

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源

孙境蔚^{1,2}, 胡恭任^{1*}, 于瑞莲¹, 苏光明¹, 王晓明³

(1. 华侨大学环境科学与工程系, 厦门 361021; 2. 泉州师范学院资源与环境科学学院, 泉州 362000; 3. 核工业北京地质研究院分析测试研究中心, 北京 100029)

摘要: 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析了厦门市旱地 2 个垂直剖面土壤中 26 种重金属元素的含量, 研究了剖面土壤中重金属元素的分布特征, 环境风险及污染来源. 综合内梅罗综合污染指数法, 地质累积指数法和潜在生态危害指数法的评价结果, Cd 为厦门市旱地土壤的主要污染因子; 土壤重金属污染严重的为 50~60 cm 深度. 多元统计分析结果表明, 重金属的主要来源为农业生产活动与自然源, 其中主要污染因子 Cd 来自于农业生产的影响. 对垂直剖面土壤的酸可溶相铅同位素组成与厦门市潜在污染源的铅同位素进行对比分析. 结果表明, 厦门市旱地土壤中, 铅主要来源于污泥和土壤母质层. 根据剖面土壤在²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 图中的分布特征, 利用铅同位素二元混合模型计算出 P180 剖面 and P181 剖面母质层的贡献率的平均值分别为 54.36% 和 42.88%, 污泥的贡献率平均值分别为 45.64% 和 57.12%, 表明旱地剖面土壤中铅主要来源为母质层和城市污泥, 与多元统计分析结果相一致.

关键词: 旱地; 重金属; 垂直剖面土壤; 源解析; 铅同位素示踪; 多元统计分析法

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2304-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.039

Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope

SUN Jing-wei^{1,2}, HU Gong-ren^{1*}, YU Rui-lian¹, SU Guang-ming¹, WANG Xiao-ming³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. School of Resources and Environmental Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China; 3. Analytical Laboratory of Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Two profile soils in drylands of Xiamen City were collected and 26 kinds of heavy metals were determined by ICP-MS. The distribution characteristics, environmental risk and pollution sources of heavy metals in soil profiles were studied. The results of Nemerow comprehensive pollution index method, the geological accumulation index method and potential ecological hazard index method indicated that Cd was the main pollution factor in the drylands of Xiamen City; the soil pollution was serious in 50-60 cm depth. Multivariate statistical analysis showed that the main sources of heavy metals were the compound pollution of agricultural production activities and natural resources, and the main pollution factor Cd was from agricultural production. Composition of acid-extractable Pb isotopic ratios in soil profiles and potential pollution sources were analyzed. The results showed that Pb in soil profiles was from sludge and parent material. The contribution rates of the two sources in the soil profiles by ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb were calculated by using the two mixed models. In the two profiles, parent material contribution rates were 54.36% and 42.88%, and sludge contribution rates were 45.64% and 57.12%, respectively. The main sources of lead of drylands in Xiamen were parent material and sludge, which was consistent with the results of the multivariate statistical analysis.

Key words: drylands; heavy metals; soil vertical profiles; source identification; lead isotope tracing; multivariate statistical analysis

土壤是农业生产的重要载体, 土壤环境质量的优劣与农业生产的发展息息相关. 污染源的确是对土壤污染程度进行正确评价和对污染源进行有效治理的前提. 多元统计分析法是一种用于确定数据分布中共同模型的一种有效方法, 通过减少初始数据中变量的个数更加易于解释数据, 已被广泛应用于重金属的溯源研究中^[1-3]. 铅同位素在次生环境中不产生同位素分馏, 其同位素组成主要受源区初始铅含量及放射性铀、钍衰变反应制约, Pb 同位素

的这种“指纹”特征可很好地应用于环境污染来源示踪及源解析研究^[4,5]. 陈迪云等^[6]的研究表明, 厦门地区土壤重金属污染日趋严重, 因此, 开展土壤重金属污染评价和溯源的研究则是重中之重. 对重金属的含量及其剖面分布特征进行分析评价, 采用多

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177043, 21377042); 福建省自然科学基金项目(2015J01147)

作者简介: 孙境蔚(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: sunjingwei2005@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hugongren@163.com

元统计分析法以及铅同位素示踪法进行污染来源解析,以期为厦门市旱地土壤的重金属污染防治提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

厦门市位于福建省东南部,属于亚热带海洋性气候,温和多雨。区内丘陵地分布广泛,平原则以冲积平原为主,山地构成主要以赤红壤为主,其次为红壤^[7]。采样点位于厦门市海沧区厦门市第一农场,是厦门市主要的农业区,区域内主要是旱地。

1.2 样品采集与处理

根据《土壤环境监测技术规范 HJ/T 166-2004》(规范),在厦门市第一农场远离道路的旱地采集两个剖面土壤样品,P180(24°31'26.00"N,117°57'3.00"E)和 P181(24°31'25.96"N,117°57'4.86"E),按 10 cm 深度为一个样本,P180 剖面采集 0~80 cm 深度,共计 8 个垂直剖面土壤样品,P181 剖面采集 0~130 cm 深度,共计 13 个垂直剖面土壤样品。每层土壤样品置于干净的塑料袋中,密封并贴好标签,注明标号,并做现场描述记录,将采集的样品运回实验室。置于室内晾干,剔除杂物,捣碎,过 2 mm 尼龙筛,再轻轻研磨,过 63 μm 尼龙筛,装入聚乙烯塑料袋中密封,置于干燥处保存备用。

1.3 样品分析与质量控制

预处理后的土壤样品送至核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行分析测定。样品中的 Fe 和 Mn 采用 HCl + HNO₃ + HF 微波消解,用原子吸收光谱法测定;其它重金属总量分析根据《电感耦合等离子体质谱分析(ICP-MS)方法通则》(DZ/T 0223-2001)用 HCl + HNO₃ + HF + H₂O₂ 微波消解,采用 ELEMENT XR 等离子体质谱分析仪进行测定,以 ESS-3 土壤系列标准物质进行质量控制,测定结果的相对标准偏差(<5.0%)在误差允许范围内;铅同位素比值分析样品的制备在核工业北京地质研究分析测试中心同位素超净实验室中完成。按 DZ/T 0184.12-1997 标准分析流程对铅进行分离与纯化。用国际标准物质 NBS981 监控仪器分析工作状态。详细测试过程参照文献[8]。

2 结果与分析

2.1 垂直剖面土壤中重金属元素含量

两个垂直剖面土壤样品中的 26 种重金属元素含量如表 1 所示。P180 剖面,超过厦门市背景值^[9]

的重金属按照背景值倍数的顺序为: Cd(4.191) > Ba(3.243) > Y(2.598) > Cs(2.242) > Be(2.036) > Tl(1.968) > Ga(1.606) > Zn(1.504) > Co(1.478) > Rb(1.374) > Sc(1.247) > Li(1.156) > Bi(1.089) > Pb(1.081) > Sb(1.042) > U(1.035) = Mn(1.035) > Sr(1.033) > V(1.029); P181 剖面的顺序为 Cs(2.217) > Cd(2.213) > Tl(1.520) > Ba(1.469) > Be(1.448) > Sb(1.340) > Y(1.330) > Sc(1.255) > Ga(1.199) > V(1.166) > Zn(1.089)。

2.2 垂直剖面土壤重金属污染评价

2.2.1 内梅罗综合污染指数法

选用内梅罗综合污染指数(Nemero pollution index, P)法评价土壤综合污染程度。评价标准选择厦门市土壤背景值^[9]。评价的分级标准^[10]为: $P \leq 0.7$, 清洁; $0.7 < P \leq 1.0$, 警戒线; $1.0 < P \leq 2$, 轻度污染; $2.0 < P \leq 3.0$, 中度污染; $P > 3.0$, 重度污染。计算结果如表 2 所示,P180 剖面,内梅罗综合污染指数平均值为 4.150,为重度污染。其中,40 cm 深度以下均为重度污染,主要污染因子是 Y 和 Cd,在 50~60 cm 深度,内梅罗综合污染指数达到最大值 9.971,该深度 Cd 的单因子污染指数达到 13.92。P181 剖面,内梅罗综合污染指数平均值为 1.940,为轻度污染; 0~30 cm 和 40~50 cm 深度为中污染,主要污染因子是 Cd; 120~130 cm 为中污染,污染因子为 Y; 其余深度土壤为轻度污染,主要污染因子为 Cs。

2.2.2 地质累积指数法

以厦门市土壤重金属背景值^[9]为参照,采用德国学者 Müller^[11]提出的地质累积指数法(geoaccumulation Index, I_{geo})计算 26 种重金属的地质累积指数(图 1)。与 I_{geo} 分级标准^[12]对比可知,P180 剖面土壤中,Be、Ga、Cd、Cs、Ba、Tl、Y 的 I_{geo} 平均值在 0~1 之间,属于轻度污染,其中 Cd 在 60~80 cm 深度为偏中度污染,在 40~50 cm 为中度污染,50~60 cm 为偏重度污染;金属 Ni、Cu、In、Sb、Bi、U、Fe 在整个剖面均为无污染;其余金属均出现不同深度的轻度污染,其中以 50~60 cm 深度出现污染的重金属种类最多。P181 剖面中,Cd、Cs、Tl 的 I_{geo} 平均值在 0~1 之间,属于轻度污染,其中 Cd 在 10~30 cm,40~50 cm 为偏中度污染;Cs 在整个剖面均为轻度污染;Cu 在 40~50 cm,Ga 在 110~130 cm,Y 在 10~20 cm 和 110~130 cm,Ba 在 0~20 cm 和 30~80 cm 均为轻度污染,其余金属均为无污染。

表 1 厦门市旱地垂直剖面土壤中重金属元素含量¹⁾/mg·kg⁻¹Table 1 Heavy metal elements content in soil profiles of drylands in Xiamen /mg·kg⁻¹

项目	深度/cm	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	In	Li	Mn
背景值 ²⁾		300.0	1.800	0.520	0.054	7.410	41.30	6.440	21.60	42 700	20.00	0.100	20.00	280.0
P180-1	0~10	597.0	2.110	0.468	0.072	4.900	13.40	11.50	5.390	23 912	25.90	0.077	20.40	386.0
P180-2	10~20	598.0	2.160	0.435	0.066	3.000	14.70	13.00	4.380	22 062	29.00	0.076	19.70	300.0
P180-3	20~30	681.0	1.760	0.507	0.070	1.930	7.680	10.10	4.410	15 399	26.80	0.061	19.70	186.5
P180-4	30~40	518.0	2.110	0.336	0.037	2.080	7.820	10.80	4.070	15 637	25.40	0.062	16.60	247.0
P180-5	40~50	1 845	3.680	0.073	0.311	21.20	1.260	6.340	6.010	19 713	33.30	0.065	48.40	1 120
P180-6	50~60	2 623	4.200	0.239	0.654	26.80	4.020	8.560	8.750	18 399	33.60	0.068	43.50	1 265
P180-7	60~70	1 954	1.840	0.134	0.225	5.780	0.537	6.340	2.770	13 251	32.60	0.047	12.10	594.0
P180-8	70~80	2 161	2.010	3.120	0.144	6.410	0.930	7.420	3.360	21 270	33.70	0.041	12.00	1 450
平均值		1 372	2.484	0.664	0.197	9.013	6.293	9.258	4.893	18 705	30.04	0.062	24.05	693.5
CV/%		62.55	37.04	151.3	104.9	105.5	88.64	26.78	38.16	19.81	12.17	20.48	58.08	73.04
背景值倍数/倍		3.243	2.036	1.089	4.191	1.478	—	2.242	—	—	1.606	—	1.156	1.035
P181-1	0~10	597.0	2.260	0.468	0.072	5.400	15.20	11.50	8.890	23 912	26.00	0.077	21.30	386.0
P181-2	10~20	598.0	2.090	0.435	0.066	7.790	12.70	13.00	8.640	22 062	23.40	0.076	17.90	300.0
P181-3	20~30	681.0	1.530	0.507	0.070	5.340	16.30	10.10	7.500	15 399	20.60	0.061	18.10	186.5
P181-4	30~40	518.0	1.600	0.336	0.037	3.810	11.50	10.80	9.470	15 637	18.90	0.062	14.40	247.0
P181-5	40~50	1 845	1.420	0.073	0.311	4.040	11.30	6.340	15.60	19 713	17.10	0.065	14.00	1 120
P181-6	50~60	2 623	1.530	0.239	0.654	5.150	12.20	8.560	7.590	18 399	19.60	0.068	17.50	1 265
P181-7	60~70	1 954	1.830	0.134	0.225	5.820	12.60	6.340	6.710	13 251	20.70	0.047	18.10	594.0
P181-8	70~80	2 161	1.660	3.120	0.144	6.660	12.60	7.420	6.860	21 270	20.50	0.041	17.70	1 450
P181-9	80~90	597.0	1.600	0.468	0.072	3.970	14.90	11.50	5.790	23 912	21.20	0.077	19.90	386.0
P181-10	90~100	598.0	1.690	0.435	0.066	4.120	15.80	13.00	5.880	22 062	21.30	0.076	19.60	300.0
P181-11	100~110	681.0	1.630	0.507	0.070	3.990	17.70	10.10	5.700	15 399	21.70	0.061	20.60	186.5
P181-12	110~120	518.0	1.810	0.336	0.037	6.110	15.50	10.80	3.230	15 637	30.50	0.062	19.70	247.0
P181-13	120~130	1 845	2.310	0.073	0.311	5.030	13.60	6.340	6.340	19 713	29.90	0.065	20.50	1 120
平均值		621.4	1.766	0.430	0.104	5.172	13.99	9.156	7.554	13 923	22.42	0.069	18.41	509.5
CV/%		15.04	16.12	19.09	29.49	23.39	14.48	13.46	38.61	25.68	18.07	17.48	12.16	41.00
背景值倍数/倍		1.469	1.448	—	2.213	—	—	2.217	—	—	1.199	—	—	—
项目	深度/cm	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	Tl	U	V	Y	Zn
背景值 ²⁾		5.140	13.50	34.90	140.0	0.600	13.30	34.00	24.40	0.810	4.250	78.30	25.10	82.70
P180-1	0~10	8.100	5.480	43.00	143.0	0.884	10.50	41.80	21.20	1.260	5.240	59.50	28.80	65.80
P180-2	10~20	3.520	4.570	43.10	197.0	0.382	10.40	41.70	23.40	1.450	4.860	49.40	29.50	59.10
P180-3	20~30	3.070	3.790	47.40	222.0	0.666	9.200	48.90	24.50	1.420	3.370	49.10	20.00	60.60
P180-4	30~40	5.310	3.630	42.90	212.0	0.463	7.140	34.40	19.40	1.410	3.110	39.90	19.30	48.10
P180-5	40~50	14.10	3.180	38.60	262.0	0.443	13.60	80.60	16.00	0.892	6.080	90.50	33.30	146.0
P180-6	50~60	23.50	3.530	46.50	264.0	0.604	14.60	94.20	18.40	1.310	5.870	86.50	48.50	143.0
P180-7	60~70	2.980	2.880	71.60	210.0	0.150	9.360	74.00	42.50	1.490	5.160	3.480	202.0	49.30
P180-8	70~80	3.120	2.720	71.80	248.0	0.159	9.200	80.30	39.20	1.520	4.900	4.260	161.0	47.70
平均值		7.963	3.723	50.61	219.8	0.469	10.50	61.99	25.58	1.344	4.824	47.83	67.80	77.45
CV/%		92.30	24.59	26.24	18.13	53.19	23.44	36.66	38.49	15.04	22.19	67.91	105.6	54.10
背景值倍数/倍		—	—	1.081	1.374	1.042	1.247	1.033	—	1.968	1.035	1.029	2.598	1.504
P181-1	0~10	8.100	5.740	43.00	141.0	0.884	13.60	59.40	21.20	1.260	5.240	64.40	39.10	63.60
P181-2	10~20	3.520	5.000	43.10	134.0	0.382	11.80	56.60	23.40	1.450	4.860	56.90	42.20	62.60
P181-3	20~30	3.070	5.990	47.40	134.0	0.666	9.110	39.60	24.50	1.420	3.370	49.50	24.50	51.40
P181-4	30~40	5.310	4.230	42.90	122.0	0.463	9.460	57.10	19.40	1.410	3.110	49.40	29.40	57.20
P181-5	40~50	14.10	4.530	38.60	114.0	0.443	8.740	55.60	16.00	0.892	6.080	46.90	24.50	66.10
P181-6	50~60	23.50	4.680	46.50	143.0	0.604	8.710	44.70	18.40	1.310	5.870	38.30	24.40	54.20
P181-7	60~70	2.980	4.800	71.60	135.0	0.150	9.500	51.10	42.50	1.490	5.160	45.20	30.40	54.90
P181-8	70~80	3.120	4.620	71.80	141.0	0.159	9.230	48.90	39.20	1.520	4.900	39.60	31.50	58.40
P181-9	80~90	8.100	5.730	43.00	146.0	0.884	9.220	37.30	21.20	1.260	5.240	45.60	25.60	48.80
P181-10	90~100	3.520	6.130	43.10	138.0	0.382	9.580	38.50	23.40	1.450	4.860	49.40	29.20	47.80
P181-11	100~110	3.070	6.370	47.40	134.0	0.666	9.810	38.60	24.50	1.420	3.370	49.50	27.30	54.40
P181-12	110~120	5.310	5.800	42.90	104.0	0.463	12.50	38.40	19.40	1.410	3.110	61.30	52.50	51.40
P181-13	120~130	14.10	5.430	38.60	144.0	0.443	16.20	41.80	16.00	0.892	6.080	109.0	70.60	58.50
平均值		3.758	5.312	42.22	133.1	0.603	10.57	46.74	20.68	1.067	4.243	54.23	34.71	56.10
CV/%		80.40	13.18	13.09	9.388	16.94	21.60	17.89	11.99	7.977	16.77	33.37	39.19	10.10
背景值倍数/倍		—	—	—	—	1.340	1.255	—	—	1.562	—	1.166	1.330	1.089

1) “—”为未超背景值; 2) 参照文献[9]

表 2 厦门市旱地垂直剖面土壤内梅罗综合污染指数

Table 2 Nemerow Pollution Index of the soil profiles of drylands in Xiamen

样号	深度/cm	最大单因子指数	P	样号	深度/cm	最大单因子指数	P
P181-1	0~10	Cd(2.617)	2.037	P180-1	0~10	Cs(2.785)	2.128
P181-2	10~20	Cd(3.128)	2.355	P180-2	10~20	Cs(2.446)	2.353
P181-3	20~30	Cd(3.213)	2.391	P180-3	20~30	Cs(2.615)	1.871
P181-4	30~40	Cs(1.738)	1.402	P180-4	30~40	Cs(2.617)	1.958
P181-5	40~50	Cd(3.000)	2.233	P180-5	40~50	Cd(6.617)	4.834
P181-6	50~60	Cs(2.259)	1.735	P180-6	50~60	Cd(13.92)	9.971
P181-7	60~70	Cs(2.097)	1.641	P180-7	60~70	Y(7.739)	5.570
P181-8	70~80	Cs(2.240)	1.744	P180-8	70~80	Y(6.169)	4.513
P181-9	80~90	Cs(2.639)	1.998	平均值			4.150
P181-10	90~100	Cs(2.446)	1.874				
P181-11	100~110	Cs(2.470)	1.889				
P181-12	110~120	Cs(2.300)	1.798				
P181-13	120~130	Y(2.705)	2.125				
平均值			1.940				

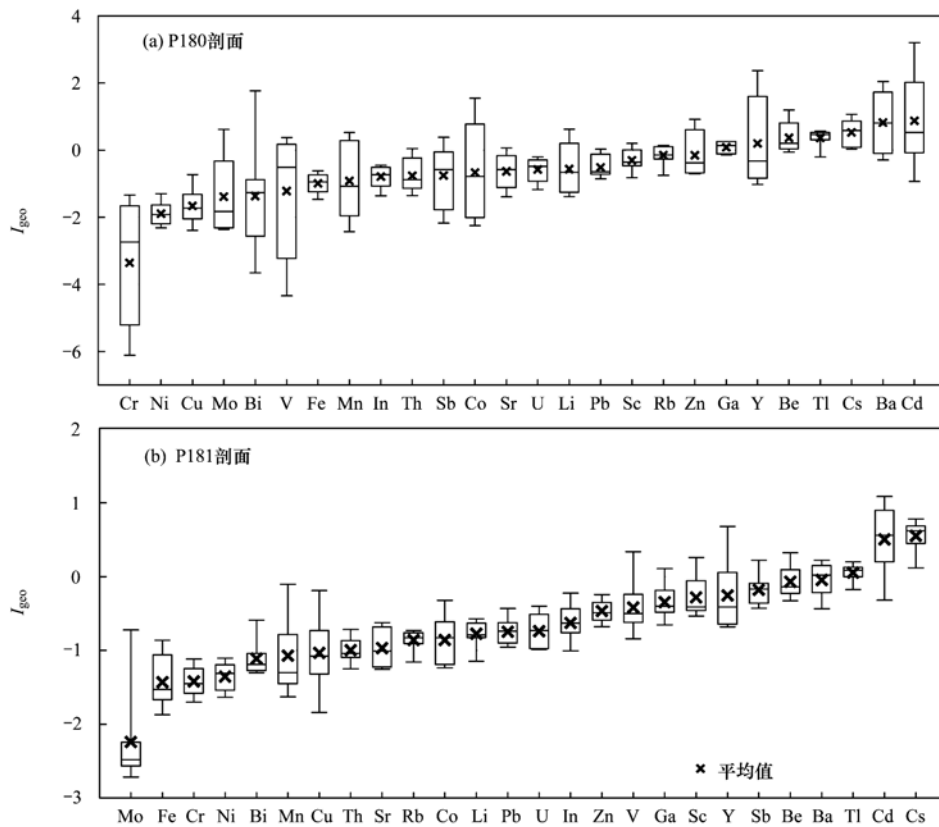


图 1 厦门市旱地垂直剖面土壤中 26 种重金属地质累积指数评价结果

Fig. 1 Box-plots of the geoaccumulation index of 26 heavy metals in the soil profiles of the drylands in Xiamen

2.2.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法 (potential ecological risk index, RI) 是 Hakanson^[13] 基于元素释放能力以及元素丰度的原则,对重金属污染进行评价. 该方法引入重金属毒性系数,从重金属的毒性效应出发,更能为人类的健康保障提供有力的科学依据. 计算公式如式(1)所示:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_{\text{实测}}^i / C_n^i \quad (1)$$

式中, E_r^i 为沉积物中重金属 i 的潜在生态风险系数, C_r^i 为重金属元素的污染系数, $C_{\text{实测}}^i$ 为重金属元素的实测含量, T_r^i 为该重金属元素的毒性响应系数, C_n^i 为重金属元素的背景值. 采用厦门市土壤重金属背景值^[9]为参照,以徐争启等^[14]的毒性响应系数进行

计算,结果如表 3 所示. 由于本研究计算潜在生态危害指数所采用的重金属种类不同,对于评价标准^[13]进行适当的调整(表 4).

结果表明,各种金属的 E_r^i 表现为: P180 剖面中, Cd (126.0) > Co (7.387) > Pb (5.407) > Cu (2.522) > Ni (2.068) > V (2.057) > Zn (1.504) > Mn (1.035) > Cr (0.510); P181 剖面中, Cd (66.68) > Pb (4.511) > Co (4.239) > Cu (3.894) > Ni (2.951) > V (2.333) > Cr (1.133) > Zn (1.089) > Mn (0.760). Cd 的生态危害指数最大,在 P180 剖面 Cd 的生态危害指数的平均值达到了较强水平,

在 50 ~ 60 cm 深度甚至达到了极强水平; Cd 在 P181 剖面为中等水平. Cd 在两个剖面的 RI 贡献率分别为 84.63% 和 76.13%,因此, Cd 为厦门旱地土壤剖面的主要潜在生态危害因子.

就 RI 而言, P180 剖面的范围为 37.67 ~ 459.6, 平均值为 148.5, 总体处在中等生态危害范围, 在 50 ~ 60 cm, 由于 Cd 的存在导致该层的 RI 达到极强的生态危害水平; P181 剖面的范围为 52.5 ~ 117.7, 平均值为 87.59, 总体处在轻微生态危害水平, 0 ~ 30 cm 的表层土壤 RI 达到 100 以上, 处于中等生态危害水平.

表 3 重金属潜在生态危害指数 E_r^i

Table 3 Potential ecological risk index of heavy metals E_r^i

样号	深度/cm	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Mn	RI
P180-1	0~10	2.559	1.085	4.016	3.044	2.778	1.278	45.96	4.594	0.576	65.89
P180-2	10~20	2.125	1.190	2.459	2.539	2.258	1.148	42.13	4.605	0.448	58.90
P180-3	20~30	2.112	0.622	1.582	2.106	2.273	1.177	44.68	5.064	0.278	59.89
P180-4	30~40	1.716	0.633	1.705	2.017	2.098	0.934	23.62	4.583	0.369	37.67
P180-5	40~50	3.892	0.102	17.39	1.767	3.098	2.835	198.5	4.124	1.672	233.4
P180-6	50~60	3.720	0.326	21.97	1.961	4.510	2.777	417.5	4.968	1.887	459.6
P180-7	60~70	0.150	0.043	4.738	1.600	1.428	0.957	143.6	7.650	0.887	161.1
P180-8	70~80	0.183	0.075	5.254	1.511	1.732	0.926	91.91	7.671	2.164	111.4
平均值		2.057	0.510	7.387	2.068	2.522	1.504	126.0	5.407	1.035	148.5
对 RI 贡献率/%		1.386	0.343	4.975	1.393	1.699	1.013	84.85	3.642	0.697	100.0
P181-1	0~10	2.770	1.231	4.426	3.189	4.582	1.235	78.51	4.829	1.203	102.0
P181-2	10~20	2.447	1.028	6.385	2.778	4.454	1.216	93.83	5.053	0.500	117.7
P181-3	20~30	2.129	1.320	4.377	3.328	3.866	0.998	96.38	4.049	0.868	117.3
P181-4	30~40	2.125	0.931	3.123	2.350	4.881	1.111	31.91	4.274	1.545	52.25
P181-5	40~50	2.017	0.915	3.311	2.517	8.041	1.283	90.00	4.038	0.572	112.7
P181-6	50~60	1.647	0.988	4.221	2.600	3.912	1.052	51.06	4.626	0.829	70.94
P181-7	60~70	1.944	1.020	4.770	2.667	3.459	1.066	52.34	3.996	0.609	71.87
P181-8	70~80	1.703	1.020	5.459	2.567	3.536	1.134	66.38	4.476	0.719	87.00
P181-9	80~90	1.961	1.206	3.254	3.183	2.985	0.948	57.45	5.940	0.476	77.40
P181-10	90~100	2.125	1.279	3.377	3.406	3.031	0.928	72.77	3.942	0.581	91.44
P181-11	100~110	2.129	1.433	3.270	3.539	2.938	1.056	68.94	3.835	0.526	87.66
P181-12	110~120	2.637	1.255	5.008	3.222	1.665	0.998	43.40	4.925	0.871	63.99
P181-13	120~130	4.688	1.101	4.123	3.017	3.268	1.136	63.83	4.658	0.586	86.41
平均值		2.333	1.133	4.239	2.951	3.894	1.089	66.68	4.511	0.760	87.59
对 RI 贡献率/%		2.663	1.294	4.840	3.369	4.446	1.244	76.13	5.150	0.868	100.0

表 4 E_r^i 、RI 与潜在生态风险水平分级

Table 4 Degree of potential ecological risk according to E_r^i and RI

项目	参数				
E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	≥320
RI	<100	100~200	200~400		≥400
潜在生态风险水平	轻微	中等	较强	很强	极强

2.3 垂直剖面土壤重金属的来源分析

2.3.1 因子分析

为分析厦门市旱地剖面土壤重金属的污染来源,采用因子分析法进行污染源解析. 因子分析法

通过不同元素之间的相关程度判断它们是否存在依存关系,确定重金属的来源是否相同,是应用较为广泛的多元统计分析方法^[15]. 本研究对两个剖面的 26 种重金属分别进行因子分析, KMO 和 Bartlett 球

形度检验表明,标准化后的数据适宜做因子分析.

P180 剖面,3 个因子的累积方差贡献率为 89.21%, 分别可以解释总方差的 44.06%、36.69%、8.460%. 如图 2(a) 所示, Li、Be、Ba、Sc、Co、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Mo、Cd、U、Mn、V 在因子 1 上具有较高的正载荷, 该组金属中, Cd 为背景值的 4.191 倍, 主要来自磷肥^[16]; Ba 为背景值的 3.243 倍, 含钡药剂在 40 年代前作为防治害虫的药被广泛应用, 至今碳酸钡也还继续存在于杀虫剂当中^[17], 在 P180 剖面中, 底层土壤中 Ba 的含量很高, 为背景值的 5 倍左右, 随着深度的减少逐渐降低(表 1), 这与近年来高毒, 高残留杀虫剂的品种和范围受到限制有关. 因此, 因子 1 可以看作是农业生产的影响; Pb、Bi、Th、Tl、Y 在因子 2 上具有较高的正载荷, 其中金属 Y 的剖面平均含量为背景值的 2.598 倍, Y 主要来自母质层^[18], 因此, 因子 2 主要与母质层有关; Cs、Sb、In、Ni、Cr、Fe 在因子 3 上具有较高

的正载荷, Cs 为背景值的 2.242 倍, Cs 主要来源于医药, 电子等高科技行业^[19], Sb、Ni、Cr 主要来源于电子屏幕制造, 合金生产, 金属冶炼等行业^[20,21], 研究区域内电视机, 机械金属加工为主要支柱产业, 因此, 该因子主要受工业生产排放的影响.

P181 剖面, 3 个因子的累积方差贡献率为 74.50%, 分别可以解释总方差的 32.72%、27.07%、14.71%. 如图 2(b) 所示, 因子 1 是 V、Mo、Sb、Sc、Y、Bi、Ga、Th、In 和 Be, 接近或略超过背景值, 代表母质层的影响; 因子 2 是 U、Cr、Ni、Li、Cs、Rb、Tl 和 Pb, 其中 Tl 为背景值的 1.562 倍, 主要来源于电子工业, 合金工业等^[22], 因此该因子代表工业排放的影响; 因子 3 是 Ba、Cu、Zn、Sr、Fe、Mn、Co 和 Cd, 其中 Cd、Zn 和 Ba 分别为背景值的 2.213、1.089 和 1.469 倍, Cd 来主要自磷肥, Ba 来自杀虫剂, Zn 主要来源于化肥和农药^[16,17], 该因子主要受农业生产活动的影响.

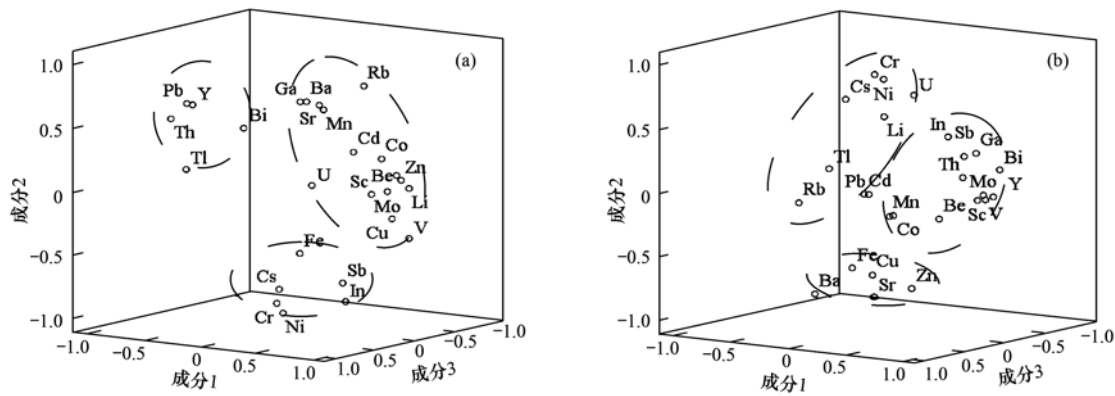


图2 重金属载荷

Fig. 2 Loading plots of the heavy metals contents

2.3.2 铅同位素示踪研究

(1) 酸可溶相铅同位素组成

重金属在环境中表现出的活性和可移动性与其形态有关. 污染条件下, 重金属以活性态存在, 因此, 可溶相铅同位素的组成能够反映土壤中是否有外来铅的加入^[23]. 厦门市旱地垂直剖面土壤的酸可溶相铅同位素组成如表 5 所示, P180 和 P181 剖面的酸可溶相铅同位素组成²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb, ²⁰⁸Pb/(²⁰⁶Pb + ²⁰⁷Pb) 的变化范围分别为: 1.172 5 ~ 1.195 2 和 1.174 3 ~ 1.184 7, 34.91 ~ 38.97 和 34.56 ~ 38.69, 15.46 ~ 15.68 和 15.53 ~ 15.77, 18.15 ~ 18.72 和 18.35 ~ 18.62, 1.903 ~ 2.097 和 1.875 ~ 2.102, 1.038 ~ 1.133 7 和 1.015 6 ~ 1.136 0. 两个垂直剖面土壤中的酸可溶相铅同位素组成变化幅度均比较小.

Sturges 等^[24]指出, 自然源的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 一般较高 (>1.20), 而人为因素产生的 Pb 的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 较低(0.96 ~ 1.20), 因此, 两个剖面均受到一定程度人为铅污染源的影响. P180 剖面土壤的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 比值随着土壤深度的增加, ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 比值有所波动, 在 50 ~ 60 cm 之间骤降至最低值 1.172 5, 这是深耕翻土使得土壤上下层混合所导致, 原因是重金属向下迁移, 该层土壤已经受到严重的铅污染. 之后增加至最大值 1.195 2, 接近自然来源的同位素比值, 这之前重金属的分析结果相一致. P181 垂直剖面土壤中的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 比值随着深度的增加先减小, 表明重金属从表层向下迁移, 在深度 50 ~ 60 cm 之间达到最小值 1.174 3. 深度大于 60 cm 时, 由于自然来源的铅和人为来源的铅叠加, 导致²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 比值出现波动.

表 5 垂直剖面土壤酸可溶相 Pb 同位素组成

Table 5 Acid-extractable Pb isotopic ratios in soil profiles

样号	深度/cm	可溶相 Pb /mg·kg ⁻¹	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb/(²⁰⁷ Pb + ²⁰⁶ Pb)	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb
P180-1	0~10	6.680	1.1794	1.0352	1.9130	18.490	15.680
P180-2	10~20	7.691	1.1827	1.0377	1.9150	18.480	15.630
P180-3	20~30	8.192	1.1810	1.0349	1.9100	18.460	15.600
P180-4	30~40	7.801	1.1813	1.0308	1.9030	18.460	15.620
P180-5	40~50	16.59	1.1847	1.0336	1.9060	18.310	15.460
P180-6	50~60	21.98	1.1725	1.1318	2.0970	18.150	15.480
P180-7	60~70	10.82	1.1947	1.1323	2.0800	18.720	15.670
P180-8	70~80	9.960	1.1952	1.1337	2.0820	18.710	15.660
P181-1	0~10	19.09	1.1847	1.0249	1.8900	18.620	15.720
P181-2	10~20	22.37	1.1826	1.0235	1.8890	18.570	15.700
P181-3	20~30	8.100	1.1823	1.0211	1.8850	18.610	15.740
P181-4	30~40	9.221	1.1774	1.0259	1.8970	18.510	15.720
P181-5	40~50	10.00	1.1762	1.1360	2.1020	18.410	15.650
P181-6	50~60	13.87	1.1743	1.0246	1.8970	18.520	15.770
P181-7	60~70	11.28	1.1799	1.0198	1.8840	18.530	15.700
P181-8	70~80	13.92	1.1773	1.0219	1.8900	18.510	15.720
P181-9	80~90	15.84	1.1804	1.0187	1.8820	18.480	15.660
P181-10	90~100	12.03	1.1780	1.0216	1.8890	18.500	15.710
P181-11	100~110	13.00	1.1786	1.0161	1.8780	18.500	15.700
P181-12	110~120	28.16	1.1815	1.0204	1.8840	18.350	15.530
P181-13	120~130	26.62	1.1819	1.0156	1.8750	18.430	15.590

(2) 垂直剖面土壤中铅的来源及其贡献率

母质层、汽车尾气尘、燃煤、污泥^[25]等端元组分的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb的比值范围较大,能有效区分,因此,可用其来追踪两个垂直剖面土壤铅的来源。

不同深度剖面土壤样品与端元组分的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb如图3所示。根据其中的分布特征,两个垂直剖面土壤的酸可溶相Pb同位素比值落在污泥和母质层之间,且与二者的铅同位素组成具有

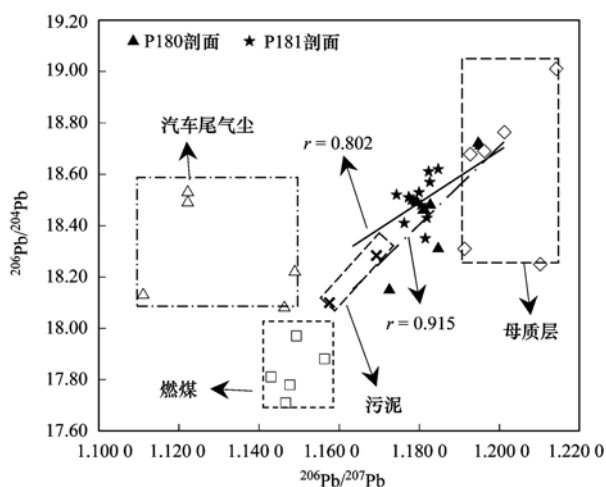


图 3 垂直剖面土壤与端元物质铅同位素组成对比

Fig. 3 Comparison of lead isotope composition in the soil profiles and the known sources

较好的相关关系($r=0.915$ 和 $r=0.802$),与燃煤和汽车尾气尘相差较大。因此,剖面土壤铅来源可以看成污泥和母质层两个源的混合。采用母质层和污泥的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值,运用铅同位素二元模型^[26]计算出不同铅源的相对贡献率,结果如表6所示。P180剖面 and P181剖面,母质层的贡献率平均值分别为54.36%(23.94%~84.31%)和42.88%(28.72%~56.38%),污泥的贡献率平均值分别为45.64%(15.69%~76.06%)和57.12%(43.62%~71.28%),表明P180剖面铅主要来源为母质层,最底层土壤样品(60~80cm)母质层的比例最高,说明P180剖面底层并未受到人为污染的影响,为自然来源。P181剖面铅主要来源于城市污泥,受到工业生产及生活污水的影响。

3 讨论

3.1 重金属评价方法

内梅罗综合污染指数法是一种兼顾极值或突出最大值的加权型多因子环境质量指数,综合反映了在重金属污染下的土壤环境质量;地质累积指数法很直观地给出重金属的污染水平,除取决于样品的测定值外,还与地球化学背景值的选择有关。由于地球化学背景值具有很大的地区差异,因此地质累积指数法存在一定的不确定性。以上两种方法均未

表 6 相对贡献率计算结果

Table 6 Calculation results of relative contribution rate

样号	深度/cm	母质层/%	污泥/%
P180-1	0~10	42.29	57.71
P180-2	10~20	51.06	48.94
P180-3	20~30	46.54	53.46
P180-4	30~40	47.34	52.66
P180-5	40~50	56.38	43.62
P180-6	50~60	23.94	76.06
P180-7	60~70	82.98	17.02
P180-8	70~80	84.31	15.69
P181-1	0~10	56.38	43.62
P181-2	10~20	50.80	49.20
P181-3	20~30	50.00	50.00
P181-4	30~40	36.97	63.03
P181-5	40~50	33.78	66.22
P181-6	50~60	28.72	71.28
P181-7	60~70	43.62	56.38
P181-8	70~80	36.70	63.30
P181-9	80~90	44.95	55.05
P181-10	90~100	38.56	61.44
P181-11	100~110	40.16	59.84
P181-12	110~120	47.87	52.13
P181-13	120~130	48.94	51.06

考虑重金属对生物危害性的差异,而潜在生态危害指数法弥补了这方面的不足,体现了重金属生物毒性的大小不同所带来的生态危害的差别.本研究对以上3种方法进行的重金属评价,结果基本一致,3种方法互相印证补充,完整体现了研究区域的重金属污染和生态危害水平.根据3种评价方法的评价结果,旱地的两个土壤剖面,P180的污染程度和重金属的剖面变化程度均小于P181剖面,虽然两个剖面来自同一区域,但是由于农业生产对土壤的翻动较大的特性,存在一定的差别,但是总体来说得到的结论基本一致,旱地的主要污染因子为Cd、Cs和Y,污染较重的剖面为50~60 cm深度.

3.2 重金属在旱地垂直剖面土壤中的迁移特征

3.2.1 重金属在旱地土壤中的特征

根据Shan等^[27]的研究,与水田相比较,旱地的Fe、Mn、Pb、Zn、Cd有更大的积累,原因是过高的施磷量和低含水率.旱地与水田由于含水量的不同,重金属的形态差异较大,进而影响植物对重金属的吸收,镉在淹水状态下有效态含量是排水良好的情况下的近十分之一,因此,旱地中镉的危害更大.

3.2.2 垂直剖面土壤中重金属的来源解析

本研究中,因子分析主要针对两个剖面土壤中的全部重金属元素进行污染源解析,重金属元素来源为农业生产(如Cd、Zn等)、母质层、工业生产

(如Pb等).重金属含量的分析表明,Cd虽然为旱地两个剖面的主要污染物质,但是其含量较低.Pb污染并不突出,但土壤中Pb含量较高.由于目前Pb同位素示踪技术较成熟,Cd同位素示踪技术还处于探索阶段,因此本文选用铅同位素对土壤中的铅污染源进行了研究,铅同位素示踪分析是对铅的来源进行分析,结果表明,一部分来自母质层,一部分来自于工业生产排放的污泥.

3.2.3 垂直剖面土壤中重金属的迁移特征

结合重金属含量的剖面变化可知,随着深度的增加,重金属含量逐渐降低至接近或低于背景值,而Pb同位素示踪也表明,从底层到表层土壤的铅同位素组成由母质层逐渐向工业废水方向飘移,说明土壤底层其受人为活动影响较少,以自然来源为主.在垂直剖面上,两个剖面Pb污染源的贡献率分布同样呈不规则变化,这是深耕翻土使得土壤表层和下部土壤混合所导致.

在50~60 cm深度处,两个剖面的重金属污染比较严重,同位素示踪结果也表明,污泥的贡献率在该深度也达到最大值(84.31%和71.28%),说明该深度样品受到了城市工业废水及生活污水排放的影响.采样剖面位于海沧区,海沧区是厦门工业总产值最大的一个区,以电子、机械、生物制药为主导产业,工业废水的排放以及污水灌溉等在建国初期对土壤产生了一定的重金属污染.近年来由于政府的严格监管,企业的污水排放得到有效的控制.

4 结论

(1)根据内梅罗综合污染指数法,地质累积指数法和潜在生态危害指数法的评价结果,Cd为厦门市旱地土壤的主要污染因子;土壤污染比较严重的为50~60 cm深度.

(2)因子分析结果表明,重金属的主要来源为农业生产活动,工业生产排放以及自然源的影响,主要污染因子为Cd,受到农业生产的影响严重,应加强对周边工农业排污的监测和管理.

(3)对垂直剖面土壤的可溶相铅同位素组成与厦门市潜在污染源进行分析,结果表明,厦门市旱地土壤中,铅主要来源为污泥和母质层.利用二元混合模型计算两个污染源的贡献率,旱地的两个剖面,母质层的贡献率平均值分别为54.36%和42.88%,污泥的贡献率平均值分别为45.64%和57.12%,表明旱地的铅来源为母质层和城市污泥,两者均为主要铅源,与多元统计分析结果一致.在50~60 cm深度处,

两个剖面的土壤样品中的铅受到工农业排污的影响最为严重,与重金属总量的分析结果一致,主要原因是建国初期海沧区工农业飞速发展,环保措施不到位,工农业废水排放对土壤产生了负面影响。

参考文献:

- [1] Anju M, Banerjee D K. Multivariate statistical analysis of heavy metals in soils of a Pb-Zn mining area, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(7): 4191-4206.
- [2] Singh S, Raju N J, Nazneen S. Environmental risk of heavy metal pollution and contamination sources using multivariate analysis in the soils of Varanasi environs, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(6): 345-356.
- [3] Chandrasekaran A, Ravisankar R, Harikrishnan N, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metal concentration in soils of Yelagiri Hills, Tamilnadu, India-Spectroscopical approach [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, **137**: 589-600.
- [4] Kayhanian M. Trend and concentrations of legacy lead (Pb) in highway runoff[J]. Environmental Pollution, 2012, **160**: 169-177.
- [5] Walraven N, van Os B J H, Klaver G T, *et al.* The lead (Pb) isotope signature, behaviour and fate of traffic-related lead pollution in roadside soils in The Netherlands[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 888-900.
- [6] 陈迪云, 谢文彪, 宋刚, 等. 福建沿海农田土壤重金属污染与潜在生态风险研究[J]. 土壤通报, 2010, **41**(1): 194-199.
- [7] 张引娥. 重金属元素在厦门-漳州土壤剖面中的分布特征及其环境意义[J]. 地球与环境, 2013, **41**(1): 13-19.
- [8] 何海星, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 厦门西港近岸沉积物重金属污染历史及源解析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 1045-1051.
- [9] 国家环境保护总局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 329-492.
- [10] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- [11] Müller G. Schwermetalle in sedimenten des staugeregelten Neckars[J]. Naturwissenschaften, 1980, **67**(6): 308-309.
- [12] 王健康, 高博, 周怀东, 等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1693-1699.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [14] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- [15] 于瑞莲, 胡恭任, 郑志敏. 泉州湾洛阳江河口潮间带沉积物中重金属来源分析[J]. 矿物学报, 2013, **33**(1): 10-18.
- [16] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, *et al.* The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, **54**(3): 267-277.
- [17] 张家兴, 王冬兰. 农药应用与综合治理[J]. 农药科学与管理, 1997, (1): 36-37.
- [18] 王彦. 2013年美国钇统计分析[J]. 稀土信息, 2014, (4): 38-39.
- [19] 董普, 肖荣阁. 铯盐应用及铯(碱金属)矿产资源评价[J]. 中国矿业, 2005, **14**(2): 30-34.
- [20] 袁博, 范继涛, 余良晖. 我国铯资源形势分析及对策建议[J]. 中国国土资源经济, 2011, **24**(3): 47-49, 57.
- [21] 戴文灿, 周发庭. 电镀含镍废水治理技术研究现状及展望[J]. 工业水处理, 2015, **35**(7): 14-18.
- [22] 周清平, 胡劲, 姚顺忠. 铊的应用以及对人体的危害[J]. 有色金属加工, 2009, **38**(1): 10-12, 5.
- [23] 于瑞莲, 胡恭任, 林燕萍, 等. 泉州市不同功能区土壤铅同位素组成及其来源分析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(7): 1996-2003.
- [24] Sturges W T, Barrie L A. Lead 206/207 isotope ratios in the atmosphere of North America as tracers of US and Canadian emissions[J]. Nature, 1987, **329**(6135): 144-146.
- [25] 胡恭任, 于瑞莲, 郑志敏. 铅稳定同位素在沉积物重金属污染溯源中的应用[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(5): 1326-1331.
- [26] Bird G, Brewer P A, Macklin M G, *et al.* Quantifying sediment-associated metal dispersal using Pb isotopes: application of binary and multivariate mixing models at the catchment-scale [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(6): 2158-2169.
- [27] Shan Y S, Tysklind M, Hao F H, *et al.* Identification of sources of heavy metals in agricultural soils using multivariate analysis and GIS[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13**(4): 720-729.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行