

青岛市表层土壤中重金属的富集、分布特征与环境效应

华东师范大学 张晓民、孙姝婷、刘昞

摘要

评价土壤中重金属的污染程度,分析污染主要原因以及定位污染源是地质环境研究的重要课题。

本文以青岛为研究案例,围绕重金属的污染程度考量、重金属污染因素分析、确定污染源位置等角度展开研究,形成3个问题,通过构建地质积累指数模型、动态加权模型、相关性分析模型、主成分分析模型、B样条函数插值模型等5个模型,完整而系统的将之解决。

问题1旨在直观地刻画重金属元素的空间分布。我们使用MATLAB画出了8种重金属元素空间分布的示意图,并分别对8种重金属元素进行描述性统计分析。在此基础上,我们建立地质积累指数模型来定量评价不同区域的污染程度,得到的结果为:工业区、交通区污染最为严重,生活区、公园绿地区其次,山区污染最轻。

问题2中,各种重金属浓度的数量级不一致会导致不可公度问题,我们首先对重金属浓度进行一致化处理,建立动态加权模型以合理确定8种重金属的污染权重,从而为每一个采样点计算一个综合污染评价值,污染值最高的地区即为污染的源头区域。进一步,建立主成分分析模型以判断主要污染元素,得到的最终结果为:两种人为因素,包括工业污染、交通污染,是造成该城区重金属污染的主要原因,其中,工业生产导致8种重金属污染同时发生,车辆交通导致Hg、Pb污染发生。

对问题3,首先我们建立相关性分析模型,选取8种重金属浓度,海拔为变量,得出重金属污染的传播规律为:污染由高浓度向低浓度、高海拔向低海拔传播,且各污染元素具有一定的同源性。基于问题2的分析,我们发现污染值较高的点集中于2个区域,即一个工业密集区和一个交通密集区。为了寻找污染值最大的点,我们建立B样条函数插值模型,分别寻找这两个区域插值后综合污染评价值最高的点。得到的结果是:工业污染源(较大污染源)的坐标定位为(2220,3400),交通污染源(较小污染源)的坐标定位为(15220,9170)。考虑到样本容量过小,求得的位置一般会与污染源的真正位置有一定的偏差,因此,我们认为污染源应分别存在于以上述两点为圆心,以一定的距离为半径(经检验,合适的距离在100m左右)的圆之中,且更可能出现于相对海拔较高的位置。

最后,我们在评价自身模型优缺点的基础上,探讨信息的收集与相应模型的建立,提出了微分方程、回归模型的构建方法,并对所建模型的推广方式进行了分析。

关键词: 重金属污染 地质积累指数 动态加权 B样条函数插值

1.研究背景及意义

土壤是生态环境的重要组成部分，是与人类关系极为密切的环境介质，也是人类赖以生存的主要自然资源。随着工农业的发展，土壤污染问题越来越突出，尤其是重金属污染。所谓土壤重金属污染是指由于人类的活动将重金属带入土壤中，致使土壤重金属含量明显高于其自然背景值，并造成生态破坏和环境质量恶化的现象。当前，随着全球经济一体化的发展，我国也加快了工业化与城市化的发展进程，城市的农业集约化程度不断提高，水土资源快速恶化和萎缩，土壤利用强度日益加大。土壤不仅是陆地生态系统的基础，还是城市生态系统的重要组成部分。城市土壤供应着城市绿色植物的生长介质和养分，是城市污染物重要的源和汇，是土壤微生物的栖息地和能量来源，直接影响到城市的生态环境质量。重金属污染物主要包括汞、镉、铅、铬、锌、铜、镍、钴、锡以及类金属砷等，作为一种持久性有毒物质，进入土壤系统，会使城市土壤的各种性质发生了变化，引起土壤的组成结构和功能发生变化，微生物活动受到抑制，有害物质或分解产物在土壤中逐渐积累，通过“土壤→植物→人体”或“土壤→水→人体”在人体内积累，间接被人体吸收，危害人体健康。因此，土壤重金属污染已成为全球面临的一个严重环境问题。

国土资源部统计表明，目前全国耕种土地面积的 10% 以上已受重金属污染，重金属污染土壤面积至少有 1.5 亿亩；而且我国每年有 1200 万吨粮食遭到重金属污染，直接经济损失超过 200 亿元；从中国土壤资源状况看，截至 2011 年底全国人均耕地仅 1.35 亩，不到世界平均水平的 1/2，而且随着今后中国经济社会的发展如生态退耕、农业结构调整及自然灾害损毁等，土壤资源将进一步减少。由此可见，我国土壤重金属污染已十分严重，同时影响到人们的食品安全。因而如何有效地控制及治理土壤重金属的污染，改良土壤质量，将成为生态环境保护工作中十分重要的一项内容。

2011 年 4 月初，我国首个“十二五”专项规划——《重金属污染综合防治“十二五”规划》获得国务院正式批复，针对“十二五”中国面临的严峻环境形势，防治规划力求控制 5 种重金属，重点解决重金属污染等关系民生的突出环境问题。2012 年 11 月 8 日，党的十八大报告首次单篇论述“生态文明”，从理论和实践的高度对社会主义生态文明新时代做出了全面而深刻的阐述，把生态文明建设摆在突出位置，坚持在发展中保护、在保护中发展，继续积极探索代价小、效益好、排放低、可持续的环境保护新道路，着力解决影响科学发展和损害群众健康的突出环境问题，走生态文明建设之路，建设美丽中国，实现中华民族永续发展。可见，我国政府治理重金属污染的决心。重金属污染防治工作是整个国家的需要，也是社会可持续发展的需要，更是人民群众的需要。伴随着城市经济的不断发展，城市重金属污染问题已经引起了社会各界的广泛关注。

青岛位于山东半岛南端、黄海之滨，是中国重要的经济中心城市和港口城市，重要的外贸口岸之一，国家历史文化名城和风景旅游胜地，也是首批全国文明城市、国家卫生城市、国家环境保护模范城市、国家园林城市，获得“中国人居环境奖”。青岛市还获批为第二批国家低碳城市试点。2005 年青岛八大关被《中国国家地理》评选为中国最美的五大城区之一，2007 年青岛成为中国唯一入选“世界最美海湾”的城市。青岛还是中国举办大型赛事和国际盛会最多的大都市之一，2008 年青岛成功举办第 29 届奥运会帆船比赛，成为奥运之城，被誉为“世界帆船之都”，2013、2014 年连续两届世界杯帆船赛、2014 年世界园艺博览会、2015 年世界休闲体育大会也都将在青岛举办，青岛承

担着全面展示良好城市形象、走向世界的重任，作为体现青岛面貌的首要因素——环境已成为青岛、中国乃至世界大众关注的问题。当前，青岛市正围绕建设宜居城市，实施“十绿工程”，推进各类生态功能区建设和保护，加强城市园林绿化，按照“生态优先、集约发展、智能低碳”的原则，坚持绿色增长，树立低碳发展理念，全面建设资源节约型、环境友好型社会。此外，虽然目前国内关于城市表层土壤重金属污染调查及其评价的研究已有很多，但主要涉及东南沿海发达地区，研究区域主要集中在工业企业周边、城郊和农业区，而对于整个青岛市大区域内各功能区的土壤重金属污染状况及环境质量评价的研究甚少，因此，对青岛城市环境的研究具有极其重要的科学价值和现实意义。

本文以青岛市不同功能区的表层土壤为研究对象，对土壤中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的浓度进行测定，通过构建地质积累指数模型、动态加权模型、相关性分析模型、主成分分析模型、B 样条函数插值模型等 5 个模型，评价土壤中重金属的污染程度，分析污染的主要原因并定位污染源，以期为今后青岛市区乃至山东半岛城市的土地合理规划与利用、土壤重金属污染的治理、保障城市居民的身心健康提供科学依据。

2. 问题的提出

随着城市经济的快速发展和城市人口的不断增加，人类活动对城市环境质量的影响日显突出。对城市土壤地质环境异常的查证，以及如何应用查证获得的海量数据资料开展城市环境质量评价，研究人类活动影响下城市地质环境的演变模式，日益成为人们关注的焦点。

按照功能划分，城区一般可分为生活区、工业区、山区、主干道路区及公园绿地区等，分别记为 1 类区、2 类区、……、5 类区，不同的区域环境受人类活动影响的程度不同。

现对青岛城区土壤地质环境进行调查。为此，将其划分为间距 1 公里左右的网格子区域，按照每平方公里 1 个采样点对表层土（0~10 厘米深度）进行取样、编号，并用 GPS 记录采样点的位置。应用专门仪器测试分析，获得了每个样本所含的多种化学元素的浓度数据。另一方面，按照 2 公里的间距在那些远离人群及工业活动的自然区取样，将其作为青岛城区表层土壤中元素的背景值。

附件 1 列出了采样点的位置、海拔高度及其所属功能区等信息，附件 2 列出了 8 种主要重金属元素在采样点处的浓度，附件 3 列出了 8 种主要重金属元素的背景值。

我们现在的任务是：

(1) 给出 8 种主要重金属元素在该城区的空间分布，并分析青岛市不同区域重金属的污染程度。

(2) 通过数据分析，说明重金属污染的主要原因。

(3) 分析重金属污染物的传播特征，由此建立模型，确定污染源的位置。

3. 问题的分析

● 问题（1）的分析

该问题共由 2 个部分构成。

第一部分为给出 8 种主要重金属元素在该城区的空间分布。图像是对空间分布最直观的反映与刻画，因此，我们首先应给出 8 种重金属的浓度分布图，本文采用其伪色彩图。在直观图的基础上，应分别对 8 种重金属元素的分布做统计性描述，统计量的选择包括浓度的均值、方差、偏度、峰度^[1]等，配合浓度的箱线图，以定量刻画其空间分布

特征。

第二部分为分析该城区内不同区域重金属的污染程度。同样，应使用统计性描述方法；为了更加直观的反映重金属浓度值与背景值的偏离程度，我们还定义了污染的富集系数。在此基础上，我们参考环境科学相关知识，建立地质积累指数模型，对不同区域分别进行处理，以刻画不同区域重金属的污染程度，并对各区域进行比较分析。

● 问题（2）的分析

该问题要求说明重金属污染的主要原因，我们从污染的源头区域、源头区域的重金属污染种类两个角度来回答这一问题。由于共有 8 种重金属元素，首先应建立一个统一的指标，综合考虑 8 种重金属元素，合理确定各类元素的权重系数，以做到评价的客观、公正。鉴于各种类重金属元素浓度的数量级不同，我们首先对浓度进行一致化处理与标准化处理。借助模糊数学隶属度函数的构造方法，我们选用偏大型正态分布来定义和计算各类重金属污染的权重系数，即一种动态加权方法。确定权重之后，我们以这个权重乘以对应的重金属元素的地质积累指数，来计算各个采样点重金属污染的综合评价值。通过对采样点的分类汇总和排序，确定污染的来源区域，即回答了重金属污染的功能区来源。进一步，我们进行重金属污染的主成分分析，以明确不同功能区土壤中重金属的污染种类。

● 问题（3）的分析

该问题要求给出污染物的传播特征并定位污染源。城市土壤重金属来源于成土母质和人类活动，同一样源的重金属之间存在着相关性，根据相关性可以判断土壤重金属污染来源是否相同。在第（1）问中，我们找出了综合污染度最高的一批采样点。根据重金属污染物的传播特征可以知道，进一步寻找到浓度最高的地理位置点，即可确认为污染源。然而，我们仅知道离散的 319 个样本点处的数据，为了得到更多的点，我们考虑使用二维 B 样条函数插值^[2]的方法。通过插值计算污染度最高的点，即确认为污染源。

4. 模型假设

- （1）污染源处重金属的浓度值最高。根据扩散原理，重金属污染总是从高浓度向低浓度扩散。
- （2）仅考虑该城区内各项因素所造成的污染，城区外的污染不计入考察范围。
- （3）采样点浓度的测定是准确无误的，不考虑测定误差。
- （4）给定的 8 种重金属元素之外的污染元素、污染物不计入考察范围。
- （5）该城区中没有水域，城区全部被陆地覆盖。

5. 符号说明

表 1

符号	定义	单位
x_i	第 i 个的采样点的空间 x 轴坐标	米
y_i	第 i 个的采样点的空间 y 轴坐标	米
H_i	第 i 个的采样点的海拔	米
r_{ij}	第 i 个采样点第 j 种重金属元素浓度	$(\mu\text{g/g})$

K_{ij}	第 <i>i</i> 个采样点第 <i>j</i> 种重金属元素富集系数	无量纲
μ_j	当地无污染区该重金属含量的背景值	($\mu\text{g/g}$)
I_{ij}	第 <i>i</i> 个取样点的第 <i>j</i> 种重金属的地质积累指数	无量纲
a_j	第 <i>j</i> 种金属背景值范围下界	($\mu\text{g/g}$)
b_j	第 <i>j</i> 种金属背景值范围上界	($\mu\text{g/g}$)
$w_{ij}(\bullet)$	偏大型正态分布动态加权函数	无
ϖ_i	第 <i>i</i> 个取样点的重金属污染综合评价值	无

6. 模型的准备

6.1 取样点的数据处理

定义 1 设 X_1, \dots, X_n 为来自总体 X 的一个相互独立的样本, 则无论总体服从何种分布, 样本均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 是总样本均值的无偏估计, 样本方差 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$ 是总体方差的无偏估计, 可分别用来表示总体均值和方差。

第 j 种重金属浓度在城区内的均值为

$$\bar{r}_j = \frac{1}{319} \sum_{i=1}^{319} r_{ij}, \quad j=1, 2, \dots, 8$$

第 j 种重金属浓度在城区内的方差为

$$S^2 = \frac{1}{318} \sum_{i=1}^{319} (r_{ij} - \bar{r}_j)^2, \quad j=1, 2, \dots, 8$$

定义 2 偏度 $\beta_1 = \frac{E(X - E(X))^3}{[E(X - E(X))^2]^{3/2}}$, 偏度可以描述分布的对称性。

定义 3 峰度 $\beta_2 = \frac{E(X - E(X))^4}{[E(X - E(X))^2]^2} - 3$, 峰度可以描述分布的陡峭性。

表 2 该区域土壤重金属含量统计表

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
N 有效	319	319	319	319	319	319	319	319
缺失	0	0	0	0	0	0	0	0
均值($\mu\text{g/g}$)	5.6765	.302396	53.5097	55.0167	0.2997113	17.2618	61.7409	201.2026
众数	5.41	0.0956 ^a	33.79 ^a	20.34 ^a	0.03400	12.60	26.04 ^a	89.08
标准差	3.02429	.2249876	70.00179	162.91510	1.62953978	9.94142	50.05776	339.23254
偏度	3.324	2.024	9.445	12.755	8.596	7.109	4.406	6.490
偏度的标准误	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137
峰度	19.696	5.641	104.166	180.685	74.148	81.844	28.308	53.591
峰度的标准误	0.272	0.272	0.272	0.272	0.272	0.272	0.272	0.272
全距	28.52	1.5798	905.52	2526.19	15.99143	138.23	452.80	3727.96
极小值	1.61	0.0400	15.32	2.29	0.00857	4.27	19.68	32.86

极大值	30.13	1.6198	920.84	2528.48	16.00000	142.50	472.48	3760.82
背景值范围	1.8~5.4	0.070~0.190	13~49	6~20.4	0.019~0.051	4.7~19.9	19~43	41~97

7. 模型的建立与求解

7.1 问题（1）的模型建立与求解

对于 8 种主要重金属元素在该城区的空间分布，我们首先使用数学软件 MATLAB（2008a）做出重金属浓度分布的直观示意图，进一步用描述性统计方法刻画重金属元素的空间分布特征.为了评价重金属污染程度，我们建立地质积累指数模型，以做出定量评价。

7.1. 18 种主要重金属元素的空间分布

为了给出 8 种主要重金属元素在该城区的空间分布，我们首先以第 i 个取样点的位置坐标与该观测点第 j 种重金属的浓度组成一个三维坐标，

$[x_i, y_i, r_{ij}]$, ($i=1,2,\dots,319$; $j=1,2,\dots,8$) 用 MATLAB 格点样条函数进行内部插值，得到该城区 8 种主要重金属元素空间分布的示意图，如图（1-8）所示：

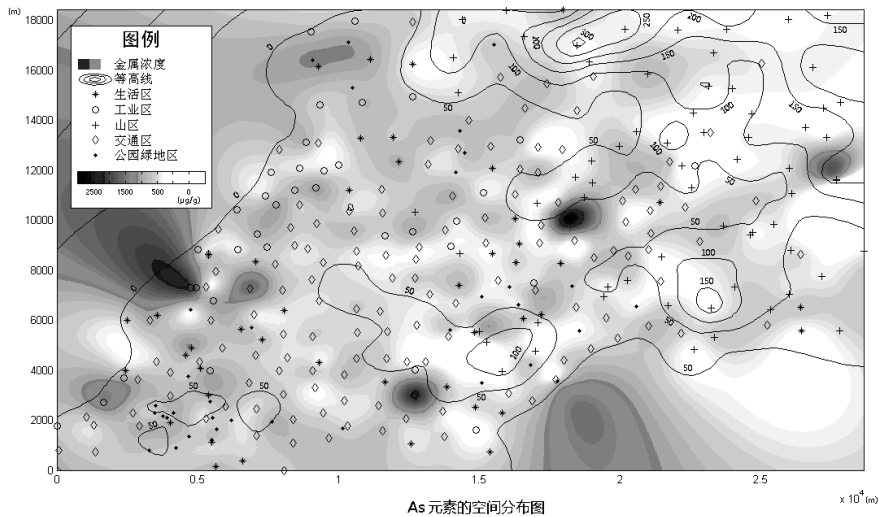


图 1As 元素的空间分布图

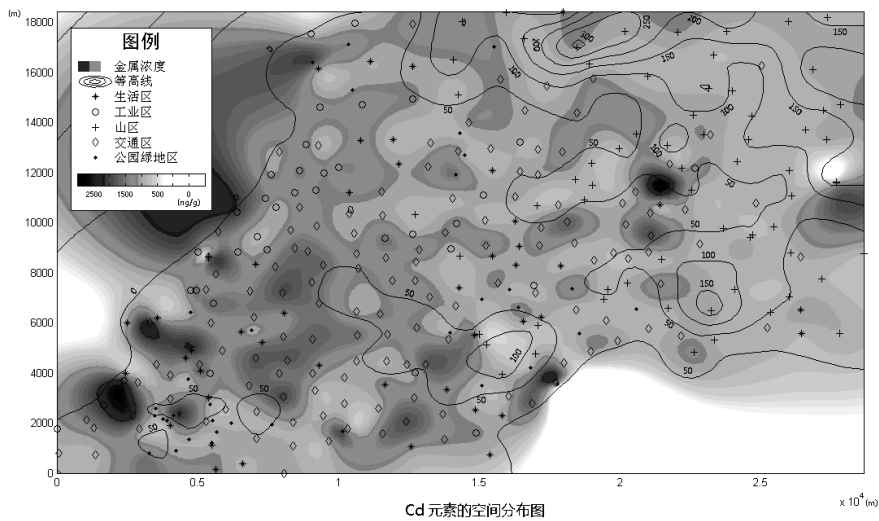


图 2Cd 元素的空间分布图

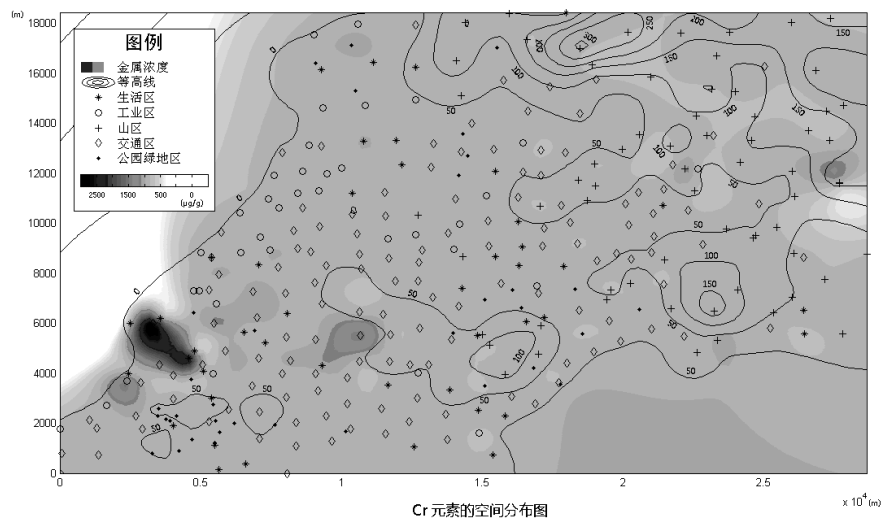


图 3Cr 元素的空间分布图

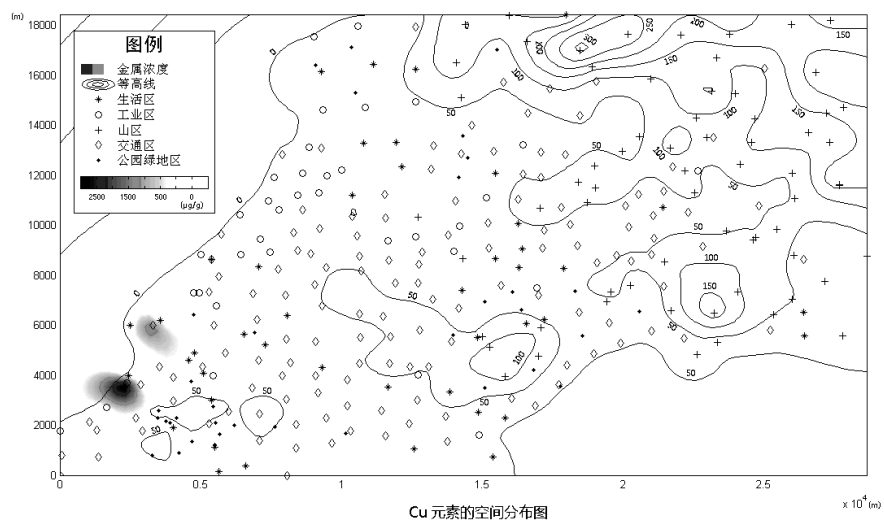


图 4Cu 元素的空间分布图

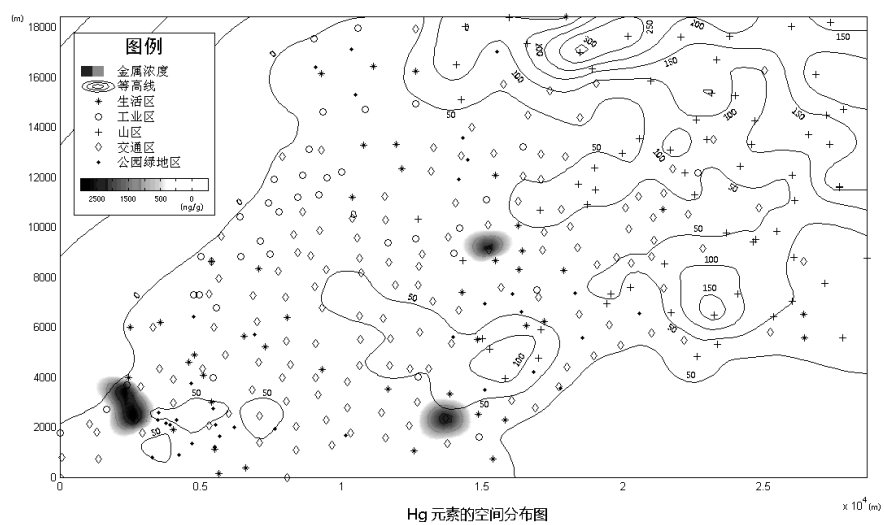
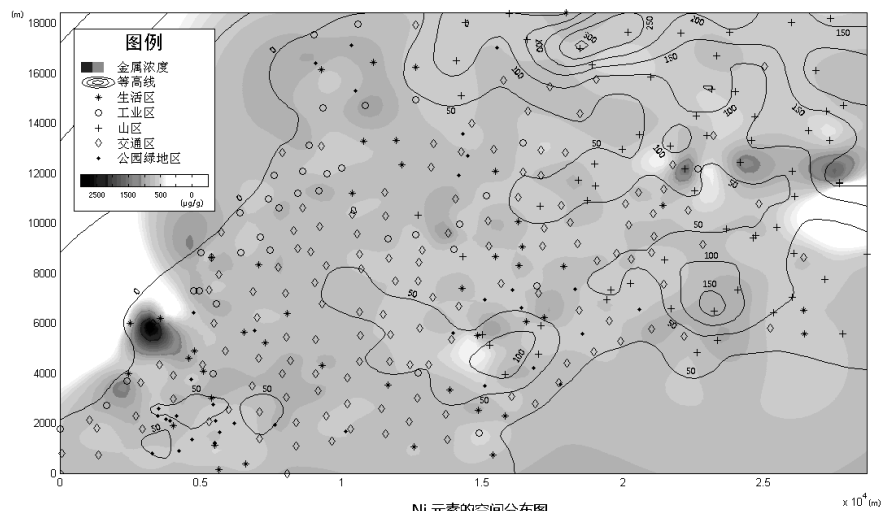
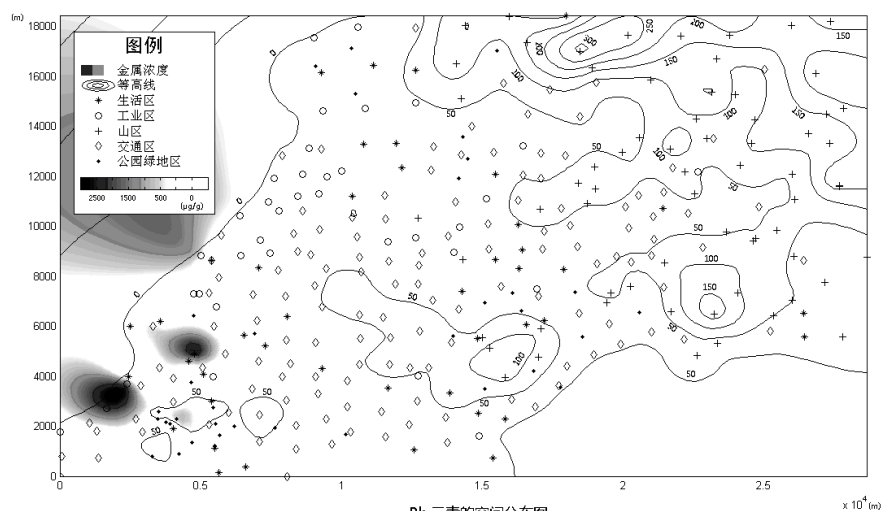


图 5Hg 元素的空间分布图



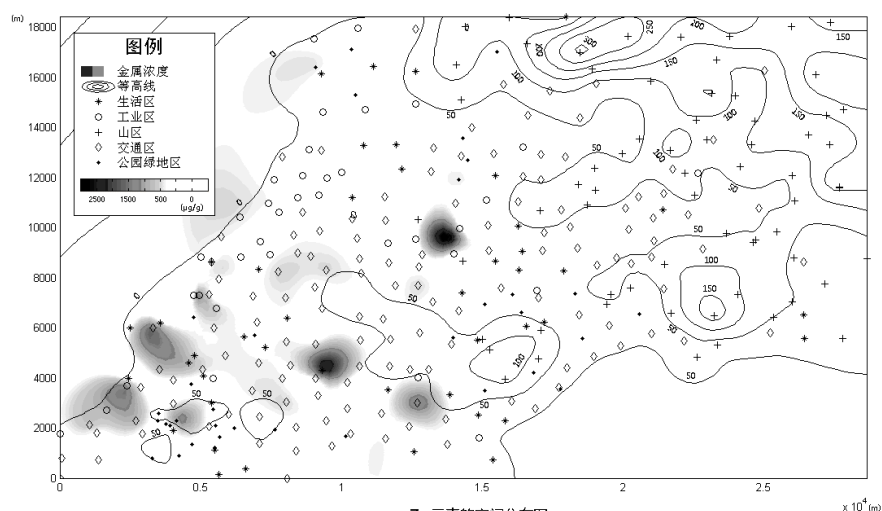
Ni元素的空间分布图

图 6Ni 元素的空间分布图



Pb元素的空间分布图

图 7Pb 元素的空间分布图



Zn元素的空间分布图

图 8Zn 元素的空间分布图

7. 1. 28 种重金属元素的空间分布——描述性统计分析

为了能更加直观地发现各种重金属浓度数据的异常点（异常值）和数据的偏态和尾重，我们采用统计学常用工具——箱线图进行刻画.图 9 为 SPSS. 19 自动生成。

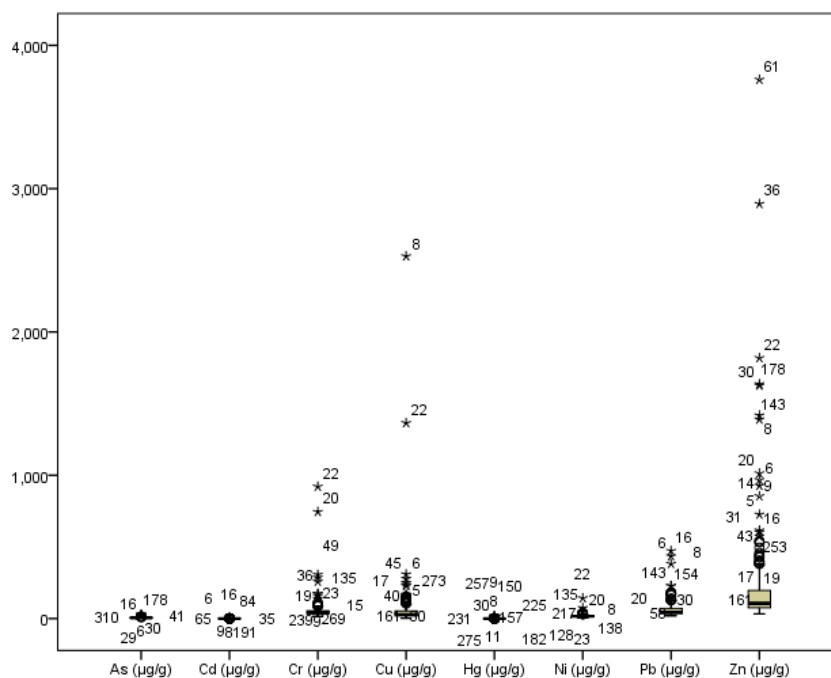


图 98 种重金属浓度箱线图

从图（1-8）中可以看出，各重金属元素含量具有明显的空点变异性，且变化趋势较为相似。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 在空间上均有 2 到 3 个高值区，并呈现出以高值区为中心向四周组建递减的趋势.在箱线图（图 9）可知，As 元素在编号为 84, 178, 29, 30 的测量点出现异常点，发现最高值为交通区，As 元素在工业区平均含量最高。Cd 在编号为 95, 22, 9, 6 的测量点出现异常点，发现最高值位于交通区，Cd 元素在工业区平均含量最高。Cr 在编号为 22, 20, 49, 8 的测量点出现异常点，发现最高值为交通区，Cr 元素在生活区平均含量最高。Cu 元素在编号为 8, 22, 6, 24 的测量点出现异常点，发现最高值为工业区，次高值为交通区，Cu 元素在工业区平均含量最高。Hg 元素在编号为 9, 182, 257, 8 的观测点出现异常点，发现最高值为交通区，Hg 元素在工业区平均含量最高。Ni 元素在编号为 22, 135, 128, 8 的观测点出现异常点，发现最高值为交通区，其次为山区，Ni 元素在工业区平均含量最高。Pb 元素在编号为 16, 6, 8, 20 的观测点出现异常点，发现最高值为生活区，次高值为工业区，Pb 元素平均含量在工业区最高。Zn 元素在编号为 61, 36, 22, 178 的观测点出现异常点，发现最高值为交通区，次高值为生活区，Zn 元素平均含量在工业区最高。

结论：重金属元素污染主要在工业区和交通区，公园绿地区和山区重金属污染程度较轻。

8 种重金属元素在城区不同功能区浓度从小到大排序，如表（3）

表 3 重金属元素浓度排序表

重金属类别	相应浓度从大到小
As	工业区 > 生活区 > 公园绿地区 > 交通区 > 山区
Cd	工业区 > 交通区 > 生活区 > 公园绿地区 > 山区
Cr	生活区 > 交通区 > 工业区 > 公园绿地区 > 山区
Cu	工业区 > 交通区 > 生活区 > 公园绿地区 > 山区

Hg	工业区 > 交通区 > 公园绿地区 > 生活区 > 山区
Ni	工业区 > 生活区 > 交通区 > 山区 > 公园绿地区
Pb	工业区 > 生活区 > 交通区 > 公园绿地区 > 山区
Zn	工业区 > 交通区 > 生活区 > 公园绿地区 > 山区

7.1.3 不同区域重金属元素污染程度——描述性统计分析

为了评定该城区内不同区域重金属的污染程度，我们首先按城区功能类型的不同对样本采集点进行分类筛选，分别对 5 类城区的重金属浓度做描述性统计，统计方法和上文相同，此外，我们定义污染的富集系数

$$K_{ij} = \frac{r_{ij}}{\mu_j}$$

其中， K_{ij} 表示污染的富集系数， r_{ij} 为第 j 种重金属元素在第 i 个地区的浓度， μ_j 为第 j 种重金属的背景值。

富集系数越大，说明该类重金属在当地污染程度越严重。

经过计算，我们得到的各项指标结果如表 4 所示。

表 48 种重金属元素在不同功能区的描述性统计表

		生活区	工业区	山区	交通区	公园绿地区
As	均值(μg/g)	6.27	7.25	4.04	5.708	6.26
	范围(μg/g)	2.34~11.45	1.61~21.87	1.77~10.99	1.61~30.13	2.77~11.68
	富集系数	1.74	2.01	1.12	1.59	1.74
Cd	均值(μg/g)	0.28	0.39	0.15	0.36	0.28
	范围(μg/g)	0.08~1.04	0.11~1.09	0.04~0.40	0.05~1.61	0.09~1.02
	富集系数	2.15	3	1.15	2.77	2.15
Cr	均值(μg/g)	69.01	53.41	38.95	58.05	43.63
	范围(μg/g)	18.46~744.46	15.40~285.58	16.20~173.34	15.32~920.84	16.31~96.28
	富集系数	2.23	1.72	1.26	1.87	1.41
Cu	均值(μg/g)	49.40	127.53	17.32	62.21	30.19
	范围(μg/g)	9.73~248.85	12.70~2528.48	2.29~69.06	12.34~1364.85	9.04~143.31
	富集系数	3.74	9.66	1.31	4.71	2.29
Hg	均值(μg/g)	0.09	0.64	0.04	0.45	0.11
	范围(μg/g)	0.01~0.55	0.01~13.5	0.01~0.21	0.01~16	0.01~1.34
	富集系数	2.57	18.29	1.14	12.86	3.14
Ni	均值(μg/g)	18.3423	19.8117	15.4538	17.6171	15.2897
	范围(μg/g)	8.89~32.8	4.27~41.7	5.51~74.03	6.19~142.5	7.6~29.1
	富集系数	1.49	1.61	1.26	1.43	1.24
Pb	均值(μg/g)	69.1064	93.0408	36.5559	63.5342	60.7086
	范围(μg/g)	24.43~472.48	31.24~434.8	19.68~113.84	22.01~181.48	26.89~227.40
	富集系数	2.23	3.00	1.18	2.05	1.96
Zn	均值(μg/g)	237.0086	277.9275	73.2942	242.8549	154.2423
	范围(μg/g)	43.37~2893.47	56.33~1626.02	32.86~229.8	40.92~3760.82	37.14~1389.39
	富集系数	3.43	4.03	1.06	3.52	2.24

从表 4 中，可以发现工业区的富集系数均比较大，特别是 Hg 的富集系数为 18.29，远远高于背景值，表现出强富集。其次是在交通区，生活区，公园绿地区。山区的富集系数均略大于 1，接近背景值，表现为一定的弱富集或者贫化。

7.1.4 不同区域重金属的污染程度——地质积累指数模型

在描述性统计的基础上，我们根据环境科学知识，构建了地质积累指数^[3]模型，来定量刻画不同区域重金属的污染程度。

地质积累指数通常也称为 Muller 指数，是 20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来广泛应用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标，其具体计算方法如下：

$$I_{ij} = \log_2 \left[\frac{r_{ij}}{K \times \mu_j} \right]$$

其中， I_{ij} 表示第 i 个取样点的第 j 种重金属的地质积累指数； r_{ij} 表示第 i 个取样点的第 j 种重金属的浓度； K 为修正系数，通常取 1.5； μ_j 为当地无污染区该重金属含量的背景值。

为了评价 5 类城区各种重金属的污染情况，我们对相同类型的城区采样点进行分类汇总，取其地质积累指数的加权平均数作为该类城区的地质积累指数。结果如表 5 所示：

表 55 类城区的地质积累指数与污染度评价

	生活区		工业区		山区		交通区		公园绿化区	
	I_1	污染程度	I_2	污染程度	I_3	污染程度	I_4	污染程度	I_5	污染程度
As	0.13	无到中	0.21	无到中	-0.53	无	-0.06	无	0.14	无到中
Cd	0.34	无到中	0.80	无到中	-0.53	无	0.60	无到中	0.18	无到中
Cr	0.15	无到中	-0.03	无	-0.45	无	0.03	无到中	-0.17	无
Cu	0.88	无到中	1.38	中	-0.39	无	1.07	中	0.40	无到中
Hg	0.20	无到中	1.32	中	-0.60	无	0.46	无到中	0.20	无到中
Ni	-0.08	无	-0.03	无	-0.46	无	-0.18	中	-0.34	无
Pb	0.24	无到中	0.67	无到中	-0.46	无	0.28	无到中	0.13	无到中
Zn	0.47	无到中	0.86	无到中	-0.59	无	0.65	无到中	0.05	无到中

注：按 Förlstner (1990) 的分类法^[3]： $I_i < 0$ ，无污染；，无污染到中度污染 $0 \leq I_i < 1$ ； $1 \leq I_i < 2$ ，中度污染。

结论：此模型显示重金属元素污染主要在工业区和交通区，均出现两种重金属达到中度污染 ($0 \leq I_i < 1$)；公园绿地区和生活区重金属污染相对于工业区和交通区较轻，多数重金属浓度介于无污染到中度污染之间 ($0 \leq I_i < 1$)；而山区 8 种重金属浓度均达到无污染 ($I_i < 0$)。

7.2 问题（2）的模型建立与求解

为了研究重金属污染的主要原因，我们分 3 步进行探究：首先，建立动态加权模型，定义重金属的综合污染指标，求出重金属综合污染程度达到最高的采样点（前 10 位），确定这些采样点所属的区域类型；然后，对所确定的区域类型，我们筛选出该类型采样点的全部数据，对各种重金属元素污染做主成分分析，确定该类区域的主要污染元素；最后，通过比对重金属污染元素的来源（查阅文献资料获得），我们得出重金属污染的主要原因。

7.2.1 采样点综合污染程度的动态加权模型

我们考虑使用动态加权模型^[4]，合理确定各重金属元素的污染权重，同时对不同量纲的重金属浓度作标准化处理，从而达到对采样点污染程度综合排序的目的。

(1) 模型的建立

土壤中重金属的浓度有其背景值,背景值为一个区间,记为 $[a_j, b_j]$.我们假定当重金属浓度 r_{ij} 低于背景值的最大范围 b_j 时,此时土壤没有被污染;当重金属浓度 r_{ij} 超出背景值范围的最大范围 b_j 时,土壤被污染,且超出的值越大,污染程度越大。

Step1 为了定量分析城区内不同区域重金属的污染程度,我们首先对第 j 种重金属在第 i 个地区的污染浓度做标准化处理:

$$r_{ij}^{(1)} = \begin{cases} 1 & 0 \leq r_{ij} \leq b_j \\ 1 - \frac{r_{ij} - b_j}{c_j} & r_{ij} > b_j \end{cases};$$

其中, r_{ij} 表示第 i 个取样点的第 j 种重金属的浓度, b_j 为第 j 种重金属背景值的最大范围, $c_j = \max\{a_j - m_j, M_j - b_j\}$, $m_j = \min\{r_{ij}\}$, $M_j = \max\{r_{ij}\}$ 。

Step2 对 r_{ij} 作极小化处理,即可得到:

$$r_{ij}^{(2)} = M_j^{(1)} - r_{ij}^{(1)},$$

其中, $M_j^{(1)} = \max\{r_{ij}^{(1)}\}, 1 \leq i \leq n$;

Step3 $r_{ij}^{(2)}$ 为一个极小化指标,将其标准化:

$$r_{ij}^{(3)} = \frac{r_{ij}^{(2)} - m_j^{(2)}}{M_j^{(2)} - m_j^{(2)}},$$

其中 $M_j^{(2)} = \max\{r_{ij}^{(2)}\}$, $m_j^{(2)} = \min\{r_{ij}^{(2)}\}$, $1 \leq i \leq n$,

则相应的指标值变为 $\{r_{ij}^{(3)}\} \in [0, 1]$, $r_{ij}^{(3)}$ 为无量纲的标准化指标。对应的背景值区间上下界 a_j, b_j 也随之做相应的变化,方法同上,此处不再详述。

Step4 根据这一实际问题,通过对8种主要重金属元素的浓度进行分析,不难知道其变化具有一定的规律。由此,在这里我们取动态加权函数为偏大型正态分布函数来定义第 j 种重金属的污染度:

$$w_{ij}(r_{ij}^{(3)}) = \begin{cases} 0 & \text{当 } r_{ij}^{(3)} = 0 \text{ 时} \\ 1 - e^{-\left(\frac{r_{ij}^{(3)}}{\delta_j}\right)^2} & \text{当 } r_{ij}^{(3)} > 0 \text{ 时} \end{cases};$$

其中, δ_j 的取值由 $1 - e^{-\left(\frac{r_{ij}^{(3)}}{\delta_j}\right)^2} = 0.9$ 确定, σ_j 为第 j 种重金属的标准偏差。

偏大型正态分布的图像如图10所示:

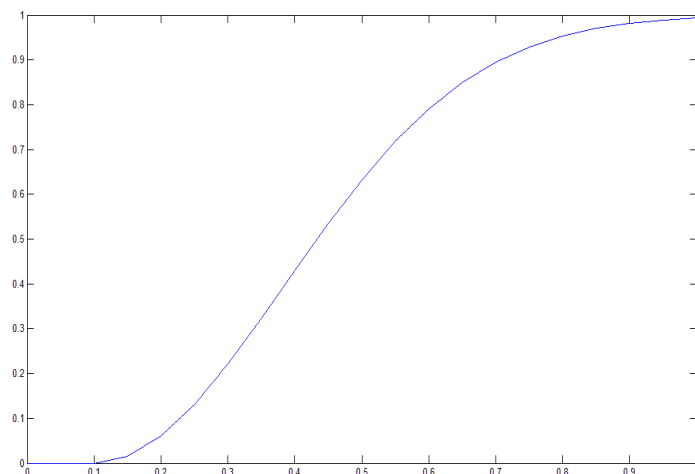


图 10 偏大型正态分布函数图像

Step5 根据第 i 个取样点的第 j 种重金属的地质积累指数 I_{ij} ，以及相应的动态加权函数 $w_{ij}(r_{ij}^{(3)})$ ，计算综合评价值为：

$$\varpi_i = \sum_{j=1}^8 I_{ij} \times w_{ij}(r_{ij}^{(3)})$$

需要说明的是：采样点获得的综合评价值越高，则此采样点被污染程度也就越高。

(2) 模型的求解

分别计算 319 个采样点的综合评价值，得到前 10 名的采样点及其信息见表 6，排名的全部结果参见附录。

表 6 综合污染指标排序前 10 名样本点

排名	采样点编号	功能区	类型	$x(m)$	$y(m)$	海拔(m)	综合评价值
1	8	2	工业区	2383	3692	7	28.89
2	22	4	交通区	3299	6018	4	24.10
3	9	4	交通区	2708	2295	22	20.10
4	6	2	工业区	1647	2728	6	19.41
5	20	1	生活区	4592	4603	6	16.63
6	30	2	工业区	4948	7293	6	16.50
7	16	1	生活区	4777	4897	8	14.93
8	5	4	交通区	1049	2127	12	12.29
9	163	4	交通区	8045	3052	39	12.02
10	182	4	交通区	13694	2357	33	11.97

可见，工业区、交通区的采样点综合污染指标值排名较前，即污染程度大；表 6 中出现的居民区采样点的地理坐标也都是在排名更高的工业区采样点附近的，也就是说，这些居民区的污染很有可能是由临近的工业区所造成的。

通过本模型的求解，我们可以得到初步的结论：**造成重金属污染的源头区域是工业区与交通区，也就是说人为原因导致了重金属污染。**

7.2.2 重金属污染的主成分分析模型

为了进一步明确不同功能区土壤中重金属的污染种类，我们对 5 类功能区土壤的 8 种重金属进行主成分分析^[5]

(1) 模型的建立

主成分分析模型的建立过程如下：

(a) 输入样本观测值：

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{319 \times 8}$$

其中， r_{ij} 表示第 i 个取样点的第 j 种重金属的浓度

(b) 计算各指标的样本均值和样本标准差：

$$\bar{R}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}, S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{R}_j)^2}, j=1,2,\dots,8$$

(c) 对 r_{ij} 标准化，计算样本相关阵：

$$\text{令 } Y_{ij} = \frac{r_{ij} - \bar{R}_j}{S_j}, i=1,2,\dots,319; j=1,2,\dots,8;$$

得标准化数据阵 $\mathbf{\Psi} = (Y_{ij})_{319 \times 8}$

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n Y_{ij} X_{ik} \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(r_{ij} - \bar{R}_j)}{S_j} \frac{(r_{ik} - \bar{R}_k)}{S_k} \\ \mathbf{X} &= (x_{ij})_{8 \times 8} \end{aligned}$$

由于 $x_{jj}=1, x_{ik}=x_{kj}$

即 \mathbf{X} 为对称阵，对角线上元素全为1.只需计算及打印 $\begin{pmatrix} x_{21} & & \\ \cdots & & \\ x_{81} & \cdots & x_{87} \end{pmatrix}$ ；

(d) 求 \mathbf{X} 的特征值以及特征向量
若能通过正交换 \mathbf{Q} 使

$$\mathbf{Q}'\mathbf{X}\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \cdots & \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ & \cdots & \lambda_8 \end{pmatrix}$$

则即为 \mathbf{X} 的8个特征值。

不妨设 $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_8 > 0$, \mathbf{Q} 的各列 $l_j = \begin{pmatrix} l_{1j} \\ \cdots \\ l_{pj} \end{pmatrix}, j=1,2,\dots,8$ 即为 λ_j 所对应的正则化特征向量。

(e) 建立主成分

按积累方差贡献率 $\sum_{j=1}^k \lambda_j / \sum_{j=1}^8 \lambda_j = \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{8} > 85\%$ (或80%) 的准则，确定 k ，从而建立

k 主成分:

$$Z_j = l'_j Z = l_{1j} Y_1 + \dots + l_{8j} Y_8, \quad j=1,2,\dots,k$$

其中 Y_1, \dots, Y_8 为标准化指标变量。

(f) 计算前 k 个主成分的样本值

$$Z_{ij} = \sum_{i=1}^8 Y_{it} l_{tj} \quad i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,k$$

从而可得新指标 (主成分) 样本值 $(Z_{ij})_{n \times k}$ 以之代替样本值 $(r_{ij})_{319 \times 8}$ 作统计分析, 便可将问题简化。

上述计算步骤是对 **X** 型主成分分析而言, 对于 **S** 型主成分分析, 只需令 $(Y_{ij})_{319 \times 8} = (r_{ij})_{319 \times 8}$, 即跳过标准化即可。

(2) 模型的求解

使用 SPSS. 19 软件进行分析, 得到的结果如表 7 所示:

表75类城区污染的主成分分析

	生活区			山区		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
	45.199%	14.165%	13.432%	38.022%	25.445%	19.362%
As	0.669	-0.0646	-0.010	-0.009	0.668	0.478
Cd	0.784	0.171	-0.417	0.601	-0.678	0.141
Cr	0.643	0.234	0.493	0.761	0.480	-0.365
Cu	0.729	-0.246	0.024	0.517	0.469	0.615
Hg	0.492	0.130	-0.437	0.324	-0.074	0.747
Ni	0.686	-0.253	0.523	0.737	0.499	-0.409
Pb	0.803	0.112	-0.348	0.605	-0.630	0.173
Zn	0.501	0.691	0.267	0.905	-0.173	-0.183
	工业区		交通区		公园绿化区	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
	65.67%	15.786%	46.883%	16.084%	48.840%	20.182%
As	0.518	0.758	0.235	-0.131	0.636	-0.569
Cd	0.786	0.074	0.621	0.458	0.811	0.103
Cr	0.916	-0.206	0.874	-0.319	0.809	-0.426
Cu	0.868	-0.463	0.906	-0.250	0.679	0.457
Hg	0.845	-0.459	0.170	0.743	0.203	0.354
Ni	0.767	0.421	0.888	-0.320	0.663	-0.622
Pb	0.858	0.049	0.703	0.477	0.782	0.544
Zn	0.859	0.188	0.643	0.115	0.798	0.286

由表 7 可以看出:

(1) 在生活区

三个主成分中第一主成分的贡献率为 45.199%, 特点表现为因子变量在元素 Pb、Cd、Cu 上有较高的载荷, 即居民区的污染主要由 Pb、Cd、Cu 等元素造成。

(2) 在工业区

两个主成分中第一主成分的贡献率为 65.67%, 特点表现为因子变量在各个元素上有较高的载荷, 即各种重金属元素都对工业区造成了严重污染。

(3) 在山区

三个主成分中第一主成分的贡献率为 38.022%, 特点表现为因子变量在元素 Zn、Cr、Ni 上有较高的载荷; 第二主成分的贡献率为 25.445%, 特点表现为因子变量在元素 As 上有较高的载荷, 即山区的污染主要由 Zn、Cr、Ni、As 等元素造成。

(4) 在交通区

两个主成分中第一主成分的贡献率为 46.883%，特点表现为因子变量在元素 Cu、Ni、Cr 上有较高的载荷；第二主成分的贡献率为 16.084%，特点表现为因子变量在元素 Hg、Pb 上有较高的载荷。这两个主成分的高载荷元素出现差异，即交通区的污染有至少 2 个不同的污染源。

(5) 在公园绿化区

两个主成分中第一主成分的贡献率为 48.84%，特点表现为因子变量在元素 Cd、Cr、Zn、Pb 上有较高的载荷，即交通区的污染主要由 Cd、Cr、Zn、Pb 等元素造成。

根据重金属污染的主要来源^[6] (见附录二)，我们能够发现：

工业区的污染是由该区内部工业废水、废气所造成的，工业污染会导致 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 污染的同时发生；交通区污染有不止一个污染源，其中一个污染是由燃料的燃烧导致，它导致了 Hg 等污染的发生；其他区域的污染是由工业污染、交通污染所造成的。

7.2.3 问题（2）的总结

通过对重金属污染程度的综合评价和主成分分析，我们得到的结论是：

该城区重金属污染主要是由工业区、交通区所造成的，即工业污染和交通污染。工业污染即工业废水、废气等造成的污染，它导致了重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 污染的同时发生。交通区可能有 2 个以上的污染来源，其中一类为工业区对它的污染；另一类为交通区自身产生的污染，表现形式以燃料的燃烧为主，它导致了重金属元素 Hg、Pb 等污染的发生。其他三个区域的重金属污染源于工业污染和交通污染。

7.3 问题（3）的模型建立与求解

为了定位污染源的位置，首先我们采用相关性分析，研究了金属污染物的传播特征；在传播特征的基础上，我们选用 B 样条函数插值，以求解污染值最大的点，即污染源的位置。

7.3.1 重金属污染物的传播特征分析——相关性分析模型

城市土壤重金属来源于成土母质和人类活动，同一来源的重金属之间存在着相关性，根据相关性可以判断土壤重金属污染来源是否相同。^[3]本问题中共涉及 8 种重金属元素，它们的浓度是否存在相关性，是我们探究金属污染物的传播特征首先要研究的问题。

(1) 模型的建立

设有随机变量 X 与 Y （本问题中， X 与 Y 可以表示第 j 种重金属浓度在城区内的均值 \bar{r}_j 或海拔 H_i ），记：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$
$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

则定义 $R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$ 为相关系数，利用相关系数判断相关关系的密切程度，通常认为^[5]：

相关系数的值	直线相关程度
$R = 0$	完全不相关
$0 < R \leq 0.3$	微弱相关
$0.3 < R \leq 0.5$	低度相关
$0.5 < R \leq 0.8$	显著相关
$0.8 < R \leq 1$	高度相关
$ R = 1$	完全相关

(2) 模型的求解

我们使用 SPSS. 19 软件进行相关性分析，选取的变量为观测点 8 种重金属的浓度与其海拔，相关性分析结果如表 8 所示：

表 88 种浓度、海拔之间的相关性分析结果

R	海拔(m)	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
海拔(m)	1	-.289	-.248	-.152	-.138	-.084	-.163	-.235	-.178
As	-.289	1	.255	.189	.160	.064	.317	.290	.247
Cd	-.248	.255	1	.352	.397	.265	.329	.660	.431
Cr	-.152	.189	.352	1	.532	.103	.716	.383	.424
Cu	-.138	.160	.397	.532	1	.417	.495	.520	.387
Hg	-.084	.064	.265	.103	.417	1	.103	.298	.196
Ni	-.163	.317	.329	.716	.495	.103	1	.307	.436
Pb	-.235	.290	.660	.383	.520	.298	.307	1	.494
Zn	-.178	.247	.431	.424	.387	.196	.436	.494	1

注：标有阴影表示两者显著相关。

相关性分析的结果显示：

(I) Cu 与 Cr, Pb 与 Cd, Pb 与 Cu, Ni 与 Cr 之间都表现出显著的相关关系（相关系数分别为 0.532、0.660、0.520、0.716），通过查阅文献中重金属污染物的主要来源^[7]，不难发现它们拥有一个共同的污染来源：燃料的燃烧。于是，我们推测造成这些重金属污染可能是工业燃料燃烧或是交通燃料燃烧所致。然而，更多的情况下，元素之间没有表现出很强的相关性，可以得知，污染源并非只有一个。

(II) 海拔与所有重金属浓度均呈现出负相关关系，通过文献查阅^[3]我们得知，重金属污染一般是从高海拔向低海拔传播（由于降水等因素的作用）。

通过以上分析，我们找到的重金属污染的**传播规律**为：

- (I) 各重金属元素的污染传播具有相关性，也就是具有一定的同源性。
- (II) 存在不止一个污染源，污染程度随离污染源的距离增大而减小。
- (III) 重金属污染从高海拔向低海拔传播。

7.3.2 污染源的定位——B 样条函数插值模型

在第 (1) 问中, 我们找出了综合污染度最高的一批采样点。根据重金属污染物的传播特征可以知道, 进一步寻找到浓度最高的地理位置点, 即可确认为污染源。然而, 我们仅知道离散的 319 个样本点处的数据, 为了得到更多的点, 我们考虑使用二维 B 样条函数插值^[2]的方法, 通过插值计算污染度最高的点, 即确认为污染源。

(1) 模型的建立

散乱数据的曲面拟合就是寻找一个光滑的插值基函数, 同时构建一个包含所有散乱数据点的最小矩形区域, 同时将这个矩形区域进行规则化网格划分, 拟合这些曲面控制点网格的值, 就可以用线性插值来逼近原来的所有散乱数据。

B 样条函数二维线性插值公式:

$$f(x_k, y_k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_{ij} \phi(x_k - x_i) \phi(y_k - y_j) \cdots \cdots \cdots (1)$$

对于 N 个双自变量的点集 $P = \{(x_k, y_k, z_k) | z_k = f(x_k, y_k)\}$, 来构建其平面的控制点网格矩阵。设 P 的极值量分别用 $X_{\max}, X_{\min}, Y_{\max}, Y_{\min}$ 来表示, 期望每个控制点网格中平均包含 n 个数据点, 那么可以得到横坐标和纵坐标方向上相应的网格单元数目, 也即两个方向的分辨率:

$$Size = \sqrt{\frac{(X_{\max} - X_{\min})(Y_{\max} - Y_{\min})}{n}},$$

$$X_{res} = \text{int}\left(\frac{X_{\max} - X_{\min}}{Size}\right) + 1, \quad Y_{res} = \text{int}\left(\frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{Size}\right) + 1.$$

这样就可以用 xOy 平面内的一个最小平面矩形区 $\Omega = \{(x, y) | 0 \leq x \leq X_{res}, 0 \leq y \leq Y_{res}\}$ 来描述散乱数据点集 P 在平面的投影区域。

为了逼近散乱点集, 构造一个均匀双三次 B 样条曲面, 这一个曲面由覆盖在矩形区域 Ω 上的控制顶点网格 D 来描述。根据双三次 B 样条曲面的要求, 为了消除便捷因素的影上, 分别四周扩展了两个网格单位的边界, 可设 D 为 $(X_{res} + 4)(Y_{res} + 4)$ 的控制点网格, 且所有控制顶点均落在矩形域中的整数网格上, 将每一个网格控制点的值表示为 C_{ij} , 其中 i 为行序号, j 为列序号, 且 $i = -1, 0, \dots, X_{res} + 2; j = -1, 0, \dots, Y_{res} + 2$, 因为散乱数据点集 P 都落在区域 Ω 中, 只要计算 D 上的双三次 B 样条曲面控制点网格的值, 就可以用来插值逼近数据点集 P 中的所有散乱数据。

利用最小二乘法拟合曲面, 设下面的目标函数为 C_{ij} 点对函数 f 在点 (x_k, y_k) 处的真实贡献和期望值之差的平方和, 构造如下最小平方方法目标函数:

$$Obj = \sum_{k=1}^N \left| f(x_k, y_k) - \sum_{ik} \sum_{jk} C_{ik, jk} \phi(x_k - x_{ik}) \times \phi(y_k - y_{jk}) \right|^2$$

并使这个目标函数最小, 即将其对 C_{ij} 求导并令其为零, 求拟合参数 C_{ij} (共 $(X_{res} + 4)(Y_{res} + 4)$ 个参数);

其中 $\phi(x_k - x_i), \phi(y_k - y_j), f(x_k, y_k)$ 均为已知参数, 即得到一个 $(X_{res} + 4)(Y_{res} + 4)$ 阶线性方程组。求解此线性方程组就可以得到 C_{ij} , 只要求解出 C_{ij} , 那么根据公式 (1) 就可以计算出数据点的值, 甚至可以估算出原来没有数值的点的值。这样我们使用有限的

规则控制网格点（共 $(X_{res} + 4)(Y_{res} + 4)$ 个网格）的 C_{ij} 数据储存就代表了原有许多散乱数据点，达到散乱数据曲面拟合和压缩的目的。

(2) 模型的求解

在问题（2）中，我们对采样点综合污染进行排序，发现污染的高值集中于两个区域，这两个区域的代表性采集点分别为 8 号采样点和 257 号采集点，其具体信息见表 9

表 9 代表性采集点的详细信息

编号	城区类型	$x(m)$	$y(m)$	海拔(m)	综合污染值
8	工业区	2383	3692	7	28.89179
257	交通区	15248	9106	16	11.55739

进一步分析这两个区域，可以发现 8 号采集点周围是一个工业区，257 号采集点周围密布着交通区。

结合金属污染物的传播特征，我们可以判断，在这两个区域周围分别存在一个污染源，我们使用 MATLAB (2008a) 求解这一模型，得到了一大一小两个污染源的定位信息及其综合污染值。

污染源的最终定位结果是：

	所在区域类型	$x(m)$	$y(m)$	综合污染值	主要污染元素
污染源（I）	工业区	2220	3400	36.5257	全部 8 种元素
污染源（II）	交通区	15220	9170	11.8117	Hg 、Pb

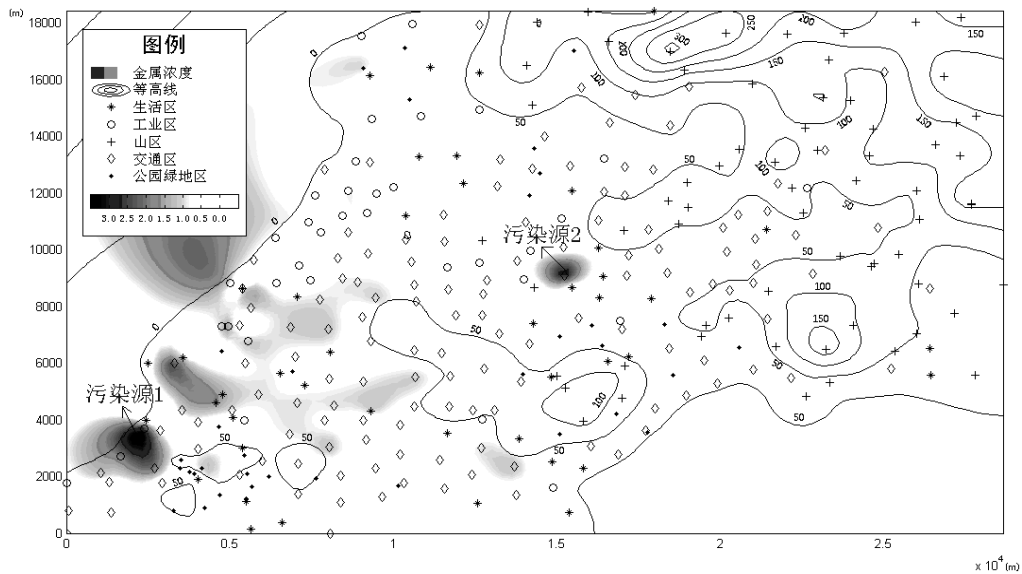


图 11 污染源示意图

考虑到样本容量过小，求得的位置一般会与污染源的真正位置有一定的偏差，因此，我们认为污染源应分别存在于以上述两点为圆心，以一定的距离为半径（经检验，合适的距离在 100m 左右）的圆之中，且更可能出现于相对海拔较高的位置。

8.模型的评价与改进

8.1 模型的优缺点

优点:

(1) 构建了动态加权模型, 克服了不同污染物量纲不一致等问题, 同时, 对地质积累指数动态加权, 克服了地质积累指数不能直接相加的难题, 从而能够将污染物统一进行考虑与处理。

(2) 在数据处理过程中所构建的相关性分析模型、主成分分析模型具有很强的可推广性, 可普遍用于海量数据的一般处理。

(3) 选取简便易操作的 B 样条函数插值方法, 插值结果合理、有效。

缺点:

(1) 动态加权处理过程中, 虽然此方法能够使数据单调性保持一致, 但是数据的分布特征会发生改变。

(2) 在插值方法的选择中, 没有选取各种不同的插值方法进行比较, 从而不能保证 B 样条函数插值是一个最优的选择。

8.2 信息的收集与模型建立展望

为了更好地研究城市地质环境的演变过程, 还应收集的信息包括:

- (1) 与时间相关的跟踪数据。
- (2) 当地土壤类型。
- (3) 当地土壤的使用年限。
- (4) 当地降雨量。

.....

运用与时间相关的跟踪数据, 可以建立基于溶质运移理论^[8]的“对流—弥散”方程^[8], 其基本形式如下:

$$\frac{\partial(\partial C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D(\theta, v)_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(q_i C)}{\partial x_i} \quad (i, j = 1, 2, 3 \text{ 或 } x, y, z)$$

其中, C 为浓度, v 为含水孔隙中水的平均流速, θ 为土壤的有效孔隙度。

最常见的一维溶质运移方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}$$

其中, D 为溶质的有效扩散系数。

另外, 根据当地土壤的使用年限、当地降雨量等数据可以构建回归分析方程^[1] (线性回归或非线性回归, 此处以线性回归为例):

$$\begin{cases} y = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_m x_m + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \end{cases}$$

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m, \sigma^2$ 都是与 x_1, x_2, \cdots, x_m 无关的未知参数, 其中 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m$ 成为回归系数。

9. 模型的检验

B 样条函数插值模型所求出的两个污染源的综合评价值分别为 36.5257 和 11.8117,

分别高于插值前对应区域采样点的综合评价最大值（分别为 28.89179 和 11.55739），说明我们的模型成功地搜索到了相应插值区域中的一个局部的污染值高点（但是并不能保证是局部最高值点）。

选取远离两个污染源 100m 之外的若干个点，计算它们的综合污染评价值，发现它们全部低于污染源综合评价值的 90%，也就是说，我们可以确信的认为，真实污染源不可能与所求得的污染源相距超过 100m。

10. 模型的推广

本论文中所建立的相关性分析模型、主成分分析模型，可普遍适用于海量数据的一般处理，如在金融领域中，如何对企业生产力、企业规模、员工受教育程度之间的关系进行评价等问题。本论文中构建的 B 样条函数插值模型，也适用于散乱数据曲面插值的一般性问题。

11. 对策与建议

本文通过对已知数据资料进行重金属污染评估数学模型的建立，研究重金属在青岛市土壤中的空间分布、污染原因、传播特征，并确定了污染源的位置。结果表明，青岛市不同功能区土壤重金属的污染程度不同，说明不同土地利用方式对城市土壤质量的影响程度不同。

城市土壤是城市环境重金属污染的“印记”，能够在一定程度上反映环境中重金属污染程度。土壤是相对不可再生的自然资源，也是不可替代的自然资源，是人类赖以生产、生活和生存的物质基础。随着我国城市化和工业化进程的加快，一方面促进了人口、产业向城市集聚，提高人们的生活水平，推动社会经济发展，但另一方面也导致城市人口持续增长，生产和消费高度集中，自然资源消耗增加，污染物排放也随之倍增，环境污染问题日益严重。而土壤污染会在一定程度上影响动物、农作物的生长发育，破坏生态环境的质量和生态平衡，同时还可以通过食物链等方式进入人体，从而严重危害人体健康。

通过本文的研究发现，青岛市的土壤重金属污染已比较严重，所以土壤重金属污染应引起相关部门的重视，采取有效措施加以防范和治理。

10.1 完善相关法规，引入责任追究机制

随着城市化、工业化进程的加快、重金属污染的形式非常严峻，不管西部还是东部，都变成了重金属污染的重灾区。相对于大气、水资源、海洋污染国家都出台了相关法律，但关于重金属污染的防治，至今没有一部法律。而且人们对重金属污染的隐蔽性、滞后性认识不充分。建议对重金属污染防治进行国家立法，依靠法律建立机制，齐抓共管下功夫，摸清底数，控制增量，消化存量，对重金属无它实现标本皆治的目标。建立机制方面，比如摸底排查制度、防治和补救制度、防治保障机制以及相应的土壤重金属预警制度等。同时，建立惩罚性赔偿机制，降低赔偿的实施条件，提高惩罚性赔偿的数额，同时将重金属污染防治成效纳入经济社会发展综合评价体系，作为官员综合考核评价和企业责任人业绩考核的重要内容。

10.2 完善的重金属污染监测机制，减少或切断重金属污染源

对于工业区，对污染严重、使用有毒有害物质进行生产或生产中排放有毒有害物质的企业，应强制实施清洁生产审核；对高耗能、高排放产业实行禁（限）批，对增加值

低、能耗高、排放大的产业分期分批实施行业退出；特别应抓好化工、电镀、制药、制革等重污染行业的治理；严格控制生产过程中有毒元素的排放及泄漏，废弃物的排放、堆放采取物理化学措施处理，减少对环境的污染；禁止废渣任意堆放，防止废渣中的重金属物质下渗至土壤；时刻重视污染监控，加强对重金属排放的工业控制，推进工业净化装置在工业区的配置进程；完善相关法律法规形成强制防污治污手段。

对于农业区，禁止或限制使用剧毒或高残留农药。积极发展高效、低毒、低残留农药和生物性农药，制定农药安全使用规程，研究和规定农药在农畜产品中的最大允许含量。

对于交通区，应加大新兴科学技术的投入力度，注重对环保型车辆使用的推广，大力推广无铅汽油及天然气等清洁能源，鼓励使用汽车尾气净化装置，减少汽车污染尾气排放。

对于生活区，要进行居民生活环保引导，实行垃圾分类、电子产品分类处理，车辆限行及绕行，加大环境监测力度。

对于土壤灌溉区，利用污水灌溉时，要严格掌握水质标准，建立土壤环境容量，严格控制污灌次数和面积，加强污灌区土壤和农产品的监测工作，防止因盲目灌溉而导致土壤污染。

10.3 加强污染土壤管理，减轻对人体的危害

城市人口高度密集，土壤污染可以通过扬尘和土壤直接接触而对人体产生危害。因此，必须加强对污染土壤的管理，通过土壤重金属污染的检测与评价，进行城市重金属污染土壤的核准登记，提出污染控制与治理修复方案。对于大面积的城市重金属污染土壤，加以植物覆盖，增加绿地面积，减少其暴露面积，防止地下水污染。

此外，应结合人体健康评估和土地利用方式，尽快制定城市土壤重金属健康评价标准，不同的土地利用方式，对环境的要求不同，在进行城市建设时应进行相应的重金属污染评价，在不同的土壤上进行不同的功能区建设，避免人群与重金属污染的土壤发生接触。

10.4 建立公众监督机制，加强宣传力度

加大环保举报热线“12369”的宣传力度，及时受理群众举报，并迅速核实、处理。事件的查处情况应按规定及时向社会公布。加大新闻宣传和舆论监督力度，组织编写、发放重金属污染防治科普宣传品，通过电视、报纸等途径广泛开展重金属健康危害预防、控制的宣传工作。

当今世界，城市化已经成为人类社会发展的必然趋势，随着经济的发展和城市人口的增加，土壤重金属的污染程度也会不断加重，土壤重金属污染状况不容乐观。经济和社会的发展是一把双刃剑，给我们带来机遇的同时，也面临着巨大的挑战。为了城市居民身心健康的生活，让社会的发展给人们带来实实在在的好处，对污染问题的治理显得更为重要和迫切。在现有基础上选择合适的土壤重金属污染处理对策只是一种权宜之计，最根本的还是要做好源头预防工作。“往者不可谏，来者犹可追”，土壤重金属污染的治理任重道远，我们要认清现阶段城市化背景下人类活动强度和土壤演变状况，加大宣传力度，唤起人们对土壤重金属污染的关注，提高公众的环境保护意识，减少重金属污染物的排放总量，创建一个良好的城市生活环境，让城市能够健康持续地发展。

12.参考文献

- [1]谭永基, 蔡志杰, 数学模型, 上海: 复旦大学出版社, 2005.
- [2]李波涛等, 基于 B 样条函数的散乱数据曲面拟合与数据压缩, 地球物理学进展, 第 24 卷 (3): 936—943, 2009.
- [3]骆永明等, 香港地区土壤及其环境, 北京: 科学出版社, 2007.
- [4]韩中庚, 数学建模方法及其应用 (第二版), 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [5]余锦华等, 多元统计分析与应用, 广州: 中山大学出版社, 2005.
- [6]百度百科, 重金属污染, <http://baike.baidu.com/view/282970.htm>, 2011.9.10
- [7]段雪梅等, 南京市表层土壤重金属污染特征级污染来源, 环境科学管理, 第 35 卷(10): 33—34, 2010.
- [8]王红旗等, 土壤环境学, 北京: 高等教育出版社, 2007.

13.数据包、程序代码

附录一：综合污染评价降序排序一览表

编号	功能区	$x(m)$	$y(m)$	海拔(m)	综合评价
8	2	2383	3692	7	28.89179
22	4	3299	6018	4	24.09639
9	4	2708	2295	22	20.10373
6	2	1647	2728	6	19.40845
20	1	4592	4603	6	16.63274
30	2	4948	7293	6	16.50491
16	1	4777	4897	8	14.92585
5	4	1049	2127	12	12.28597
163	4	8045	3052	39	12.01703
182	4	13694	2357	33	11.96543
143	5	4153	2299	73	11.75879
257	4	15248	9106	16	11.55739
40	4	8017	7210	39	11.52107
31	2	5567	6782	7	11.20741
29	2	4742	7293	9	10.95783
41	4	6869	7286	18	10.87387
45	4	9460	8311	45	10.79914
49	4	10685	5528	34	10.71853
36	1	9328	4311	24	10.55434
26	4	5635	7965	29	10.42598
14	4	3526	4357	7	10.34003
221	3	5006	8846	6	10.13442
178	2	12696	3024	27	9.695083
35	4	8180	4496	15	9.693868
17	4	5868	4904	16	9.670658
310	5	9095	16414	29	9.648949
34	4	7048	4600	24	9.59924
23	1	3573	6213	5	9.498649
43	4	7747	8260	49	9.45768
240	2	8904	8868	24	9.112315
15	4	5062	4339	5	9.10553
161	4	6837	3490	28	8.888428
253	4	14173	11941	14	8.841414
232	2	8629	12086	1	8.737512
44	4	8457	8991	21	8.634411
61	4	13797	9621	18	8.578768
37	4	9090	5365	20	8.459116
42	1	7056	8348	37	8.344238
174	4	11557	1581	7	7.532697
224	2	7405	10981	6	7.493078

225	2	8446	11200	4	7.428275
154	2	5382	3012	50	7.370088
234	2	8622	10638	4	7.194621
231	2	9212	11305	5	7.173975
19	4	5481	6004	0	7.11278
39	1	8077	6401	29	7.072222
18	1	6534	5641	6	7.032995
223	4	6395	10443	4	6.914455
162	4	7906	3978	22	6.78494
222	2	5734	9659	3	6.743943
33	1	7304	5230	10	6.66965
54	4	10700	8184	50	6.543977
145	5	4684	1364	37	6.436672
150	5	4020	2990	27	6.261255
38	4	8049	5439	18	6.22102
151	4	4026	3913	13	6.003496
84	4	18134	10046	41	5.871422
274	1	10856	14727	41	5.722715
32	4	7004	6226	11	5.638154
152	4	5101	4080	13	5.573013
244	1	11529	11243	16	5.548565
56	4	11678	8618	17	5.538156
246	4	11646	9381	14	5.428846
239	2	7458	8920	36	5.42867
309	5	10352	17133	31	5.253559
135	3	22193	12185	79	5.225562
275	2	12644	14943	43	5.208905
93	3	22304	10527	40	5.202133
236	4	8307	9726	14	5.046221
153	1	5438	3994	10	5.024928
273	1	11121	16432	23	4.881368
179	4	12400	2060	13	4.849724
269	1	10800	13282	9	4.847191
99	4	20215	9951	31	4.587002
12	1	4043	1895	14	4.584091
27	4	5394	8631	12	4.581964
7	4	2883	3617	15	4.554649
157	1	5636	133	17	4.531591
3	4	1321	1791	28	4.474035
4	2	0	1787	4	4.401993
144	5	3267	793	0	4.339615
235	4	9237	9872	28	4.293943
165	4	8403	1075	6	4.261519

228	4	8866	13143	3	4.221602
252	3	12727	7691	32	4.161077
52	4	11730	5532	54	3.940519
266	4	13175	12238	31	3.92642
50	4	10643	4472	45	3.900212
90	4	21091	9482	43	3.886056
58	4	13244	7056	37	3.831262
181	1	13765	1353	15	3.737061
272	2	9277	16148	18	3.681475
139	3	3518	2571	59	3.637476
226	2	7612	11938	2	3.617361
170	4	9095	3975	26	3.583657
261	4	16440	12068	47	3.504758
66	4	13920	5354	79	3.483097
191	5	16872	2798	10	3.361799
21	1	2486	5999	2	3.33283
47	4	9319	6799	49	3.267722
227	2	7912	12840	1	3.197783
247	2	12641	9560	11	3.173527
271	2	9333	14631	4	3.142081
280	4	14405	18032	152	3.111235
65	4	13093	4339	56	3.097173
46	4	9062	7639	45	3.073525
95	1	21439	11383	45	3.056909
53	4	11482	6354	61	3.03716
142	5	3927	2110	27	3.004358
166	4	8079	0	16	2.914478
180	4	12591	1063	18	2.873749
24	5	4741	6434	5	2.833423
1	4	74	781	5	2.796679
141	5	3762	2170	30	2.747444
243	4	10395	11203	8	2.701467
238	2	6423	8831	40	2.608416
230	4	9475	12000	9	2.590786
217	4	23359	5325	28	2.583039
219	3	22624	4818	27	2.570927
177	1	12734	4015	43	2.553011
79	4	17962	12823	25	2.535708
28	4	5291	7349	10	2.517322
175	4	11415	2585	12	2.496934
176	4	11649	3515	27	2.486243
255	1	15140	11101	30	2.472339
109	3	25361	6423	49	2.40397

279	2	12632	17949	33	2.401998
313	5	10142	1662	8	2.369554
241	4	10547	9591	32	2.348697
11	5	4233	895	6	2.316491
183	4	13855	3345	79	2.311178
164	4	8394	2035	27	2.23776
13	1	2427	3971	2	2.068189
69	5	16387	6609	44	2.051544
55	4	10630	8774	29	2.036024
192	4	17734	3629	14	2.016003
242	4	10398	10360	0	1.991264
129	3	22965	13535	78	1.979807
57	4	11902	7709	30	1.970117
264	4	14269	12877	27	1.906819
167	4	9663	1288	3	1.902717
128	3	24153	12450	71	1.90045
270	1	10022	12204	5	1.897668
98	4	21072	10404	32	1.88771
82	3	18738	10921	53	1.720526
138	3	15007	5535	70	1.700978
67	1	14844	5519	62	1.658732
278	2	10599	17980	11	1.593585
173	4	10340	1764	7	1.539504
233	2	7776	10613	9	1.539448
71	4	15658	7594	24	1.523815
75	4	12778	5799	93	1.512662
286	4	20591	13549	42	1.496703
60	4	12855	8945	18	1.48318
10	4	2933	1767	7	1.473361
147	5	5664	1653	13	1.468321
159	1	7093	1381	45	1.442157
51	4	11702	4480	71	1.415912
59	4	12746	8450	21	1.410874
208	3	21450	7555	58	1.336575
308	1	14318	13569	30	1.280458
140	5	3469	2308	52	1.275683
263	2	15412	12982	21	1.240118
249	2	14207	9980	14	1.236598
85	4	17198	9810	37	1.222237
200	1	18303	7385	39	1.218561
73	4	14177	6684	35	1.186683
160	4	7100	2449	89	1.185183
110	3	24065	7353	104	1.181374

319	5	7653	1952	48	1.171471
86	4	17144	9081	20	1.156937
258	4	16428	9069	20	1.141731
120	3	26015	12078	57	1.131933
103	4	22674	12173	52	1.119141
130	3	23198	13523	62	1.059515
293	3	15748	15728	56	1.050484
64	4	12442	4329	65	1.047662
267	4	12153	12336	16	0.958002
215	4	21018	5764	9	0.950108
77	4	17087	11933	43	0.949986
311	5	10510	15314	19	0.932571
216	4	22176	5492	25	0.919899
315	5	6924	5696	7	0.915274
250	2	14065	10987	25	0.910858
195	3	17203	6218	40	0.89717
96	4	20554	11228	43	0.892781
196	1	17005	7212	33	0.823884
63	1	15467	8658	17	0.820604
189	4	15801	3966	115	0.81366
104	2	22535	11293	54	0.807416
307	3	14482	12692	20	0.795623
148	5	5541	2093	26	0.787242
107	1	26416	6508	14	0.763173
283	3	14624	14004	25	0.732012
276	2	12625	16259	66	0.728075
2	4	1373	731	11	0.71785
294	4	15517	17034	77	0.71666
237	4	7106	9467	44	0.705718
100	4	18993	12371	78	0.700944
72	1	14298	7418	36	0.697799
291	4	18467	17001	308	0.676157
155	1	5314	2060	40	0.67214
168	4	9469	2286	15	0.667124
68	1	16569	6055	78	0.662755
285	4	18470	14411	59	0.652851
281	3	14074	16516	124	0.65017
306	3	17981	18449	93	0.627912
185	1	14896	1603	4	0.582184
289	3	19041	15769	90	0.532849
277	1	9036	17538	3	0.518048
287	3	20983	15862	93	0.499805
218	3	23238	6502	169	0.483257

299	3	22046	17634	171	0.480459
318	5	5985	2567	44	0.426589
101	3	19968	12961	42	0.394815
256	2	15198	10100	28	0.37824
206	4	20282	8590	57	0.374011
92	4	23664	9790	46	0.328886
284	4	16629	14481	41	0.322967
203	5	18954	4874	4	0.318836
171	4	10225	3821	19	0.313473
251	4	12734	10344	32	0.310285
304	3	23325	16701	105	0.29379
292	3	17414	15476	97	0.293763
265	4	13277	13204	19	0.28875
193	4	16823	4207	67	0.280931
80	3	18413	11721	88	0.276694
169	4	9178	3299	42	0.25761
198	2	16301	8299	24	0.233527
184	1	14862	2524	28	0.231659
48	4	10631	6472	57	0.229588
245	4	11563	10298	12	0.222404
62	3	14325	8666	23	0.21964
305	4	26852	16114	225	0.218707
88	4	19767	8810	46	0.201788
297	3	22605	14301	93	0.153374
146	5	5495	1205	9	0.14574
149	5	5451	2757	92	0.126208
205	4	19072	8519	36	0.126208
220	3	21703	6591	65	0.113662
123	3	27346	13331	100	0.112461
156	4	5503	1127	6	0.110424
214	5	19909	5300	3	0.10076
125	3	27823	14737	189	0.095155
268	1	11958	13313	13	0.079052
316	5	4678	3765	40	0.079052
296	5	15952	18397	103	0.077189
83	4	17814	10707	64	0.057919
108	1	27816	5581	11	0.052537
199	1	17904	8287	25	0.047265
314	5	17765	3561	8	0.044361
114	4	26073	8807	38	0.033487
81	3	19007	11488	84	0.029391
209	4	20261	7586	29	0.028261
262	4	16440	13232	24	0.021586

312	5	13954	5615	61	0.020459
122	3	27696	11621	169	0.01793
197	4	16947	7487	41	0.014799
260	1	16267	11058	60	0.014324
102	3	21766	12348	67	0.01325
91	4	22846	9149	69	0.011453
105	3	25221	5795	27	0.010866
187	1	15810	2307	8	0.006493
89	4	21006	8819	55	0.005835
248	2	14000	8970	14	0.00422
204	4	18012	4414	20	0.003579
118	3	24813	10799	46	0.00264
188	1	16032	3061	35	0.002405
74	5	15092	6936	32	0.002258
194	5	17008	4775	82	0.001413
112	3	27177	7771	17	0.001166
127	3	24580	13319	107	0.001098
158	1	6605	374	6	0.000873
259	1	16289	10072	43	0.000645
202	4	18556	5588	15	0.000591
70	5	16061	7352	28	0.000278
113	3	26424	8639	8	0.000145
301	3	25981	18051	173	3.24E-05
254	5	15467	12080	23	1.27E-06
282	3	14262	15129	66	2.81E-07
25	1	5375	8643	15	0
76	3	17044	10691	93	0
78	4	17075	12924	25	0
94	4	21418	10721	35	0
97	4	20101	10774	40	0
106	4	26453	5577	11	0
111	3	25998	7032	51	0
115	3	24631	9422	76	0
116	3	24702	9522	62	0
117	3	25461	9834	68	0
119	4	26086	11094	53	0
121	3	27700	11609	165	0
124	3	26591	13715	126	0
126	3	27232	14482	150	0
131	4	24685	14278	98	0
132	3	28654	8755	23	0
133	3	24003	15286	90	0
134	3	21684	13101	114	0

136	3	17079	5894	81	0
137	3	15255	5110	110	0
172	4	10210	2789	19	0
186	2	15387	729	8	0
190	3	15087	3512	69	0
201	5	18438	6539	22	0
207	4	21475	8540	85	0
210	3	19569	7348	70	0
211	3	19411	6934	28	0
212	3	19501	6091	9	0
213	4	20582	6548	13	0
229	2	9296	13102	9	0
288	3	20177	17642	276	0
295	4	16607	17365	155	0
298	3	23146	15382	153	0
300	3	23785	17643	194	0
302	3	27380	18202	136	0
303	3	25021	16290	104	0
317	5	6182	2005	25	0

附录二：取样点位置及其所属功能区以及主要重金属浓度一览表

编号	编号	x(m)	y(m)	海拔(m)	功能区	As (μg/g)	Cd (ng/g)	Cr (μg/g)	Cu (μg/g)	Hg (ng/g)	Ni (μg/g)	Pb (μg/g)	Zn (μg/g)
1	1	74	781	5	4	7.84	153.80	44.31	20.56	266.00	18.20	35.38	72.35
2	2	1373	731	11	4	5.93	146.20	45.05	22.51	86.00	17.20	36.18	94.59
3	3	1321	1791	28	4	4.90	439.20	29.07	64.56	109.00	10.60	74.32	218.37
4	4	0	1787	4	2	6.56	223.90	40.08	25.17	950.00	15.40	32.28	117.35
5	5	1049	2127	12	4	6.35	525.20	59.35	117.53	800.00	20.20	169.96	726.02
6	6	1647	2728	6	2	14.08	1092.90	67.96	308.61	1040.00	28.20	434.80	966.73
7	7	2883	3617	15	4	8.94	269.80	95.83	44.81	121.00	17.80	62.91	166.73
8	8	2383	3692	7	2	9.62	1066.20	285.58	2528.48	13500.00	41.70	381.64	1417.86
9	9	2708	2295	22	4	7.41	1123.90	88.17	151.64	16000.00	25.80	172.36	926.84
10	10	2933	1767	7	4	8.72	267.10	65.56	29.65	63.00	21.70	36.94	100.41
11	11	4233	895	6	5	5.93	201.40	45.19	24.90	259.00	14.60	35.88	102.65
12	12	4043	1895	14	1	9.17	287.00	43.94	45.77	168.00	19.70	62.74	223.16
13	13	2427	3971	2	1	5.72	193.70	80.35	26.57	111.00	19.80	57.64	89.08
14	14	3526	4357	7	4	4.49	359.50	258.15	123.27	77.00	12.90	106.47	853.98
15	15	5062	4339	5	4	5.51	516.40	91.97	89.04	189.00	19.80	121.72	494.80
16	16	4777	4897	8	1	11.45	1044.50	94.78	136.97	202.00	22.30	472.48	602.04
17	17	5868	4904	16	4	6.14	445.40	82.69	167.39	144.00	18.40	111.24	389.80
18	18	6534	5641	6	1	7.84	347.90	57.65	97.14	213.00	19.60	70.82	307.24

19	19	5481	6004	0	4	7.41	345.70	159.45	71.03	85.00	18.10	89.34	380.92
20	20	4592	4603	6	1	8.50	614.00	744.46	130.55	156.00	32.80	228.64	1013.47
21	21	2486	5999	2	1	5.51	257.20	54.64	29.01	104.00	13.20	87.68	223.27
22	22	3299	6018	4	4	9.84	1213.50	920.84	1364.85	115.00	142.50	181.48	1818.47
23	23	3573	6213	5	1	9.39	325.80	172.29	104.89	82.00	31.50	90.90	429.29
24	24	4741	6434	5	5	3.30	212.10	50.13	38.62	139.00	10.60	66.98	186.22
25	25	5375	8643	15	1	4.09	90.50	35.02	11.82	16.00	10.40	29.09	46.84
26	26	5635	7965	29	4	6.14	583.40	95.25	233.70	155.00	21.10	97.47	311.02
27	27	5394	8631	12	4	5.31	366.40	42.34	64.65	188.00	17.40	67.11	182.65
28	28	5291	7349	10	4	3.69	323.90	35.14	34.66	50.00	13.90	65.48	253.16
29	29	4742	7293	9	2	21.87	424.50	73.40	59.72	1520.00	27.80	83.70	175.71
30	30	4948	7293	6	2	18.38	630.00	96.68	114.81	645.00	34.80	130.36	1626.02
31	31	5567	6782	7	2	10.53	635.30	64.03	101.35	190.00	28.30	162.64	615.10
32	32	7004	6226	11	4	3.50	463.40	112.19	72.93	118.00	14.10	60.60	193.37
33	33	7304	5230	10	1	6.35	532.00	57.51	83.76	191.00	19.50	73.46	297.14
34	34	7048	4600	24	4	5.51	778.70	74.66	92.48	330.00	19.70	110.20	351.63
35	35	8180	4496	15	4	4.49	754.80	99.88	97.92	243.00	24.90	100.79	323.37
36	36	9328	4311	24	1	3.50	396.30	138.37	58.97	170.00	24.20	91.76	2893.47
37	37	9090	5365	20	4	5.51	687.80	85.52	72.85	201.00	19.00	103.20	403.27
38	38	8049	5439	18	4	4.29	526.00	55.31	81.43	93.00	19.90	100.65	369.80
39	39	8077	6401	29	1	4.29	449.10	67.22	51.64	315.00	15.70	106.97	294.69
40	40	8017	7210	39	4	6.56	852.70	72.59	158.67	311.00	21.20	124.24	377.14
41	41	6869	7286	18	4	16.58	459.00	94.79	47.17	1900.00	19.90	71.32	215.10
42	42	7056	8348	37	1	7.41	337.30	77.27	248.85	90.00	20.10	99.58	210.00
43	43	7747	8260	49	4	5.93	568.10	75.14	118.16	135.00	23.80	111.54	572.96
44	44	8457	8991	21	4	4.69	599.00	69.05	122.18	121.00	19.80	102.72	427.04
45	45	9460	8311	45	4	4.90	635.50	68.42	227.76	176.00	19.50	96.33	538.98
46	46	9062	7639	45	4	5.31	600.70	44.65	45.10	51.00	15.50	65.87	186.33
47	47	9319	6799	49	4	4.29	567.60	60.25	48.67	46.00	16.10	63.74	208.06
48	48	10631	6472	57	4	5.51	228.50	49.27	30.85	62.00	22.90	45.93	102.04
49	49	10685	5528	34	4	4.69	568.60	306.02	70.41	900.00	16.80	79.67	196.73
50	50	10643	4472	45	4	7.20	214.70	50.33	40.16	156.00	20.80	47.76	403.98
51	51	11702	4480	71	4	5.31	151.90	47.24	24.44	140.00	17.30	37.49	92.55
52	52	11730	5532	54	4	4.90	343.30	42.01	58.81	80.00	13.80	79.07	275.82
53	53	11482	6354	61	4	4.90	293.90	60.29	51.03	53.00	12.60	75.93	278.37
54	54	10700	8184	50	4	3.89	312.90	33.79	277.82	55.00	14.00	68.24	295.61
55	55	10630	8774	29	4	3.69	315.90	45.43	34.05	55.00	12.60	62.84	196.33
56	56	11678	8618	17	4	3.11	416.30	57.88	47.64	167.00	11.90	116.19	242.04
57	57	11902	7709	30	4	3.89	374.00	45.17	50.19	35.00	15.00	58.11	157.35
58	58	13244	7056	37	4	3.89	344.30	35.29	47.87	100.00	15.10	133.72	141.02
59	59	12746	8450	21	4	2.91	252.90	45.98	71.54	32.14	14.40	42.99	146.22
60	60	12855	8945	18	4	3.30	503.40	38.74	30.46	36.43	7.20	53.73	102.86
61	61	13797	9621	18	4	4.90	303.80	56.02	65.86	63.21	40.05	90.69	3760.82

62	62	14325	8666	23	3	4.09	127.00	27.58	23.99	30.00	11.93	57.47	85.61
63	63	15467	8658	17	1	2.91	265.00	35.66	29.39	24.64	9.23	60.54	122.96
64	64	12442	4329	65	4	2.72	278.90	43.43	32.61	64.29	9.90	53.40	135.71
65	65	13093	4339	56	4	3.11	751.20	53.11	53.80	27.86	10.46	60.27	155.00
66	66	13920	5354	79	4	3.30	361.30	47.54	52.28	25.71	9.11	113.46	218.27
67	67	14844	5519	62	1	3.30	488.00	51.18	34.55	37.50	10.80	54.62	125.92
68	68	16569	6055	78	1	6.14	227.00	42.15	67.04	49.29	16.31	34.28	82.96
69	69	16387	6609	44	5	3.69	347.40	37.76	19.97	26.79	10.01	54.41	221.22
70	70	16061	7352	28	5	4.49	136.00	36.56	23.07	21.43	14.96	34.19	78.98
71	71	15658	7594	24	4	3.11	327.10	25.98	23.73	25.71	9.79	63.81	138.06
72	72	14298	7418	36	1	8.06	113.10	52.40	20.81	65.36	19.69	29.56	62.24
73	73	14177	6684	35	4	3.69	270.50	33.12	57.85	25.71	13.50	62.04	118.16
74	74	15092	6936	32	5	3.69	160.30	38.29	26.08	25.71	14.29	40.13	82.86
75	75	12778	5799	93	4	3.50	305.50	39.50	30.86	31.07	14.74	61.89	148.88
76	76	17044	10691	93	3	2.72	70.90	19.45	9.12	15.00	7.09	22.73	32.86
77	77	17087	11933	43	4	8.50	261.30	45.97	24.83	51.43	18.00	43.39	84.49
78	78	17075	12924	25	4	1.77	119.80	15.32	13.34	8.57	6.19	26.31	47.76
79	79	17962	12823	25	4	2.53	468.80	37.04	32.03	45.00	12.15	65.25	178.98
80	80	18413	11721	88	3	3.69	150.70	59.61	19.00	34.29	24.98	38.47	89.08
81	81	19007	11488	84	3	6.14	100.30	37.49	20.23	34.29	14.85	29.29	61.94
82	82	18738	10921	53	3	10.99	109.80	56.07	69.06	58.93	20.70	38.87	63.27
83	83	17814	10707	64	4	6.35	91.80	36.12	16.91	36.43	12.49	27.01	47.76
84	84	18134	10046	41	4	30.13	743.90	49.03	26.18	27.86	17.66	72.76	182.04
85	85	17198	9810	37	4	3.89	416.80	37.04	23.78	22.50	11.48	54.45	105.00
86	86	17144	9081	20	4	2.91	369.80	36.34	52.48	22.50	7.99	42.02	84.08
87	87	18393	9183	26	4	1.96	194.00	18.08	16.17	26.79	6.98	40.27	94.69
88	88	19767	8810	46	4	6.98	50.10	41.02	14.25	17.14	13.39	26.57	40.92
89	89	21006	8819	55	4	2.91	198.80	28.21	19.24	13.93	9.56	47.81	94.80
90	90	21091	9482	43	4	5.93	886.60	42.69	28.12	43.93	21.15	94.64	163.27
91	91	22846	9149	69	4	5.93	128.90	47.52	16.31	12.86	17.66	33.51	91.73
92	92	23664	9790	46	3	7.41	114.30	48.34	21.45	35.36	16.54	35.83	63.88
93	93	22304	10527	40	4	4.29	232.90	29.17	40.02	1714.29	9.79	38.65	95.41
94	94	21418	10721	35	1	4.69	132.80	36.11	17.28	20.36	15.53	37.03	82.76
95	95	21439	11383	45	4	5.72	1619.80	43.48	15.50	20.36	15.41	30.99	57.55
96	96	20554	11228	43	4	6.77	282.50	41.97	52.80	27.86	18.34	49.10	104.90
97	97	20101	10774	40	4	4.49	180.60	37.23	18.70	27.86	11.93	36.45	63.98
98	98	21072	10404	32	4	3.11	386.60	35.93	26.38	24.64	12.26	60.00	157.24
99	99	20215	9951	31	4	2.91	345.00	40.46	152.21	23.57	15.53	58.05	170.71
100	100	18993	12371	78	3	4.29	95.60	22.49	17.15	85.71	10.13	27.97	67.24
101	101	19968	12961	42	3	7.63	87.10	45.83	14.83	30.00	14.63	29.25	48.78
102	102	21766	12348	67	4	5.93	203.00	35.97	16.88	15.00	14.51	45.83	89.49
103	103	22674	12173	52	2	2.34	353.00	24.53	12.70	11.79	9.00	58.80	89.08
104	104	22535	11293	54	3	2.91	233.20	24.92	21.62	85.71	8.33	45.20	100.10

105	105	25221	5795	27	4	5.72	174.30	33.83	29.45	20.36	13.05	42.10	71.43
106	106	26453	5577	11	1	2.34	87.60	18.46	9.73	13.93	8.89	24.43	43.37
107	107	26416	6508	14	1	6.56	245.60	36.73	61.30	55.71	14.18	47.24	114.29
108	108	27816	5581	11	3	4.69	167.90	33.15	18.96	60.00	15.98	33.46	55.71
109	109	25361	6423	49	3	6.35	111.40	28.82	59.17	206.79	11.70	28.02	61.53
110	110	24065	7353	104	3	5.10	94.60	77.92	20.34	23.57	28.69	25.92	58.47
111	111	25998	7032	51	3	4.69	111.60	24.57	12.09	31.07	8.55	27.12	43.88
112	112	27177	7771	17	3	3.50	85.50	26.33	24.88	36.43	11.36	26.77	64.08
113	113	26424	8639	8	4	4.69	169.50	39.11	22.51	25.71	15.98	39.53	82.96
114	114	26073	8807	38	3	4.49	138.00	34.52	35.54	50.36	12.60	25.45	52.45
115	115	24631	9422	76	3	3.30	131.40	35.97	11.29	43.93	11.03	30.06	61.94
116	116	24702	9522	62	3	2.91	41.00	41.77	12.50	17.14	17.10	19.68	78.37
117	117	25461	9834	68	3	4.09	129.70	26.83	10.12	40.71	7.76	28.84	68.16
118	118	24813	10799	46	4	5.72	148.00	36.73	14.21	52.50	12.60	27.15	57.86
119	119	26086	11094	53	3	4.90	108.10	22.72	9.40	35.36	8.89	32.39	69.39
120	120	26015	12078	57	3	4.90	132.50	79.52	18.67	42.86	27.68	28.30	92.24
121	121	27700	11609	165	3	4.09	162.90	33.79	12.96	30.00	12.94	29.17	74.90
122	122	27696	11621	169	3	5.93	88.80	52.41	15.30	10.71	19.91	28.62	63.88
123	123	27346	13331	100	3	2.91	206.70	17.46	12.02	31.07	5.51	53.79	79.18
124	124	26591	13715	126	3	2.72	121.80	19.98	7.71	24.64	8.10	27.30	57.96
125	125	27823	14737	189	3	2.34	231.10	36.48	12.80	37.50	17.66	29.02	96.53
126	126	27232	14482	150	3	2.53	128.60	21.75	9.10	30.00	9.56	22.77	58.06
127	127	24580	13319	107	3	3.89	126.80	50.01	12.74	53.57	18.68	29.40	69.90
128	128	24153	12450	71	3	2.34	79.70	74.36	27.49	9.64	45.45	21.22	87.65
129	129	22965	13535	78	3	2.34	294.10	42.68	12.27	79.29	15.53	83.44	99.49
130	130	23198	13523	62	4	1.96	238.30	19.71	25.22	19.29	6.64	66.24	142.86
131	131	24685	14278	98	3	2.72	109.30	18.52	12.55	19.29	9.79	26.06	61.43
132	132	28654	8755	23	3	3.11	69.40	22.93	7.56	26.79	7.65	22.09	53.06
133	133	24003	15286	90	3	3.50	155.70	33.30	12.08	42.86	11.36	28.05	51.53
134	134	21684	13101	114	3	2.72	109.30	19.83	14.54	19.29	9.45	34.56	47.55
135	135	22193	12185	79	3	1.77	205.50	173.34	27.81	41.79	74.03	55.71	229.80
136	136	17079	5894	81	3	3.50	53.20	35.15	7.91	20.36	11.14	24.90	34.39
137	137	15255	5110	110	3	2.53	40.00	19.08	2.29	15.00	7.88	24.15	54.29
138	138	15007	5535	70	3	9.17	82.80	63.88	24.85	11.79	31.50	21.68	76.53
139	139	3518	2571	59	5	7.41	222.40	31.10	38.50	142.50	8.66	128.60	133.98
140	140	3469	2308	52	5	5.72	164.80	49.44	27.98	126.43	13.61	37.64	76.12
141	141	3762	2170	30	5	8.06	194.00	41.79	31.43	213.21	13.61	45.52	127.35
142	142	3927	2110	27	5	5.72	310.10	56.40	37.11	138.21	16.43	59.63	154.49
143	143	4153	2299	73	5	8.72	1024.90	77.61	71.24	128.57	19.35	227.40	1389.39
144	144	3267	793	0	5	6.77	492.80	37.86	35.61	142.50	13.39	114.13	118.98
145	145	4684	1364	37	5	6.56	202.30	33.28	37.67	1339.29	11.36	140.62	110.92
146	146	5495	1205	9	5	6.77	97.20	38.67	18.12	24.64	14.74	28.77	49.90
147	147	5664	1653	13	5	6.98	208.60	41.00	28.55	67.50	15.19	93.83	84.59

148	148	5541	2093	26	5	6.14	143.40	41.67	22.57	88.93	12.49	38.14	65.61
149	149	5451	2757	92	5	6.69	158.10	36.61	16.22	36.00	12.91	31.67	63.57
150	150	4020	2990	27	4	8.00	332.60	77.06	46.01	240.00	24.47	68.10	259.29
151	151	4026	3913	13	4	6.69	401.80	84.94	60.11	138.00	19.16	96.76	227.55
152	152	5101	4080	13	1	8.23	756.40	42.73	87.52	63.00	19.26	88.74	184.69
153	153	5438	3994	10	2	9.35	407.50	55.54	61.83	112.00	24.05	66.82	208.27
154	154	5382	3012	50	1	8.90	307.30	54.39	57.21	326.00	25.72	131.93	256.94
155	155	5314	2060	40	4	3.77	242.10	30.93	32.13	28.00	11.56	50.60	144.69
156	156	5503	1127	6	1	5.41	178.90	29.54	23.73	52.00	9.89	49.84	118.88
157	157	5636	133	17	1	7.78	315.50	49.76	28.03	550.00	18.95	45.73	109.29
158	158	6605	374	6	1	5.62	134.60	25.33	19.10	45.00	11.66	40.50	87.14
159	159	7093	1381	45	4	5.41	235.60	36.88	48.80	43.00	14.06	53.61	213.47
160	160	7100	2449	89	4	4.58	203.80	39.03	24.18	87.00	16.66	53.09	138.88
161	161	6837	3490	28	4	6.91	568.50	54.59	113.46	264.00	23.22	82.40	399.90
162	162	7906	3978	22	4	5.00	506.50	59.45	70.71	202.00	26.13	78.01	334.39
163	163	8045	3052	39	4	5.62	880.00	78.29	121.12	293.00	25.61	171.14	540.00
164	164	8394	2035	27	4	6.91	250.30	39.09	50.46	81.00	20.41	59.17	172.65
165	165	8403	1075	6	4	7.78	161.90	42.08	77.92	186.00	18.22	62.81	171.84
166	166	8079	0	16	4	6.26	249.40	54.70	81.74	75.00	25.51	57.92	171.12
167	167	9663	1288	3	4	7.56	248.20	42.23	69.39	57.00	16.56	44.54	165.10
168	168	9469	2286	15	4	4.79	156.30	41.16	32.40	83.00	14.58	35.50	103.88
169	169	9178	3299	42	4	2.77	120.30	49.85	18.38	43.00	25.51	37.93	115.41
170	170	9095	3975	26	4	6.26	429.20	54.47	56.60	45.00	19.78	87.50	230.41
171	171	10225	3821	19	4	7.34	205.10	43.63	23.51	47.00	19.78	41.33	104.29
172	172	10210	2789	19	4	4.17	113.80	37.27	17.06	34.00	14.47	26.74	64.49
173	173	10340	1764	7	4	5.00	221.30	30.75	70.32	47.00	16.14	47.20	185.41
174	174	11557	1581	7	4	7.56	580.10	39.78	85.46	270.00	17.49	66.69	315.92
175	175	11415	2585	12	4	5.62	171.00	31.23	25.73	292.00	15.72	31.09	110.61
176	176	11649	3515	27	1	6.05	365.00	35.92	30.91	110.00	17.91	44.75	147.35
177	177	12734	4015	43	2	4.79	289.70	42.12	41.10	57.00	17.49	76.80	237.45
178	178	12696	3024	27	4	23.72	452.10	37.22	43.61	160.00	16.35	73.27	1635.92
179	179	12400	2060	13	4	6.47	847.60	53.17	59.00	96.00	19.05	68.82	186.53
180	180	12591	1063	18	1	4.17	310.70	40.70	42.64	58.00	14.99	115.59	177.76
181	181	13765	1353	15	4	5.00	317.50	42.46	30.96	162.00	17.81	59.94	221.94
182	182	13694	2357	33	4	4.17	357.50	38.78	43.89	14901.00	17.70	98.22	349.80
183	183	13855	3345	79	1	6.26	387.20	38.03	30.06	85.00	21.97	54.98	142.55
184	184	14862	2524	28	1	5.00	196.50	50.03	18.56	29.00	25.82	33.90	84.80
185	185	14896	1603	4	2	1.61	295.80	15.40	18.35	19.00	4.27	40.42	106.53
186	186	15387	729	8	1	4.58	129.00	31.09	18.93	38.00	15.10	29.76	69.80
187	187	15810	2307	8	1	5.41	204.90	40.16	25.86	41.00	16.24	33.28	80.00
188	188	16032	3061	35	4	3.57	174.80	31.13	26.21	26.00	11.14	31.77	94.08
189	189	15801	3966	115	3	2.00	197.00	78.36	22.98	19.00	24.05	43.73	104.18
190	190	15087	3512	69	5	3.37	106.70	16.31	9.04	17.00	7.60	26.89	37.14

191	191	16872	2798	10	4	6.47	738.00	47.35	24.07	135.00	19.58	34.09	101.73
192	192	17734	3629	14	4	3.37	788.70	28.90	17.62	34.00	15.51	26.04	91.02
193	193	16823	4207	67	5	6.91	133.10	40.58	32.64	27.00	22.39	33.97	115.20
194	194	17008	4775	82	3	2.38	149.50	27.18	11.19	54.00	14.47	38.35	59.49
195	195	17203	6218	40	1	7.56	206.60	55.79	24.44	22.00	28.63	29.73	81.73
196	196	17005	7212	33	4	8.67	78.90	58.87	21.65	26.00	23.43	26.52	70.51
197	197	16947	7487	41	2	4.79	178.60	32.31	29.01	45.00	14.26	47.98	104.90
198	198	16301	8299	24	1	5.41	250.10	34.32	16.25	15.00	18.53	41.29	90.20
199	199	17904	8287	25	1	5.83	89.20	54.90	23.28	19.00	21.76	24.95	53.57
200	200	18303	7385	39	5	5.62	453.50	37.22	21.92	40.00	16.56	41.51	87.35
201	201	18438	6539	22	4	4.38	92.40	38.70	15.03	21.00	13.85	24.22	47.24
202	202	18556	5588	15	5	2.77	198.70	18.11	15.33	19.00	9.68	34.15	95.92
203	203	18954	4874	4	4	5.41	260.10	43.81	26.46	33.00	13.22	39.49	87.04
204	204	18012	4414	20	4	5.62	101.10	49.01	19.96	23.00	20.82	26.00	71.53
205	205	19072	8519	36	4	6.69	146.50	43.39	19.89	36.00	17.49	33.24	60.00
206	206	20282	8590	57	4	7.56	66.50	49.24	14.67	19.00	17.08	25.48	41.12
207	207	21475	8540	85	3	2.77	119.00	27.49	10.62	44.00	10.52	31.94	53.27
208	208	21450	7555	58	4	1.61	434.80	21.29	12.84	18.00	8.85	56.14	106.43
209	209	20261	7586	29	3	5.62	188.00	30.52	26.03	58.00	14.26	31.96	77.45
210	210	19569	7348	70	3	2.97	77.50	16.91	9.95	34.00	7.50	28.15	41.63
211	211	19411	6934	28	3	4.58	130.80	35.61	19.59	23.00	16.14	29.87	61.12
212	212	19501	6091	9	4	5.20	134.50	29.37	16.33	32.00	13.54	29.83	59.90
213	213	20582	6548	13	5	3.17	101.80	32.23	10.68	12.00	12.81	33.20	51.12
214	214	19909	5300	3	4	5.00	232.00	32.43	24.23	37.00	15.10	36.08	101.84
215	215	21018	5764	9	4	7.56	121.10	62.91	31.03	44.00	27.28	28.36	88.16
216	216	22176	5492	25	4	5.20	238.70	47.18	59.66	24.00	19.68	62.57	108.47
217	217	23359	5325	28	3	6.05	151.20	92.76	31.43	79.00	32.07	31.57	130.61
218	218	23238	6502	169	3	2.77	202.60	56.54	18.09	49.00	28.11	26.14	82.14
219	219	22624	4818	27	3	2.38	351.60	64.86	28.97	65.00	17.28	112.62	105.31
220	220	21703	6591	65	3	5.20	173.80	58.28	19.99	51.00	22.49	31.61	69.80
221	221	5006	8846	6	2	8.67	423.30	61.41	117.83	216.00	30.30	178.88	293.16
222	222	5734	9659	3	4	5.41	645.30	50.27	80.60	113.00	23.32	99.42	358.27
223	223	6395	10443	4	2	7.12	967.70	36.41	70.71	66.00	16.87	119.35	457.96
224	224	7405	10981	6	2	4.58	445.70	28.32	132.05	139.00	12.91	87.44	303.06
225	225	8446	11200	4	2	8.23	420.60	35.81	73.86	561.00	22.49	60.91	241.63
226	226	7612	11938	2	2	4.58	257.40	42.25	44.84	260.00	19.58	46.90	192.65
227	227	7912	12840	1	4	6.05	248.70	44.36	42.79	150.00	19.89	72.20	170.10
228	228	8866	13143	3	2	8.23	350.30	59.07	36.58	177.00	24.57	52.56	170.00
229	229	9296	13102	9	4	4.17	109.90	29.09	13.71	31.00	11.35	25.08	51.63
230	230	9475	12000	9	2	3.97	306.20	38.30	36.22	115.00	13.54	60.63	145.51
231	231	9212	11305	5	2	10.74	306.50	53.98	97.05	255.00	27.91	69.40	177.86
232	232	8629	12086	1	2	3.77	515.60	28.74	77.47	1801.00	15.10	70.18	178.57
233	233	7776	10613	9	2	10.27	175.90	57.88	37.50	65.00	26.97	45.34	100.41

234	234	8622	10638	4	4	5.20	417.80	35.71	47.58	801.00	16.03	94.93	204.08
235	235	9237	9872	28	4	6.47	368.20	44.22	65.70	91.00	18.33	76.88	247.04
236	236	8307	9726	14	4	6.47	393.00	35.82	70.17	135.00	18.53	72.96	254.80
237	237	7106	9467	44	2	8.90	117.50	32.54	20.51	41.00	14.47	41.45	56.33
238	238	6423	8831	40	2	3.37	379.10	32.13	37.81	49.00	13.74	70.37	208.37
239	239	7458	8920	36	2	6.69	320.30	87.90	66.99	78.00	21.90	123.60	230.11
240	240	8904	8868	24	4	4.17	613.40	50.34	149.26	133.00	16.60	110.20	447.83
241	241	10547	9591	32	4	8.23	220.50	61.48	41.96	84.00	22.40	58.37	153.27
242	242	10398	10360	0	4	4.38	229.30	32.69	60.40	64.00	13.70	62.62	204.81
243	243	10395	11203	8	1	5.20	334.30	47.05	40.37	76.00	18.40	61.03	211.47
244	244	11529	11243	16	4	5.20	284.30	40.47	44.73	349.00	16.00	119.46	184.61
245	245	11563	10298	12	4	5.41	230.10	41.65	35.71	57.00	16.90	43.91	118.70
246	246	11646	9381	14	2	5.00	551.10	71.75	71.23	74.00	22.30	111.62	209.50
247	247	12641	9560	11	2	9.58	201.00	39.11	25.26	125.00	10.70	99.35	90.07
248	248	14000	8970	14	2	3.17	203.80	26.57	24.29	23.00	11.90	41.69	94.34
249	249	14207	9980	14	2	3.77	355.20	26.25	32.87	14.00	9.60	59.22	117.87
250	250	14065	10987	25	4	9.13	133.70	52.99	22.10	26.00	24.80	37.73	95.48
251	251	12734	10344	32	3	7.34	95.60	47.85	19.51	14.00	20.80	28.52	57.68
252	252	12727	7691	32	4	5.62	352.60	44.57	58.98	51.00	13.30	69.95	531.45
253	253	14173	11941	14	5	4.79	556.20	50.87	143.31	92.00	19.10	180.05	388.69
254	254	15467	12080	23	1	5.20	113.70	41.85	20.73	12.00	19.00	31.87	57.27
255	255	15140	11101	30	2	3.37	240.50	28.04	22.63	261.00	11.70	35.74	92.46
256	256	15198	10100	28	4	7.34	120.30	54.19	21.90	27.00	23.00	29.63	81.01
257	257	15248	9106	16	4	3.57	514.10	42.34	47.67	13800.00	17.30	69.96	269.89
258	258	16428	9069	20	1	4.38	246.30	29.90	21.84	84.00	14.10	59.00	95.17
259	259	16289	10072	43	1	5.41	158.00	46.86	24.02	31.00	19.30	36.27	79.24
260	260	16267	11058	60	4	4.38	211.30	27.79	19.01	34.00	12.00	38.38	81.42
261	261	16440	12068	47	4	5.62	236.50	35.95	66.52	199.00	13.90	40.98	193.67
262	262	16440	13232	24	2	6.05	193.00	40.60	24.88	27.00	14.40	33.53	84.86
263	263	15412	12982	21	4	6.26	169.70	44.26	88.12	46.00	17.20	42.71	97.67
264	264	14269	12877	27	4	5.20	320.10	35.92	36.86	68.00	16.50	58.46	162.85
265	265	13277	13204	19	4	6.91	180.20	54.08	27.01	37.00	18.40	44.13	118.91
266	266	13175	12238	31	4	4.58	351.80	55.39	78.07	87.00	16.90	69.55	188.88
267	267	12153	12336	16	1	8.67	245.70	47.79	27.55	35.00	18.40	53.42	98.81
268	268	11958	13313	13	1	6.47	86.80	41.12	15.46	23.00	15.90	37.53	70.18
269	269	10800	13282	9	1	7.12	367.80	92.02	49.80	97.00	16.30	41.26	321.12
270	270	10022	12204	5	2	3.77	467.10	49.03	34.44	45.00	15.40	60.83	132.86
271	271	9333	14631	4	2	5.41	364.70	40.34	40.93	79.00	18.70	83.32	175.34
272	272	9277	16148	18	1	10.97	248.50	40.61	61.52	81.00	17.20	76.19	168.05
273	273	11121	16432	23	1	9.81	171.80	75.38	163.20	30.00	26.30	45.27	125.16
274	274	10856	14727	41	2	8.23	409.90	44.67	66.92	80.00	36.00	96.85	197.63
275	275	12644	14943	43	2	5.41	302.50	34.22	27.60	408.00	14.80	68.70	218.24
276	276	12625	16259	66	1	2.77	236.20	42.67	16.35	62.00	9.40	41.88	149.52

277	277	9036	17538	3	2	7.78	114.50	56.38	26.96	36.00	22.40	31.24	75.91
278	278	10599	17980	11	2	6.47	165.20	73.40	42.73	40.00	19.70	84.13	95.69
279	279	12632	17949	33	4	5.62	380.40	46.63	28.31	48.00	14.60	83.82	155.98
280	280	14405	18032	152	3	3.77	398.40	29.57	18.64	60.00	10.50	113.84	172.53
281	281	14074	16516	124	3	3.57	268.60	28.11	23.20	64.00	12.20	54.52	101.00
282	282	14262	15129	66	3	4.38	126.50	28.57	20.57	19.00	12.10	25.17	53.10
283	283	14624	14004	25	4	6.91	290.30	47.87	28.90	34.00	14.80	44.26	94.96
284	284	16629	14481	41	4	7.12	228.40	40.29	25.15	37.00	15.30	40.10	83.19
285	285	18470	14411	59	4	4.38	305.50	52.44	22.92	13.00	19.10	45.21	109.33
286	286	20591	13549	42	3	3.97	407.60	35.65	22.33	11.00	18.60	60.36	121.62
287	287	20983	15862	93	3	8.00	96.60	19.42	11.26	12.00	7.50	27.54	47.38
288	288	20177	17642	276	3	3.57	185.50	23.15	13.42	34.00	9.50	29.49	92.36
289	289	19041	15769	90	4	3.37	288.70	26.12	15.10	18.00	10.30	30.14	63.83
290	290	18906	16346	173	3	3.17	90.40	16.20	8.30	32.00	7.00	44.31	44.67
291	291	18467	17001	308	3	2.97	285.40	26.86	15.00	65.00	13.30	38.63	68.20
292	292	17414	15476	97	4	7.12	100.00	46.15	19.43	14.00	23.00	22.01	65.70
293	293	15748	15728	56	4	5.62	306.90	42.02	25.21	40.00	19.20	36.99	141.50
294	294	15517	17034	77	5	5.83	319.50	43.32	25.89	54.00	15.80	40.98	83.40
295	295	16607	17365	155	3	3.97	100.10	21.69	11.96	40.00	7.90	42.79	69.24
296	296	15952	18397	103	3	3.17	218.60	39.51	15.26	34.00	10.50	50.98	84.24
297	297	22605	14301	93	3	2.77	239.80	26.06	15.82	35.00	10.20	41.43	80.90
298	298	23146	15382	153	3	3.17	156.80	19.73	8.34	42.00	7.60	39.21	71.01
299	299	22046	17634	171	3	2.97	281.10	28.56	11.42	48.00	12.60	37.95	81.01
300	300	23785	17643	194	3	3.17	142.50	36.75	9.93	43.00	13.30	32.61	61.64
301	301	25981	18051	173	3	1.80	195.50	28.53	7.32	36.00	9.70	37.41	50.92
302	302	27380	18202	136	3	3.17	153.90	20.90	8.21	37.00	7.60	31.37	38.21
303	303	25021	16290	104	4	3.77	104.20	30.34	12.34	24.00	11.80	39.31	57.16
304	304	23325	16701	105	3	4.79	72.10	65.54	11.55	35.00	19.80	26.04	47.58
305	305	26852	16114	225	3	3.57	190.80	31.33	10.67	65.00	15.70	51.56	94.02
306	306	17981	18449	93	1	6.47	282.90	52.68	20.34	25.00	22.90	32.53	103.50
307	307	14482	12692	20	5	7.34	149.00	44.22	20.14	33.00	16.00	35.43	147.75
308	308	14318	13569	30	5	8.23	121.30	43.29	31.63	86.00	11.40	33.21	46.86
309	309	10352	17133	31	5	10.74	479.20	96.28	29.23	98.00	25.30	80.36	112.35
310	310	9095	16414	29	5	11.68	870.50	70.84	35.17	302.00	29.10	78.15	435.44
311	311	10510	15314	19	5	7.34	279.00	51.25	27.95	44.00	22.50	51.20	117.66
312	312	13954	5615	61	5	6.05	162.00	36.22	17.91	35.00	14.20	36.41	61.02
313	313	10142	1662	8	5	5.41	907.00	43.08	36.48	10.00	14.50	41.02	121.20
314	314	17765	3561	8	5	6.26	132.90	42.59	16.58	27.00	16.20	35.52	63.31
315	315	6924	5696	7	5	6.47	197.00	38.18	21.09	64.00	18.60	40.18	168.05
316	316	4678	3765	40	5	6.47	100.70	36.19	13.31	42.00	11.50	34.34	56.23
317	317	6182	2005	25	5	4.79	119.10	35.76	19.71	44.00	9.90	39.66	67.06
318	318	5985	2567	44	4	7.56	63.50	33.65	21.90	60.00	12.50	41.29	60.50
319	319	7653	1952	48	5	9.35	156.00	57.36	31.06	59.00	25.80	51.03	95.90

附录三：Matlab程序代码

```
clear
clc

dx = 100; %x轴方向相邻点距离
dy = 100; %y轴方向相邻点距离
db = 100; %z轴放大系数

fin = fopen ( 'data.txt', 'r' );
size = fscanf ( fin, '%d', 1 );

x = fscanf( fin, '%d', [ 1, size ] );
y = fscanf( fin, '%d', [ 1, size ] );
h = fscanf( fin, '%d', [ 1, size ] );
As = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Cd = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Cr = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Cu = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Hg = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Ni = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Pb = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
Zn = fscanf( fin, '%f', [ 1, size ] );
type = fscanf ( fin, '%d', [ 1, size ] );
avr = fscanf ( fin, '%f', [ 1, size ] );

inf = 1000000000; %无穷大
minx = +inf; miny = +inf;
maxx = -inf; maxy = -inf;

for i = 1 : 1 : size;
if ( minx > x ( i ) )
minx = x ( i );
end
if ( miny > y ( i ) )
miny = y ( i );
end
if ( maxx < x ( i ) )
maxx = x ( i );
end
if ( maxy < y ( i ) )
maxy = y ( i );
end
end

[ X, Y, Z ] = GRIDDATA ( x, y, avr * db, ( minx : dx : maxx )', ( miny : dy : maxy ),
'v4' ); %对象插值
pcolor ( X, Y, Z ); %伪彩色图
shading interp; %隐藏网格线

hold on;

[ X, Y, Z ] = GRIDDATA ( x, y, h, ( minx : dx : maxx )', ( miny : dy : maxy ), 'v4' ); %
高度插值
[ C, H ] = contour ( X, Y, Z, 'k' ); %等高线图
clabel ( C, H ); %高度标注

hold on;

x1 = zeros (1,1); y1 = zeros (1,1); sz1 = 0;
x2 = zeros (1,1); y2 = zeros (1,1); sz2 = 0;
x3 = zeros (1,1); y3 = zeros (1,1); sz3 = 0;
x4 = zeros (1,1); y4 = zeros (1,1); sz4 = 0;
x5 = zeros (1,1); y5 = zeros (1,1); sz5 = 0;
```

```

%筛选类型不同的点：
for i = 1 : 1 : size;
if ( type ( i ) == 1 )
    sz1 = sz1 + 1;
x1 ( sz1 ) = x ( i ); y1 ( sz1 ) = y ( i );
elseif ( type ( i ) == 2 )
    sz2 = sz2 + 1;
x2 ( sz2 ) = x ( i ); y2 ( sz2 ) = y ( i );
elseif ( type ( i ) == 3 )
    sz3 = sz3 + 1;
x3 ( sz3 ) = x ( i ); y3 ( sz3 ) = y ( i );
elseif ( type ( i ) == 4 )
    sz4 = sz4 + 1;
x4 ( sz4 ) = x ( i ); y4 ( sz4 ) = y ( i );
else
    sz5 = sz5 + 1;
x5 ( sz5 ) = x ( i ); y5 ( sz5 ) = y ( i );
end
end

%对于不同类型的点用不同类型的符号做散点图
plot ( x1, y1, 'k*', x2, y2, 'ko', x3, y3, 'k+', x4, y4, 'kd', x5, y5, 'k.' );

```

附录四：重金属污染源一览表

元素	污染源
As	采矿、冶金、化学制药、玻璃工业中的脱色剂、各种杀虫剂、杀鼠剂、砷酸盐药物、化肥、硬质合金、皮革、农药等
Cd	电镀、采矿、冶炼、燃料、电池和化学工业等排放的废水
Cr	劣质化妆品原料、皮革制剂、金属部件镀铬部分，工业颜料以及鞣革、橡胶和陶瓷原料等
Cu	铜锌矿的开采和冶炼、金属加工、机械制造、钢铁生产等
Hg	仪表厂、食盐电解、贵金属冶炼、化妆品、照明用灯、齿科材料、燃煤、水生生物等
Ni	电镀工业、机器制造业、金属加工业的废水
Pb	各种油漆、涂料、蓄电池、冶炼、五金、机械、电镀、化妆品、染发剂、釉彩碗碟、餐具、燃煤、膨化食品、自来水管等
Zn	锌矿开采、冶炼加工、机械制造以及镀锌、仪器仪表、有机会合成和造纸等工业的排放、汽车轮胎磨损以及煤燃烧产生的粉尘、工业废水