

# 生态地球化学预测预警若干问题探讨

周国华<sup>1</sup>, 田黔宁<sup>2</sup>, 孙彬彬<sup>1</sup>, 魏华玲<sup>1</sup>, 刘占元<sup>1</sup>

ZHOU Guo-hua<sup>1</sup>, TIAN Qian-ning<sup>2</sup>, SUN Bin-bin<sup>1</sup>,

WEI Hua-ling<sup>1</sup>, LIU Zhan-yuan<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, Hebei, China;*

2. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*

**摘要:**回顾了生态地球化学危害效应的作用机理,提出了区域地球化学调查-地球化学环境监测-机理研究相结合的生态地球化学预测预警基本思路。根据当前中国多目标区域地球化学调查和生态地球化学评价工作的现状,举例说明了土壤重金属元素累积、土壤环境变化、生态效应机理的若干研究方法,提出了预测预警成果体现的若干建议。

**关键词:**多目标地球化学调查;生态地球化学评价;预测预警;重金属元素累积;土壤环境变化

中图分类号:X171.1;X142

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2009)01-0118-06

Zhou G H, Tian Q N, Sun B B, Wei H L, Liu Z Y. Discussion on ecologic geochemical early-warning and forecasting. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(1):118-123

**Abstract:** The paper reviewed the functioning mechanism of ecologic geochemical hazards and introduced the basic thought of ecologic geochemical early-warning and forecasting by integrating with regional geochemical survey, environmental geochemistry monitoring and mechanism research. Based on the current situation of the multi-purpose regional geochemical survey and ecological geochemical assessment in China, research methodology was illustrated by some examples in terms of heavy metal accumulation in soil, soil environmental variation and ecological effect mechanism. Also, several suggestions on outcome presentation of ecological geochemical early-warning and forecasting were put forward.

**Key words:** multi-purpose regional geochemical survey; ecologic geochemical assessment; early-warning and forecasting; heavy metal accumulation; soil environmental variation

1999年以来,多目标区域地球化学调查在全国范围内迅速推进,仅“十五”期间就部署调查面积 $108\times 10^4\text{km}^2$ ,至今覆盖面积已达 $135\times 10^4\text{km}^2$ ,取得了大量的具有多学科研究、多领域应用意义的区域地球化学基础数据资料<sup>[1]</sup>。为提升数据资料在国土资源管理、环境评价与人居安全、农业生产与农产品安全、基础地质研究等领域的转化应用水平,在区域调查的基础上部署了生态地球化学评

价工作,深化了对异常元素来源、迁移转化、存在形态及其生态效应的认识。地球化学预测预警作为生态地球化学评价的一项重要任务,如何深化、充实预测预警的成果,是当前生态地球化学评价面临的难点和热点。本文拟从生态地球化学作用机理和影响因素出发,结合多目标调查与评价资料的特点,总结提出若干评价研究的技术方法,以期起到抛砖引玉的作用。

收稿日期:2008-09-17;修订日期:2008-12-26

地质项目:中国地质调查局项目《沿海经济带区域生态地球化学评价》(编号:1210823805)和《Pt、Pd、U、Co、Cr矿地球化学勘查中的关键技术研究》(编号:121010660403)资助

作者简介:周国华(1964-),男,博士,教授级高级工程师,从事应用地球化学研究。E-mail:zhouguohua@igge.cn

## 1 生态地球化学预测预警的方法原理

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<sup>①</sup>。

从理论上讲,生态地球化学环境变化引发的生态效应包括有利和有害 2 种情况。前者指生态环境逐渐改善和优化,后者为污染积累、环境恶化并导致危害效应。实际预测研究主要针对有害效应进行。20 世纪 90 年代初西方学者提出了“化学定时炸弹”的概念,指缓慢的环境变化使储存于土壤或沉积物中的化学物质得到活化,造成一系列延缓的或突发的危害效应<sup>②</sup>,实质上就是典型的有害生态效应。20 世纪 90 年代初谢学锦院士将化学定时炸弹这一概念引入国内后,有研究者考虑到积累—危害爆发—弛豫的作用过程及国际政治因素,认为“延缓型地球化学灾害”的提法更为恰当<sup>③</sup>,并根据地球化学危害的形成过程和作用机理,提出了区域调查—环境变化监控—触发机理研究相结合的工作思路<sup>④</sup>,值得生态地球化学预测预警借鉴。

综合已有的研究成果,并从多目标调查和生态地球化学评价的工作基础出发,笔者认为生态地球化学预测预警的基本思路是:①调查摸清生态地球化学环境现状,主要指营养有益元素、有毒有害元素、重要无机化合物和有机污染物的现时含量水平(基线值),以及影响化学物质迁移转化、生态效应的宏观环境因素(如土地利用方式、水土保持状况、气候条件等)、微观环境条件(如土壤沉积物中有机质含量、酸碱度、阳离子交换量、粒级组成、氧化还原电位等)。多目标区域地球化学调查是基本方法。②监测掌握生态地球化学环境的变化趋势,包括生态系统中元素(如土壤中重金属元素)和化合物含量的变化趋势、变化速率,以及环境条件的变化趋势、变化速率(如土壤酸化速率、有机质含量变化等)。可通过调查监控、综合研究进行。③生态地球化学危害的机理研究与预测。研究环境介质中元素和化合物的活化、迁移、释放规律,以及在水、农产品、人体内累积量的变化趋势,查明其主要影响因素,掌握其临界点或突变点,综合监测资料预测生态地球化学危害的发生机率、时间,结合区域性基础资料划定危害发生的空间范围。理论分析、实验模拟和综合研究是机理研究与预测的主要途径。

## 2 生态地球化学环境变化的预测

早在 20 世纪 90 年代初,谢学锦院士就超前地认识到建立环境地球化学监控网络的重要性,组织完成了全国区域土壤环境地球化学监控网络的第一轮采样分析工作<sup>⑤</sup>,可惜这项工作未能成为日常性工作而得到连续的支持,没有形成可供动态对比研究的多时段资料。另一方面,由于土壤与沉积物具有较强的缓冲能力,加上采集分析误差等影响,间隔时间较短的调查结果不一定能真实有效地反映土壤沉积物中环境指标的变化规律,在当前条件下通量计算不失为开展生态地球化学预测预警的有效手段。

### 2.1 通量调查与预测

中国地质调查局颁布的《DD2005-02 区域生态地球化学评价技术要求》<sup>⑥</sup>中规定了用于农田生态系统地球化学预测预警的元素通量方法。思路是对农田土壤元素输入途径和输出途径进行系统的调查分析,根据元素年输入通量(大气干湿沉降、化肥与有机肥、农药、灌溉水等)与年输出通量(农田退水、作物收割、Hg 等元素挥发作用等),计算元素年净通量,再根据有效土层厚度、土壤容重计算土壤元素浓度的年变化速率,据此预测若干年后土壤元素的含量和土壤环境的质量、营养肥力水平状况。这一方法具有可操作性强,工作量和费用较低,短期内即可取得预测成果的优点,近年来已见诸多成果报道<sup>⑦-⑨</sup>。但这种方法取得的预测预警成果本质上属于静态预测,是以调查监测年份的区域环境状况、污染物排放量、农药与化肥施用量、农业生产水平为基准进行的预测,当区域经济社会发展、工农业生产及污染排放、农业经济及生产管理发生明显变化时,预测成果的可靠性将受到影响。如果能综合考虑区域生态环境现状及其发展趋势,系统分析元素在大气—水—土壤—沉积物—作物之间的迁移转化规律和分配特征,则可以改善计算预测结果的正确性。

此外,根据环境保护部门提供的区域内大气污染物排放量,基于大气污染物迁移扩散动力学模型,也可以估算局部范围内土壤重金属等污染物的年累积量及其浓度变化速率。

### 2.2 多时段地球化学资料对比

自 20 世纪 70 年代末以来,中国有关部门实施了多项全国性地球化学调查计划,主要有:①20 世纪 80 年代第二轮全国土壤普查,测定指标主要包括

土壤的 N、P、K 全量, 有机质含量和营养元素有效态含量; ②20 世纪 80 年代末至 90 年代初全国土壤环境背景值调查, 全国共采集 4130 件表土样、测定元素 60 多种, 863 个土柱样、测定了元素 48 种<sup>[10]</sup>; ③20 世纪 90 年代初全国地球化学监控网络, 在全国范围内采集泛滥平原沉积物样 530 多件, 测定了 50 多种元素; ④20 世纪 70 年代后期开始实施的全国区域化探扫面计划, 以山区丘陵区水系沉积物测量为主, 同时, 自 80 年代中后期开始在中国中东部郑州、杭嘉湖、珠江三角洲等部分平原区部署了土壤地球化学测量工作, 测试元素 39 种以上; ⑤20 世纪与 21 世纪之交启动的全国多目标区域地球化学调查, 至今已覆盖面积  $135 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。除上述计划外, 区域性、流域性、局部性的地球化学调查工作更是不胜枚举, 形成了一批多时段的地球化学资料。由于这些计划/项目的研究目标不同, 样品介质类型、采样方法、样品密度、分析测试指标、分析方法及质量要求各不相同, 因此数据资料的对比研究存在较大的问题。尽管如此, 部分地区仍形成了可供对比研究的系统资料, 通过对比研究也已取得了一定的认识。现将此类实例引述如下, 以供参考。

#### (1) 浙北杭嘉湖地区

杭嘉湖地区分别在 1990 年和 2002 年开展了 2 次区域土壤地球化学测量, 2 次测量的野外工作方法基本一致, 相同的分析指标有 39 项。采用数理统计、图形分析等方法识别并消除了采样和分析误差的影响, 得出 12 年间土壤中 As、B、Bi、Cd、Cu、F、I、P、S、Sb、Se、Sn、Tl、V、Zn 的平均相对累积率超过 5%, 并圈定了主要重金属元素污染累积区范围。利用相同单元格内 2 次分析值计算了元素累积速率, 据此预测了若干年后土壤元素含量及环境质量状况。同时, 对比发现杭嘉湖平原区表层土壤具有明显的酸化趋势<sup>[11]</sup>, 与当地农业部门研究结论相符<sup>[12]</sup>。

#### (2) 江苏太湖地区

太湖地区是中国的鱼米之乡, 改革开放以来工业化进程迅速, 农田生态环境受到了严重的影响。利用太湖地区不同时期调查取得的水稻土中重金属元素全量、有效量和 pH 值数据, 研究发现自 20 世纪 80 年代初至 90 年代末的 10 多年间太湖地区水稻土 pH 值下降了 0.38, 重金属元素全量和有效量显著上升, 增加量介于 30%~200%之间<sup>[13-14]</sup>, 表明农田

生态环境已发生了巨大变化, 对农业生产和农产品的安全性构成了威胁。

#### (3) 珠江三角洲地区

在国土资源部的支持下, 珠江三角洲地区于 2001 年建立了区域土壤环境地球化学监控网络<sup>④</sup>, 在约  $16000 \text{ km}^2$  的区域内共布设监控点 98 个, 采集了表、深 2 层土壤样品。在中国地质调查局的支持下, 2007 年在原采样点再次采集了表层土壤样<sup>⑤</sup>, 并将样品库中 2001 年所采的副样提出后进行同批次分析。对比研究结果表明, 珠江三角洲地区 2001—2007 年的 6 年期间, 土壤中 Hg、Ag、Zn、Mo、Cd、Bi、Ge、W 等元素明显被累积, 圈定了各元素不同累积速率的区域范围。

#### (4) 江苏省土壤 pH 值

比较江苏省 1980 年土壤调查和 2003 年多目标地球化学调查取得的土壤 pH 值空间分布图, 发现江苏省局部地区酸化较明显<sup>[15]</sup>。

### 2.3 沉积柱研究

利用沉积柱重建沉积环境变化历史, 并预测其发展变化趋势, 是环境地球化学研究的常用方法。在稳定环境条件下沉积形成的湖泊、河漫滩、河口海湾沉积柱保留了沉积时的环境条件和沉积物的化学组成特征。根据不同层位沉积物的化学组成, 结合沉积柱年龄研究成果, 即可恢复不同年代沉积环境条件和化学组成的特点, 分辨出近代人为污染的影响, 并得出其发展变化趋势。例如, 南太湖地区沉积物中元素演化序列研究表明, 沉积物受到了明显的人为铅污染<sup>[16]</sup>; 对北京大学未名湖 250 年以来沉积物中主要重金属含量的研究发现, Zn 随深度增加而逐渐减小, 亦显示存在近代人为污染<sup>[17]</sup>的特征。

## 3 影响生态地球化学的因素及其作用机理

多目标等区域地球化学调查揭示了地球化学环境现状, 而通过不同时期的调查或监控资料对比研究可掌握地球化学环境的变化趋势。但是, 要准确预测环境变化可能引发的生态效应, 还需要建立生态效应与环境变化之间的响应关系, 揭示影响生态环境效应的关键因素。以机理研究成果为依据, 综合考虑区域环境条件, 抓住关键因素, 从影响“环境变化-响应模式”的生态地球化学外因和内因 2 个方面入手, 建立生态地球化学预测模型, 是实现预测预警的基本途径。



### 3.1 重要环境要素

土壤中化学物质除了直接作用于土壤微生物、土壤动物、植物生长外,还需通过某些暴露途径作用于动物和人体,产生危害。如经土壤侵蚀、淋溶过程进入水体从而影响水环境的质量,或以扬尘颗粒物经动物、人体呼吸道进入体内危及健康,或由作物根系吸收进入农产品影响农产品的安全性,并经食用而影响动物和人体的健康。因此,土地利用方式、气候条件、农业生产及作物类型、人群接触暴露方式等都是生态地球化学预测预警需要考虑的外部宏观环境因素。

土壤元素生态效应不仅取决于其含量水平,更大程度上与其存在形态、生物有效性有关,这方面的研究实例和成果资料不胜枚举。大量研究表明,土壤重金属等微量元素的存在形态及其生物有效性主要与土壤矿物及粒级组成、有机质含量、酸碱度、阳离子交换量、氧化还原电位、含水量等土壤环境条件有关<sup>[18]</sup>。土壤污染物生态危害作用机理研究也主要围绕这些内部因素,分析揭示其关键因素或因子。

从理论上讲土壤理化条件是影响土壤元素生态环境效应的主要因素,并且对其作用规律和关系模型也已有所认识。然而,考虑到中国自然地理条件、地球化学景观类型纷繁复杂,土壤类型、土壤理化条件存在着明显的区域分异特点,不同区域、不同环境中土壤元素地球化学行为及其生态效应仍是今后研究的主题。

### 3.2 影响生态地球化学的因素及其作用机理的实例

多目标区域地球化学调查和生态地球化学评价积累了大量数据资料,基于这类资料可以研究建立元素生态效应的关系模型,从而为预测预警提供理论依据。现列举说明如下。

#### (1) 土壤元素有效量变化规律

对浙江省北部地区的研究表明<sup>[19]</sup>,土壤元素有效量及其有效性与成土母质类型、土壤类型及其理化性质等密切相关。Mn、Cu、Zn、Mo、Cd、Pb、Se 等元素全量与有效量间具显著正相关性,元素全量是决定这些元素有效量的重要因素。Fe、Cu、Zn、Cd、As、Pb 等元素的有效度与有机质含量间存在显著正相关关系,预示着有机质的增加有利于土壤中元素的活化,而 Fe、Cu、Zn、Cd、As、Pb、Se 等元素的有效度与 pH 值具有显著负相关关系,表明土壤 pH 值的下降(即土壤酸化)将增加这些元素的生物有效

性,从而增加 Cu、Cd、As、Pb 等重金属元素的生物有效量。基于土壤中元素的有效度与有机质、pH 值存在显著相关关系,可以建立以有机质、pH 值为自变量的元素有效度预测方程。根据这一方程可以计算杭嘉湖地区表层土壤继续酸化和土壤有机质含量变化将引起土壤中重金属元素的有效量的变化趋势,从而为土壤重金属生态风险评价提供依据。

#### (2) 农产品中重金属元素累积量的影响因素

对浙江省晚稻、茶、西红柿、柑桔、西兰花等主要作物中重金属元素含量与根系土壤中重金属元素含量关系的研究表明<sup>[20]</sup>,农产品与土壤间重金属元素含量总体呈共消长趋势,土壤中有有机质含量和 pH 值是影响作物对土壤重金属元素吸收累积的重要环境因素:①土壤有机质含量增加,农产品对土壤中重金属元素的富集系数下降,表明土壤中的有机质有利于消减土壤重金属污染对农产品安全性的影响;②随着土壤 pH 值的下降,农产品对土壤中重金属元素的富集系数显著上升,即土壤酸化将大大增加农产品对土壤重金属元素的吸收累积量,增加农产品食用安全性风险。根据土壤中有有机质含量、pH 值与农产品中重金属元素富集系数间的这种关系,可以建立农产品中重金属富集系数随土壤中有有机质含量和 pH 值的关系方程,据此预测由土壤有机质、pH 值变化引起的农产品中重金属元素富集系数的变化和农产品中重金属元素的含量及其食用的安全性。

### 3.3 模拟实验/试验

前已阐明,利用土壤重金属元素全量和有效态分析资料,可以研究建立土壤元素有效量与全量的关系,揭示制约土壤元素形态转化、生物有效性的关键因素,从而为土壤环境变化的生态危害预测提供理论依据。例如,北京市东南郊模拟 Cd 污染影响下土壤中 Cd 元素的赋存形态及其动态变化的研究表明,进入土壤的活动态 Cd 可逐渐转化为稳定态,但具生物有效性的水溶态和离子交换态 Cd 仍占 30% 左右,因此即使偏碱性的土壤,Cd 污染的生态风险仍不容忽视<sup>[21]</sup>。

典型土壤对重金属元素的吸附容量及饱和吸附量,土壤对酸雨的缓冲性及其临界点、酸化过程中 Al 元素与重金属元素活化、营养元素淋失规律,添加有机质、磷酸盐、矿渣、粘土矿物等物料对土壤中重金属元素存在形态、生物有效性的影响及土壤修

复效果等,是近些年来室内和田间模拟实验的热点课题。例如,珠江三角洲典型土壤的模拟酸雨实验表明,土壤酸缓冲能力为菜园土>水稻土>赤红壤,酸化过程早期铝铁胶体吸附共沉淀,导致重金属溶出量增长不明显甚至下降,进一步酸化则多数元素溶出量明显增加<sup>[22]</sup>。近年来,模拟实验研究已从简单的形态分析、静态浸泡溶出实验发展到土柱动态淋漓实验、野外田间试验,实验成果更加真实地反映了自然环境中土壤元素的迁移转化规律。例如,田间试验表明江苏八卦州 Cd 污染土壤添加凹凸棒石后土壤 Cd 的有效性明显下降,芦蒿中 Cd 含量降低了 46%<sup>[23]</sup>。

#### 4 生态地球化学预测预警的成果表达

将研究成果应用服务于国土资源管理、土壤污染治理、农业生产管理与种植布局、地球化学灾害防治是生态地球化学评价的根本目的,因此生态地球化学预测预警研究不仅要求取得理论方面的认识,更要求提交实用性的成果,直接服务于规划布局,指导生产管理。生态地球化学预测预警成果可以从时间、空间 2 个角度来体现。时间角度的预测预警实际上就是根据生态环境的变化速率和作用规律,确定生态危害发生的时间点。空间范围的预测预警,就是依据生态地球化学空间分异性——地球化学环境现状、变化趋势与速率,预测若干年后的生态地球化学状况及生态环境分区,圈定生态地球化学危害的相对高风险区。

根据现有多目标地球化学调查与生态地球化学评价资料,预测预警成果主要体现为:①基于土壤重金属元素含量和 pH 值变化趋势的土壤环境质量预测评价,如根据土壤重金属累积速率,预测土壤环境质量的变化趋势和超出土壤环境质量的年限、区域范围;②基于土壤中重金属元素含量变化趋势、影响富集系数的土壤条件、作物种类等因素,预测农产品安全性变化趋势,如随着土壤环境变化某种农产品安全性(或超标率)的变化趋势;③基于土壤中元素含量、土壤环境变化趋势(有机质、酸碱度等)的生态地球化学预测评价,如土壤营养状况(生产力水平)与可耕性评价、地下水与地表水环境质量预测评价,综合形成土壤质量的地球化学预测评价等。

生态地球化学预测预警在发现问题的同时,需

提供解决问题的理论依据和方法技术基础,为政府规划决策、污染治理修复、灾害预防与规避服务。例如,筛选出区域范围内土壤中重金属元素快速累积区及高风险元素,查明主要污染源,从而为环保决策提供依据;根据不同农产品对土壤重金属元素的富集特性,筛选推广种植吸收率较低的农作物;基于影响土壤重金属元素存在形态、生物有效态的关键土壤环境条件(如土壤有机质含量、酸碱度等),提出稳定或固化重金属元素的土壤环境调控技术途径,以消减其生态风险。

#### 5 结论与建议

生态地球化学预测预警需要从影响生态系统的外部环境和内部因素出发,以系统的多介质生态地球化学资料为基础,考虑生态环境的动态演变趋势,综合基础性调查、环境地球化学监测、生态效应机理研究的成果,从时间和空间 2 个方面取得具有理论依据的实用性成果。

由于地表岩石、土壤、水、生物、大气圈层之间,农田、城市、江河、湖泊、浅海等生态系统之间,以及自然环境客体与人类社会主体之间的相互联系、相互影响、相互作用的关系错综复杂,也隐含着巨大的不确定性,目前生态地球化学预测预警无论在理论上还是在方法技术上还不成熟,具有很强的探索性,难度也是显而易见的。当前,应立足现实,以现有的资料为基础开展研究,以迅速取得实用性成果。同时,建议相关部门从社会经济可持续发展和保障人类生存环境的大局出发,进一步重视生态地球化学预测预警工作,将土壤地球化学环境监控网络作为一项日常工作长期执行,使生态地球化学预测预警更加科学有效。

#### 参考文献

- [1]奚小环.多目标的地质大调查——21世纪勘查地球化学的战略选择[J].物探与化探,2007,31(4):283-288.
- [2]成杭新,杨忠芳,赵传冬,等.区域生态地球化学预警:问题与讨论[J].地质前缘,2004,11(2):607-615.
- [3]Stigliani W M, Doelman P, Salomons W, et al. Chemical Time Bombs—predicting the unpredictable[J]. Environment, 1991, 33(4): 4-30.
- [4]陈明,冯流,周国华,等.缓变型地球化学灾害:特征、模型和应用[J].地质通报,2005,24(10/11):916-921.
- [5]谢学锦,周国华.多目标地球化学填图及多层次环境地球化学监控网络——基本概念与方法[J].地质通报,2001,21(12):809-816.

- [6] 龚香宜, 祈士华, 吕春玲, 等. 福建省兴化湾大气重金属的干湿沉降[J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 31-34.
- [7] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区 As 等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 213-222.
- [8] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区农田生态系统土壤镉通量研究[J]. 地质通报, 2007, 26(7): 869-877.
- [9] 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 257-264.
- [10] 中国环境监测总站(魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等). 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [11] 周国华, 董岩翔, 刘占元, 等. 杭嘉湖地区土壤元素时空变化研究[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊): 72-79.
- [12] 沈国新, 蒋松荣, 杨樾, 等. 浙江省杭嘉湖蚕区桑园土壤的酸碱度分析[J]. 蚕桑通报, 1996, 27(3): 49-50.
- [13] 成杰民, 潘根兴, 郑金伟. 太湖地区水稻土 pH 及重金属元素有效态含量变化影响因素初探[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 141-144.
- [14] 李恋卿, 郑金伟, 潘根兴, 等. 太湖地区不同土地利用影响下水稻土重金属有效性的变化[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 101-104.
- [15] 王志刚, 赵永有, 廖启林, 等. 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 720-727.
- [16] 姚书春, 李世杰, 薛滨, 等. 南太湖沉积岩芯中金属和营养元素的垂向分布特征及其意义[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 178-181.
- [17] 贾振邦, 安凯, 赵智杰, 等. 北京大学未名湖沉积物中主要重金属 250 年以来的变化[J]. 环境化学, 2003, 22(1): 93-94.
- [18] 龚子同, 黄标. 关于土壤“化学定时炸弹”及其触暴因素的探讨[J]. 地球科学进展, 1998, 13(2): 184-191.
- [19] 周国华, 吴小勇, 周建华. 浙江省北部地区土壤元素有效量及其主要影响因素[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 316-322.
- [20] 周国华, 汪庆华, 董岩翔, 等. 土壤-农产品系统中重金属含量关系的影响因素分析[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(增刊): 226-231.
- [21] 周国华, 黄怀曾, 何红蓼, 等. 北京市东南郊自然土壤和模拟污染影响下 Cd 赋存形态及其变化[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 25-27.
- [22] 周国华, 谢学锦, 刘占元, 等. 珠江三角洲潜在生态风险: 土壤重金属活化[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1088-1093.
- [23] 范迪富, 黄顺生, 廖启林, 等. 不同量剂凹凸棒石粘土对镉污染菜地的修复实验[J]. 江苏地质, 2007, 31(4): 323-328.
- ① 奚小环, 任天祥, 陈国光, 等. DD2005-01 多目标区域地球化学调查规范. 中国地质调查局, 2005.
- ② 谢学锦, 成杭新, 严光生, 等. 全国环境地球化学监控网络与动态地球化学图. 地矿部“八五”重大基础科研项目研究成果报告, 1996.
- ③ 杨忠芳, 成杭新, 周国华, 等. DD2005-02 区域生态地球化学评价技术要求. 中国地质调查局, 2005.
- ④ 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 地球物理地球化学勘查研究所, 北京化工大学. 国土资源部“十五”科技项目《缓变型地质灾害风险评价与防治》专题《珠江三角洲土壤中化学定时炸弹的监控研究》成果. 2001—2003.
- ⑤ 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所. 中国地质调查局“十一五”计划项目《资源与环境地球化学勘查与评价方法技术研究和推广》支持的研究内容《中国东部典型地区土壤环境变化与生态效应评价的方法技术研究》成果. 2006—2008.