

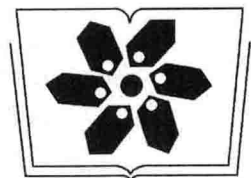


乌江流域水库汞的生物地球 化学过程及环境效应

冯新斌 等◎著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

乌江流域水库汞的生物地球 化学过程及环境效应

冯新斌 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是我国第一部有关水生生态系统汞的生物地球化学过程及其生态环境效应研究的系统性成果专著。全书共7章,系统介绍了以作者为学术带头人领导的研究组近10年来对我国乌江流域水库中汞迁移转化的生物地球化学过程、流域尺度上水库汞的生物地球化学循环的质量平衡关系和水库生态系统汞的食物链传输规律及其生态环境效应的研究成果。主要涉及的内容包括:乌江流域干流和支流水库汞的生物地球化学过程、乌江流域水库汞的质量平衡、乌江流域水库汞在食物链中的传输与累积、乌江流域水库汞的生物地球化学过程影响因素等。

本书是一部成果专著,也是一部系统介绍水生生态系统汞的生物地球化学循环研究理论、方法和思路以及相关研究动态的著作,可供环境地球化学、环境化学、环境工程、环境科学等学科的研究人员和国家各级环保部门研究人员,以及高等院校和科研院所相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

乌江流域水库汞的生物地球化学过程及环境效应 / 冯新斌等著. —北京:科学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-03-043040-3

I. ①乌… II. ①冯… III. ①乌江-流域-水库-汞-生物地球化学
②乌江-流域-水库-汞-环境效应 IV. ①X142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 011399 号

责任编辑:霍志国 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:24 1/2 插页:4

字数:570 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

致谢与说明

本书的研究成果得到以下项目的资助，特此感谢！

1. 国家自然科学基金重点项目：乌江流域水库系统中汞的生物地球化学过程及其生态环境效应（编号 40532014），2006. 01 ~ 2009. 12。
2. 国家重点基础研究发展计划项目：我国汞污染特征、环境过程及减排技术原理（编号 2013CB430000），2013. 01 ~ 2017. 08。
3. 国家自然科学基金青年科学基金项目：西南高汞区水体/大气界面间汞交换通量的研究（编号 40803036），2009. 01 ~ 2011. 12。
4. 国家自然科学基金面上项目：西南高汞区湖泊/水库富营养化对甲基汞产率的影响（编号 40873085），2009. 01 ~ 2011. 12。
5. 国家自然科学基金面上项目：网箱养鱼对水库汞甲基化过程的影响机理研究（编号 40973083），2010. 01 ~ 2012. 12。
6. 国家自然科学基金面上项目：富营养化水体沉积物中汞的甲基化/去甲基化机理研究（编号 41273099），2013. 01 ~ 2016. 12。

序

我国科学工作者针对环境中汞的来源、行为和危害的研究始于20世纪70年代初，早年取得了一些不错的研究成果，为我国环境保护和污染控制提供了重要的科学支撑。90年代以来，在我国签署持久性有机污染物公约的推动下，有机污染物成为环境界研究热点，但包括汞在内的重金属研究发展相对缓慢。国内继续从事汞研究的队伍寥寥无几，冯新斌研究组恰恰是少数在此领域坚持下来，而且做出卓越成就的队伍。

从20世纪末开始，决策部门和科学界重新认识到我国环境重金属污染的严峻形势，加上国际环境界对汞健康危害及全球传输潜力认识的加深，兴起了新一轮环境汞污染研究的热潮，我国重金属和汞的研究再次受到普遍关注。尽管如此，我国关于汞的研究总体上明显滞后于发达国家，但冯新斌研究组孤军突起，在关于我国环境中汞的来源、行为、归趋、食物链积累和暴露风险研究方面已经走在国际前沿，冯新斌研究员本人自然成为本领域的领军人物，并且在国际汞研究领域有着广泛影响。

《乌江流域水库汞的生物地球化学过程及环境效应》一书恰恰是在这样的背景下，根据冯新斌研究组多年的系统积累，以乌江流域梯级水库汞为对象开展一系列创新研究所取得成果的系统总结。

本书内容极为丰富，既有系统严谨的实验分析方法，又有全面翔实的水库调查实例。涉及的内容很广，包括：环境介质中汞的研究方法、水库汞的生物地球化学特征、水库汞质量平衡、汞在食物链传输与累积规律以及水库汞生物地球化学过程的影响因素等。著者将乌江流域水库汞的生物地球化学特征与水库演化历史结合起来进行了翔实的论述，揭示了汞在水库水体、沉积物、生物体中的分布特征和变化规律以及水-气界面和水体-沉积物界面间的交换过程，提出我国水生生态系统汞的生物地球化学循环特征明显不同于北美、北欧等地区研究结果的新观点。

本书系我国水生生态系统汞的生物地球化学循环研究的首部专著，全面总结了我国西南高汞背景区乌江流域水库汞的生物地球化学新特征，在水生生态系统汞的生物地球化学循环方面获得了新认识。目前，我国对敏感生态系统汞的生物地球化学过程研究还处于探索阶段，本书的出版将给相关研究人员以新的启迪，也必将促进全球水库汞生物地球化学研究的发展。

在本书出版之际，谨向冯新斌研究员表示祝贺。

陶澍

2015.1 北京大学

前 言

汞 (mercury, Hg) 是有毒、人体非必需的重金属元素, 已被定义为一种持久性、生物积累性的有毒物质 (PBTs)。汞作为一种全球性的污染物, 已受到世界各国的普遍关注。2009 年 2 月, 在肯尼亚举行的联合国环境规划署 (UNEP) 第 25 届理事会上, 世界各主要国家同意建立全球汞控制公约, 并决定在 2010 ~ 2013 年召开 5 次政府间谈判委员会系列会议 (INCs), 为一项具有法律约束力的全球汞控制公约的正式签署做准备。2013 年 2 月在日内瓦召开的第 5 次政府间谈判委员会上, 140 多个国家和地区的代表同意签署该公约, 并命名为《水俣公约》, 并于 2013 年 10 月在日本水俣市正式签定。因此, 国内外越来越关注汞及汞引发的环境问题。

汞在敏感生态系统中的环境行为、环境效应的研究是汞的健康风险评价的重要核心问题, 也是国际学术界和政府高度关注的科学问题。自 20 世纪 50 年代震惊世界的日本“水俣病”事件被证实是由于人为汞污染引起的甲基汞中毒以来, 汞的环境地球化学、环境毒理学及生态风险问题成为环境科学研究的热点。随着对汞在环境生态系统中危害性认识的不断深入, 从 20 世纪 60 年代起, 人们开始控制汞的使用量和排放量。总体来看, 在汞污染排放量降低后, 多数严重工业污染区水体中的水生生物体内汞含量水平明显下降, 汞污染问题似乎得到了有效的控制, 或者说找到了解决的办法。然而, 20 世纪 80 年代末和 90 年代, 科学家出人意料地在没有人为和自然汞污染来源的北美和北欧偏远地区的大片湖泊中发现鱼体高甲基汞负荷, 并证实人为排放的汞通过大气长距离迁移后的沉降是产生这一汞污染的主要原因。由此, 在西方发达国家兴起了新一轮环境汞污染研究的热潮。

国外大量研究证实, 天然湖泊和筑坝拦截形成的水库环境是有利于汞活化、甲基化和生物累积的场所, “蓄水河流”生态系统是典型的“汞敏感”生态系统, 其食物链顶端的鱼类甲基汞含量很高, 食用这些鱼类对人体健康构成巨大威胁。显然, 筑坝拦截对河流流域汞的生物地球化学的意义不仅在于全球循环中河流汞输送等大尺度问题, 而且水库对汞转化和甲基汞污染的“敏感性”, 迫使我们不得不重新审视蓄水河流汞污染的生态风险。在世界河流正广泛地受到筑坝拦截影响的背景下, 新建大型水库对河流汞生物地球化学循环影响的研究, 已受到国际上的普遍重视。

统计数据显示, 我国境内面积 1.0 km^2 以上的湖泊仅 2693 个, 截至 2007 年, 我国已建成各类水库却高达 86 353 座, 随着西部大开发继续深入, 水库数量还将继续大幅增长。事实上, 我国多数河流都不同程度受到筑坝拦截的影响, “蓄水河流”已成为我国河流的普遍现象和重要特征。由此可见, 水库很可能成为我国人群潜在的甲基汞暴露风险来源。20 世纪 70 年代末至 80 年代, 我国科学家对污染水生生态系统汞的迁移转化规律及生态环境效应开展了大量的研究工作, 并取得了国际领先的研究成果, 但是此后的 20 年来, 我国学者对环境汞污染的研究力度明显不够, 对水库系统中汞的环境行为及其生态风险的认

识比较薄弱,无法回答与此相关的流域区域经济和可持续发展的重大问题,如长江三峡水库运行后,汞的甲基化是否将对未来水生生态系统安全产生显著危害?三峡水库是否成为下游河段主要的甲基汞污染来源以及对人群可能的危害程度?没有明显汞污染的河流,蓄水后是否会出现鱼体甲基汞的污染问题?等等。基于此,近10年来我们以我国西南地区乌江流域水库(湖泊)系统中汞的生物地球化学循环为研究核心,重点开展了水库(湖泊)中汞迁移转化的生物地球化学过程、流域尺度上水库(湖泊)汞生物地球化学循环的质量平衡关系、水库(湖泊)生态系统食物网汞的迁移转化动力学和梯级开发水库(湖泊)生态系统中汞生物地球化学概念模型等方面的研究,基本阐明了乌江流域水库生态系统汞的生物地球化学循环及其生态环境效应,揭示了长江中上游地区峡谷型水库生态系统中汞的迁移、转化、累积规律等主要生物地球化学过程,提出了保障流域水环境生态安全的对策。获得的研究成果对流域生态环境的可持续发展具有重大的现实意义,本书对这些研究成果进行了系统、全面的总结。

本书共7章:第1章从汞的概述、汞的研究方法、水生生态系统中汞的生物地球化学循环研究进展和乌江流域水库汞的生物地球化学循环研究意义4个方面对本书的基础知识进行了总结概括;第2章全面但扼要地介绍了乌江流域概况,包括:自然概貌、社会(人文)与经济、乌江流域水电开发情况;第3章介绍了我们近年来针对乌江干流上的6个水库开展的有关水库生态系统中汞的生物地球化学循环的研究工作和成果;第4章描述了乌江支流上的3个水库(湖泊)汞的生物地球化学循环的研究工作和成果;第5章对乌江干流水库汞的生物地球化学循环的质量平衡关系的研究成果进行了系统性总结,并建立了乌江干流水库汞的质量平衡模型;第6章系统总结了乌江流域水库(湖泊)生态系统汞的食物链传输规律及生态环境效应的相关研究成果;第7章是对整个工作的总结,重点分析了乌江流域水库(湖泊)汞的生物地球化学过程影响因素,并建立了乌江流域水库汞的生物地球化学演化的概念模型。

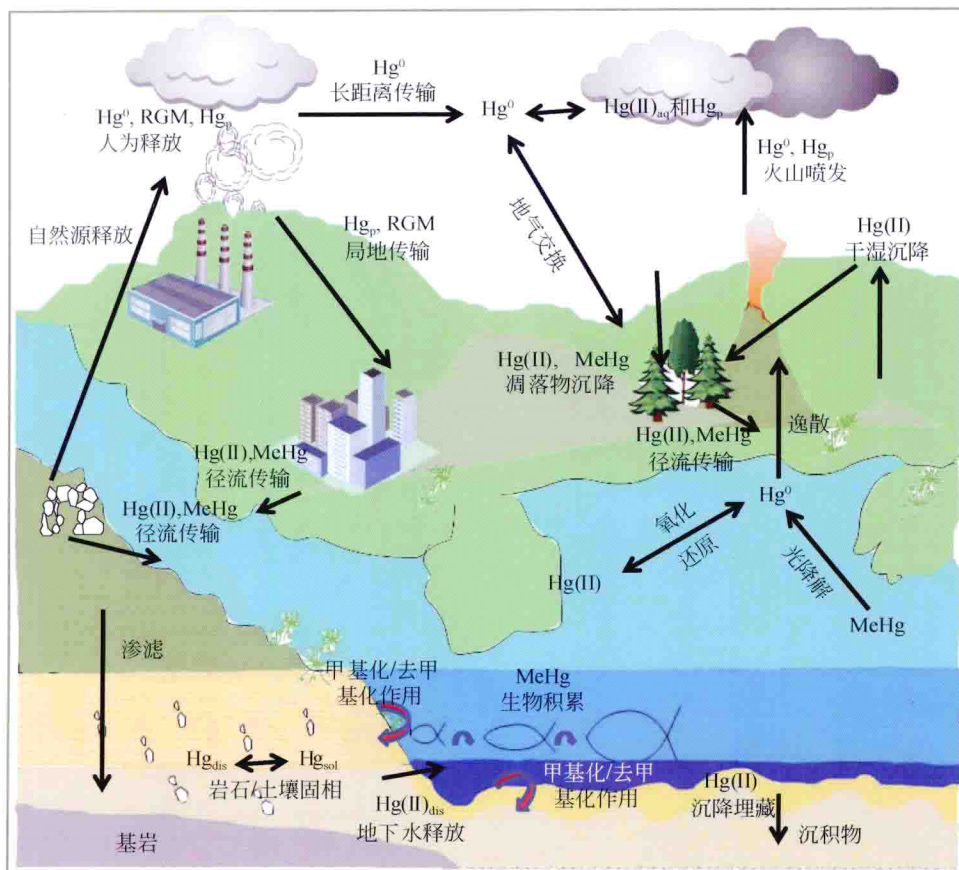
本书介绍的研究成果和本书的总结出版是在我的数届博士(硕士)研究生和博士后仇广乐、闫海鱼、蒋红梅、商立海、何天容、张军方、郭艳娜、付学吾、李仲根、白薇扬、孟博、姚珩、刘凯、陈春霄、陈瑜鹏、杨芳、包正铎、李秋华等的共同努力下完成的,他(她)们的博士(硕士)论文和研究成果以及与我本人共同发表的科学论文是本书写作的基础。本书有关章节的合作作者为:第1章姚珩、孟博、闫海鱼、商立海;第2章商立海、闫海鱼、仇广乐;第3章孟博、姚珩;第4章仇广乐、孟博;第5章李仲根、付学吾;第6章闫海鱼、李秋华、王庆;第7章孟博、姚珩、李秋华。

我们课题组虽然在乌江流域水库生态系统开展了大量的研究工作,也取得了一定的研究成果,但这些只是阶段性的成果,难免存在缺陷和不足,希望在以后的工作中加以改进。

作 者

2014年12月

彩 图



Hg^0 —单质汞 $\text{Hg(II)}_{\text{aq}}$ —水相离子态汞 Hg_p —颗粒态汞 RGM—活性气态汞
 Hg(II) —离子态二价汞 Hg_{dis} —溶解相汞 Hg_{sol} —固相汞 MeHg—甲基汞

图 1-3 汞循环图



图 3-1 乌江流域水库（湖泊）分布图

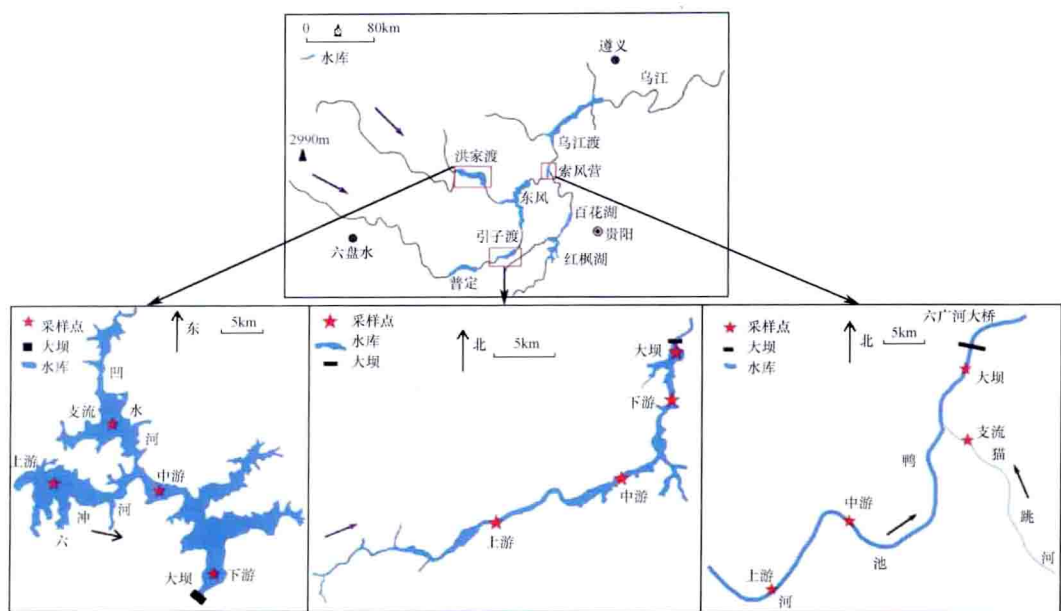


图 3-2 乌江干流洪家渡、索风营和引子渡水库采样点分布图



(a) 淹水前



(b) 淹水后1年(1993年)



(c) 淹水后5年(1997年)



(d) 淹水后9年(2001年)

图 3-11 St Louis 等 (2004) 在加拿大的 1 个沼泽地进行的淹水实验



图 3-12 洪家渡和索风营水库沿岸地貌 (拍摄于 2009. 12)

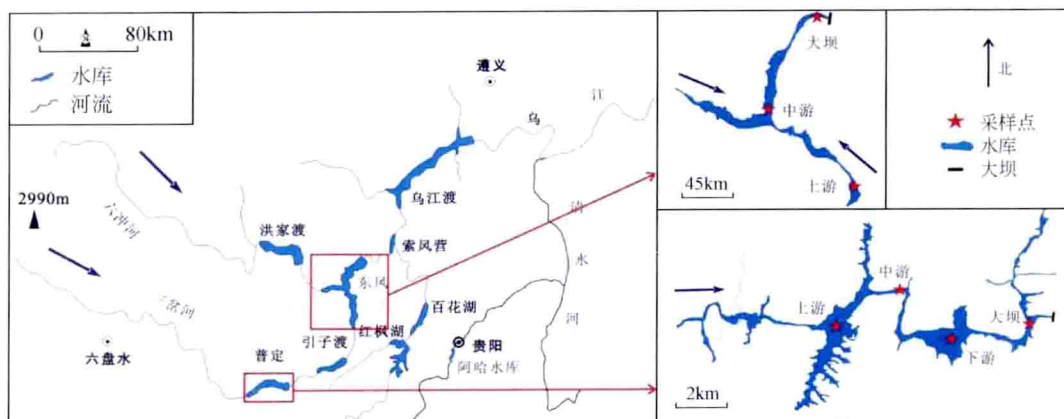


图 3-14 普定水库、东风水库采样点分布图

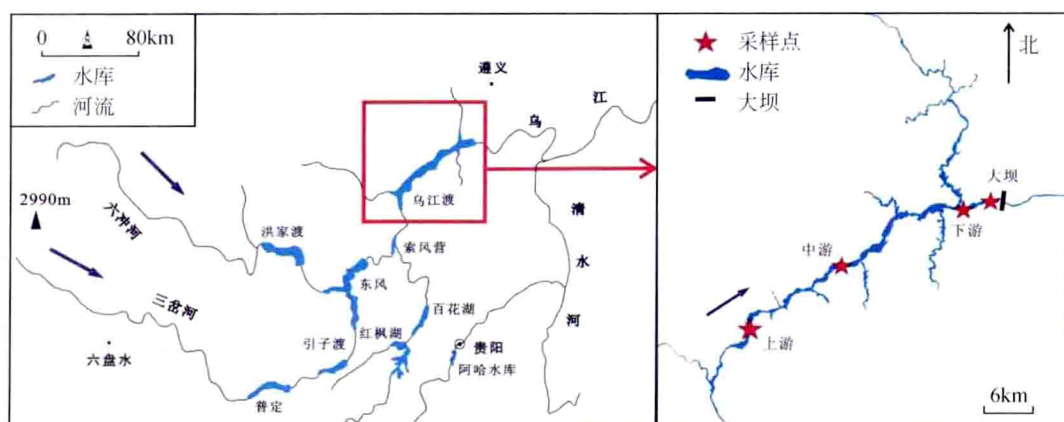


图 3-44 乌江渡水库采样点分布图

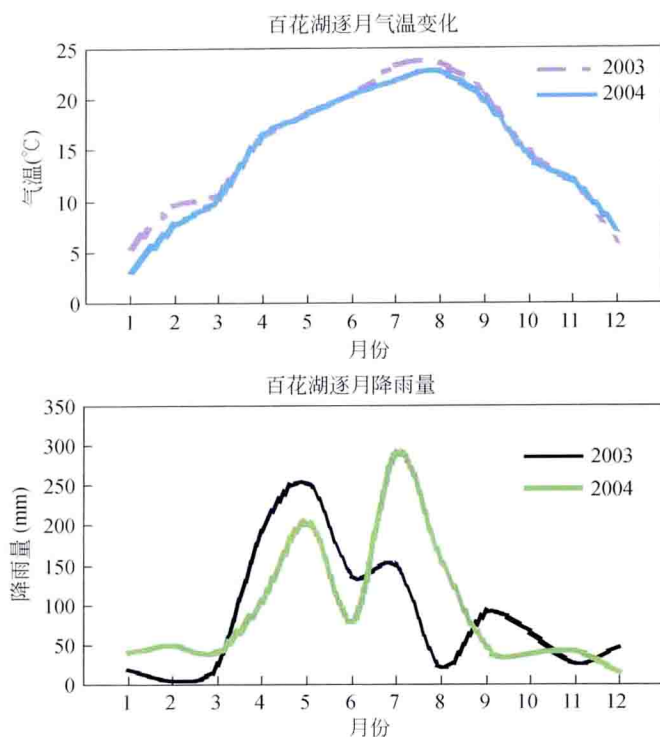


图 4-37 百花湖降雨与气温变化（2003～2004 年）
（数据来源：贵州省气象局）

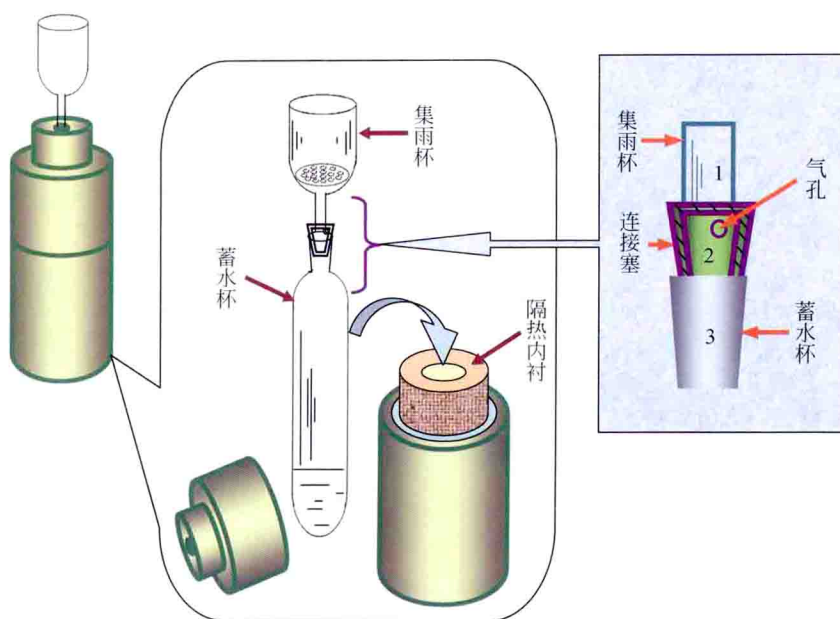


图 5-2 雨水采集器主要组成部件示意图

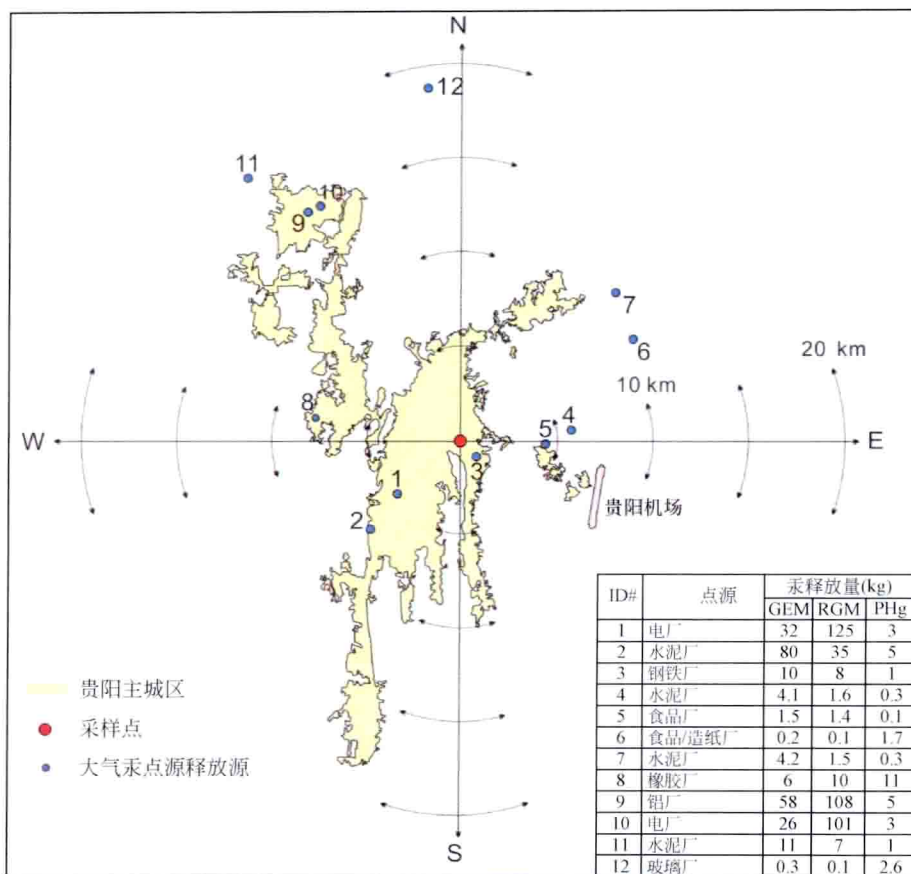


图 5-9 贵阳市大气汞形态采样点位置及大型汞排放源分布图

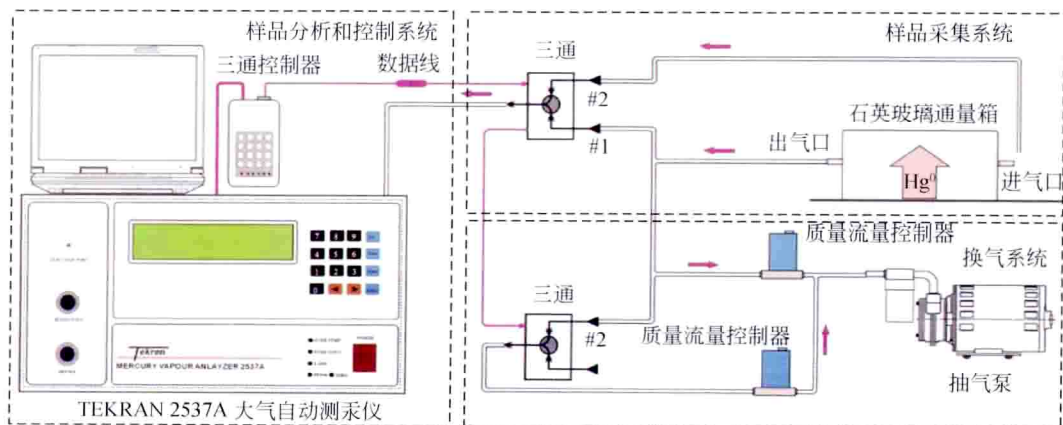


图 5-16 水体-大气界面间汞交换通量的测定示意图



图 7-1 乌江流域初级演化阶段水库汞的生物地球化学模型



图 7-2 乌江流域中级演化阶段水库汞的生物地球化学模型

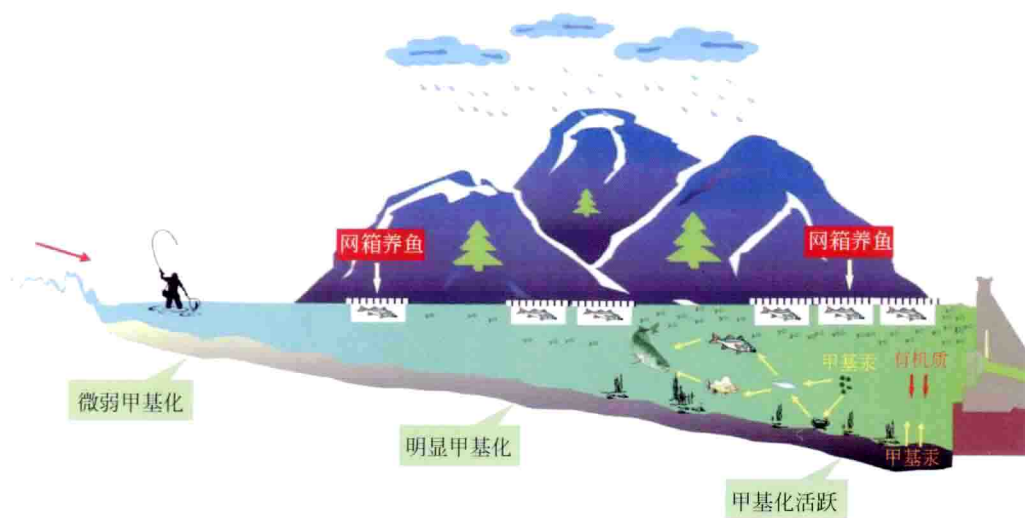


图 7-3 乌江流域高级演化阶段水库汞的生物地球化学模型

目 录

第1章 绪论	1
1.1 汞的概述	1
1.1.1 汞的物理化学性质	2
1.1.2 汞的毒性	4
1.1.3 汞的来源	7
1.1.4 汞——全球污染物	8
1.1.5 汞公约	9
1.2 汞的分析方法进展	10
1.2.1 水-气界面汞的交换通量测定方法	12
1.2.2 天然水体中痕量汞的分析方法	13
1.2.3 沉积物、浮游生物和鱼类样品中汞的分析方法	15
1.2.4 稳定汞同位素示踪技术在水环境汞循环中的应用	16
1.3 水生生态系统汞循环	17
1.3.1 水生生态系统汞循环概述	17
1.3.2 汞的形态分布与迁移转化	18
1.3.3 水生生态系统汞的生物富集	20
1.4 乌江流域水库汞的生物地球化学循环研究意义	22
1.4.1 水库是典型的“汞敏感生态系统”	22
1.4.2 水库生态系统的特征	23
1.4.3 乌江流域水库汞的生物地球化学过程研究意义	24
1.4.4 水库生态系统汞生物地球化学过程研究的关键问题	26
参考文献	29
第2章 流域概况	40
2.1 自然概貌	40
2.1.1 地理位置	40
2.1.2 气候	42
2.1.3 地质与地貌	43
2.1.4 土壤与植被	43
2.1.5 矿产资源	44
2.2 社会（人文）与经济	44
2.2.1 人口	44
2.2.2 工矿业	45

2.2.3 农畜牧与渔业	46
2.3 水电开发	46
2.3.1 乌江梯级水库的开发	46
2.3.2 乌江流域贵州段水库的基础参数	47
参考文献	51
第3章 乌江流域干流水库汞的生物地球化学过程	52
3.1 实验方案	53
3.1.1 采样前准备	53
3.1.2 实验设计及样品采集	54
3.2 洪家渡、索风营和引子渡水库汞的生物地球化学过程	56
3.2.1 水体理化参数	56
3.2.2 水体汞分布	62
3.2.3 水库淹没土壤汞分布	74
3.3 普定水库和东风水库汞的生物地球化学过程	78
3.3.1 水体汞的生物地球化学	79
3.3.2 沉积物汞的生物地球化学	94
3.3.3 沉积物-水体界面汞交换通量	106
3.4 乌江渡水库汞的生物地球化学过程	111
3.4.1 水体汞的生物地球化学	111
3.4.2 沉积物汞的生物地球化学	120
3.4.3 沉积物-水体界面汞交换通量	132
参考文献	137
第4章 乌江流域支流水库汞的生物地球化学过程	144
4.1 红枫湖汞的生物地球化学过程	145
4.1.1 样品采集	145
4.1.2 水体汞的生物地球化学	146
4.1.3 沉积物汞的生物地球化学	164
4.1.4 沉积物-水体界面汞交换通量	175
4.2 百花湖汞的生物地球化学过程	177
4.2.1 样品采集	177
4.2.2 水体汞的生物地球化学	177
4.2.3 沉积物汞的生物地球化学	195
4.2.4 沉积物-水体界面汞交换通量	199
4.3 阿哈水库汞的生物地球化学过程	201
4.3.1 样品采集	201
4.3.2 水体汞的生物地球化学	201
4.3.3 沉积物汞的生物地球化学	214
4.3.4 沉积物-水体界面汞交换通量	223