家在发展过程中，在创造灿烂的工业文明的同时，大多经历了“先污染，后治理”的发展路子，并为之付出了沉重代价。处在 21 世纪之初的中国，深刻认识到发达国家发展路子的弊病，为避免走“先污染，后治理”或“边污染，边治理”的发展老路子，提出了牢固树立尊重自然、顺应自然、保护自然的理念，坚持绿水青山就是金山银山，加快推进生态文明建设，加快形成人与自然和谐发展的现代化建设新格局。

在大气污染、水污染加剧的同时，我国一些地区土壤存在不同程度的重金属污染。重金属作为重要的环境污染物，通过食物链等途径进入人体，对人群产生严重的健康效应。例如，“痛痛病”就是人类食用含 Cd 的大米，Cd 在人体内把骨骼中的 Ca 置换导致的骨头病；“水俣病”是因人类饮用被甲基汞污染的水体或食用含甲基汞的鱼虾，甲基汞被人体肠胃吸收，造成生物累积，侵害脑部和身体其他部分而引起的有机汞中毒。2011 年，国务院批复了《重金属污染综合防治“十二五”规划》，将重金属污染综合防治上升到了国家层面。

本书分为两部分，第一部分是理论部分，系统介绍了重金属的生态地球化学行为，即重金属在土壤、水、植物和大气等环境介质中的来源、分布、存在形态、迁移转化方式、生态效应和重金属的健康风险评价理论基础和评价模型。第二部分是实践部分，以全国原发性肝癌的高发区之一——佛山市顺德区和珠江三角洲地区为研究区域，探讨顺德肝癌高发区蔬菜土壤重金属的来源，深入分析肝癌高发区蔬菜土壤中 Ni、Cr 的空间热点，通过建立土壤—蔬菜重金属的含量关系模型，预测土壤重金属含量和蔬菜重金属含量，进行风险评价，探讨了肝癌高发区人发重金属的来源，分析了人发含量的影响因子。在珠江三角洲地区，通过构建土壤重金属预测预警模型，探讨基于通量模型和“时空模型”的预测预警方法，从而为土壤重金属生态地球化学管理手段提供理论依据和实践样本。本书是作者近年来对重金属生态地球化学研究成果的总结，初步构建了重金属生态地球化学的研究框架，并对珠江三角洲地区环境重金属的研究进行有益尝试，为原发性肝癌的环境致病因子的进一步研究探索了研究方向。

本书的研究方法和研究内容不仅对珠江三角洲地区环境重金属的防治工作具有积极意义，同时也为其他地区环境重金属污染防治工作提供了有益的参考和借鉴。

是为序。



海南省生态环境保护厅厅长

前 言

重金属的生态地球化学主要研究重金属在土壤、水、植物和大气等环境介质中的来源、分布、存在形态、迁移转化方式以及生态效应等。重金属通过生态地球化学行为进入人类食物链被人体吸收或者直接进入人体，当超过一定的含量时就会对人体健康产生影响。

经分析流行病学数据发现，佛山顺德区是全国原发性肝癌的高发区之一。为了研究顺德区原发性肝癌的环境致病因子和珠江三角洲环境预测预警机制，笔者在攻读研究生学位期间，作为技术骨干从事“珠江三角洲肝癌—鼻咽癌高发区生态地球化学环境与人群健康调查研究”和“珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学环境预警预测”等课题研究。本书主要是通过梳理笔者在学习和工作期间已发表研究成果，探讨重金属的生态地球化学与人群健康的关系，以及建立土壤环境预测预警模型。

本书共分10章，第1章介绍了生态地球化学领域的核心概念，以及当前的研究进展；第2章介绍了重金属在环境介质中的生态地球化学行为，以及其暴露途径；第3章介绍了重金属的健康风险评价理论基础和评价模型，重点介绍了Hg、Cd、As、Cu、Zn、Ni、Cr、Se、Sb、Sn、Tl等重金属对人体的健康效应；第4章介绍了土壤重金属来源途径及解析方法，探讨了顺德肝癌高发区蔬菜土壤重金属的来源；第5章介绍了土壤重金属空间分布模型，深入分析了肝癌高发区蔬菜土壤中Ni、Cr的空间热点；第6章阐述了土壤重金属缓变型地球化学灾害特征识别；第7章介绍了土壤重金属预测预警模型，探讨了基于通量模型和“时空模型”的预测预警；第8章在土壤—蔬菜重金属含量关系模型的基础上，通过预测土壤重金属含量从而推算出蔬菜重金属含量；第9章介绍了土壤重金属生态地球化学评价方法和管理手段，探讨了土壤和蔬菜重金属的风险评价；第10章探讨了肝癌高发区人发重金属的来源，分析了人发中重金属含量的影响因子。

写作过程中，周永章教授对全书提出了宝贵意见。研究过程中，预测预警数据得到中国地质科学院物化探研究所周国华研究员和广东省地质调查院的大力支持。出版过程中，得到了中山大学出版社廖丽玲老师的帮助。在此一并表示衷心的感谢。同时，感谢海南师范大学博士科研启动资助项目的支持，感谢本书中引

用文献的作者。除了书后列出的参考文献外，还有一些可能没有列入，请原作者原谅。

限于本人的学术水平，本书难免存在不足和欠妥之处，诚恳欢迎各位同仁批评赐教。

李 勇

2014 年 8 月 6 日

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 核心概念	(1)
第二节 研究进展述评	(6)
第二章 重金属生态地球化学行为	(12)
第一节 土壤中重金属的生态地球化学行为	(12)
第二节 水体中重金属的生态地球化学行为	(18)
第三节 植物中重金属的生态地球化学行为	(24)
第四节 大气颗粒物中重金属的生态地球化学行为	(28)
第五节 人体重金属的生态地球化学行为	(33)
第三章 重金属的健康风险评价及其健康效应	(37)
第一节 健康风险评价基础理论	(37)
第二节 重金属的健康风险评价模型	(40)
第三节 重金属与人体健康	(47)
第四章 土壤重金属生态地球化学来源解析	(71)
第一节 土壤重金属来源途径	(71)
第二节 土壤重金属来源解析方法研究	(73)
第三节 顺德肝癌高发区土壤重金属的来源解析	(75)
第五章 土壤重金属生态地球化学空间分析	(84)
第一节 土壤重金属空间分布模型	(84)
第二节 珠三角土壤 Cd 的空间分布特征	(86)
第三节 肝癌高发区蔬菜土壤中 Ni、Cr 的空间热点分析	(88)

第六章 土壤重金属缓变型地球化学灾害 (96)

 第一节 土壤重金属形态含量的分布特征 (96)

 第二节 重金属总量对土壤重金属形态的影响 (99)

 第三节 土壤重金属的缓变型地球化学灾害识别及其特征 (100)

第七章 土壤重金属生态地球化学预测预警..... (107)

 第一节 生态地球化学预测预警..... (107)

 第二节 基于通量模型的预测预警..... (110)

 第三节 基于时空模型的预测预警..... (125)

第八章 土壤—蔬菜系统重金属特征与预测预警..... (133)

 第一节 数据来源..... (134)

 第二节 模型构建..... (135)

 第三节 土壤—蔬菜系统中 Pb 的含量特征 (136)

 第四节 土壤和蔬菜 Pb 的预测预警 (141)

第九章 土壤重金属生态地球化学风险评价及管理..... (148)

 第一节 土壤生态地球化学风险评价方法..... (148)

 第二节 肝癌高发区土壤重金属环境风险评价..... (150)

 第三节 珠三角蔬菜重金属 Pb 的健康风险评价 (159)

 第四节 土壤重金属生态地球化学风险管理..... (160)

第十章 顺德肝癌高发区人发重金属来源及其影响因子..... (162)

 第一节 人发样品采集及测度..... (163)

 第二节 人发重金属含量特征..... (164)

 第三节 人发重金属的来源及其影响因子..... (165)

附 录..... (171)

参考文献..... (174)

第一章 绪 论

重金属的生态地球化学行为包括了重金属在环境介质中的来源、空间行为、赋存状态、迁移、转化规律，及其产生的生态效应、健康效应等。本章主要介绍生态地球化学和人群健康研究领域主要的核心概念，以及对其研究内容和研究方法的进展情况进行评述。

第一节 核心概念

一、重金属

重金属一般指密度大于 4.5 g/cm^3 的金属，如铅 (Pb)、砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、铜 (Cu)、金 (Au)、银 (Ag) 等。有些重金属通过食物进入人体，干扰人体正常生理功能，危害人体健康，被称为有毒重金属。这类金属元素主要有 Pb、Cd、Cr、Hg、As 等。USEPA (美国国家环境保护局) 列出 13 种要特别注意的有毒重金属，即 Hg、Cd、As、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni、Tl、Sb、Se、Ag、Be。上述有毒重金属中，任何一种都能引起人的头痛、头晕、失眠、健忘、神经错乱、关节疼痛、结石等，还有可能导致人体患上癌症，如肝癌、胃癌、肠癌、膀胱癌、乳腺癌、前列腺癌等。

我国制定的有关环境标准和规定对重金属的含量有明确规定，如《我国无公害蔬菜上的卫生指标规定》《地表水环境质量标准基本项目标准限值》《土壤环境质量标准》《环境空气质量标准》等。

二、生态地球化学

生态地球化学是生态学与地球化学结合的产物，它以元素 (及其化合物) 在生物—地质复合系统中的循环为基础，以地球化学及其与环境、生物等交叉的

边缘学科的方法原理为依托,以元素对人的影响为核心,研究元素在系统中的分布分配、迁移转化规律,评价其生态效应。它也是从全国多目标区域地球化学调查和应用实践中产生的科学理论,是一项以多目标区域地球化学调查为基础,以生态地球化学评价、生态地球化学评估、生态地球化学预警和生态地球化学修复为主体的系统工程。它以元素地球化学循环原理为基本理论,以土壤圈为核心评价地球系统的技术路线。

较“生态地球化学”一词早 60 多年,由苏联科学家提出了“生物地球化学”的概念。生物地球化学研究包含了自然界中化学、物理、地质和生物等多个过程及其相互作用的研究,这些过程和相互作用控制了自然环境(包括岩石圈、生物圈、水圈和大气圈)的发展方向、过程和结果。概括地说,生物地球化学关注不同圈层的化学物质循环及其与生物的相互作用,相对于生态地球化学来说,是针对“过程”开展研究的一门科学。生物地球化学是生态地球化学的研究途径之一,或者说生物地球化学为地球化学的生态效应评价提供了有效手段。生物地球化学是生态系统形成、发展、演化的驱动力之一,是“因”之一;生态地球化学是生物地球化学、元素地球化学、环境地球化学、土壤地球化学等一系列地球化学过程所产生的生态学状态,是“果”。生态地球化学以生态系统为研究对象,在城市、山地、湿地生态系统等不同研究对象基础上,发展了城市生态地球化学、山地生态地球化学和湿地生态地球化学。

1. 城市生态地球化学

城市生态地球化学是研究城市生态系统各要素中元素或化合物的组成特征、来源、含量、形态、迁移转化规律及其对人类和其他生命体的生态(环境)效应的科学。城市生态地球化学评价的对象主要是城市生态环境中的元素和化学物质,其目的主要是评价元素和化学物质在城市环境中的动态平衡状态,阐明元素或化学物质对城市生态环境影响的性质、程度和后果(功能变化),达到保持生态环境平衡和可持续发展的要求。

2. 山地生态地球化学

山地生态地球化学作为一门新学科的兴起具有重大意义,涵盖了山地生态学和地球化学等学科,它以生态学和地球化学的方法原理为依托,以研究山地系统中元素及其化合物的分布、迁移转化规律为核心,以探索山地生态环境的演替趋势为目的,建立评价山地生态环境在自然和人为影响下的生态效应标准。山地往往具有较大的海拔梯度,气象、水文、生态指数在较短的水平距离内产生较大的改变,一些海拔较高的山体甚至表现出从热带到寒带的所有气候、水文和生态特

征,山地系统中生物多样性高,气候、水文和生态序列完整,因此山地生态地球化学的发展、演化具有其独特性、多样性和复杂性。

3. 湿地生态地球化学

湿地系统包括低潮时水深不超过 6 m 的水域,也可包括邻接湿地的河湖沿岸、沿海区域以及湿地范围的岛屿或低潮时水深超过 6 m 的水域。湿地生态地球化学研究湿地生态系统物理、化学与生物过程、动态和机理、过程之间和过程与功能之间的关系。

三、生态地球化学评价

生态地球化学评价的理论基础是元素地球化学循环原理。元素地球化学全球性循环、区域性循环和局部性循环,分别具有不同规模、特征、功能及其生态效应。相应形成全球生态地球化学评价,研究整个生物圈地球化学循环及其生态效应,属于全球生态学研究范畴;区域生态地球化学评价,研究大流域、大地域地球化学循环及其生态效应,属于区域生态学研究范畴;局部生态地球化学评价,研究生物个体和种群层面地球化学循环及其生态效应,属于局部生态学研究范畴。区域生态地球化学评价是针对流域或区带(面积范围为 $n \times 10^2 \text{ km}^2 \sim n \times 10^6 \text{ km}^2$)内元素和化合物分布特征,通过对元素及化合物的来源示踪及迁移途径研究,评价它们对生态系统及各组成要素的影响,预测其未来变化趋势。

四、生态地球化学预测预警

生态地球化学预测预警是指利用生态地球化学的理论与方法,预测地球化学环境的变化趋势及其生态环境效应,对可能引发的生态安全问题提出警示。而区域生态地球化学预警(early warning of regional ecological geochemistry)则是指通过采集和分析生态系统中物质迁移、转化的各种参数,对生态系统中物质时空演变的未来趋势及其生态效应的预测、预报。

生态地球化学预测预警是建立在对生态系统现实安全性和地球化学影响因素研究与评价的基础上,通过建立影响要素演化趋势的预测模型,并根据人类可持续发展对生态环境的要求,对危险程度提出警示,并重点强调要素指标的演化趋势和速度产生的影响及后果。

五、缓变型地球化学灾害

缓变型地球化学灾害是通过长期积累而存在于土壤或沉积物中的包括重金属和有机污染物在内的环境污染物,因环境物理化学条件(例如温度、pH 值、湿度、有机质含量等)的改变减小了环境容量,某种或某些形态的污染物大量地被重新活化和突然释放出来并造成严重生态和环境损害的灾害现象。这种灾害具有明显的特征,其定量数学模型可较完整地概括出环境系统从“干净”到“污染”再到“灾害”的整个过程,可以用于灾害的风险概率评估、预测、灾害爆发轨迹等方面的研究,为土壤污染防治和灾害预警提供了定量研究工具和可供实际采用的基本手段,对当前国土资源调查中的“生态环境地球化学评价”具有重要的借鉴意义。

典型缓变型地球化学灾害的演化过程是具有多重套合结构特性的非线性过程,可以划分为 3 个演化阶段,每个阶段之间各内蕴一个具有特定数学特征的临界点。如图 1-1 所示,横坐标表示环境系统的污染物可释放总量(total releasable content of the pollutant) TRCP (C),纵坐标表示环境系统中的活性污染物总浓度(total concentration of active specie) TCAS (Q),两条虚线分别表示一阶导数和二阶导数的图形。随着 TRCP 的增长,TCAS 的增长趋势发生变化,当 TRCP 的增量为 ΔC 时,TCAS 增长了 ΔQ_1 ,随着污染物浓度的累积,同样的 ΔC 的增长,TCAS 增长了 ΔQ_2 , $\Delta Q_2 \gg \Delta Q_1$,即 TCAS 与 TRCP 的关系是非线性的,可以用多项式表示如下:

$$Q = a_0 + a_1 C + a_2 C^2 + a_3 C^3 + \cdots + a_n C^n \quad (1-1)$$

在一个演化周期内,该多项式的最高次数一般为 3。式中一阶导数、二阶导数为零处分别代表缓变型地球化学灾害爆发的临界点、爆发点。具有特定数学特征的临界点包括:

爆发临界点 A,当 $Q' = Q'' = 0$ 时,曲线左侧向下凹,右侧向上凸;

爆发点 B, $Q' = \max$ 、 $Q'' = 0$ 时,曲线向上凸;

积累临界点 Z, $Q'' = \min$ 时,曲线左侧向上凸,右侧向下凹。

六、地方病

地方病亦称生物地球化学性疾病,系指在自然环境中由于地壳元素分配的不均匀、个别微量元素的含量超过或低于一般含量而直接或间接地引起生物体内微量元素平衡严重失调时产生的特殊性疾病。它有以下三个特征:一是发生在某一

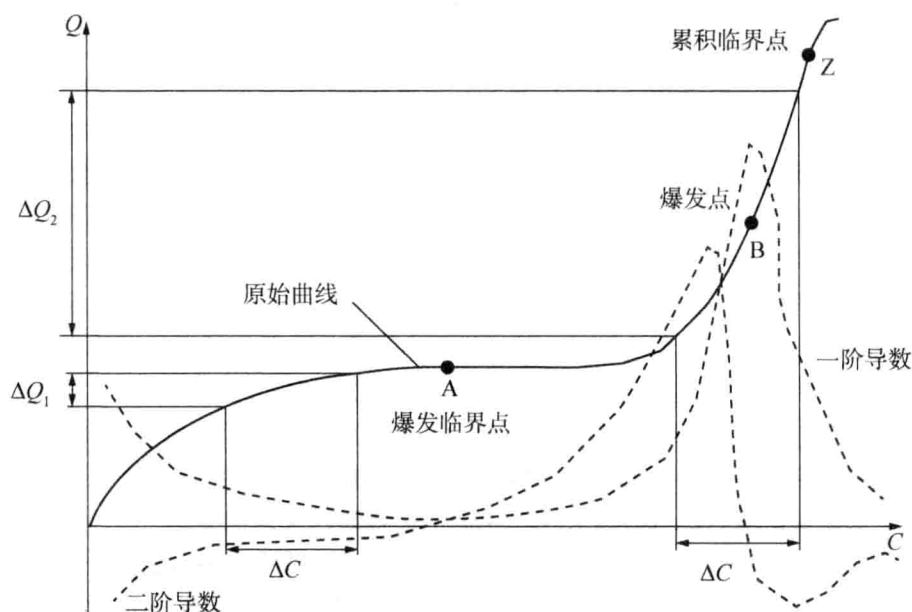


图 1-1 污染物缓变型地球化学灾害数学模型

特定地区，同一定的自然环境有密切的关系；二是通常由微量元素失衡引起并在一定地域内流行，年代比较久远；三是有相当数量的患者表现出共同的甚至奇异的病症。

由于地表化学元素迁移的强度和速率因地而异，生命元素在地表的分布是不均匀的。生物地球化学营养链中的化学元素含量异常会引起生物地球化学地方病，然而生物地球化学地方病的地理流行是受许多因素影响的。致病元素的异常程度与生物地球化学地方病患病率的关系是一种概率统计关系。一些生命元素（如碘、氟、硒、铜等）缺乏或过剩的程度愈严重，生物群体中代谢障碍的个体数目愈多，患病率愈高。从跨自然地带和自然地区的大面积的统计数据可以看出，生命元素的异常程度与生物地球化学地方病患病率的相关关系服从生物最适浓度定律和地球化学生态学定律。

七、医学地质学

医学地质学（medical geology）是研究地质材料和地质过程对动物和人类健康影响的学科，是处理自然地质因素和地质环境与生态环境间关系的科学，是认识人类健康与疾病的地理分布及其成因的学科，是采用深入而广泛的多学科综合

知识和手段来认识、解决和改善健康与疾病问题的学科。它的研究范围包括确定和表征环境中有害物质的天然和人为来源,探索导致疾病的生物的、化学的、物理的以及其他因素的变化和运动规律,并研究这些因素是通过什么途径对人类产生健康和疾病影响的。

一般医学地质学的研究对象涉及如砷、汞、氟、碘、硒等微量元素,灰尘,有机物,放射性物质,微生物,病原体,局域环境污染乃至全球气候变化。微量元素可以以气体、液体和固体三种形态进入人体。第一种途径是天然岩石中的微量元素通过风化作用和人为污染进入土壤,土壤中的微量元素经谷物、蔬菜和其他食品进入人体;第二种途径是天然岩石和土壤中的微量元素通过淋滤作用和人为污染进入水体,水中的微量元素被人直接饮入或水进入动植物体内后被人间接食用进入人体;第三种途径是地质运动、火山活动、人为活动形成的大气飘尘,一定粒径的飘尘可经呼吸道进入人体并在肺部沉积下来,它们也可进入水体和动植物后再被人体摄入,从而影响人体健康。医学地质学所涉及的疾病与健康问题有:呼吸道疾病(由煤的使用、粉尘和氨引起);与微生物和饮水有关的疾病;肌肉失常、心血管疾病和癌症;常见的砷中毒和与碘、氟、硒等有关的疾病;火山粉尘所致疾病;与土壤有关的疾病等等。

第二节 研究进展述评

随着重金属生态地球化学与人群健康研究的不断深入和新技术的快速发展,重金属的研究领域和研究程度也不断扩大和深入。例如,从测定土壤、植物中重金属全量到对土壤中重金属生物有效性的研究,而且细分元素价态,因为价态不同,毒性也不一样,如 Cr^{6+} 的毒性要远强于 Cr^{3+} ;从单一元素研究到多元素之间相互作用研究;从研究重金属的环境地球化学特征到重金属与体液之间的相互作用机制研究。

一、研究内容

(一) 重金属的生物有效性

重金属的生物有效性是衡量重金属元素迁移性和生态影响的关键参数。对于微量元素的生物有效性讨论,主要集中在其定义和评价方法上。

基于化学和生物学,“生物有效性”有两种不同的定义。生态毒理学家定义

“生物有效性”为物质监管剂量的一部分，这部分能通过暴露途径到达血液而且在体内运输到一个生态毒理的靶位。“生物可给性”是指一种物质的一小部分能被体液溶解，因此可以被吸收。地球化学家定义了“地质有效性”为化合物总量的一部分，这部分通过物理的、化学的和生物的过程，从地球物质中被释放进入环境或者生物界面。在生态毒理的背景下，“地质有效性”类似于“生物可给性”，但是“生物可给性”强调了在毒物的整个毒性中，地球物质的毒物形式所起的重要作用。对于地球物质中的大多数潜在毒物来说，存在如下一种关系：潜在毒物总量 > “生物可给性” > “生物有效性”。

生物有效性的评价方法较多，根据不同的研究对象可归为两类，即直接或间接的物理化学法和生物学评价法，物理化学法包括化学总量预测法、化学一步提取法、顺序提取法、自由离子活度法（唐南膜平衡法）等；生物学评价法包括植物指示法、微生物学评价法等。此外，在大气颗粒物和污染土壤经口无意摄入的暴露途径中，其生物有效性评价主要采取动物实验和体外实验两种方法。动物口服毒性实验的结果通常被认为是相当可靠的，但这种方法的应用受到其相对较长的实验周期和较高的实验费用的限制。许多研究均表明，基于生理学的体外实验，与动物实验的结果表现出良好的相关性。该方法操作简单，还能克服体内实验的诸多缺点。

（二）重金属元素间的交互作用

重金属元素间的交互作用及其生态效应逐渐成为医学地质学发展的重要方向之一。污染毒理效应的实验研究不仅采用大鼠、兔、豚鼠、蛙和狗等常规动物，而且还涉及鱼、虾和藻类等水生动植物，以及水稻、小麦和蔬菜等作物甚至土壤微生物；不仅以毒性大小或半致死剂量作为毒理效应的衡量指标，而且还研究其对生物产量的影响和有毒元素在体内的积累情况。

重金属交互作用具体表现在拮抗、协同和加和 3 个方面。从某种程度上而言，重金属产生拮抗作用的直接原因是位点竞争。而协同作用的产生和强度与各组分加入的顺序和比例有关，而且混合物组成及各组分（元素）的比例是决定混合物毒性的重要因素。修瑞琴等发现，当 Ni 和 Cd 以浓度比 1:1 加至石斑鱼生活的水体中时，表现为协同作用；但以其毒性比 1:1 加入时，则表现为先协同后拮抗。加和作用通常有两种，即浓度加和与效应加和。莫罗（Moreau）等认为，两种重金属是非相互作用，但作用模式相同时，联合毒性应等于浓度加和，如果作用模式不同，联合毒性则是效应加和。

此外，周启星等分析了复合污染生态毒理效应的定量关系，发现重金属污染物本身的化学性质对复合污染生态效应所起的作用，要比其浓度组合关系的影响

小得多；重金属污染物暴露的浓度组合关系更为直接，在一定条件下甚至起决定作用。这一研究结果纠正了“复合污染生态毒理效应不仅取决于化学污染物或污染元素本身的化学性质，还与其浓度水平有关”的共识。

（三）重金属在人体中的暴露途径及其毒理动力学

大量的医学地球化学研究主要集中在岩石、土壤、沉积物中的化学元素是怎样通过水或者蔬菜传输进入食物链的，而且研究区域地球化学的变化是怎样通过饮食不足的必需元素，或者饮食过量的毒性元素导致疾病丛生。随着研究的深入，出现了一门新的学科——“毒理地球化学”，这门学科主要研究地球物质与体液之间的化学作用，以及这些相互作用可能影响毒性的机制。国内在这方面的研究成果尚不多。

重金属元素存在于地球物质中，如土壤和灰尘等，它们的主要暴露途径包括肠胃道（摄取）、呼吸道（吸收）和皮肤（经皮吸收）。毒理动力学是研究一种毒物和它最终效应的生理过程。该生理过程通常涉及 ADME（毒药物动力学），包括了吸收、分布、新陈代谢和排泄/排除四个过程。当一种潜在的有毒物质来源于地球物质和在体内的转化时，它以化学形式强烈地影响其毒理动力学，以及在血液、器官和组织上的生物有效性，因此，具有生态毒理指示效应。

二、研究方法

环境地球化学和生态毒理学中研究重金属的方法大量地应用于生态地球化学与人群健康研究。如对重金属元素的总量进行测定的酸法和碱法、对重金属元素的赋存形式进行研究的连续提取法及其后来的改进、对有毒有害元素联合作用的生态毒理技术，都已经发展得比较成熟。在揭露重金属在土壤中的来源和表征它们的区域变异方面，多元统计和地学统计的联合成为可能。此外，有大量的化学和毒理学的方法用于评估重金属与人体相互作用及其潜在毒理效应。下面主要介绍用于评估重金属与人体相互作用产生潜在毒理效应的方法及多元统计和地学统计在这方面的应用。

（一）环境地球化学和生态毒理学方法

评估微量元素与人体相互作用产生潜在毒理效应的方法包括：生物可给性和生物耐久性体外测试、生态毒理体外测试、生态毒理体内测试和生物监测。

生物可给性测试用于测量模拟气体、肠道和肺液中从地球物质提取的金属和其他物质的短期溶解度。生物耐久性测试用于测量地球物质和其他物质的长期溶