

系统动力学在太原盆地重金属 地球化学预警模型中的应用

王雄军¹, 赖健清¹, 孔 华¹, 张建东¹, 李德胜², 周继华², 王建武²
(1. 中南大学 地学院, 长沙 410083; 2. 山西省地质调查院, 太原 030001)

摘 要: 系统动力学是一门研究信息反馈系统的科学。以太原盆地土壤重金属元素背景值为评价标准, 对太原盆地重金属元素数据进行分析, 利用系统动力学软件(*Vensim PLE*)建立重金属系统动力学模型, 结合地质累积指数方法对 *As*, *Ni*, *Cr*, *Zn*, *Cu*, *Pb*, *Hg*, *Cd* 等 8 种重金属元素的累积进行预测, 并对结果进行了有效的分析。
关键词: 系统动力学; 太原盆地; 重金属; 地质累积指数; *Vensim PLE*
中图分类号: *X53*; *P632* 文献标识码: *A* 文章编号: 1001-1412(2008)04-0343-05

0 引言

太原盆地地处黄土分布区, 盆地内有若干大断陷盆地, 地形地貌和地表物质组成特殊^[1]。山西也是我国重要的能源重化工基地, 作为产煤大省, 煤炭污染时间集中, 污染面广, 污染程度高, 加之降雨少, 地表径流少, 污染物排泄不畅, 生态环境污染形势更加严峻, 是国内乃至世界严重污染的地区之一。因此研究重金属污染物在土壤中的分布、含量特征以及进行污染程度评价, 对于查明太原盆地土壤环境质量, 以及社会的可持续性发展具有重要意义。运用系统动力学知识和软件 *Vensim PLE*, 应用地质累积指数^[2]对太原盆地浅层重金属污染情况进行了模拟, 做出了系统动力学模型, 得出了更具体的预警结果。

本文研究的目的是了解太原盆地土壤的生态环

境地球化学特征, 查明 8 种重金属元素的分布状况, 进行土壤污染评估与预警, 为太原盆地农业和城市污染治理、建立生态地球化学系统动力学预警模型、为保护生态地球化学环境提供依据。

1 土壤背景值的获取方法

本区土壤背景值样品取自区内的底层土, 盆地深层样品数 432 个。取样深度一般为 150~175 cm, 底层土壤基本代表了不受或很少受到人类活动影响的原始环境(即第 I 环境)的特征。取样密度 4 km²/点, 并由多点组合而成, 分析测试 16 km² 一个样品, 即 4 个单点组合成一个分析样, 对样品进行分析测试。对样品的测试结果采用, 利用区域地球化学数据库管理系统 *PGD* 统计, 分布检验进行 $\bar{x} \pm 2S$ 逐步迭代剔除求其平均值。表层样品直接计算其平均值。背景值详情见表 1。

表 1 土壤重金属背景值

Table 1 The background values of heavy metal in the soil of Taiyuan basin

元素名称	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
背景值	65.1	28.2	21.5	61.6	10.2	0.1	0.03	20

量的单位: $w_B/10^{-6}$

2 系统动力学

系统动力学(system dynamics, SD)是1956年麻省理工学院(MIT)福瑞斯特教授始创。50年代后期发展为一门新的领域,初期用于工业企业管理,早期称工业动力学。60年代是系统动力学成长的重要时期。1961年《工业动力学》^[3]、1968年《系统原理》^[4]、1969年《城市动力学》^[5]等著作问世。这是60年代系统动力学的3本著作,《城市动力学》总结美国城市兴衰问题的理论与应用。这一阶段是SD成长的重要时期,在理论与应用方面为其壮大与成熟奠定了坚实的基础。70年代,罗马俱乐部提出了世界模型的研究任务。我国学者在80年代初开始在国内传播和推广系统动力学,由复旦大学教授、MIT理工学院终身院士杨通谊引进的。王其藩^[6-8]先生在80年代初就在MIT作研究时得到了福瑞斯特教授的悉心指导,并成为MIT斯龙管理学院系统动力学研究中心的终生成员。有关系统动力学的研究主要在邮政系统、高校行政、房地产、税收、石油、宏观经济等领域展开。在生态地球化学领域仍属空白。

SD之建模大大不同于过去常用的功能模拟法,其模型模拟具有结构-功能模拟的突出特点,也就是白箱模拟。系统行为的发生与发展主要根植于系统内部。在一定条件下,外部环境的变动、外部的干扰会起着重要作用,但归根结底,外因只有通过系统的内因才能起作用。所以我们研究的重点就是把内因和外因区分开来。以定性分析为先导、定量分析为支持,两者相辅相成,螺旋上升、逐步深化和解决问题。

2.1 系统动力学模型

系统动力学模型是现实系统的“实验室”。它是现实系统的简化与代表,是真实世界的某些断面和侧面。建模不等于对现实系统的复制,不可能有所谓原原本本、一一对应、按真实世界去建立的模型。系统动力学模型与现实系统的关系见图1。

2.2 系统动力学预警模型

环境预警模型方面已经有不少的研究,但用系统动力学在生态地球化学方面还没有过。通过对地球化学和系统动力学的学习理解,用系统动力学理论在生态地球化学上的建模是可行的。本文以Hg元素为例,说明重金属元素系统动力学建模的整个过程。

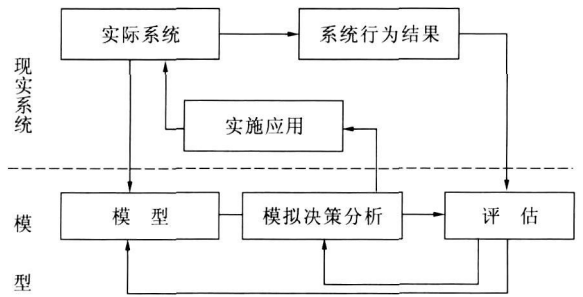


图1 系统动力学模型与现实系统关系图

Fig. 1 The system dynamics model VS the realization system diagram

2.3 预警模型建模过程

这个过程大体可分为5步:首先要用系统动力学的理论、原理和方法对研究对象进行系统分析;其次为系统的结构分析,划分系统层次与子块,确定总体的与局部的反馈机制;第3步是建立数学的、规范的模型;第4步是以系统动力学理论为指导,藉助模型进行模拟;第5步为检验评估模型。下面简要介绍各步骤的主要内容。

(1) 系统分析。初步划定系统的界限,确定内生变量、外生变量、输入量。把整个系统考虑成一个封闭系统,把与建模目的关系密切、重要的量都划入系统边界内,系统的行为就是由内部决定。对于我们这个课题,就是把与重金属元素含量密切相关的量(即重金属含量的主要影响因素)找出来,建立重金属预警系统。

(2) 结构分析。通过对关于元素含量影响因素分析确定了元素含量结构,在反馈系统中,积累环节被称为状态变量或位。“位”的涵义系源自流体在容器中积存的液面高度(如水位)。系统动力学认为反馈系统中包含连续的、类似流体流动的积累过程。速率或变化率,随着时间的推移,使状态变量的值增或减。在环境污染过程中,可以肯定元素含量受污染率和治理率的影响,如图2所示。

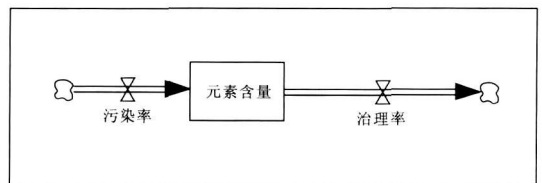


图2 元素含量流程图

Fig. 2 The flow chart of element content

(3) 建立数学规范模型。地质累积指数(Geoac

cumulation Index) 通常称为 Müller 指数, 是 20 世纪 70 年代晚期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标, 其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_m}{1.5 \times BE_m} \right]$$

(1)

式中, C_m 为样品中元素 m 的浓度; BE_m 为地球化学背景浓度; 1.5 为常数, 是考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变动。

地质累积指数可分为几个级别, 如 Forstner^[9] 等 (1990) 分为 7 个级别, 0~ 5 级表示污染程度由无到极强, 最高一级 (6 级) 的元素含量可能是背景值的几百倍。公式 (1) 表明, 地质累积指数除取决于样品的测定浓度外, 还与地球化学背景值的选择有关。由于不同的地球化学背景值具有很大的差异, 因此, 获得的重金属的污染 (富集) 信息也有所不同。

用 DYNAMO 语言建立方程, 估计参数, 确定初始值。主要公式如下:

①元素含量 = INTEG (污染率 - 治理率, 0.092) (量的单位: $w_B/10^{-6}$); ②污染率 = 年污染率 + 地质累积函数 (量的单位: $w_B/10^{-6}$); ③治理率 = (偏差 / 土壤背景值) × 环境政策影响 × 3 (量的单位: $w_B/10^{-6}$); ④测试函数 = RAMP (0.002, 2002, 2020); ⑤环境政策影响 = RAMP (0.002, 2002, 2020)

(4) 模型模拟。用系统动力学可视化软件来建模。现在都用 VENSIM 软件进行建模。建模效果见图 3。

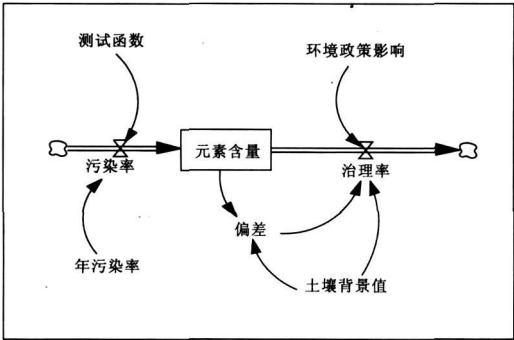


图 3 元素含量模型简图

Fig. 3 The content model about the content

3 预警模型

(1) Vensim PLE。Ventana Simulation Environment Personal Learning Edition 即 Ventana 系

统动力学模拟环境个人学习版。通过使用该软件可以对系统动力学模型进行构思、模拟、分析和优化, 同时可以形成文档。

(2) 模型建立的一般过程。进行系统分析、设立流位流率、建立结构模型和方程、确定参数; 建模: 画出入树或流图填入方程和参数; 再进行模拟, 结构分析及真实性检验; 最后对数据集进行分析。

(3) 模型建立后的静态分析。模型建立后, 在运行前后均可以进行静态分析。静态分析主要是一种结构分析, 如原因树分析、结果树分析 (图 4) 或反馈回路分析。

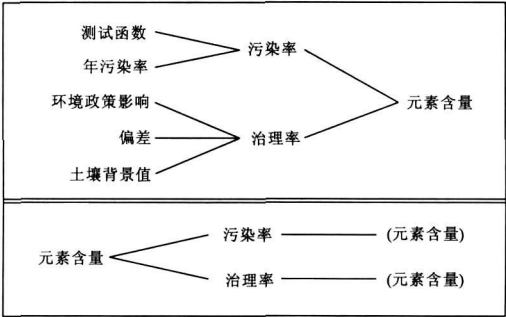


图 4 原因树和结果树形分析

Fig. 4 The treeing analysis of the causes and the results
上图为原因树分析图, 下图为结果树分析图

(4) 仿真计算及数据集分析。有治理的理想模型结果 (以 Hg 元素为例) 和天然预测模型结果 (以 Hg 元素为例)。

4 预警结果分析

4.1 综合分析

对 1 737 个盆地浅层样品用系统动力学模拟, 结果可以看出 As, Ni, Cr, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd 的质量分数分别为 11.61×10^{-6} , 30.45×10^{-6} , 70.92×10^{-6} , 79.34×10^{-6} , 26.84×10^{-6} , 26.64×10^{-6} , 0.26×10^{-6} 和 0.20×10^{-6} 。对照背景值作表 (表 2) 可知: Hg, Cd, Pb 的增幅明显, 需加强治理。

表 2 太原盆地背景值- 预警值对比
Table 2 Comparison of background and
prewarning values for Taiyuan basin

元素	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
背景值	65.1	28.2	21.5	61.6	10.2	0.11	0.03	20
预警值	70.92	30.45	26.84	79.34	11.61	0.20	0.26	26.64

量的单位: $w_B/10^{-6}$ 。

通过对元素含量、污染率和处理率的描述, 预警模型全面勾画了现实中重金属元素污染趋势, 污染率的不断上升和治理率的停滞形成鲜明对比, 反映了太原盆地注重工农业生产, 却忽略了其生产过程对环境的影响, 因而污染元素没能得到有效的控制。

4.2 汞元素分析

对 Hg 元素的预警结果表明: 如果污染没有得到治理, Hg 的含量在 2020 年将会由现在的 0.092×10^{-6} 升至 0.26×10^{-6} , 超出国家标准 (0.018×10^{-6}) 和背景值 (0.021×10^{-6}), 造成严重污染。

对比汞元素目前的实际含量和预测含量, 运用预测值和太原盆地表层土壤数据各作全区含量地球化学图(图 5), 可以清晰地看到在祁县、介休、孝义

市、太谷、平遥、晋中市、太原市和汾阳市, 汞的污染发展趋势依次增大; 从整个太原盆地来看, 几乎整个盆地都受汞污染的影响, 预警结果表明汞的污染主要集中在盆地的各大中小城市, 并有不断向外扩散的趋势, 其后果将直接影响盆地的生态环境造成严重污染。

本文提出的太原盆地重金属含量预警模型的建立是一种尝试。由于模型建立过程中所能利用的资料不足, 考虑的影响因素较少, 采用的模型也较为简单, 所以预警结果难免存在偏差。虽然预警结果有可能夸大, 但我们给出了一种演化的趋势, 希望能引起大家的重视。

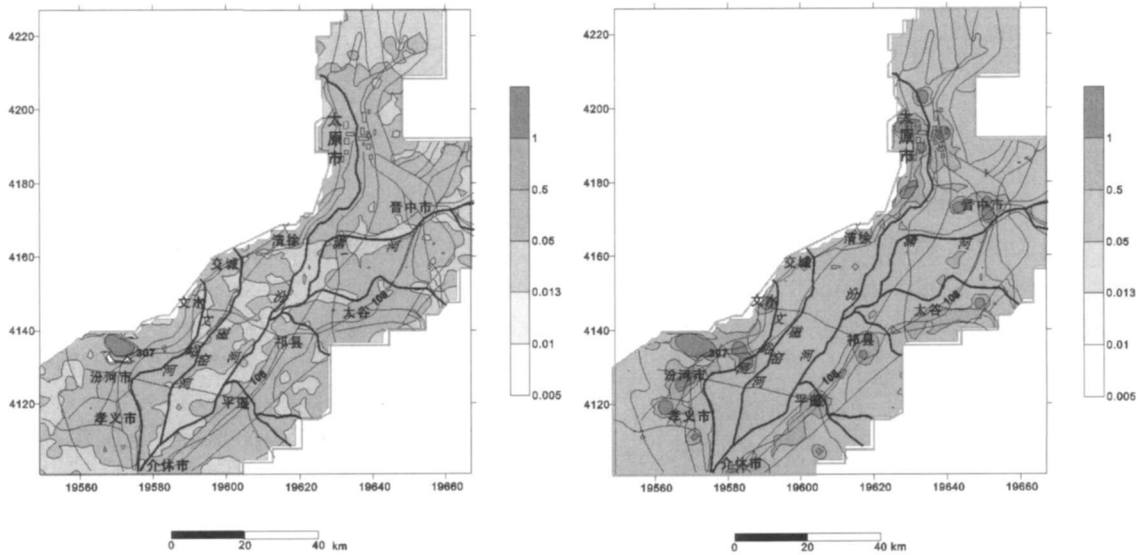


图 5 Hg 元素实际含量与预测值地球化学对比图

Fig.5 The diagram showing the comparison of real content and the prewarning value of Hg
左图为实际含量分布图, 右图为预测值分布图

参考文献:

[1] 李德胜, 杨忠芳, 靳职斌. 太原盆地土壤微量元素的地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2004, 40(3): 86-89.

[2] 腾彦国, 倪师军. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(2): 7-9.

[3] Forrester jay W. Industrial Dynamics[M]. Cambridge, Mass.: The MIT Press. 1961.

[4] Forrester jay W. Principles of Systems[M]. Cambridge,

Mass.: Wright Allen Press, Inc. 1968.

[5] Forrester jay W. Urban Dynamics Cambridge, Mass[M]. The MIT Press. 1969.

[6] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.

[7] 王其藩. 社会经济复杂系统动态分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1992.

[8] Forstner U, Ahlf W, Calmano W, et al. Sediment criteria development contributions from environmental geochemistry to water quality management[C]. In: Heling D, Rothe P, Forstner U, et al. Sediments and environmental geochemistry: selected aspects and case histories. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1990: 311-338.

APPLICATION OF SYSTEM DYNAMICS TO HEAVY METAL PREWARNING MODEL FOR TAIYUAN BASIN, SHANXI PROVINCE

WANG Xiong jun¹, LAI Jiar qing¹, Kong Hua¹, Zhang Jiang dong¹,

LI De shen², ZHOU Ji hua², WANG Jiar wu²

(1. College of Geosciences and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Shanxi Province Geological Survey, Taiyuan 030001, China)

Abstract: System dynamics is the science of research information feedback system. Taking the element background value of heavy metal in soil of Taiyuan basin as the evaluation criteria the heavy metal data of the Taiyuan basin are analyzed. Based on this foundation system dynamics' software (Vensim PLE) is adopted to establish the heavy metal system dynamics model. Then combining with the Geoaccumulation Index method forecast is made to the accumulation of the eight heavy metals: As, Ni, Cr, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd with effective result.

Key Words: system dynamics; Taiyuan basin; heavy metal; Geoaccumulation Index; Vensim PLE

(上接第 342 页)

Abstract: The Qaidam basin has rich oil and gas resources. However, anomalies found in recent years in the area are varied in formation mechanism and multi-explanations thus lead to low rate of proven oil reserves. Based on status and effects of the past conventional non-seismic exploration in Qaidam basin, this article mainly studies the magnetic anomalies of biogas reservoirs in Sanhu area by means of magnetic measurement oil-searching mechanism, polarization of the magnetic data, the residual magnetic anomaly extraction and processing tools of magnetic orthographic drawings, and achieves tangible results.

Key Words: magnetic anomaly; high frequency magnetic anomaly; Redox current magnetic field; natural gas prospect; Qaidam basin;