

谭灵芝,朱怀松,王国友. 2012. 乌鲁木齐地区土壤重金属污染空间分布及污染预警研究[J]. 环境科学学报, 32(10): 2509-2523

Tan L Z, Zhu H S, Wang G Y. 2012. Spatial distribution and early warning of heavy metal pollution in Urumqi[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(10): 2509-2523

# 乌鲁木齐地区土壤重金属污染空间分布及污染预警研究

谭灵芝<sup>1</sup>, 朱怀松<sup>2,\*</sup>, 王国友<sup>3</sup>

1. 重庆工商大学长江上游经济研究中心, 重庆 400067
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830046
3. 重庆工商大学经济管理实验教学中心, 重庆 400067

收稿日期: 2011-12-22      修回日期: 2012-03-03      录用日期: 2012-03-05

**摘要:**以乌鲁木齐市土壤和农作物为研究对象,在大量野外调查采样和样品测试分析的基础上,运用地统计学和 BP 神经网络技术等方法,对研究区内土壤重金属的空间分布及重金属污染进行预警研究. 结果发现,整个研究区重金属污染均呈增强态势, Cr 元素呈现南北两头高、中间低的分布规律,其余各元素均呈现出较为明显的条块状或斑块状分布,且从南到北逐渐降低,高值区主要集中在乌鲁木齐市. 通过 BP 神经网络模型对乌鲁木齐 2015 年和 2020 年土壤重金属含量进行了预测,并对预测结果进行预警分析. 结果表明,未来 10 年内,随着乌鲁木齐社会经济的发展,各行政区重金属元素含量均表现出了累积增长的趋势,其中,天山区、沙依巴克区、新市区和水磨沟区等 4 个主城区预测值普遍高于其他行政区. 从预测结果来看,乌鲁木齐地区未来 10 年内, Cd 元素污染相当严重,将达到重警状态, Zn 元素将达到中警状态,其余各元素基本上处于轻警或无警状态.

**关键词:**乌鲁木齐; 重金属; 空间分布特征; BP 预警

文章编号: 0253-2468(2012)10-2509-15      中图分类号: X53      文献标识码: A

## Spatial distribution and early warning of heavy metal pollution in Urumqi

TAN Lingzhi<sup>1</sup>, ZHU Huaisong<sup>2,\*</sup>, WANG Guoyou<sup>3</sup>

1. Research Center of the Economy of the Upper Reaches of Yangtze River of Chongqing Technology & Business University, Chongqing 400067
2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830046
3. Economic and Management Center of Chongqing Technology & Business University, Chongqing 400067

Received 22 December 2011;      received in revised form 3 March 2012;      accepted 5 March 2012

**Abstract:** The spatial distribution of heavy metals in soil was analyzed with methods of geostatistics and BP based on field investigation and sampling. The situation and environmental risk of heavy metals were subsequently assessed. The results showed that the pollution of Cr was higher in the south and north but lower in the middle part. while the other elements appeared stick- or stripe-shape distribution, decreasing gradually from south to north. The regions with high values of heavy metals were mostly near Urumqi. The contents of heavy metals in Tianshan district, Shayibake district, Xinsiqu district and Shuimogou district were generally higher than other districts of Urumqi. According to predicted content of heavy metals in 2015 and 2020, Cd, with levels higher than the warning value, will cause a severe pollution and should be considered as a priority pollutant. The content of Zn is up to medium warning value, while those of other meals are at highest light warning values.

**Keywords:** Urumqi; heavy metal; spatial distribution; BP forecast

### 1 引言( Introduction )

城市化进程和工农业生产的迅猛发展,极大地

促进了人类社会经济的快速发展;另一方面,大量工业“三废”的排放和农药、化肥的过量使用,也加重了土壤重金属污染程度,尤其是 Pb、Cd、Hg、Cu 及

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目( No. 2010CB951000 );教育部人文社科项目( No. 09XJC790022 )

**Supported by** the National Basic Research Program of China( No. 2010CB951000 ) and the Humanities and Social Sciences Planning Fund of Ministry of Education( No. 09XJC790022 )

**作者简介:** 谭灵芝( 1976— ),女,副研究员, E-mail: tlz. wgy@163. com; \* 通讯作者( 责任作者 ), E-mail: emcwg@163. com

**Biography:** TAN Lingzhi( 1976— ), female, associate professor, E-mail: tlz. wgy@163. com; \* **Corresponding author**, E-mail: emcwg@163. com

其复合污染(史贵涛等,2006).重金属污染具有范围广、持续时间长,难以在物质循环和能量流动中分解的特点,不仅会对资源与环境、农业生产等造成破坏,还可通过食物链进一步危害动物及人类健康(Yang *et al.*, 2004; 黄勇等, 2005; 蔡彦明等, 2006).因此,开展重金属污染土壤调查、预警和修复研究已迫在眉睫.

由于人类活动与自然成土因素的影响,土壤重金属在空间上表现出复杂的变异性,导致土壤重金属时空属性数据的复杂化,而且土壤中不同重金属之间的相互关系也在空间上表现出复杂的相关性与变异性(王学军,2006).White等(1997)对美国土壤Zn含量的空间变异特征进行了半方差分析,发现其空间自相关距离为470 km,并用克里格插值绘制出美国土壤Zn含量的分布图.Chang等(1998)对整个台湾土壤中As的空间变异进行了半方差分析和克里格制图,发现台湾西南地区As含量超过了整个台湾省的平均值.郑袁明等(2003)研究了北京市土壤中Cr、Ni含量的空间结构与分布特征,发现土壤中Cr、Ni存在一定程度的积累现象.Liu等(2004)对浙江杭嘉湖平原重金属的空间变异进行了研究,结果表明,该地区土壤重金属存在明显的变异.

当前,存在多种土壤污染物预测方法和模型,如重金属污染物回归预测方法与预测模型(胡永定,1989)、重金属污染物的动力学预测方法和对时间的3种动态预测模型(卢子杨等,1989)、指数回归和线性回归模型、正交多项式逼近及线性动力学模型等(王增辉等,1992;齐淑华等,2000;刘爱国等,2002).上述方法主要是通过通过在污染物与影响因子之间建立一些线性模型来进行预测,但在自然界中,污染物与影响因子之间表现出的更多的是一种非线性映射关系,以上方法很难解释或者模拟这种非线性关系,而BP神经网络模型在处理无法用公式描述的非线性关系或者不能用数学模型表示的系统时,表现出了极大的灵活性和自适应性,具有较高的预测精度.近年来,已有较多领域利用BP神经网络模型进行预测预警研究(Shen *et al.*, 2009; Shiu *et al.*, 2009).

同时,以上研究主要集中在我国南部和东部地区,对于西北干旱区土壤重金属污染特征、空间变异特征和污染预警问题的研究较少.有色金属是西北干旱区的优势矿产资源,以地处西北干旱区的乌

鲁木齐市为例,其境内分布着丰富的铬、镉、铜、锌、镍等有色金属矿产资源,有色金属矿藏采掘、冶炼和加工等工业的兴起与发展,极大地推动了乌鲁木齐市经济社会的快速发展,但也带来了严重的环境污染问题.研究表明,乌鲁木齐市郊区安宁渠镇农田土壤中重金属元素与背景值相比,有富集的趋势,其中,Cd、Hg的富集趋势较为明显(胡慧玲, 2003).刘玉燕等(2006)通过对乌鲁木齐米东区土壤质量调查发现,柏杨河乡和古牧地镇土壤中铬、镉、砷、铜、锌含量超标;另外,乌鲁木齐城市土壤也受到了不同程度Cr、Cu、Pb、Zn污染,其中,Pb的污染相当严重(刘玉燕等,2007;王亚宇等,2008).干旱区分布的工矿型城市土壤是干旱区居民工农业生产的主要载体,一旦土壤环境被污染,将危害当地的粮食安全和生态安全及居民的身体健康.

从研究的空间尺度上看,目前的研究主要关注某城市内部或者某个功能区土壤、城区土壤、城郊蔬菜地或郊区土壤等小尺度范围内的土壤重金属污染问题,对市、区或县域整体等中尺度及省域、流域范围等大尺度研究较少.此外,目前对于预测预警方面的研究主要集中在水文、气象等方面,对于土壤重金属安全预测预警系统的建立和应用非常有限,尚有待深入研究.

鉴于此,本文以新疆乌鲁木齐为例,采用大尺度(乌鲁木齐河中下游流域)、中尺度(乌鲁木齐市整体)套合小尺度(郊区、城区土壤等)的方法,研究乌鲁木齐地区土壤重金属Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As等7种元素的空间变异特征,并绘制它们的空间分布图.在此基础上,尝试通过改进BP神经网络模型建立重金属含量与社会经济指标之间的非线性映射关系,在Matlab环境下实现BP网络对乌鲁木齐市未来土壤重金属含量的预测预警分析.以期及时了解该地区未来重金属污染变化趋势,开展重金属污染防治和修复治理工作提供科学依据.

## 2 表层土壤重金属含量分布特征 (Distribution characteristics of the heavy metal content on the soil)

### 2.1 样品收集及处理

乌鲁木齐市属于典型的干旱区内陆城市,面积约14000 km<sup>2</sup>,由于有丰富的有色金属资源,市内分布着众多金属冶炼厂、钢铁厂、化肥厂、火电厂、水泥厂等工矿企业.长期以来,随着大量工业“三废”的排放,加上农药、化肥的施用和交通运输等原因,

使城市土壤环境受到了不同程度的污染,尤其是重金属污染问题日益突出.因此,根据乌鲁木齐市基本情况,综合考虑研究区社会经济状况、产业结构、土地利用方式、土壤类型及地形、母质、种植结构等因素,在乌鲁木齐东南西北4个方向布采样点.其中,米东区2007年才从昌吉州分出,并入乌鲁木齐市,乌市的产业结构、交通运输等在短期内对其土壤重金属污染影响有限,因此,在样区分析时单独

列出.此外,考虑到重金属污染的迁移性,沿乌鲁木齐河流域在乌鲁木齐市相邻的五家渠市、安宁渠镇、农十二师也选择若干个采样区,并和乌鲁木齐市进行对比.2009年9—10月期间,按照 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的均匀网格和重点区域加密布点相结合的原则,在研究区采用多点混合取样的方法采样,每个样品采集 $1\text{ kg}$ (由于个别网格被道路、建筑物或水域占据,没有实施采样),共采集428个 $0\sim 20\text{ cm}$ 表层土壤样品,同时使用GPS进行准确定位,采样点具体分布情况见图1.

采集的土壤样品自然风干后,拣去石块、植物根系及各种新生体,将样品充分混合后,采用四分法取一半样品用于备份保存;另一半用玛瑙研钵磨碎,分别过10、20、60目塑料网筛,采用四分法取部分土样进一步研磨,过100目塑料网筛,用于土壤重金属全量及其化学形态测试分析.土壤中重金属全量分析采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消煮法,同时做空白对照,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn用ICP-MS(ELAN DRCII, PerkinElmer, 美国)测定,As用原子荧光仪(AFS-810, 中国)测定.土壤有机质(CM)性质参照鲁如坤(2000)主编的《土壤农业化学分析方法》进行分析,有机质含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定.

## 2.2 土壤有机质

土壤中的有机质,特别是土壤中水溶性有机质(DOM)既能吸附重金属并降低毒性,又可改变土壤重金属形态,提高重金属活性,因此,有机质含量可看作是土壤重金属积累的重要标志(Liphadzi, 2003).研究区内土壤有机质含量变幅为 $4.30\sim 182.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均含量为 $33.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,变异系数为83.98%,属中等变异,空间变异性较大.由表1可知,乌鲁木齐样区有机质含量平均值最大( $46.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),农十二师样区最小( $16.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),各采样土壤有机质含量均值大小顺序为:乌鲁木齐>安宁渠>米东区>五家渠>农十二师.

根据国家土壤肥力状况分级标准,土壤有机质可分为6个级别(表1),研究区内382个采样单元中,土壤有机质含量达到1级的占22.53%,达到2~6级的分别占15.11%、28.30%、29.95%、3.85%和0.27%,其中,达到3级及以上的占65.94%.表明研究区土壤有机质含量处于较高水平,这可能与当地气候、植被、地形、土壤类型及耕作措施等因素密切相关.

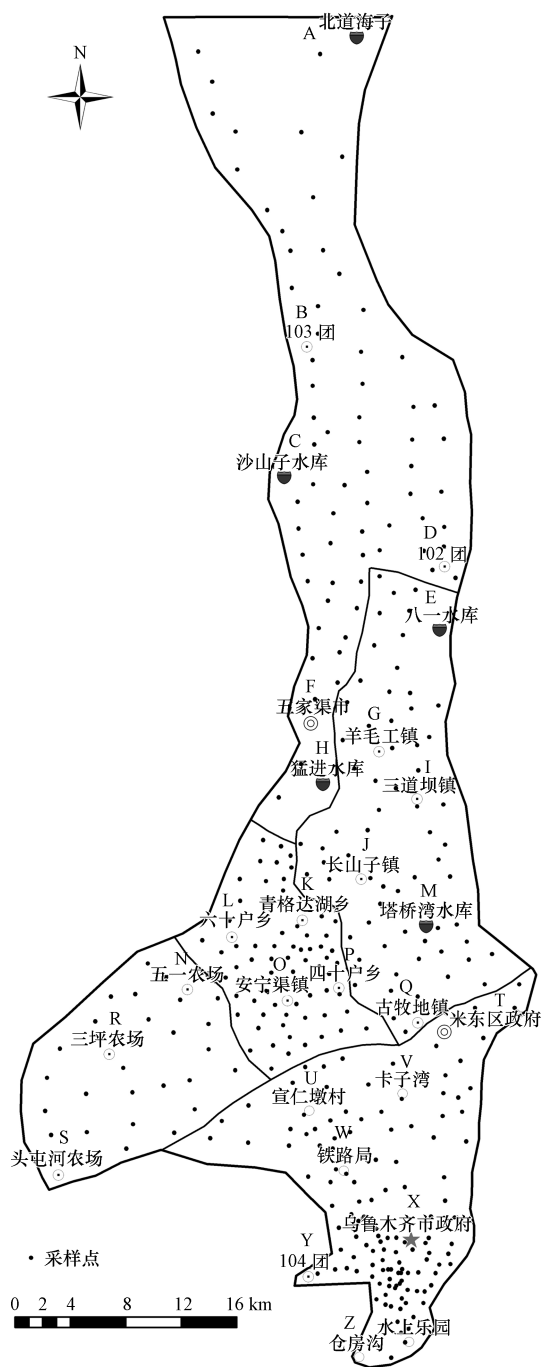


图1 表层土壤采样点分布图

Fig. 1 Sample point distribution of topsoil

表 1 各采样区表层土壤基本性质平均值统计表

Table 1 Statistics on averaged topsoil basic properties in different sampling areas

采样区	样品数 /个	有机质 /(g·kg <sup>-1</sup> )	分级	有机质 /(g·kg <sup>-1</sup> )
乌市市区	143	46.30	1	>40
农十二师	29	16.83	2	30~40
安宁渠	70	33.73	3	20~30
米东区	72	29.89	4	10~20
五家渠	68	18.36	5	6~10
			6	<6

### 2.3 表层土壤重金属空间分布状态

为了在空间上获得乌鲁木齐市表层土壤重金属污染分布状态,本文通过克里格插值法进行空间插值分析.但由于土壤重金属污染物空间分布往往具有很大的变异性和偏倚性,再加上采样点数量不足、分布不均匀等原因,若直接使用普通克里格法对原变量进行空间预测,往往会降低预测结果精度,从而使预测的结果不能很好地满足环境调查和

研究的需求.为了提高预测精度,使预测结果能够更加真实地反映重金属空间分布规律,本文引入有机质含量(表1)作为协同变量,采用协同克里格插值法进行预测.它是在普通克里格法的基础上,考虑了样品的概率分布函数,突破了观测值线性组合的估计模式,在更大范围内能够以更灵活的方式计算最佳无偏估计值.

从不同采样区表层土壤重金属全量特征值统计(表2)及表层土壤空间分布(图2)可以看出,整个研究区土壤Cd含量变化范围为0.14~3.74 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为0.89 mg·kg<sup>-1</sup>,超过当地背景值7.50倍.在研究区内呈现从南到北逐渐减低的趋势;高值区(0.75~2.92 mg·kg<sup>-1</sup>)主要分布在乌鲁木齐市、安宁渠等样区,且分布较为集中,这部分区域占将近1/2的面积,其中,最高值主要集中在乌鲁木齐西部、西北部和东部等地.总体而言,乌鲁木齐样区Cd含量变化最大,变幅为0.14~3.74 mg·kg<sup>-1</sup>,变异系数达到82.22%,接近于强度变异,平均含

表 2 不同采样区表层土壤重金属含量比较

Table 2 Comparison of heavy metal in different sample regions of Urumqi

mg·kg<sup>-1</sup>

采样区	数据类型	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As
乌鲁木齐市市区(不包括米东区, N=143)	最小值	0.14	39.91	26.26	23.52	12.20	55.25	4.71
	最大值	3.74	180.14	149.60	91.52	106.42	958.55	24.59
	平均值	1.18	104.57	53.63	45.77	30.40	249.51	11.41
	标准差	0.97	27.95	19.89	14.07	18.00	179.03	4.55
	变异系数	82.22%	26.73%	37.09%	30.75%	59.20%	71.75%	39.84%
农十二师(N=29)	最小值	0.29	38.20	32.25	29.83	15.00	93.05	6.21
	最大值	1.39	75.70	76.10	59.20	33.36	321.90	11.20
	平均值	0.57	52.94	48.84	41.23	20.20	129.17	7.91
	标准差	0.29	8.70	8.74	6.57	4.40	48.43	1.32
	变异系数	50.68%	16.43%	17.90%	15.95%	21.78%	37.49%	16.65%
安宁渠(N=70)	最小值	0.25	32.35	29.87	22.72	9.17	81.64	6.61
	最大值	1.69	77.24	96.26	58.81	28.69	379.66	18.67
	平均值	0.83	49.97	47.59	36.84	18.21	181.37	11.46
	标准差	0.32	10.39	13.72	7.64	3.20	62.40	3.21
	变异系数	38.73%	20.80%	28.83%	20.74%	19.22%	34.41%	28.02%
米东区(N=72)	最小值	0.19	33.46	24.56	15.59	5.98	1.05	5.62
	最大值	1.48	90.34	98.90	69.33	32.29	254.64	22.70
	平均值	0.84	57.69	43.64	40.59	19.24	163.49	12.59
	标准差	0.30	12.66	13.56	9.63	4.89	49.92	3.07
	变异系数	35.99%	21.95%	31.08%	23.73%	25.43%	30.53%	24.39%
五家渠(N=68)	最小值	0.19	26.43	17.35	23.34	8.03	53.51	4.70
	最大值	1.11	93.33	65.75	50.96	26.13	285.40	16.31
	平均值	0.56	51.56	34.79	35.14	14.34	121.87	9.27
	标准差	0.24	12.92	12.13	6.99	4.24	36.24	2.19
	变异系数	42.17%	25.05%	34.87%	19.89%	29.55%	29.74%	23.57%
新疆土壤背景值(1989)		0.105	47.20	24.90	25.20	19.10	65.20	9.70

注:新疆土壤背景值源于文献(中国环境监测总站,1990;李健等,1989).

量也最大,高达  $1.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过当地背景值 9 倍,并超过国家土壤环境质量三级标准 ( $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),这可能是因为乌鲁木齐市土壤普遍受到了外源 Cd 的影响. 低值区 ( $0.14 \sim 0.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要集中安宁渠样区北部和农十二师样区西部.

各样区内 Cr 的变异系数比较接近,变幅介于  $16.43\% \sim 26.73\%$ ,都属于中等变异(表 2). 从 Cr 元素平均含量来看,乌鲁木齐样区明显高于其他样区,其平均含量高达  $104.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,变异系数最高( $26.73\%$ ),其他各样区 Cr 含量差异不大. 在空间分布上(图 2),土壤 Cr 含量在研究区内呈现明显的南北高、中间低的分布规律,高值区 ( $77.58 \sim 167.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要集中在乌鲁木齐样区和五家渠样区北部,这部分区域在图中所占比例不大,其中最高值集中在乌鲁木齐样区南部. 说明乌鲁木齐市局部地区土壤存在着较为严重的 Cr 污染,这与乌鲁木齐市南部曾是城市重工业和食品、造纸等污染性企业较为集中的区域有关. 农业土壤中的 Cr 主要来源于畜禽粪便、城市污泥、污灌和化肥的施用. 低值区 ( $26.43 \sim 50.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 分布较广,除乌鲁木齐样区外,其余样区均有分布,所占比例较大. 可见研究区土壤 Cr 分布相对较为集中,大部分区域未受到外源 Cr 的影响,少数区域土壤 Cr 污染较为严重,应采取一定的措施进行治理.

各样区内 Cu 的变异系数范围为  $17.90\% \sim 37.09\%$ ,属中等变异,除农十二师样区略低于其他样区外,其余各样区变异系数差异不大(表 2). 另外,从 Cu 元素的平均含量来看,各采样区差异也不大,变幅为  $34.79 \sim 53.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,说明在整个采样区内 Cu 元素的空间分布较为均匀,空间变异性不大,可能与 Cu 的使用和来源较为广泛有关. Cu 含量的空间分布呈现较为明显的条块状分布(图 2),高值区 ( $57.94 \sim 98.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要集中分布在乌鲁木齐样区西部和南部、农十二师南部、安宁渠东部及五家渠样区北部等区域,分布较为分散. 低值区 ( $17.35 \sim 31.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要分布在乌鲁木齐北部和五家渠样区大部分地区. 形成这种分布格局的原因可能与种植结构有关,另一方面也与城市及周边地区工业企业的发展有直接关系.

各样区土壤 Ni 含量变化范围为  $15.59 \sim 91.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最大值是最小值的 5.87 倍,平均值为  $40.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过当地背景值 0.62 倍(表 2),除乌鲁木齐样区略高外,其他样区 Ni 含量比较接近.

各样区内 Ni 的变异系数范围为  $15.95\% \sim 30.75\%$ ,属中等变异. 从空间分布看,土壤 Ni 含量呈现出斑块状分布(图 2),高值区 ( $45.42 \sim 75.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要集中分布在乌鲁木齐样区,且占有较大比例,表明乌鲁木齐样区土壤 Ni 存在着较为严重的污染,这可能与当地土壤类型、种植结构及局部地区工业生产活动有关. 低值区 ( $15.6 \sim 30.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要分布在安宁渠和五家渠大部分地区.

各样区内 Pb 的变异系数变幅为  $19.22\% \sim 59.20\%$ ,平均变异系数为  $58.66\%$ ,属中等变异(表 2);Pb 含量最大值是最小值的 17.8 倍,平均值为  $22.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过当地背景值 0.17 倍. 其中,乌鲁木齐样区变异系数最大,为  $59.20\%$ ,最大值超过当地背景值 4.57 倍,其他各样区差异不大(表 2). 土壤 Pb 含量呈现出较为明显的条块状分布(图 2),高值区 ( $28.77 \sim 61.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要分布在乌鲁木齐样区西部和南部,这部分区域所占比例较小,且明显高于其他样区最高值. 说明乌鲁木齐局部土壤 Pb 污染严重,明显受到外源 Pb 的影响,这可能与南部地区城市交通车辆排放的尾气和造纸、食品等行业排放的“三废”造成的污染有直接关系. 农业土壤中铅的积累可能是因为这些地区的样品主要取自乌鲁木齐市西部的农用地,污水和废水灌溉会引起 Pb 元素在土壤中的累积. 低值区 ( $5.98 \sim 16.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要分布在五家渠样区大部分地区.

各样区内 Zn 的变异系数变幅为  $29.74\% \sim 71.75\%$ ,属于中等变异,平均含量为  $189 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过当地背景值的 1.90 倍,最大值是最小值的 17.90 倍,其中,乌鲁木齐样区变异系数最大,为  $71.75\%$ (表 2). 土壤 Zn 含量大致呈现出块状分布,从南到北逐渐降低(图 2). 研究区内大部分地区土壤中 Zn 均出现了不同程度的累积,其中高值区 ( $330.11 \sim 569.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 依然集中分布在乌鲁木齐样区南部和西部,说明乌鲁木齐局部土壤 Zn 污染严重,可能主要与水泥厂、食品厂、电子行业等生产过程中排放的废水有关,而农业土壤 Zn 主要来源于含锌化肥和农药的施用及污水灌溉等. 低值区 ( $53.51 \sim 101.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 主要分布在农十二师样区中部和五家渠样区大部分地区.

各样区内 As 的变异系数变幅为  $16.65\% \sim 39.84\%$ ,属中等变异,平均含量为  $11.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过当地背景值 0.13 倍,除乌鲁木齐样区含量略高外,其余各样区差异不大(表 2). 土壤 As 含量呈现

出明显的块状分布(图2),高值区(12.41~22.26  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )主要集中分布在乌鲁木齐样区大部分地区和安宁渠局部地区,这部分区域在图中占有一定的比例,低值区(4.70~8.26  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )主要分布在

农十二师样区大部分地区和五家渠东部地区.分析其原因可能与当地的土壤类型、种植结构及农业生产过程中含砷农药的使用有密切关系.

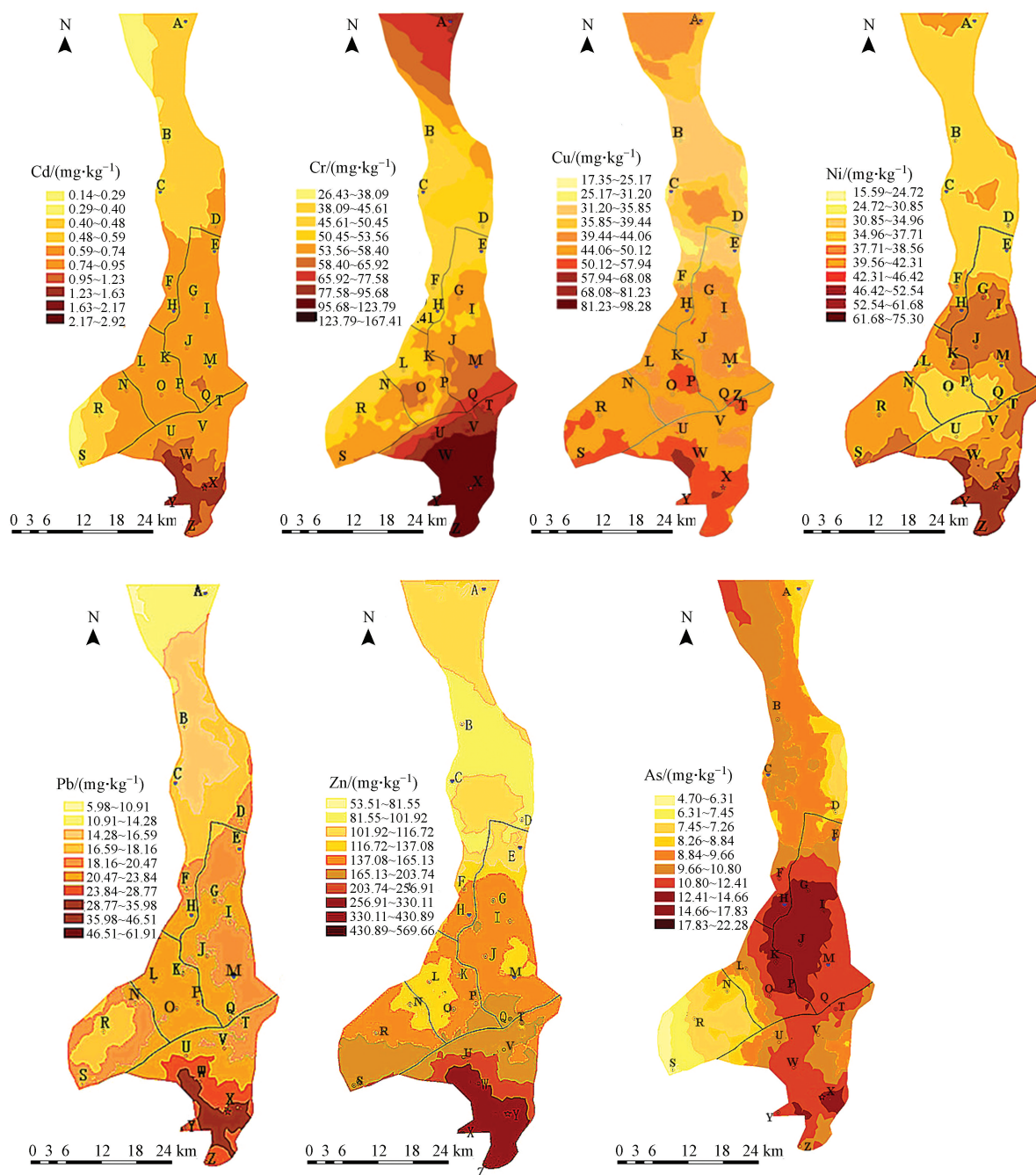


图2 各重金属元素的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of different heavy metals

总体而言,乌鲁木齐市土壤重金属污染比较严重.西北地区是我国重金属主要矿产区,乌鲁木齐周围则蕴藏着较为丰富的铜矿、铁矿、锌矿等,还有

大型的煤矿,在乌鲁木齐市及周边易形成采矿区和矿产加工区,造成土壤重金属污染.其次,新疆特有的城镇围绕绿洲布局,城市之间多以荒漠和戈壁

相隔,交通不便,经济发展和基础设施建设水平差异较大,造成疆内主要大型企业都集中在乌鲁木齐市,这些工业企业通常将 Cd 用于电镀、油漆着色剂、合金抗腐蚀和抗磨擦剂、塑料稳定剂、光敏元件的制备及电池等生产过程,直接或间接地将 Cd 排放到环境中。即使在现阶段实施产业转移或产业转型,也因为交通问题,许多大型企业仍附着在乌鲁木齐市周边,污染威胁长期存在。加之城市规划中生产区和生活区没有合理的缓冲地带,缺乏足够的防范措施等造成区域内生产和生活中重金属污染交叉重叠。此外,乌鲁木齐市处于严重缺水的西北干旱地区,污水灌溉现象比较严重,污灌使土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As 等重金属含量的增加,加之化肥和农药的使用,都导致土壤重金属污染。

### 3 重金属污染预警分析(Warning analysis on heavy metal pollution)

#### 3.1 神经网络原理及方法

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是一个由大量简单的处理单元(神经元)广泛连接组成的人工网络,主要采用并行和自适应的信息处理方式,用来模拟大脑神经系统的结构和功能,是对人脑神经网络的某种简化、抽象和模拟(胡守仁, 1993)。人工神经网络是通过建立输入量与输出量之间非线性映射关系的分析方法,它能从已知数据中自动归纳,获得数据的内在规律,已广泛应用于模式识别、信号处理和人工智能等领域(巫影等,

2002)。人工神经网络发展到现在已经有很多模型,按网络结构可分为前馈型网络模型和反馈型网络模型, BP 神经网络是由 Rumelhart 等在 1986 年提出的,它属于多层前馈神经网络模型,因采用误差反向传播(Error Back Propagation)的学习算法而得名,目前已经成为应用最广泛的神经网络模型(阎平凡等, 2000)。

虽然 BP 网络得到了广泛的应用,但自身也存在一些缺陷和不足,主要存在收敛速度慢和局部极小值两个主要问题(VanRooij, 1996)。由于在人工神经网络中,反向传播法占据了非常重要的地位,研究人员对其做了深入的研究,提出了很多改进方法,其中,应用较为广泛的是附加动量法和自适应学习速率法。鉴于对神经网络研究较多,本文不再对具体方法进行赘述。

#### 3.2 指标拟定与选取

为了量化分析的需要,根据科学性、合理性、可比性和可操作性的原则,选取能够反映乌鲁木齐各个行政区土壤重金属污染的社会经济因素,在初拟指标的基础上,查阅相关文献(Lindstrom, 2001; 刘玉燕等, 2006; 王亚宁等, 2008),并征求相关专家的意见,最后选取了 20 个社会经济因素(表 3)。这些指标均能体现对土壤重金属污染可能产生的影响,同时又能够体现出影响层次的不同。根据目前所掌握的重金属数据实际情况,本文选取 2009 年乌鲁木齐各行政区社会经济指标统计数据 and 土壤重金属含量进行研究。

表 3 影响乌鲁木齐土壤重金属含量的社会经济指标体系

Table 3 Social and economic index of soil-affecting heavy metals in Urumqi

指标编号	社会经济指标	单位	指标编号	社会经济指标	单位
X1	人口密度	人·km <sup>-2</sup>	X11	农牧民人均纯收入	元·年 <sup>-1</sup>
X2	非农人口比重		X12	农牧民人均纯收入增长速度	
X3	人均 GDP	元·人 <sup>-1</sup>	X13	人均耕地面积	m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup>
X4	GDP 增长率		X14	每公顷耕地农作物产量	t·hm <sup>-2</sup>
X5	第二产业产值比重		X15	每公顷耕地生产农业产值	元·hm <sup>-2</sup>
X6	工业总产值	亿元	X16	单位耕地面积牲畜存栏数	头·hm <sup>-2</sup>
X7	规模以上工业企业产值	亿元	X17	社会消费品零售总额	亿元
X8	第一产业产值比重		X18	社会消费品零售总额增长速度	
X9	农业总产值	万元	X19	固定资产投资完成额	亿元
X10	农业总产值增长速度		X20	地区工业生产总产值	亿元

#### 3.3 指标选取

为了将可能影响乌鲁木齐土壤重金属污染的多个社会经济指标用少数几个主要因子来描述,本

文采用因子分析法,对 2009 年乌鲁木齐市各行政区社会经济指标进行分析,得到各因子所对应的特征值、贡献率、累计贡献率和因子载荷矩阵(表 4)。

表 4 2009 年指标特征值、贡献率、累计贡献率和因子载荷矩阵

Table 4 Eigenvalue, contribution proportion, accumulative contribution proportion and factor load matrix of the index in 2009

变量	初始主成分			旋转后主成分			变量	初始主成分			旋转后主成分		
X1	-0.70	-0.22	0.05	-0.65	-0.17	-0.31	X13	0.91	0.08	-0.36	0.97	0.03	0.11
X2	-0.54	0.08	0.09	-0.77	0.15	-0.35	X14	0.52	0.33	0.53	0.22	0.25	0.73
X3	-0.61	0.78	0.11	-0.60	0.82	-0.11	X15	0.49	0.80	0.07	0.43	0.75	0.36
X4	0.79	0.23	0.23	0.60	0.15	0.58	X16	0.27	-0.28	0.65	-0.08	-0.34	0.67
X5	0.01	0.98	-0.04	0.06	0.98	0.07	X17	-0.70	-0.64	0.21	-0.75	-0.59	-0.20
X6	-0.24	0.94	-0.19	-0.08	0.97	-0.19	X18	0.57	0.23	0.70	0.18	0.14	0.90
X7	-0.24	0.93	-0.22	-0.07	0.96	-0.22	X19	-0.53	0.30	0.46	-0.67	0.31	0.19
X8	0.90	-0.17	-0.36	0.96	-0.22	0.08	X20	-0.32	0.65	0.08	-0.29	0.67	-0.01
X9	0.71	0.36	-0.20	0.74	0.31	0.19	特征值	7.57	6.10	2.59	6.48	6.10	3.68
X10	0.58	-0.29	0.72	0.16	-0.38	0.88	贡献率	37.84%	30.52%	12.93%	32.40%	30.49%	18.40%
X11	0.39	0.70	0.22	0.27	0.65	0.44	累计贡	37.84%	68.36%	81.29%	32.40%	62.89%	81.29%
X12	0.83	-0.38	-0.31	0.87	-0.42	0.07	献率						

由表 4 可知,提取的前 3 个主成分的累计贡献率达到了 81.3%,表明所提取的主成分能够很好地解释原有社会经济指标特征信息,旋转后累计贡献率没有损失,但载荷矩阵特征信息更加明显.在第一主成分上 X8(第一产业产值比重)、X12(农民人均纯收入增长速度)和 X13(人均耕地面积)等指标具有很高的载荷,第二主成分上 X3(人均 GDP)、X5(第二产业产值比重)、X6(工业总产值)和 X7(规模以上工业企业产值)等指标具有很高的载荷,第三主成分上 X10(农业总产值增长速度)和 X18(社会消费品零售额增长速度)具有较高的载荷.因此,本文选取以上 9 种社会经济指标代替所有社会经济指标进行分析.

### 3.4 基于 BP 网络的土壤重金属污染预测系统设计与应用

本文采用改进 BP 神经网络模型对乌鲁木齐市地区土壤重金属未来变化趋势进行预测,基于 BP 神经网络的重金属污染预测系统设计,主要是通过 Matlab7.0 来运算实现的.其中,网络设计包含了网络结构的确定和网络中基本参数的选取设置,然后通过软件实现对网络模拟值和实验值的拟合,即 BP 网络性能测试,最后将测试合格的 BP 神经网络用于乌鲁木齐市未来土壤重金属污染趋势的预测.

3.4.1 BP 网络设计 在进行 BP 网络设计时,应从网络的层数、每层的神经元个数及学习方法等方面加以考虑,通过 Matlab 的函数命令,对样本数据进行大量的训练、运算操作和程序设计,从而建立一个适用、可靠的网络(Milacic *et al.*, 1995).

#### 1) 网络结构的确定

大量的实践证明,增加隐含层数目可以提高 BP 网络的非线性映射能力,提高精度,但也会使网络变得复杂,使网络性能降低.一般情况下,对于任何闭区间内的一个连续函数都可以用一个隐含层的 BP 网络来逼近,即一个三层 BP 网络可以完成任意  $n$  维到  $m$  维的非线性映射,而且靠增加隐含层节点数来获得较低的误差,其效果往往比增加隐含层数更容易实现(廖宁放等,1998).因此,本文将采用含有一个隐含层的三层 BP 神经网络.

输入层的节点数一般由影响因素决定,本文选取了对乌鲁木齐市土壤重金属影响贡献率较大的 9 个社会经济指标作为输入部分,即输入层节点数为 9,输出部分则为某种重金属含量值,所有输出层节点数为 1.

#### 2) 隐含层节点数的确定

对于多层前馈网络来说,隐含层节点数的确定是成败的关键,直接影响到网络的非线性性能,它往往与所解决问题的复杂程度有关.若数量太少,则网络所能获取的用以解决问题的信息太少;若数量太多,不仅增加训练时间,更重要的是隐层节点过多还可能出现所谓“过渡吻合”问题,即测试误差增大导致泛化能力下降,因此,合理选择隐层节点数非常重要.关于隐层数及其节点数的选择比较复杂,一般原则是:在能正确反映输入输出关系的基础上,应选用较少的隐层节点数,使网络结构尽量简单.本论文中采用网络结构增长型方法,即先设置较少的节点数,对网络进行训练,并测试学习误差,然后逐渐增加节点数,直到学习误差不再有明显减少为止.通过大量的训练学习和反复的试验,



最后确定隐含层节点数分别为 11 个 (Cd)、10 个 (Cr)、12 个 (Cu)、9 个 (Ni)、11 个 (Pb)、8 个 (Zn) 和 12 个 (As)。

3)BP 网络传递函数的选取

BP 网络的传递函数有多种,各种传递函数如图 3 所示。Log - sigmoid 型函数的输入值可取任意值,输出值在 0 和 1 之间;tan - sigmod 型传递函数

tansig 的输入值可取任意值,输出值在 -1 到 +1 之间;线性传递函数 purelin 的输入与输出值可取任意值。大量实践证明,tansig 函数进行预测分析时其误差要比 logsig 函数小。因此,本文在隐含层中采用 tansig 型传递函数,输出层则采用线性传递函数,整个网络的输出可以取任意值。

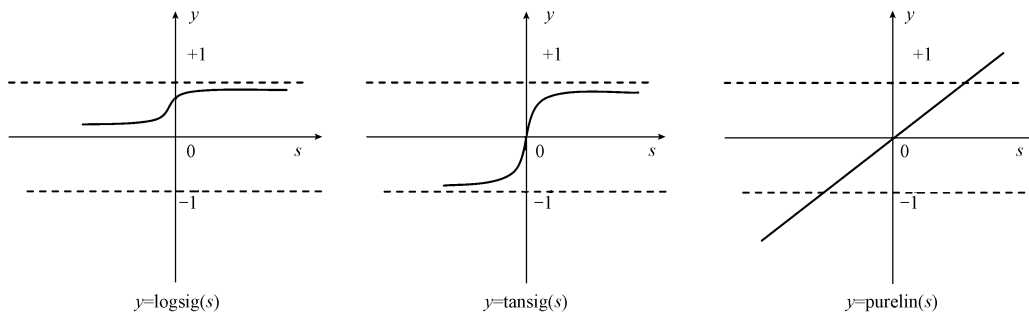


图 3 BP 网络常用的传递函数

Fig. 3 Transfer function commonly used by BP network

4)学习速率和冲量系数选取

学习速率决定每一次循环中所产生的权值变化量,影响到系统学习过程的稳定性。大的学习速率可能使网络权值每一次的修正量过大,造成系统的不稳定,甚至会导致权值在修正过程中超出某个误差的极小值呈不规则跳跃而不收敛;但过小的学习速率导致学习时间过长,不过能保证收敛于某个极小值。所以,一般倾向选取较小的学习速率以保证学习过程的收敛性(稳定性),通常在 0.01 ~ 0.8 之间。为了减少寻找学习速率的训练次数和训练时间,本文采用了变化的自适应学习速率,使网络训练在不同的阶段自动设置不同学习速率的大小,初始学习速率为 0.01。

增加冲量项的目的是为了避免网络训练陷于较浅的局部极小点。理论上其值大小应与权值修正量的大小有关,但实际应用中一般取常量,通常在

0 ~ 1 之间,而且一般比学习速率要大,本文冲量系数选取为 0.9。

5)数据的归一化处理

由于样本数据存在不在同一数量级的现象,因此,需要将其映射到 [-1,1] 之间,进行归一化(无量纲化)处理,这样有利于提高 BP 网络的训练速度。本文将乌鲁木齐各行政区 2009 年社会经济指标数据划分为训练样本和测试样本,取其中的天山区、新市区、头屯河区、米东区和乌鲁木齐县等 5 个行政区经济指标作为训练样本,而沙依巴克区和水磨沟区等 2 个行政区经济指标作为测试样本,运用 Matlab 提供的归一化函数进行处理,归一化公式为:(实测值 - 平均值)/(最高值 - 最低值),其中负值代表测量值小于平均值。对乌鲁木齐各行政区 9 个社会经济指标数据及相应的土壤重金属含量进行归一化处理,结果见表 5 和表 6。

表 5 社会经济指标归一化处理后的样本数据

Table 5 Sample data with normalization by social and economic standards

行政区	X3	X5	X6	X7	X8	X10	X12	X13	X19
天山区	0.35	-0.69	-0.33	-0.30	-1.00	-1.00	-0.82	-0.98	-1.00
沙依巴克区	-0.09	-1.00	-0.77	-0.78	-0.10	-0.80	-0.82	-0.99	-0.21
新市区	0.85	0.60	0.03	0.08	-0.99	-0.45	-0.80	-0.94	0.60
水磨沟区	0.04	-0.64	-0.84	-0.90	-0.98	1.00	-0.82	-1.00	1.00
头屯河区	0.84	0.74	0.89	0.95	-0.72	-0.67	-0.82	-0.69	-0.33
米东区	1.00	1.00	1.00	1.00	-0.74	-0.81	-1.00	-0.01	0.60
乌鲁木齐县	-1.00	-0.55	-1.00	-1.00	1.00	0.26	1.00	1.00	0.50

表 6 土壤重金属含量归一化处理后的样本数据

Table 6 Sample data with normalization by heavy metal content in soil

行政区	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As
天山区	0.54	0.87	0.57	1.00	0.40	0.37	0.07
沙依巴克区	0.99	0.96	1.00	0.84	1.00	1.00	1.00
新市区	-0.23	0.48	0.66	-0.17	0.05	0.04	0.50
水磨沟区	1.00	1.00	0.65	0.40	0.38	0.70	0.97
头屯河区	-1.00	-0.46	0.42	-1.00	0.02	-1.00	-1.00
米东区	-0.63	-0.56	-0.63	-0.68	-0.75	-0.90	0.77
乌鲁木齐县	-0.57	-1.00	-1.00	-0.99	-1.00	-0.67	0.48

## 6) 基于改进 BP 网络预测的 Matlab 实现

对社会经济指标影响下的乌鲁木齐地区土壤重金属污染趋势预测,就是通过建立 BP 神经网络模型进行训练,找出隐含在社会经济指标和重金属含量之间的非线性映射关系. 本文研究采用 9 输入、1 输出的三层 BP 网络(含 1 个隐含层),传递函数在隐含层为 S 型函数(tansig),在输出层用线性激活函数(purelin);期望误差选取为 0.001,最大训练次数为 3000,初始学习速率为 0.01,采用改进后的带动量的自适应学习率的 BP 算法进行网络训练.

在 Matlab 环境下,BP 网络的训练学习和仿真程序涉及主要是调用一些相应的函数来实现. 首先列出输入向量(5 个行政区经济指标归一化数据)和目标向量(5 个行政区某种重金属含量归一化值);然后使用网络初始化函数 initff 进行网络初始化,之后通过训练函数 traingdx 进行输入向量与对应目标向量的反复学习训练,建立起二者之间的非线性映

射关系;接着将测试样本输入值(2 个行政区经济指标归一化值)代入网络模型,运用仿真函数 simuff 进行仿真,得出检验样本的仿真值;最后调用函数 postmnmx 对仿真值进行反归一化处理,将所得结果与实测值进行比较,如果相差很小,则表示建立的网络模型可以用于预测.

3.4.2 BP 网络模型的拟合度和仿真检验 通过各重金属含量与社会经济指标之间建立起来的 BP 网络,在经过初始化后,利用函数 traingdx 对网络分别进行训练. 选练过程中,误差平方和随着训练次数的增加而减少,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As 等重金属元素的网络在分别经过 221、107、336、121、149、171 和 122 次训练后,网络的误差平方和达到规定期望误差的要求后,停止训练. 通过训练好的网络,将所有样本的目标向量和网络的拟合值进行比较,检验网络模型的拟合度,结果见表 7.

表 7 不同元素 BP 神经网络拟合误差表

Table 7 Fitting errors of the BP network model of the different heavy metals

行政区	元素	模拟值	实测值	绝对误差	相对误差	模拟精度	行政区	元素	模拟值	实测值	绝对误差	相对误差	模拟精度
		/(mg·kg <sup>-1</sup> )							/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
天山区	Cd	1.30	1.31	0.01	0.76%	99.24%	头屯河区	Cd	0.52	0.51	0.01	1.96%	98.04%
	Cr	106.30	108.01	1.71	1.58%	98.42%		Cr	67.40	66.60	0.80	1.20%	98.80%
	Cu	46.94	46.53	0.41	0.88%	99.12%		Cu	44.80	45.10	0.30	0.67%	99.33%
	Ni	45.06	45.35	0.29	0.64%	99.36%		Ni	31.67	31.55	0.12	0.38%	99.62%
	Pb	27.20	26.70	0.50	1.87%	98.13%		Pb	23.29	23.43	0.14	0.59%	99.41%
	Zn	278.78	275.68	3.10	1.12%	98.88%		Zn	135.70	141.16	5.46	3.87%	96.13%
	As	10.65	10.66	0.01	0.01%	99.91%		As	8.56	8.52	0.04	0.47%	99.53%
沙依巴克区	Cd	1.53	1.54	0.01	0.65%	99.35%	米东区	Cd	0.68	0.71	0.03	4.23%	95.77%
	Cr	111.14	110.58	0.56	0.51%	99.49%		Cr	62.39	63.68	1.29	2.02%	97.98%
	Cu	50.26	50.57	0.31	0.61%	99.39%		Cu	35.15	35.13	0.02	0.01%	99.99%
	Ni	44.61	44.24	0.37	0.84%	99.16%		Ni	33.70	33.79	0.09	0.27%	99.73%
	Pb	31.49	31.80	0.31	0.97%	99.03%		Pb	17.05	16.96	0.09	0.53%	99.47%
	Zn	335.25	338.03	2.78	0.82%	99.18%		Zn	155.20	150.73	4.47	2.97%	97.03%
	As	12.46	12.49	0.03	0.24%	99.76%		As	11.92	12.03	0.11	0.91%	99.09%

续表 7

行政区	元素	模拟值	实测值	绝对误差	相对误差	模拟精度	行政区	元素	模拟值	实测值	绝对误差	相对误差	模拟精度
		/(mg·kg <sup>-1</sup> )							/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
新市区	Cd	0.91	0.92	0.01	1.09%	98.91%	乌鲁木齐县	Cd	0.74	0.73	0.01	1.37%	98.67%
	Cr	96.57	95.85	0.72	0.75%	99.25%		Cr	50.31	49.97	0.34	0.68%	99.32%
	Cu	47.50	47.32	0.18	0.38%	99.62%		Cu	38.21	38.20	0.01	0.01%	99.99%
	Ni	37.35	37.29	0.06	0.16%	99.84%		Ni	31.66	31.65	0.01	0.01%	99.99%
	Pb	23.46	23.75	0.29	1.22%	98.78%		Pb	14.83	14.80	0.03	0.20%	99.80%
	Zn	242.46	243.08	0.62	0.26%	99.74%		Zn	173.71	173.39	0.32	0.18%	99.82%
	As	11.50	11.49	0.01	0.01%	99.90%		As	11.51	11.46	0.05	0.44%	99.56%
水磨沟区	Cd	1.53	1.54	0.01	0.65%	99.35%	平均值	Cd				1.53%	98.47%
	Cr	112.57	111.92	0.65	0.58%	99.42%	Cr				1.05%	98.95%	
	Cu	47.22	47.24	0.02	0.01%	99.99%	Cu				0.37%	99.63%	
	Ni	41.04	41.19	0.15	0.36%	99.64%	Ni				0.38%	99.62%	
	Pb	26.66	26.52	0.14	0.53%	99.47%	Pb				0.84%	99.16%	
	Zn	308.72	308.32	0.40	0.13%	99.87%	Zn				1.34%	98.66%	
	As	12.40	12.38	0.02	0.16%	99.84%	As				0.32%	99.68%	

通过各土壤重金属实测值和模拟值的对比分析可知,各重金属元素的模拟值与实测值都比较接近,BP 网络模型平均拟合误差都在 1.5% 以下,拟合精度都在 98.5% 以上,说明 BP 网络模型的拟合程度相当高,可以用来预测乌鲁木齐土壤重金属含量未来变化情况。

### 3.4.3 基于 BP 神经网络的土壤重金属污染预测

在运用 BP 网络模型进行预测时,需要收集到各区域某年的社会经济指标数据,然后将其作为输入值 P 带入网络程序,即可预测出该年分的土壤重金属含量.在这里,本文运用 BP 网络模型对乌鲁木齐

市 2015 年和 2020 年各重金属含量进行预测,由于 2015 年和 2020 年的社会经济数据未知,因此,需要先预测这两年的社会经济指标值。

#### 1) 2015 和 2020 年社会经济指标预测

本文主要通过回归分析方法,研究乌鲁木齐市 2001—2010 年各经济指标数据随时间变化的趋势,使用回归方程对其进行拟合,然后根据各指标拟合方程即可预测出 2015 年和 2020 年两年的社会经济指标数据(表 8). 由于社会经济的发展受多方面因素的影响和制约,具有很多的不确定性,在这里预测的社会经济数据仅作为本文研究使用。

表 8 乌鲁木齐市各行政区 2015 及 2020 年社会经济指标预测值

Table 8 Predicted result of social economy index of different districts of Urumqi city in 2015 and 2020

行政区	年份	X3 /(元·人 <sup>-1</sup> )	X5	X6/ 亿元	X7/ 亿元	X8	X10	X12	X13/ (m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	X19
天山区	2015	50138.00	23.02%	188.92	176.77	0.02%	4.63%	8.40%	266.55	11.48%
	2020	63413.00	23.98%	284.27	266.90	0.01%	5.60%	8.61%	387.00	23.33%
沙依巴克区	2015	41488.00	12.73%	67.27	64.44	0.08%	5.49%	8.80%	137.81	21.08%
	2020	50603.00	14.51%	88.32	86.49	0.06%	6.50%	9.10%	98.94	25.66%
新市区	2015	56533.00	58.93%	266.30	251.02	0.21%	5.87%	9.09%	554.47	23.60%
	2020	68528.00	59.76%	234.43	306.99	0.20%	4.87%	9.30%	273.62	27.14%
水磨沟区	2015	42856.00	23.90%	64.61	41.75	0.42%	4.30%	8.25%	169.59	23.78%
	2020	63186.00	24.95%	82.91	69.02	0.45%	3.04%	8.41%	192.94	25.83%
头屯河区	2015	56562.00	73.88%	422.01	409.90	4.14%	7.32%	8.42%	529.08	23.08%
	2020	69532.00	75.04%	518.55	496.60	3.92%	7.61%	8.63%	320.92	26.50%
米东区	2015	59365.00	66.44%	435.34	423.26	4.69%	6.12%	9.81%	1670.99	18.93%
	2020	65125.00	64.02%	513.80	487.75	5.33%	6.20%	10.33%	1850.20	22.75%
乌鲁木齐县	2015	27251.00	32.92%	10.31	8.29	33.36%	10.68%	11.63%	2828.36	16.19%
	2020	38106.00	38.52%	14.08	13.02	32.92%	8.48%	9.98%	2872.43	22.91%

2) 2015 年和 2020 年土壤重金属含量预测  
将预测的 2015 年和 2020 年的社会经济指数数据,作为网络输入带入 BP 神经网络模型,通过网络

运算得到了 2015 年和 2020 年乌鲁木齐各行政区土壤重金属含量的预测值(表 9)。

表 9 2015 及 2020 年乌鲁木齐土壤重金属含量预测结果

行政区	年份	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As
天山区	2015	1.38	113.88	51.89	48.19	33.87	292.96	12.20
	2020	1.46	119.88	56.11	53.67	41.34	311.04	13.70
沙依巴克区	2015	1.60	116.43	58.34	49.95	40.77	354.45	13.94
	2020	1.73	123.65	63.36	56.17	48.55	376.40	15.80
新市区	2015	0.98	99.82	55.24	42.70	31.28	257.63	13.09
	2020	1.05	105.11	60.11	47.86	37.93	273.02	14.99
水磨沟区	2015	1.59	117.93	54.28	46.60	34.52	326.03	14.38
	2020	1.71	124.67	60.50	53.45	43.43	345.18	15.55
头屯河区	2015	0.60	69.19	50.74	35.37	28.45	157.43	10.49
	2020	0.70	77.33	55.76	41.24	34.20	169.82	11.85
米东区	2015	0.80	67.03	38.72	39.15	22.64	167.87	14.16
	2020	0.90	72.38	46.38	42.49	30.08	187.18	16.34
乌鲁木齐县	2015	0.79	52.42	41.96	35.28	18.49	183.08	13.08
	2020	0.84	56.82	47.23	39.20	23.83	192.46	14.12
乌鲁木齐平均	2015	1.11	90.96	50.17	42.62	30.00	248.49	13.05
	2020	1.20	97.12	55.64	47.73	37.05	265.01	14.63
新疆土壤背景值		0.105	47.20	24.90	25.20	19.10	65.20	9.70
土壤环境质量一级标准		0.20	90.00	35.00	40.00	35.00	100.00	15.00
土壤环境质量二级标准		0.60	200.00	100.00	60.00	350.00	300.00	25.00
土壤环境质量三级标准		1.00	300.00	400.00	200.00	500.00	500.00	40.00

#### 4 预测预警结果分析 (Early warning analysis)

从整个情况来看,随着乌鲁木齐社会经济的发展,各行政区重金属元素含量均表现出累积增长的趋势.本文以国家土壤环境质量标准为基准,将各级标准限值设置为对应的警戒状态阈值,共划分为 4 个警戒级别,其中,将小于国家一级标准限值规定为无警状态,大于一级标准小于二级标准规定为轻警状态,大于二级小于三级标准规定为中警状态,大于三级标准规定为重警状态,根据上述划分标准对乌鲁木齐市土壤重金属预测结果进行预警分析.

从预测结果(表 9)可以看出,Cd 元素污染相当严重.其中,天山区、沙依巴克区和水磨沟区最为明显,其余各行政区均达到了中警状态.乌鲁木齐市早期工业布局导致主要生产生活设施集中在南部,近年来,由于南部缺乏足够的土地和水资源,加之污染严重,已无法继续支撑人口和产业的过度集中,因此,从 2000 年开始,大量的工业和人口逐渐向

北转移,导致水磨沟区 2015 年将达到重警状态,新市区 Cd 元素到 2020 年含量达到重警,而天山区和沙依巴克区仍是乌鲁木齐市主要党政机关、商业机构和人口的集中区,因此生活污染对 Cd 元素外源性影响在未来也将长期存在.从整个乌鲁木齐地区看,土壤 Cd 含量在 2015 年和 2020 年的预测平均值分别达到了  $1.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,都超过了国家环境质量的三级标准,达到了重警状态.

Cr 元素在 2015 年和 2020 年预测值,除天山区、沙依巴克区、新市区和水磨沟区 4 个主城区处于轻警状态外,其余各行政区均处于无警状态.整个乌鲁木齐土壤 Cr 含量在 2015 年和 2020 年的预测平均值分别为  $90.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $97.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均处于轻警状态.

Cu 元素各行政区在 2015 年和 2020 年的预测值均处于轻警状态,相比较土壤环境自然背景值均有一定的累积现象,但暂时还不会对环境构成威胁,整个乌鲁木齐 2015 年和 2020 年 Cu 含量预测平均值分别为  $50.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $55.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均处

于轻警状态。

Ni 元素 2015 年的预测结果中,天山区、沙依巴克区、新市区和水磨沟区 4 个主城区处于轻警状态,其余各行政区处于无警状态;2020 年各行政区 Ni 含量均有不同程度的增加,其中天山区、沙依巴克区和水磨沟区达到了中警状态,新市区、头屯河区处于轻警状态,乌鲁木齐县仍然处于无警状态。整个乌鲁木齐 2015 年和 2020 年 Ni 含量预测平均值分别为  $42.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $47.73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤环境均处于轻警状态。

从 Pb 元素预测结果来看,2015 年除沙依巴克区处于轻警状态,其余各区均处于无警状态;到 2020 年,天山区、沙依巴克区、新市区和水磨沟区 4 个主城区将达到中警状态,其余各区仍处于无警状态。整个乌鲁木齐 2015 年 Pb 含量预测平均值为  $30.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,处于无警状态,2020 年 Pb 预测平均值为  $37.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,处于轻警状态。

从 Zn 元素预测结果可以看出,在 2015 年和 2020 年,天山区、沙依巴克区、新市区和水磨沟区 4 个主城区均达到了轻警状态,其余各区处于轻警状态。整个乌鲁木齐 2015 年和 2020 年 Zn 含量预测平均值分别为  $248.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $265.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均达到了中警状态,应该引起一定的重视。

从 As 元素预测结果来看,2015 年各行政区 As 含量均低于国家土壤环境自然背景值,处于无警状态;2020 年土壤中的 As 表现出了轻微的累积现象,其中,沙依巴克区、水磨沟区和米东区处于轻警状态,其余各行政区处于无警状态。整个乌鲁木齐 2015 年和 2020 年 As 含量预测平均值分别为  $13.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $14.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均处于无警状态。

## 5 结论 (Conclusions)

1) 协同克里格插值结果表明,各重金属元素在空间上的分布都表现出一定的规律性,在研究区内除 Cr 外,大致呈现出较为明显的条块状或斑块状分布,且从南到北逐渐降低的趋势,高值区主要集中在乌鲁木齐及其附近的样区,因元素的不同略有不同,低值区主要集中分布五家渠样区。形成这种分布格局的原因一方面与土壤类型、种植结构有关,另一方面与城市及周边地区工业企业的布局、发展也有直接的关系。另外,从各元素背景值进行对比来看,7 种重金属元素含量都高于新疆土壤重金属背景值(1989 年),其中,Cd 元素变异系数最大,高

达 75.89%,超过当地背景值 7.5 倍,说明研究区内表层土壤普遍受到外源 Cd 的影响较大,存在着明显的积累;Zn 超过当地背景值的 1.9 倍,其余 5 种元素 Cr、Cu、Ni、Pb、As 超过当地背景值不到 1 倍,表明研究区内主要重金属元素都已有一定的积累。

2) 通过 BP 神经网络模型对乌鲁木齐 2015 年和 2020 年土壤重金属含量进行预测,并对预测结果进行预警分析,结果表明,未来 10 年内,随着乌鲁木齐社会经济的发展,各行政区重金属元素含量均表现出了累积增长的趋势。其中,天山区、沙依巴克区、新市区和水磨沟区等 4 个主城区预测值普遍高于其他行政区;从预警角度分析,未来 10 年内,Cd 元素污染相当严重,将达到重警状态,应该作为该地区优先控制重金属污染物,Zn 元素将达到中警状态,其余各元素基本上处于轻警或无警状态。

## 6 政策建议 (Policy suggestion)

1) 在社会经济后续发展中,需要注意产业布局 and 产业结构的适当调整,限制重化工型污染产业的发展,加强污染型企业的环境标准管制,通过制定地方性立法,严格控制污水、工业废弃物的随意排放和丢弃。适当划分工矿企业和居民的缓冲地带,避免生产生活污染交织和重合。同时应该避免污水灌溉,通过提高水价、实施滴灌、调整农业产业结构等方式,提高水资源利用率。基于农产品质量安全的重要性,当地在进行农作物生产的同时,应增强农田土壤的安全性,严格控制土壤污染物,推行标准化农业生产。对于生态风险比较高的农田,应对其进行限制生产,并采取一定的措施进行修复,从根源上解决重金属含量过高的问题。

2) 五家渠和农十二师是新疆北部重要的棉花产地,区内无大型的工矿企业,人口密度较低,无重金属污染的累积,在未来较长时间也没有较大重金属污染的来源,所以两地重金属污染相对较低。近年来,乌鲁木齐采取将市内污染企业搬迁的方式,减少市区重金属污染源,但也存在间接将污染源转移到周边地区的危险。特别是安宁渠、乌鲁木齐的米东区都承接了市区化工产业、造纸业、畜产品加工业等,导致重金属污染速度和范围急剧增大,情况不容乐观,而这两个地区是乌鲁木齐市主要的肉、禽、蛋、奶和蔬菜的供应基地,因此,应根据地区的实际情况,采取相应的防范和治理措施,除强调污染标准,加强重金属污染控制之外,通过产业结

构调整、升级和技术改造等方式,发展适合本特色的生态型产业,防止上述地区重复污染式发展的老路.提高产业的准入门槛,加大环境保护投入,多源、多方面的解决和避免土壤重金属污染,避免重金属污染物通过食物链等途径危害人体健康.

**责任作者简介:**朱怀松(1975—),男,博士,高级工程师,主要从事环境遥感与GIS应用、流域污染控制与环境规划管理、环境生物修复等方面的研究工作.

#### 参考文献(References):

- 蔡彦明,刘凤枝,王跃华,等. 2006. 我国土壤环境质量标准之探讨[J]. 农业环境科学学报, 25(21): 403-406
- Cai Y M, Liu F Z, Wang Y H, *et al.* 2006. Discussion about soil environmental quality standard in China [J]. Journal of Agro - Environment Science, 25(21): 403-406 (in Chinese)
- Chang Y H, Scrimshaw M D, Emmerson R H, *et al.* 1998. Geostatistical analysis of sampling uncertainty at the Tollesbury managed retreat site in Blackwater Estuary, Essex, UK: Kriging and cokriging approach to minimize sampling density [J]. Sci Total Environ, 221: 43-57
- Hooker P J, Nathanail C P. 2006. Risk - based characterisation of lead in urban soils [J]. Chemical Geology, 226(3/4): 340-351
- 胡永定. 1989. 冲击型土壤重金属含量与质地和 pH 的关系及其预测 [J]. 农村生态环境, 1(3): 46-51
- Hu Y D. 1989. Relationship among heavy metal contents soil tekture and pH in alluvial soils and its prediction [J]. Rural Eco - environment, 1(3): 46-51 (in Chinese)
- 黄勇,郭庆荣,任海,等. 2005. 城市土壤重金属污染研究综述[J]. 热带地理, 25(1): 14-18
- Huang Y, Guo Q R, Ren H, *et al.* 2005. A review of the study on heavy metal pollution in urban soils [J]. Tropical Geography, 25(1): 14-18 (in Chinese)
- 胡慧玲. 2003. 乌鲁木齐市郊安宁渠区土壤重金属的污染调查 [J]. 干旱环境监测, 17(2): 117-119
- Hu H L. 2003. The investigation of the heavy metal pollutions in the anningqu district [J]. Arid Environmental Monitoring, 17(2): 117-119 (in Chinese)
- 胡守仁. 1993. 神经网络应用技术 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社. 12-14
- Hu S R. 1993. Neural Network Application Technology [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press. 12-14 (in Chinese)
- 李健,郑春江. 1989. 环境背景值数据手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 220-221
- Li J, Zheng C J. 1989. The Handbook of Environment Background Value [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 220-221 (in Chinese)
- 廖宁放,高稚允. 1998. BP神经网络用于函数逼近的最佳隐层结构 [J]. 北京理工大学学报, 18(4): 18-22
- Liao N F, Gao Z Y. 1998. The most suitable architecture of hidden - layer in bp neural networks for function approximation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 18(4): 18-22 (in Chinese)
- Lindstrom M. 2001. Urban land use influences on heavy metal fluxes and surface sediment concentrations of small lakes [J]. Water, Air and Soil Pollution, 126(21): 363-383
- Liphadzi M S, Kirkham M B, Mankin K R, *et al.* 2003. EdTA - assisted heavy metal uptake by poplar and sunflower grown at a long - term sewage-sludge farm [J]. Plant and Soil, 257(1): 171-182
- 刘爱国,花日茂. 2002. 农药降解的非线性动力学模型研究 [J]. 安徽农业大学学报, 29(3): 311-315
- Liu A G, Hua R M. 2002. Study on the non - linear kinetic model for degradation of pesticides [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 29(3): 311-315 (in Chinese)
- 刘玉燕,刘敏,刘浩峰. 2006. 乌鲁木齐城市土壤中重金属分布 [J]. 干旱区地理, 29(1): 120-123
- Liu Y Y, Liu M, Liu H F. 2006. Distribution of heavy metal in urban soil of Urumqi City [J]. Arid Land Geography, 29(1): 120-123 (in Chinese)
- 卢子杨,张崇德. 1989. 土壤污染预测研究的动态模型 [J]. 农业环境保护, 8(4): 10-18
- Lu Z Y, Zhang C D. 1989. The dynamic model in the prediction research on the soil pollution [J]. Journal of Agro-environmental Science, 8(4): 10-18 (in Chinese)
- Milacic, Stupar J. 1995. Fractionation and oxidation of chromium in tannery waste and sewage sludge-amended soils [J]. Environ Sci Technol, 29(2): 506-514
- 齐淑华,刘宇红,王增辉,等. 2000. 农药降解 CM(1,1)模型 [J]. 标准化报道, 21(1): 36-37
- Qi S H, Liu Y H, Wang Z H, *et al.* 2000. The GM (1,1) model of pesticide degradation [J]. Reporting of Standardization, 21(1): 36-37 (in Chinese)
- Shen Z, Kawakami M, Kawamura I. 2009. Geosimulation model using geographic automata for simulating land-use patterns in urban partitions [J]. Environment and Planning (B: Planning and Design), 36: 802-823
- 史贵涛,陈振楼,李海雯,等. 2006. 城市土壤重金属污染研究现状与趋势 [J]. 环境监测管理和技术, 18(6): 9-12
- Shi G T, Chen Z L, Li H W, *et al.* 2006. Situation and trend of heavy metal contamination in urban soil [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 18(6): 9-12 (in Chinese)
- Shiu C J, Liu S C, Chen J P. 2009. Diurnally asymmetric trends of temperature, humidity and precipitation in Taiwan [J]. Journal of Climate, 22: 5630-5649
- VanRooij A J F. 1996. Neural Network Training using Genetic Algorithm [M]. Singapore: World Scientific. 20-23
- 王学军. 2006. 土壤微量金属含量的空间分析 [M]. 北京: 科学出版社. 12-16
- Wang X J. 2006. Spatial Analysis on the Content for the Soil Trace Metal [M]. Beijing: Science Press. 12-16 (in Chinese)
- 王亚宇,钱翌,朱建雯,等. 2008. 乌鲁木齐市表层土壤 Pb 的化学形态分布及潜在生态危害评价 [J]. 环境科学研究, 21(5): 104-109
- Wang Y Y, Qian Y, Zhu J W, *et al.* 2008. Chemical speciation of pb

- and its potential ecological risk in urban superficial soils of Urumqi City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 21(5): 104-109(in Chinese)
- White J G, Welch R M, Norvell W A. 1997. Soil Zn map of the USA using geostatistics and geographic information system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 185-194
- 巫影,陈定方,唐小兵,等. 2002. 神经网络综述[J]. *科技进步与对策*, 19(6): 133-134
- Wu Y, Chen D F, Tang X B, *et al.* 2002. Summarizing of neural network [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 19(6): 133-134 (in Chinese)
- 阎平凡,张长水. 2000. *人工神经网络与模拟进化计算*[M]. 北京:清华大学出版社. 99-101
- Yan P F, Zhang C S. 2000. *Artificial Neural Network and Simulated Evolutionary Computation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press. 99-101 (in Chinese)
- Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, *et al.* 2004. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang Lead/Zinc Mine, Guandong, China[J]. *Environment International*, 30(7): 883-889
- 郑袁明,陈煌,陈同斌,等. 2003. 北京市土壤中 Cr、Ni 的空间结构与分布特征[J]. *第四纪研究*, 23(4): 436-445
- Zheng Y M, Chen H, Chen T B, *et al.* 2003. Spatial distribution patterns of Cr and Ni in soils of Beijing[J]. *Quaternary Sciences*, 23(4): 436-445 (in Chinese)
- 中国环境监测总站. 1990. *中国土壤元素背景值*[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 329-492
- China National Environmental Monitoring Center. 1990. *The Soil Background Values of China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 329-492 (in Chinese)