

缓变型地球化学灾害:特征、模型和应用

陈 明^{1,3,4}, 冯 流², 周国华³, 谢文明⁴, Jacques Yvon⁵, 曹晓娟¹, 陈红军^{1,2}

CHEN Ming^{1,3,4}, FENG Liu², ZHOU Guohau³, XIE Wenming⁴,

JACQUES Yvon⁵, CAO Xiaojuan¹, CHEN Hongjun^{1,2}

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 2. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029;

3. 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; 4. 吉林农业大学, 吉林 长春 130118;

5. *Laboratoire Environnement et Mineralurgie. BP 50. F-54501, Vandoeuvre les Nancy Cedex, France*

1. *National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China;*

2. *Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;*

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

4. *Jilin University of Agriculture, Changchun 130118, Jilin, China;*

摘要:“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 and 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。

关键词:缓变型地球化学灾害;生态环境地球化学;评价;污染物的可释放总量;活动性污染物的总浓度

中图分类号:P595

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2005)10~11-0916-06

Chen M, Feng L, Zhou G H, Xie W M, Jacques Yvon, Cao X J, Chen H J. Delayed geochemical hazards: Characteristics, modeling and application. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10-11):916-921

Abstract: Delayed geochemical hazard (DGH) is a kind of serious ecological and environmental hazard caused by long-term accumulated pollutant that reactivated suddenly and released sharply from stable species to active ones in soil or sediment system due to the change of physical-chemical conditions (such as temperature, pH, E_h , moisture and the concentrations of organic matters, etc) or the decrease of environment capacity. The hazard has profound intrinsic characteristics, and can be expressed as a nonlinear polynomial, which provides a practical tool for assessment and early-warning of the hazard. Thus, it is of great significance for the “Ecological and Environmental Geochemistry Mapping Plan”.

Key words: delayed geochemical hazard; ecological and environmental geochemistry; assessment; total releasable content of pollutants; total concentration of active species

虽然“化学定时炸弹”^[1-9]概念的提出有着深刻的历史背景,但“化学定时炸弹”的概念过于耸人听闻。经过10多年的研究和随着研究深度的不断深入,人们逐步意识到这种叫法

的不科学性,理由如下:①在目前“反恐”的国际形势大背景下,“化学定时炸弹”的称呼容易引起误会;②“化学定时炸弹”作为一种人为的地球化学灾害,虽然可以进行预测,但是

收稿日期:2005-01-24;修订日期:2005-08-17

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999045708)、国土资源部“十五”规划项目(20010301)和法国国家科研中心(CNRS)国际合作项目PICS2039资助。

作者简介:陈明(1967-),男,博士,研究员,从事环境地球化学和勘查地球化学研究。E-mail:hcnming@vip.sina.com

并不能“定时爆发”;③这种灾害的爆发只是整个灾变过程的一部分,用它来概括整个过程是不合适的。因此,在谢学锦等的建议下,正式启用“缓变型地球化学灾害”(delayed geochemical hazard, 简称DGH)的新概念,使得其内涵和外延比“化学定时炸弹”有了新的扩展,更具科学性。这种扩展使人们能够方便地对地球化学灾害这种特殊的地质灾害进行定量研究。

1 缓变型地球化学灾害

“缓变型地球化学灾害”被定义为: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质,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释放出来,并进一步造成污染物的可释放总量(total releasable content of the pollutant, 简称TRCP)超过环境容量,从而造成严重生态和环境损害的灾害^[10,11]。

笔者等在国家973项目和国土资源部“十五”规划项目的资助下,对缓变型地球化学灾害及其定量建模、评价和预测方法作了详细研究^①,认为“缓变型地球化学灾害”可以比较完整地概括出土壤或沉积物系统的整个污染过程,包括从系统开始接受污染物→系统内污染物的迁移和演化→污染物对生态环境的危害。

缓变型地球化学灾害的整个演化过程可以被一个具有较普遍意义的非线性多项式定量地表达出来。这种数学模型为进行生态环境地球化学系统的风险评估提供了一种可供实际采用的基本手段,并可对将来土壤或沉积物系统中环境污染的发生、发展、演化和归宿作出预测,对环境灾害作出预警。因而,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。

2 污染物的可释放性和活动性

上面的定义提到对研究“缓变型地球化学灾害”十分重要的一个新概念:“污染物的可释放总量”(TRCP)。在环境中,绝大部分污染物都存在不同的形态,如价态、结合态、赋存矿物等。有的形态可以被最终释放出来,溶解于水或土壤溶液中,直接或间接地被植物和动物吸收;有的则在常温常压下是稳定的,一般不溶于水,也不会直接或间接地被植物和动物吸收,最典型的是Cr。土壤中的Cr可以以铬尖晶石的形式存在。铬尖晶石在常温常压下极其稳定,甚至在现代冶炼条件下也不容易释放出来,在地表环境下不会被活化,因此对环境是安全的。从这个意义上讲,用总铬来评价土壤质量是不合适的。如果土壤中Cr的总量为 C^T ,其中存在于铬尖晶石中的那部分为 C^S ,则污染物Cr的可释放总量 C^R 在数值上等于 C^T 减去 C^S ,即 $C^R=C^T-C^S$ 。

根据基本的物理化学原理,污染物在不同形态之间的迁移转化与一定的浓度、温度、pH和 E_h 等物理化学条件有关。在一定的物理化学条件下,在某种污染物的TRCP(其浓度表示为 C^R)之中,只有某个或某些特殊形态的污染物(其浓度表示为 D^S)虽然能“最终”释放出来,但在一定的条件下却是稳定的和不能被植物或动物直接利用的,笔者把 $C^A=C^R-D^S$ 称为“活性污染物的总浓度”(total concentration of active species, 简称TCAS),来表示那些“在相应的条件下具有相当活性的并可被植物或动物直接利用的污染物”的浓度。图1表示了污染物的总量与部分之间的关系。

3 缓变型地球化学灾害的特征

3.1 特征

前面已经给出了“缓变型地球化学灾害”的定义,根据对与重金属和有机污染物有关的缓变型地球化学灾害的研究,可将其特征概括于图2。可以用一些简单的数学工具说明和分析如下。

(1)“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,可以划分成3个典型的演化阶段,每个阶段之间各内蕴一个具有特定数学特征的临界点。

一个典型的缓变型地球化学灾害的演化过程可以用图3来表示。在图3中,X坐标为环境系统的TRCP,用变量 C 表示;Y坐标为环境系统的TCAS,用变量 Q 表示。实曲线 L_0 表示TCAS随着TRCP的增长而变化的趋势,2条虚线(L_1 和 L_2)分别为相应的一阶和二阶导数的图形。在X轴上,从点 a 到点 b 之间的TRCP的差表示为 ΔC ,在 L_0 上其对应的Y轴的变化为 ΔQ_1 ;从点 c 到点 d ,一个相同的 ΔC 却可以在 L_0 产生一个比 ΔQ_1 大得多的 ΔQ_2 ,这就是TCAS的非线性暴涨,正是这个现象曾经被称为“化学定时炸弹”。

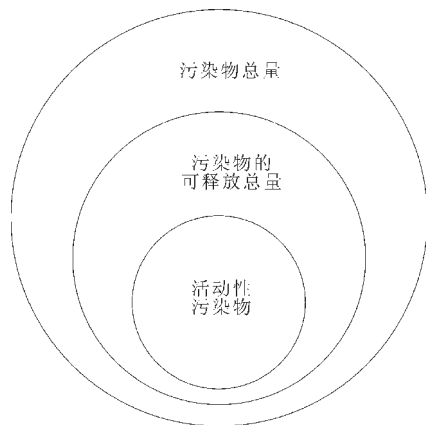


图1 污染物的总量与部分之间的关系

Fig.1 Relation between the total quantity of pollutants and their parts

① 陈明,葛晓立,周国华,等.国土资源部“十五”规划项目《缓变型地球化学灾害风险评估与防治》研究报告.地质资料馆.

研究发现, $L0$ 可以表示为一个非线性多项式:

$$Q=a_0+a_1C+a_2C^2+a_3C^3+\cdots\cdots\cdots(1)$$

式(1)的一阶导数和二阶导数可以清晰地表示出缓变型地球化学灾害的3个发展阶段及它们的临界点。2个临界点和爆发最剧烈的点具有以下数学特点:

爆发临界点($P1$): $Q'=0, Q''=0$, 曲线左侧向下凹右侧向上凹 (2)

爆发最剧烈的点: $Q'=\max, Q''=0$, 曲线向上凹 (3)

积累临界点($P2$): $Q''=\min$, 曲线左侧向上凹、右侧向下凹 (4)

$P1$ 点的左侧为积累阶段, $P1$ 与 $P2$ 之间为爆发阶段, $P2$ 点的右侧为弛豫阶段。在一个演化周期范围内, 多项式(1)的最高次数一般为3。

长期(50年)积累实验研究表明, 缓变型地球化学灾害的发展还具有多重性, 具有多重套合的结构特性。也就是说, $P2$ 点实际上是前一个灾害爆发的结束, 同时也是下一次更严重的灾害爆发的开始。限于篇幅, 有关成果将另行发表。

(2)缓变型地球化学灾害具有明显的时间效应, 即灾害发生的“延缓效应”、灾害发展过程的“缓变性”和灾害爆发的“突发性”。

污染物的积累能否形成地球化学灾害依赖于4个主要因素:①污染物的种类与输入速度;②环境容量;③物理化学条件及其改变;④生物对污染物的脆弱度。

假定一个干净的环境系统, 对于绝大部分污染物而言, 开始输入时其危害性会因系统的“环境容量”而并不明显。但是, 如果污染物的毒性特别大, 或者输入的速度特别快, 系统内的TRCP会很快超过环境容量, 从而对生态系统产生危害。TRCP会很快超过环境容量可能有2种情形:①土壤或沉积物系统的环境容量不变, 而TRCP增加, 导致TRCP大于环境容量;②TRCP不变, 但系统的环境容量由于温度、压力、pH值、 E_h 值、干湿比等条件发生不利的变化而缩小, 使得TRCP相对地大于环境容量。从现实的角度看, 能够造成上述2种情形的直接原因可能有三:①污染物的持续输入;②土地利用方式的改变或沉积物系统遭到破坏(如清淤、洪水扰动等);③由于自然因素造成的水土比变化、物理化学条件改变和土壤(沉积物)的物理结构、矿物成分、化学性质的变化。

灾害造成的损失对不同的植物和动物都会有所差异, 其原因是:各种不同的植物对土壤中的微量元素的吸收是有选择性的, 意味着缓变型地球化学灾害的发生可能只对该地区的若干植物产生危害, 而不是所有植物;同时, 由于高等动物(包括人)也是选择性地利用植物, 同类动物的不同个体对食物的偏好也会有差异, 因而灾害的发生对动物的影响具有概率特性, 并不存在“一一对应”或“非此即彼”的确定关系。但这并不影响用合适的数学工具进行定量分析和研究。

以上是“土壤-植物-动物-人”链中的情形, 在“水体(包括水和沉积物)-水生植物-水生动物-人”链中也类似。除此以外, 不同的生物种类和个体对污染物的“抵抗能力”也会有很大的差异。缓变型地球化学灾害的危害性将首先在那些抵抗能力差、较脆弱的群落或群体中体现出来, 而在抵抗力强

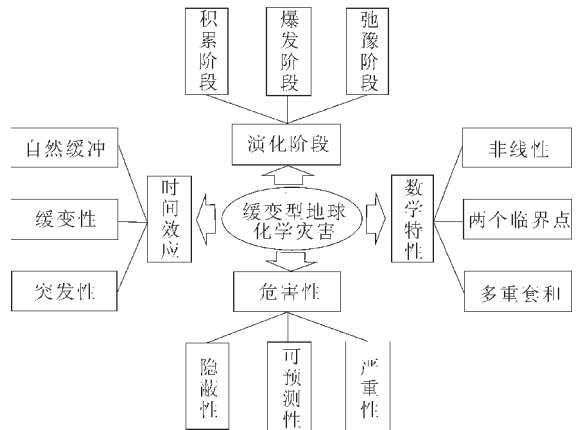


Fig.2 Characteristics of delayed geochemical hazards

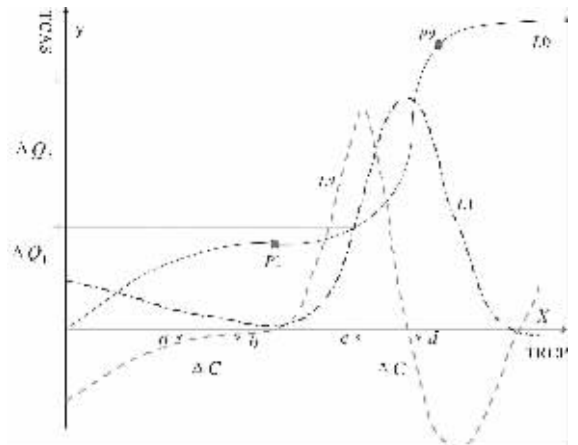


图3 缓变型地球化学灾害的演化过程

Fig.3 Evolutionary process of delayed geochemical hazards

的群落或群体中则会产生明显的滞后效应。

(3)缓变型地球化学的发生、发展和爆发过程具有隐蔽性, 只有通过长期监测才能发觉和预测, 因此常被政府部门和公众所忽视, 一旦爆发, 就会因缺乏必要的思想和技术准备而不能防患, 造成的损失会更大。

缓变型地球化学灾害的整个过程都是悄悄进行的, 在造成严重损害之前一般没有明显的物理变化。这一点与大气和水污染很不相同, 大气和水污染容易被看到和重视, 研究也最多。经过数十年的发展, 已有众多大气和水环境的监控-评价-预测-预警-防患-治理手段, 一旦有突发事件发生, 有诸多预案和技术可供利用, 而土壤污染和沉积物中的污染则完全不同。

首先, 土壤和沉积物系统历来被认为是藏污纳垢的无底洞。人类自青铜器时代掌握了冶炼术以来就开始向土壤排放各种各样的污染物; 中国的炼丹术就产生S、As、Hg、Pb等污染

物。采矿和冶炼既破坏了自然生态,也向自然界释放大量的非自然物质。人类在进行工农业生产活动、创造财富、求得自身发展和享受物质文明的同时,总是把各种各样的工业、农牧业和生活废弃物倾倒在土地和河流中,特别是工业革命以来,随着社会生产力和经济技术的高速发展,人类对环境的扰动程度和污染强度也在不断加强,甚至到了无以复加的程度。污染物的种类越来越多,可降解性越来越小或根本不能降解,毒性和治理难度越来越大。

其次,土壤和沉积物系统的污染具有隐蔽性。沉积物深藏于湖泊、水库和河流底部,一般不会直接观察或触及到,即使发生颜色等物理性质的变化也常常被忽视或根本观察不到。不但公众对此不敏感,而且,如果不进行长期监测,即使是相关学科的专家也不能对其作出预测和预警,因而政府部门也得不到足够的决策信息。正因为如此,有关缓变型地球化学灾害的研究远远落后于其他学科,有关的知识、技术、经验、应急预案、防患措施等匮乏,一旦遇到危机发生,便会造成不应有的损失。

第三,盆栽试验表明,土壤中这些活性态污染物的暴涨可以造成土壤动物和若干农作物中相应污染浓度的升高。缓变型地球化学灾害造成的危害往往是“难以”甚至“不可”修复的,其直接的危害可能有2方面:①灾害爆发,造成大面积植被和动物发育迟缓,大面积农产品质量下降,大量农作物、植被和土壤动物死亡,癌症、动物先天性缺陷、怪病和地方性疾病爆发,动物性行为异常,土地报废等。②植物和动物慢慢适应环境的变化,但由于有毒物质的影响,产生基因变异。这2种情形都是极其有害的。

3.2 其他需要说明的问题

(1)缓变型地球化学灾害主要发生在土壤或沉积物系统中,大气系统或水系统(不包括水体中的沉积物)中一般不会发生缓变型地球化学灾害。原因是:①大气中的污染物可以通过干湿沉降而最后归宿于土壤或沉积物系统,不易长期积累。虽然历史上曾经发生过多次“光化学烟雾”和“粉尘爆炸”事件,但在这些事件中,污染物的积累时间较短,发展速度很快,不是“缓变型”的。②在水溶液中,如果污染物以溶液形式存在,那么它本身就是呈活性状态的,不存在“重新活化”的问题。③理论上,如果污染物在水中以胶体或悬浮物形式存在,那么就有可能长期积累,但目前尚未见到“从胶体或悬浮物中爆发性地释放大活动态污染物”的报道。

(2)缓变型地球化学灾害中,污染物可能是“外源性”的,也可能是“内源性”的。外部污染物的输入可以但不是必然地引发灾害的发生——土地利用方式或系统的物理化学条件变化也可引发灾害。引起缓变型地球化学灾害的污染物一般是具有较稳定物理和化学性质的重金属、金属化合物、人工合成有机污染物、金属有机化合物、放射性核素等。灾害爆发时将伴随大量的化学物质的迁移和转化,并有可能发生时空传播的现象或链式反应。

4 DGH在生态环境地球化学评价和预测中的应用实例

研究区地处华北地区某大型钢铁公司的东南侧,总面积5.25 km²。钢铁公司的排污渠通过该地区,当地农民用污水灌溉土地。区内土地利用情况复杂,包括公路、铁路、水渠(排污沟)、住宅楼、厂房、公园、苗圃、桃林、农田(蔬菜地)、未利用土地(包括荒地)等。地表水水质分析结果表明,本地区Cd、Pb和Cr污染严重。

用修正的Tessier方法^[2]对土壤中重金属的5种形态:可交换态(M_E)、碳酸盐结合态(M_C)、铁锰氧化物结合态(M_F)、有机物结合态(M_O)和残留态(M_R)进行了测定(其中M为元素符号)。这5种结合态按照其在水中的溶解度从小到大排列为:M_E<M_C<M_F<M_O<M_R。其中排在较后的形态常常可以转化为排列较靠前的形态,例如M_R可以向M_E、M_C、M_F和M_O转化,M_O可以向M_E、M_C和M_F转化,M_F可以向M_E和M_C转化,M_C可以向M_E转化等。

需要指出的是,水或者土壤溶液在上述转化过程中有重要作用。上述形态之间的转化在固体中是难以实现的,必须有水的参与,水在转化过程中起到了“媒介”的作用。但目前对于不同水土比条件下的形态转换是否有差异、差异有多大等问题尚无详细研究。

4.1 Cr的缓变型地球化学灾害模型和数学特征

由于Cr的特殊性,TRCP_{Cr}=Cr_E+Cr_C+Cr_O+Cr_F。实验数据表明,下列形态之间存在缓变型地球化学灾害的演化规律:Cr_E与Cr_{E+C+O}之间、Cr_{E+C}与Cr_{E+C+F}之间、Cr_{E+C}与Cr_{E+C+O}之间、Cr_{E+C}与Cr_{E+C+O+F}之间、Cr_{E+F}与Cr_{E+C+F}之间、Cr_{E+F}与Cr_{E+O+F}之间、Cr_{E+F}与Cr_{E+C+O+F}之间、Cr_{E+O}与Cr_{E+C+O}之间、Cr_{E+O}与Cr_{E+O+F}之间、Cr_{E+O}与Cr_{E+C+O+F}之间、Cr_{E+C+F}与Cr_{E+C+O+F}之间、Cr_{E+C+O}与Cr_{E+C+O+F}之间和Cr_{E+O+F}与Cr_{E+C+O+F}之间。例如,Cr_{E+C}与TRCP_{Cr}之间的关系如图4所示,其拟合方程为:

$$y=0.0003x^3-0.015x^2+0.2578x \quad (5)$$

对方程(5)求二阶导数y''并使得y''=0,可得TACP_{Cr}=16.7 mg/kg和Cr_{E+C}=1.52 mg/kg。由实际曲线可见,在TACP_{Cr}=16.7 mg/kg时,曲线由向下凹变成向上凹,说明TRCP_{Cr}释放向Cr_{E+C}转化的速度加速,该坐标点为缓变型地球化学灾害的爆发临界点。由图4可见,当TRCP_{Cr}的浓度在10~16.7 mg/kg之间时,方程(5)的斜率几乎为零,也就是说,TACP_{Cr}的浓度的增加不会导致“可交换态”Cr的增加;而当TRCP_{Cr}的浓度在30~40 mg/kg之间时,方程(5)的斜率(一阶导数)处于最大值,也就是地球化学灾害爆发达到最剧烈的阶段。又例如,Cr_{E+C}与Cr_{E+C+O}之间的关系也比较符合缓变型地球化学灾害的规律,拟合方程为:

$$y=0.0034x^3-0.073x^2+0.5497x \quad (6)$$

二阶导数y''为零处Cr_{E+C+O}=7.16 mg/kg, Cr_{E+C}=1.44 mg/kg Cr_{E+C+F}与TRCP_{Cr}的拟合方程为:

$$y=0.0012x^3-0.0628x^2+1.1802x \tag{7}$$

二阶导数为零处 $TRCP_{Cr}=17.4\text{ mg/kg}$, $Cr_{E+C+F}=7.85\text{ mg/kg}$ 。

4.2 发生Cr缓变型地球化学灾害的概率风险

如前所述,缓变型地球化学灾害的发生是具有概率特征的。对比原始数据发现, $Cr_{E+C}\geq 1.44\text{ mg/kg}$ 的样品占总数的40%, $Cr_{E+C}\geq 1.52\text{ mg/kg}$ 的样品占总数的33.33%, $Cr_{E+C+F}\geq 7.85\text{ mg/kg}$ 的占40%。这说明在研究区有大约33%~40%的面积中 $TACP_{Cr}$ 的含量超过缓变型地球化学灾害的临界点值,具有缓变型地球化学灾害爆发的可能性。

从 $Cr_{E+C+F+O}\rightarrow Cr_{E+C+F}\rightarrow Cr_{E+C}\rightarrow Cr_E$ 逐级释放,每一级之间都可能存在缓变型地球化学灾害的可能性,并最终导致可交换态重金属浓度的急剧增加,这就是缓变型地球化学灾害的多重性。 $Cr_{E+C+F+O+R}$ 与其他形态没有上述缓变型地球化学灾害的关系曲线,证实铬尖晶石中的Cr对地表环境是安全的。

4.3 缓变型地球化学灾害的预测

形如方程(5)、(6)和(7)的拟合方程是预测缓变型地球化学灾害的关键。对于一个质量为 m 的土壤系统,假定污染物输入系统后在系统内均匀分布,当前污染物浓度为 c ,爆发临界点值为 c_{BCP} ,污染物的输入速度为 v ,那么,爆发缓变型地球化学灾害所需的时间 t 为

$$t=\frac{m(c_{BCP}-c)}{v} \tag{8}$$

4.4 缓变型地球化学灾害的成因轨迹与传播

Cr_E 是植物吸收Cr作为自己的营养物质的来源。 Cr 的释放途径可以表达为 $Cr_{E+C+F+O}\rightarrow Cr_{E+C+F}\rightarrow Cr_{E+C}\rightarrow Cr_E$ 。在每一个释放阶段,缓变型地球化学灾害都可能发生。只要 $TRCP$ 超过了爆发临界点(burst critical point,简称BCP)的值,就会造成 Cr_E 的暴涨。

根据上述符合缓变型地球化学灾害的“形态对”或“形态组合对”可以得到从 $Cr_{E+C+F+O}$ 到 Cr_E 的 Cr 的释放途径(图5)。图5中,实线箭头表示DGH关系,虚线箭头表示非DGH关系。由图5可见,只有那些含有 Cr_E 的形态或形态组合之间可能发生这种灾变。这种现象表明了“可交换态”在缓变型地球化学灾害中的主导地位。

在图5中,左边的那些“形态组合对”的浓度的升高可导致右边那些“形态组合对”的浓度的暴涨,导致 Cr_E 的急剧上升。因此,在时间上存在从 $Cr_{E+C+F+O}$ 到 Cr_E 的链式反应。这种链式反应还可以造成缓变型地球化学灾害在空间上的传播。一旦 Cr_E 在某地大量释放出来,就可以借助于水介质远距离迁移,并导致“新地方” $Cr_{E+C+F+O}$ 、 Cr_{E+C+F} 、 Cr_{E+C} 和 Cr_E 的升高,并在那里导致新的灾害发生。

5 结论和讨论

“缓变型地球化学灾害”是根据谢学锦等的建议提出来的,是对“化学定时炸弹”的扩展和科学化,其内涵和外延比“化学定时炸弹”要丰富得多,其过程可以用一个具有普遍意

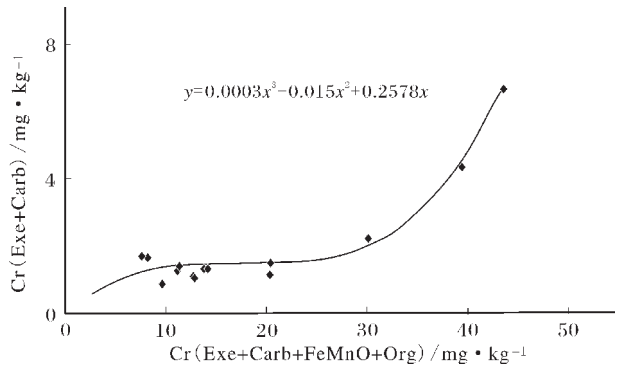


图4 研究区土壤中 Cr_{E+C} 与 $TRCP_{Cr}$ 之间的关系
Fig.4 Relation between Cr_{E+C} and $TRCP_{Cr}$ in soils of the study area

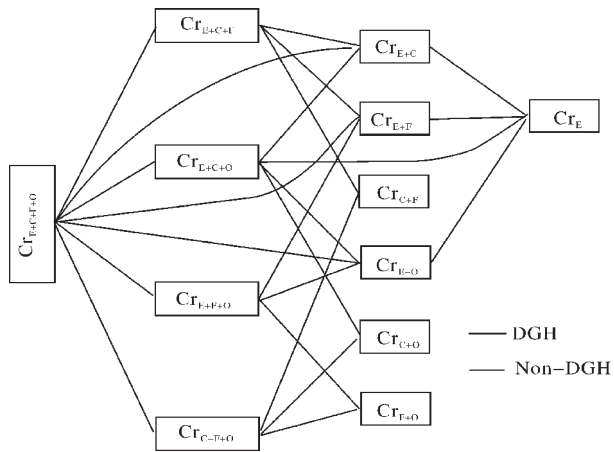


图5 Cr元素缓变型地球化学灾害的轨迹
Fig.5 Geochemical path of Cr DGH

义的非线性方程来表示。污染物的形态转化是缓变型地球化学灾害发生的重要机理,“污染物的可释放总量”和“活动性污染物的总浓度”是2个重要的新概念,与“环境容量”一起构成研究DGH的基本工具。

上述案例研究表明, Cr 具有明显的DGH特征,利用 Cr 的DGH非线性多项式,可以对DGH进行风险评估、灾害预测和灾害发生轨迹的研究。尚没有足够的证据说明所有的污染物及其积累过程都具有缓变型地球化学灾害的特性。一些实验数据说明,有的污染物不具备这样的特性,但由于自然土壤的复杂性,尚不清楚这是由于地球化学元素本身的性质造成的还是由于模拟试验的方法和过程造成的。但缓变型地球化学灾害的模型确实为进行土壤污染和灾害预警提供了定量研究方法,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。

本文使用Tessier的观点和方法研究了污染物的形态,用其他分析方法能否获得相似的结果有待于进一步研究。

参考文献:

- [1]Stigliani W M. Changes in valued “capacities” of soils and sediments as indicators and time delayed environmental effects [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1988,10:245-307.
- [2]Stigliani W M. Chemical time bombs: definitions, concepts, and examples[C]. Executive Rep. 16 (CTB Document 1; Rep. of the 1st “Chemical Time Bomb” workshop, held at Borger, Netherlands, in August 1990, Participants: P. Doelman, W. Salomons, R. Schulín, G. R. B. Smidt, W. M. Stigliani, and S. van der Zee), Int. Inst. Appl. Syst. Anal., Laxenburg, Austria, 1991. A-2361.
- [3]Stigliani W M, Doelman P, Salomons W, et al. Chemical time bombs: Predicting the un-predictable [J]. Environment, 1991, 33(4): 4-9, 26-30.
- [4]Schulín R, Geiger G, Furrer G. Effects of changing soil and sediment environments on the Binding Capacity of organic matter for contaminants[A]. In: ter Meulen G R B, Stigliani W M, Salomons W, et al eds. Chemical time bombs[C]. Proc. European State-of-the-art Conf. on Delayed Effects of Chemicals in Soils and Sediments 2-5 September 1992, Veldhoven, Published by Foundation for Ecodevelopment “Stichting Mondiaal Alternatief”, Hoofddorp, The Netherlands, 1993.53-60.
- [5]Xie Xuejin. Research of chemical time bomb[J]. China Geological Acta, 1993, 20(4): 18-19.
- [6]Geiger G, Schulín R, Furrer G. Effects of changing environmental conditions on the binding capacity of soil organic matter for heavy metals[C]. Study for the “Chemical Time Bombs Project”, Foundation for Ecodevelopment “Mondiaal Alternatief”, Hoofddorp, The Netherlands, 1994.46.
- [7]Schulín R, Geiger G, Furrer G. Heavy metal retention by soil organic matter under changing environmental conditions [A]. In: Salomons W, Stigliani W M eds. Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments-risk assessment of delayed and non-linear responses[C]. Springer, Berlin, 1995.53-85.
- [8]The UN GEO Team. Global environment outlook 2000 [M]. UNEP, 1999.1-20.
- [9]Yan Guangsheng, Xie Xuejin. Chemical time bomb and sustainable development[J]. China Geological Acta, 2001, 28(1):13-18.
- [10]Chen Ming, Feng Liu, Jacques Yvon^a. Accumulation and release of typical heavy metals in soil and chemical timing bombs [C]. International Conference on Environmental and Public Health, Management, Hongkong Baptist University, November 17-19, 2004.
- [11]Chen Ming, Feng Liu, Jacques Yvon^b. Delayed geochemical hazard: the concept, model and case study[C]. The 2nd symposium on soil pollution and remediation across the Taiwan Strait, Nankai University, Tianjin, China, Sept. 24-27, 2004.
- [12]Tessier A, Campbell P C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytica Chimica Acta, 1979,51: 844-850.