

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F_{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价

赵新儒¹, 特拉津·那斯尔², 程永毅¹, 詹江渝¹, 杨剑虹^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 伊犁职业技术学院农业工程系, 伊犁 835000)

摘要: 采用标准化方法建立伊犁河流域黑钙土、栗钙土、灰钙土和盐碱土 Cu、Zn、Pb、As、Hg 环境地球化学基线模型, 并计算其理论基线值。采用基线因子污染指数评价法、环境背景值评价法和重金属环境洁净度评价法对流域土壤进行对比污染评价。结果表明: ①基线因子污染评价显示流域内 4 种典型土壤类型以 As 的污染最为突出, 黑钙土、栗钙土、灰钙土分别有 7.14%、9.76%、7.50% 的样点达重度污染; 其次为 Pb, 栗钙土有 7.32% 的样点达重度污染, 且 As 和 Pb 的变异度最大, 表明人为扰动大。②环境背景值评价显示, 土壤主要污染元素为 As, 其次为 Cu、Zn、Pb; ③土壤重金属环境洁净度评价显示, Cu、Zn、Pb 在 4 种土类中均优于二级洁净度, Hg 为一级洁净度, As 在灰钙土中为中度污染, 黑钙土、栗钙土、盐碱土为二级或优于二级。比较 3 种评价体系, 基线因子污染评价较为充分地体现了元素地球化学迁移特性及土壤发育过程, 且可将污染评价定位到样点; 而背景值污染评价因建立于区域背景值, 忽视了重金属元素在土壤中自然迁移、淀积过程; 重金属环境洁净度评价则以土壤环境安全度为主要评价目的。

关键词: 伊犁河流域; 土壤; 重金属; 环境地球化学基线; 污染评价

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2392-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.048

Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation

ZHAO Xin-ru¹, Telajin Nasier², CHENG Yong-yi¹, ZHAN Jiang-yu¹, YANG Jian-hong¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Department of Agricultural Engineering, Ili Vocational and Technological Institute, Ili 835000, China)

Abstract: Environmental geochemical baseline models of Cu, Zn, Pb, As, Hg were established by standardized method in the chernozem, chestnut soil, sierozem and saline soil from the Ili river valley region. The theoretical baseline values were calculated. Baseline factor pollution index evaluation method, environmental background value evaluation method and heavy metal cleanliness evaluation method were used to compare soil pollution degrees. The baseline factor pollution index evaluation showed that As pollution was the most prominent among the four typical types of soils within the river basin, with 7.14%, 9.76%, 7.50% of sampling points in chernozem, chestnut soil and sierozem reached the heavy pollution, respectively. 7.32% of sampling points of chestnut soil reached the permitted heavy metal Pb pollution index in the chestnut soil. The variation extent of As and Pb was the largest, indicating large human disturbance. Environmental background value evaluation showed that As was the main pollution element, followed by Cu, Zn and Pb. Heavy metal cleanliness evaluation showed that Cu, Zn and Pb were better than cleanliness level 2 and Hg was the of cleanliness level 1 in all four types of soils. As showed moderate pollution in sierozem, and it was of cleanliness level 2 or better in chernozem, chestnut soil and saline-alkali soil. Comparing the three evaluation systems, the baseline factor pollution index evaluation more comprehensively reflected the geochemical migration characteristics of elements and the soil formation processes, and the pollution assessment could be specific to the sampling points. The environmental background value evaluation neglected the natural migration of heavy metals and the deposition process in the soil since it was established on the regional background values. The main purpose of the heavy metal cleanliness evaluation was to evaluate the safety degree of soil environment.

Key words: Ili River Basin; soil; heavy metal; environmental geochemical baseline; pollution evaluation

某一元素的地球化学背景值指在特定地质学区域范围内, 未经人类扰动下该元素在地表的自然原始浓度; 而元素的地球化学基线则是指在特定时间、特定的区域和条件下, 地球表层物质中化学元素浓度的自然变化范畴。元素的地球化学基线不仅能够及时反映在地表环境某已知点元素的含量^[1-3], 还能够一定程度体现出人为或自然带来的

环境扰动^[4-6]。在传统土壤重金属污染研究中, 更多采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法进行污染评价^[7-9]。也有学者根据土壤环境质量标

收稿日期: 2013-11-07; 修订日期: 2013-12-30

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2010157)

作者简介: 赵新儒(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤化学,
E-mail: 871354656@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: yjh@swu.edu.cn

准进行生态风险评价研究^[8-10]。近年,众多研究者引入地球化学基线值评价土壤污染情况,王济等^[11-13]对贵阳地区表层土壤铅、砷、汞的环境地球化学基线进行了系统研究,并采用地质累积指数法对该地区重金属污染状况进行了评价;腾彦国等^[14,15]运用标准化方法对四川攀枝花地区的环境地球化学基线进行研究,并对该地区土壤重金属污染进行了评价,取得了很好的效果。刘久臣等^[16]通过对上海崇明岛表层土壤重金属的环境地球化学基线研究,确定了该地区镉、铬、铜、铅、锌、砷的地球化学基线模型。

伊犁河流域是新疆最重要的农牧业区,因受地形和水分的影响,区域内土壤的发育具有典型的地带性特征,本研究拟采用标准化方法,建立流域主要土壤类型各重金属环境地球化学基线模型,并分别以“基线因子指数法”、“内梅罗综合污染指数法”和“重金属环境洁净度评价法”对流域内土壤重金属污染进行综合评价对比,以期为伊犁河流域建立更为可靠的土壤重金属环境污染评价体系。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于伊犁河上游山间河谷盆地,北纬 $42^{\circ}50' \sim 44^{\circ}10'$,东经 $80^{\circ}30' \sim 83^{\circ}10'$,面积约 5.7 万 km^2 ,海拔 $560 \sim 1400$ m;属温带大陆性气候,年均温 8.4°C ,年均降水 300 mm。区域内有3条自西

向东逐渐收缩的山脉,北部和中部山段之间为伊犁河谷与喀什河谷,南部和中部山段之间为特克斯河谷与巩乃斯河谷。区域内土壤按海拔由高到低依次发育为黑钙土、栗钙土、灰钙土和盐碱土这4种土壤类型。伊犁河流域因水、热资源丰富,是新疆最重要的农、牧、林业基地。

1.2 土壤样品的采集与测定

在伊犁河流域(8县1市),按土壤类型和农牧业利用现状布点,在每个样点区内用“蛇”形法对 $0 \sim 30$ cm表层土壤进行多点采集,用“四分法”制成混合样(布点见图1),经室内自然风干,敲碎,去除石砾、新生体、植物残渣等,按标准制备程序制成 $2、1、0.25$ mm粒径土样。

土壤中铁、铜、锌、铅用“NaOH 熔融-原子吸收分光光度法”(仪器:日立 Z-5000 型)测定;砷、汞采用“ $\text{V}_2\text{O}_5\text{-HNO}_3$ 消化-共价氢化物原子荧光光度法”(仪器:普析 PF6-3)测定^[17]。运用 Excel 及 SPSS 对数据进行处理分析。

1.3 环境地球化学基线的确定

环境地球化学基线的确定方法主要有以下3种:标准化方法、统计学方法和地球化学对比法^[18]。本研究采用标准化方法。该方法以地球化学过程中的相对惰性元素为标准元素,将标准元素含量与基线研究对象元素(活性元素)含量进行相关性对比,并建立二者之间的线性回归方程,即得活性元素的基线回归模型^[19,20]。见公式(1):



图1 伊犁河流域采样点分布示意

Fig. 1 Map of Ili River Basin and sampling points

$$c_m = a c_n + b \quad (1)$$

式中, c_m 为样品中活性元素的测定浓度; c_n 为样品中惰性元素(标准元素)的测定浓度; a 、 b 为回归常数。

将式(1)通过 95% 统计检验,落在 95% 置信度以内的样品代表基线的范围,即没有受到人为污染;落在 95% 置信度以外的样品表明受到了人为污染^[21~25]。将受到人为污染的样品剔除,通过统计分析及数据处理可获得回归常数 a 、 b 值。根据研究区土壤惰性元素的平均含量,求得活性元素的平均预测值,即基线平均值 B ,见公式(2):

$$B_M = a C_N + b \quad (2)$$

式中, B_M 为活性元素的基线平均值; C_N 为标准元素的平均值。

为了取得各样点理论基线值,可将该样点标准元素测定值(c_n)代入上式,即可计算出样点活性元素理论基线值(B_m)。

表 1 污染指数等级划分

Table 1 Classification of pollution index grade

P_i	等级	污染程度	P_N	等级	污染程度
$P_i \leq 1$	I	无污染	$P_N \leq 0.7$	I	清洁(安全)
$1 < P_i \leq 2$	II	轻度污染	$0.7 < P_N \leq 1.0$	II	高清洁(警戒限)
$2 < P_i \leq 3$	III	中度污染	$1.0 < P_N \leq 2.0$	III	轻度污染
$P_i > 3$	IV	重度污染	$2.0 < P_N \leq 3.0$	IV	中度污染
			$P_N > 3.0$	V	重污染

1.4.2 地球化学基线因子污染指数法

滕彦国等^[26]在地球化学基线基础上运用富集因子评价法评价攀枝花地区的土壤重金属污染状况,但该评价方法用于农业用地土壤重金属污染状况评价时其评价结果污染等级较高,因此该方法比较适用于矿区及重工业地区的土壤重金属污染评价。本研究在富集因子评价法的基础上,将其简化,提出比较适用于农业用地的重金属污染评价方法,见公式(5)。按照污染指数 K 值的大小,可以具体分为 4 个等级,如表 2 所示。

基线因子污染指数

$$K_i = C_i/B_i \quad (5)$$

式中, K_i 为污染物 i 的污染指数; C_i 为土壤中污染

1.4 重金属污染评价方法

1.4.1 环境背景值评价法

从环境角度出发,目前以土壤环境背景值作为环境评价指标的方法很多,统称为环境背景值评价体系,其中,以单因子污染指数法与内梅罗综合污染指数法相结合的方法对土壤重金属污染进行评价应用较广泛,见公式(3)、(4)。

单因子污染指数:

$$P_i = C_i/S_i \quad (3)$$

式中, P_i 为污染物 i 的污染指数; C_i 为土壤中污染物 i 的测量值; S_i 为土壤中污染物的背景值。

内梅罗综合污染指数:

$$P_N = \{[(P_{i均})^2 + (P_{i最大})^2]/2\}^{1/2} \quad (4)$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数; $P_{i均}$ 为平均单项污染指数; $P_{i最大}$ 为最大单项污染指数。

分别以单因子污染指数和内梅罗综合指数为参照,具体污染等级如表 1 所示。

物 i 的测量值; B_i 为土壤中污染物的理论基线值。

地球化学基线因子污染指数法意义在于可对每一个样点的污染程度作具体评价。

1.4.3 土壤重金属环境洁净度评价

从土壤环境安全角度考虑,根据土壤重金属环境质量标准^[27],判断样点或研究区范围内土壤重金属环境质量级别或洁净程度,见表 3。

表 2 污染指数 K_i 等级划分

Table 2 Classification of pollution index K_i grade

K_i	等级	污染程度
$K_i \leq 1.2$	I	无污染
$1.2 < K_i \leq 1.5$	II	轻度污染
$1.5 < K_i \leq 2.0$	III	中度污染
$K_i > 2.0$	IV	重度污染

表 3 土壤重金属环境质量二级标准/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Heavy metal environmental quality standard level 2/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

污染物	农业用地按 pH 值分组				居住用地	商业用地	工业用地
	≤ 5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	> 7.5			
总汞	0.20	0.3	0.4	0.8	4.0	20	20
总砷	35	30	25	20	50	70	70
总铅	50	50	50	50	300	600	600
总铜	150	150	200	200	300	500	500
总锌	150	200	250	300	500	700	700

2 结果与讨论

2.1 伊犁河流域土壤重金属地球环境化学基线模型

根据公式(1),用标准化方法建立某元素地球环境化学基线模型的关键是标准元素(惰性元素)的选择. 根据基线模型理论,标准元素应满足下述条件:①地球化学活性相对稳定;②在地表中含量

水平相对较高,受外源影响小,含量变化主要受地球环境化学条件所支配;③地球化学性质与基线研究对象元素相似;④易于测定. 据此,本研究选用铁作为标准化元素,将各土类各元素的测定结果代入公式(1)并进行置信度检验,取得 a 、 b 二常数后,再通过公式(2)建立起各土类各研究对象元素的地球环境化学基线模型,如表 4.

表 4 不同土类土壤中各金属元素的地球化学基线模型及基线值¹⁾

Table 4 Geochemical baseline models and baseline values of heavy metals in different types of soils

元素	背景值	黑钙土($n=14$)		栗钙土($n=41$)			
		基线模型($\bar{X}_{Fe}=12.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	r 值	基线平均值	基线模型($\bar{X}_{Fe}=12.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	r 值	基线平均值
Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.7	$B_{Cu}=3.8376C_{Fe}+3.7529$	0.754**	52.5	$B_{Cu}=1.8357C_{Fe}+36.288$	0.687**	58.3
Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	68.8	$B_{Zn}=8.1494C_{Fe}-41.046$	0.755**	62.5	$B_{Zn}=10.512C_{Fe}-57.133$	0.630**	69.0
Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.4	—	—	41.8	$B_{Pb}=4.3081C_{Fe}-28.711$	0.622**	23.0
As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.2	$B_{As}=5.6215C_{Fe}-48.707$	0.597**	22.7	$B_{As}=7.0437C_{Fe}-58.179$	0.612**	26.3
Hg/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	17.0	$B_{Hg}=0.7923C_{Fe}+2.723$	0.640**	12.8	$B_{Hg}=0.8706C_{Fe}+0.7586$	0.621**	11.2
元素	背景值	灰钙土($n=40$)		盐碱土($n=10$)			
		基线模型($\bar{X}_{Fe}=24.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	r 值	基线平均值	基线模型($\bar{X}_{Fe}=8.78 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	r 值	基线平均值
Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.7	$B_{Cu}=1.2273C_{Fe}+18.978$	0.742**	49.3	$B_{Cu}=3.3336C_{Fe}+10.035$	0.662**	39.3
Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	68.8	$B_{Zn}=3.1271C_{Fe}+1.0762$	0.774**	78.3	$B_{Zn}=11.569C_{Fe}-53.963$	0.758**	47.6
Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.4	$B_{Pb}=1.7939C_{Fe}-15.907$	0.587**	28.4	$B_{Pb}=1.8522C_{Fe}+23.76$	0.700**	40.0
As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.2	$B_{As}=2.9094C_{Fe}-28.106$	0.523**	43.8	$B_{As}=3.7085C_{Fe}-21.716$	0.785**	10.8
Hg/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	17.0	$B_{Hg}=0.4671C_{Fe}-1.0916$	0.673**	10.4	$B_{Hg}=0.4466C_{Fe}+4.4039$	0.805**	8.33

1) \bar{X}_{Fe} 为标准元素 Fe 的平均值

经 95% 置信度检验,剔除部分异常值后,伊犁河流域 4 种典型土壤类型中 Cu、Zn、Pb、As、Hg 的环境地球化学基线模型 r 值经检验均达到了极显著相关. 本研究因黑钙土中样本少,土类发育程度浅,受母质影响大,变异程度较大,未建立起 Pb 的地球化学基线模型,其地球化学基线模型有待进一步研究,本研究拟以黑钙土中 Pb 的平均值 ($41.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 代替基线平均值. 基线模型计算结果表明:黑钙土中 Cu、Zn、Pb、As、Hg 的基线值范围分别为 $41.1 \sim 60.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $47.9 \sim 84.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $35.5 \sim 50.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $14.3 \sim 63.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.28 \sim 14.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中 As 的变异系数最大,为 54.1,说明黑钙土中 As 元素受人为扰动较大. 栗钙土中 Cu、Zn、Pb、As、Hg 的基线值范围分别为 $50.5 \sim 75.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $26.8 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $7.20 \sim 44.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10.3 \sim 69.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.10 \sim 15.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中变异系数较大的元素有 As、Pb、Zn,其变异系数分别为 50.2、34.9、30.5,受人为扰动较大. 灰钙土中 Cu、Zn、Pb、As、Hg 的基线值范围分别为 $42.3 \sim 63.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $60.3 \sim 115 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $13.8 \sim 43.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $24.6 \sim 111 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.35 \sim 13.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. As 元素与 Pb 元素的变异系数较大,分别为 37.6 和 25.1,其受人为扰动较大. 盐碱土中

Cu、Zn、Pb、As、Hg 的基线值范围分别为 $35.7 \sim 44.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $38.5 \sim 64.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $33.5 \sim 51.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $9.27 \sim 22.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.77 \sim 12.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中只有 As 的变异系数较大,为 33.7,受人为扰动较大. 由于不同土类的母质与土壤发育程度不同,其作为标准元素的 Fe 含量也不相同,甚至出现比较大的差异,如灰钙土和盐碱土中 Fe 的平均含量(分别为 $24.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),所以不同土类中同一种金属元素的地球化学基线平均值也是不同的,甚至出现比较大的差异,如灰钙土和栗钙土中 As 的地球化学基线平均值(分别为 $43.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $26.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 与新疆地区各研究对象元素的背景值^[28]对比发现:Cu、Pb、As 的地球化学基线平均值比该地区的背景值均大得多,Cu 的基线平均值是其背景值的 1.47 ~ 2.18 倍;Pb 的基线平均值是其背景值的 1.46 ~ 2.15 倍;As 的基线平均值是其背景值的 0.96 ~ 3.91 倍. Zn 的地球化学基线平均值与背景值基本相当,而 Hg 的地球化学基线平均值均比背景值小. 从各金属元素化学基线平均值与背景值的对比中可看出,用某金属元素的背景值评价该地区该金属元素的污染状况,与实际情况是存在一定差距的.

2.2 内梅罗综合污染评价

参照中国环境监测总站 1990 年颁布的中国土壤元素背景值,采用单因子污染指数法与内梅罗综合污染指数法相结合对伊犁河流域地区的土壤进行污染评价. 不同土类中各金属元素内梅罗综合污染指数如表 5 所示. Cu 在黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中的单因子污染指数平均值分别为 1.97、2.21、1.88、1.53. 其中,栗钙土中有 92.7% 的样点 P_i 值在 2~3 之间,为中度污染,其他 3 种土类的 P_i 值均以 1~2 之间为主,为轻度污染,4 种土类中 Cu 污染程度次序为:栗钙土 > 黑钙土 > 灰钙土 > 盐碱土. Zn 在黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中的单因子污染指数平均值分别为 0.91、1.00、1.16、0.75,仅灰钙土中有 90.0% 的样点 P_i 值在 1~2 之间,为轻度污染,其他 3 种土类中 P_i 值均以小于 1 为主,为无污染. Pb 在黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中的单因子污染指数平均值分别为 2.16、1.17、1.41、2.18,在黑钙土及盐碱土中分别有

71.4%、70.0% 的样点 P_i 值均在 2~3 之间,以中度污染为主,在栗钙土及灰钙土中分别有 63.4%、82.5% 的样点 P_i 值均在 1~2 之间,以轻度污染为主,污染程度次序为:黑钙土 > 盐碱土 > 灰钙土 > 栗钙土. As 在黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中的单因子污染指数平均值分别为 2.49、2.59、4.60、1.24,As 的污染程度次序为:灰钙土 > 栗钙土 > 黑钙土 > 盐碱土. 其中,灰钙土中 As 的 P_i 值大于 3 的样点占 82.5%,达重度污染,17.5% 的样点为中度污染, P_i 值在 2~3 之间;栗钙土中有 24.4% 的样点为重度污染,31.7% 的样点为中度污染,41.5% 的样点为轻度污染,只有 2.44% 的样点为无污染状态;黑钙土中重度污染、中度污染、轻度污染的样点百分含量分别为 28.6%、14.3%、57.1%;盐碱土中各有 50.0% 的样点为无污染与轻度污染. 伊犁河流域 4 种典型土壤类型中 Hg 的 P_i 值均小于 1,表现为无污染.

表 5 不同土类土壤中各金属元素内梅罗综合污染指数

Table 5 Nemerow pollution Index of heavy metals in different types of soils

元素	项目	黑钙土			栗钙土			灰钙土			盐碱土		
		P_i	P_N	污染等级									
Cu	最大值	2.25			2.82			2.39			1.67		
	最小值	1.54	2.12	IV	1.89	2.54	IV	1.59	2.15	IV	1.31	1.60	III
	平均值	1.97			2.21			1.88			1.53		
Zn	最大值	1.22			1.46			1.67			0.94		
	最小值	0.70	1.08	III	0.39	1.25	III	0.88	1.43	III	0.42	0.85	II
	平均值	0.91			1.00			1.16			0.75		
Pb	最大值	2.60			2.28			2.23			2.67		
	最小值	1.83	2.39	III	0.37	1.81	III	0.71	1.87	IV	1.73	2.44	IV
	平均值	2.16			1.17			1.41			2.18		
As	最大值	5.67			6.21			9.91			1.98		
	最小值	1.28	4.38	V	0.92	4.75	V	2.20	7.72	V	0.66	1.65	III
	平均值	2.49			2.59			4.60			1.24		
Hg	最大值	0.87			0.90			0.82			0.75		
	最小值	0.55	0.81	II	0.54	0.79	II	0.37	0.72	II	0.21	0.64	I
	平均值	0.74			0.67			0.60			0.51		

各土类中重金属元素单因子污染指数分布曲线如图 2 所示. As、Pb、Zn 这 3 种金属元素在不同土壤类型中的变异程度较大,特别是 As,其在 4 种土壤类型中的变异系数分别为 37.1、49.6、52.2、35.4,Pb 和 Zn 的最大变异系数均出现在栗钙土中,分别为 34.5、30.1,说明这 3 种金属元素的含量及污染水平除了受到母质类型的影响之外,还受到了一定程度人为活动的干扰. 而 Cu 和 Hg 在 4 种土壤类型中的变异系数均较小,说明其基本受母质类型的影响. 综上所述,4 种土壤类型中最主要的污染

因子为 As,其次为 Cu、Pb、Zn,未产生 Hg 污染.

以单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法为基础的土壤重金属污染评价是建立在土壤的环境背景值基础上的,但地球化学背景是不包括人类活动影响在内的自然物质中元素的浓度,由于人类活动影响范围广,所以背景值极其难以确定. 单因子污染指数法可以判断出环境中的主要污染因子,但土壤环境是一个复杂的体系,其污染往往是由多个污染因子复合污染导致的. 因此,该方法更适用于单一因子污染特定区域的评价. 而内梅罗综合污染

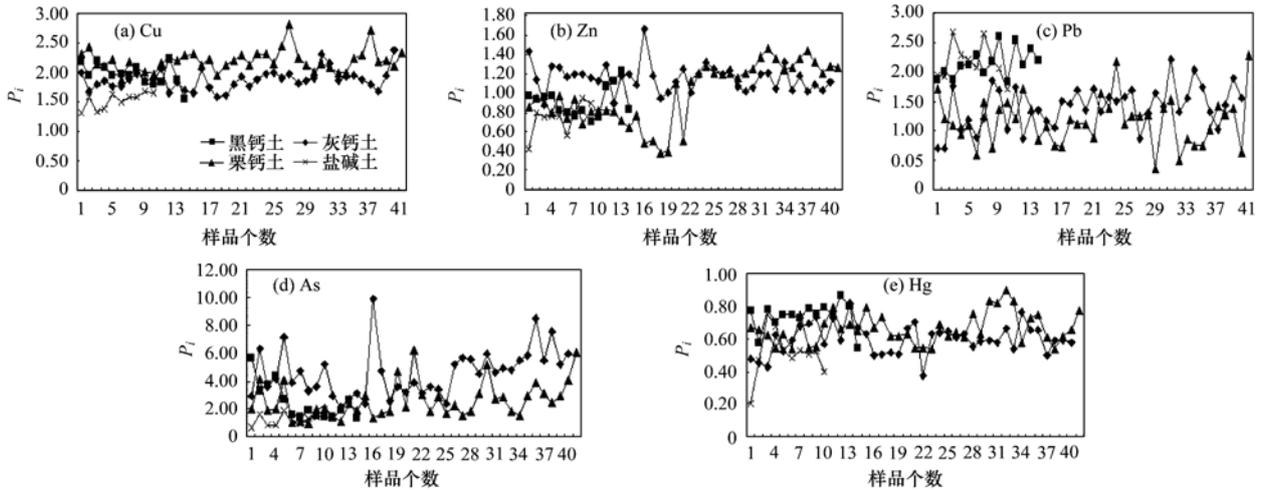


图2 不同土类各金属元素单因子污染指数分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of the single factor pollution index of heavy metals in different types of soils

评价法会以点代面地进行整体的重金属污染评价,不能从重金属元素污染的渐变性和对土壤环境的影响进行评价. 所以目前来看该评价方法还是存在一定的局限性.

2.3 地球化学基线因子污染指数法评价

根据已建立的伊犁河流域4种典型土壤重金属元素地球环境化学基线模型,采用1.4.3节的地球化学基线因子污染指数法计算出各样点的基线因子

污染指数 K_i 值,并按 K_i 值划分标准(表2),统计出各土类中重金属元素不同污染等级样本的百分数,如图3所示.

按基线因子指数污染评价结果显示:Cu在黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中的 K_i 平均值均小于1.2,只在栗钙土、灰钙土中分别有4.88%、5.00%的样点为轻度污染,盐碱土中有10.0%的样点为中度污染;Zn在黑钙土、栗钙土、灰钙土中的 K_i 平均

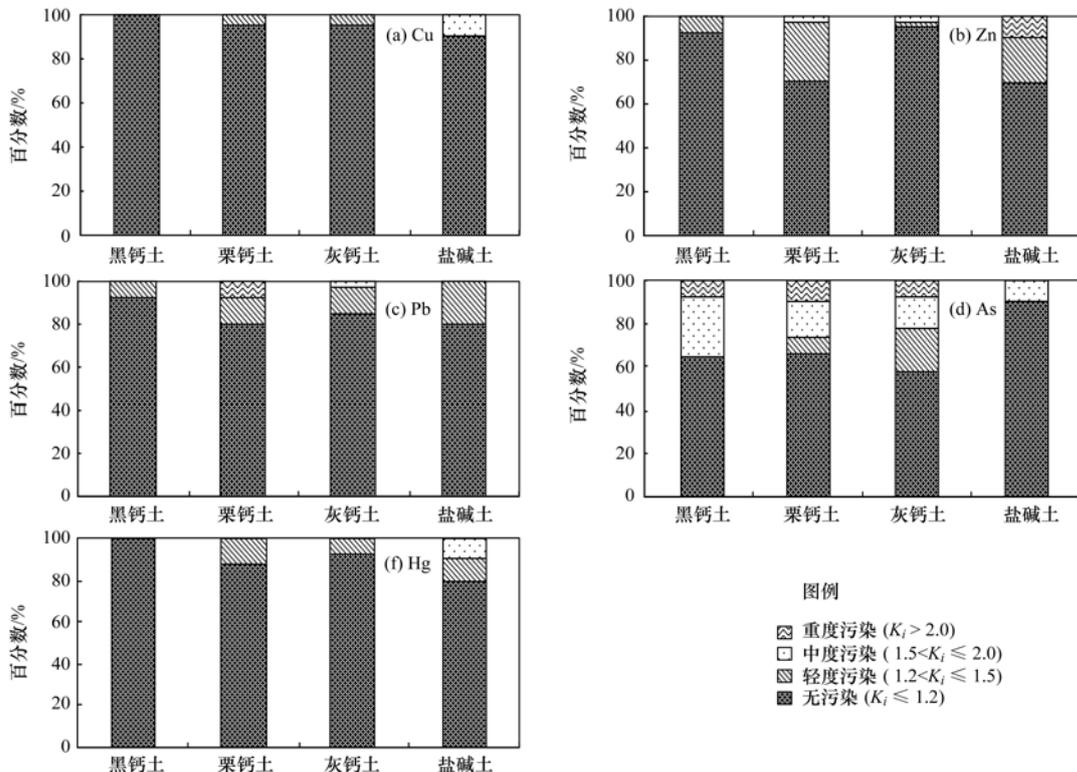


图3 不同土类各金属元素的基线因子污染指数百分数直方

Fig. 3 Percentage histograms of the baseline factor pollution index of heavy metals in different types of soils

值也均小于 1.2,但在盐碱土中 K_i 平均值为 1.33,其存在一个样点的 K_i 值为 4.33,为重度污染. 黑钙土和灰钙土中超过 90.0% 的样点以及栗钙土和盐碱土中超过 70.0% 的样点为无污染; Pb 和 Hg 在 4 种土壤类型中的 K_i 平均值均小于 1.2, Pb 在栗钙土中存在 7.32% 的样点为重度污染,在灰钙土中有 2.5% 的样点为中度污染. Hg 在盐碱土中有 10.0% 的样点为中度污染. Pb 和 Hg 在 4 种土类中均有超过 80% 的样点为无污染; As 在黑钙土、栗钙土中的 K_i 平均值均大于 1.2,在黑钙土、栗钙土、灰钙土中分别存在 7.14%、9.76%、7.50% 的样点为重度污染,黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中中度污染样品占 28.6%、17.1%、15.0% 及 10.0%,无污染的样品仅占 64.3%、65.9%、57.5% 及 90.0%. 就不同土壤类型中各种金属元素的基线因子污染指数变异程度而言,变异程度最大的是 As 和

表 6 伊犁河流域不同土类重金属环境洁净度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	灰钙土 pH > 7.5		栗钙土 pH > 7.5		黑钙土 pH 5.6 ~ 8.0		盐碱土 pH > 7.5	
	平均值	洁净度	平均值	洁净度	平均值	洁净度	平均值	洁净度
Cu	50.2	优于二级	59.0	优于二级	52.6	优于二级	40.8	优于二级
Zn	79.5	优于二级	68.9	优于二级	62.7	优于二级	51.8	优于二级
Pb	27.4	优于二级	22.8	优于二级	41.8	优于二级	42.8	优于二级
As	51.5	中度污染	29.0	二级	27.9	二级	14.6	优于二级
Hg	0.010 2	一级	0.011 3	一级	0.012 6	一级	0.008 61	一级

综合 3 种污染评价方法可见,伊犁河流域地区农业土壤中最主要的金属污染元素为 As,这可能跟该区域长期使用含 As 农药、杀虫剂有关. 基线因子污染评价基于环境地球化学基线,充分考虑了土壤中金属元素的化学迁移特性及土壤的发育过程,土壤中的金属元素都具有特定的迁移特性,根据研究区域的实际情况确定标准元素,建立标准元素与活性元素之间的相关关系,可以较好地表达出金属元素的迁移特性. 此外,基线因子污染评价可将污染等级定位到具体样点. 而背景值污染评价是建立在区域背景值基础上,区域背景值是某元素在某个特定区域未经人类扰动的自然原始浓度,它是某元素在该区域的平均值,是一个静态概念,该评价方法忽视了重金属元素在土壤中的自然迁移、淀积过程. 土壤重金属洁净度评价从土壤环境安全的角度出发,评价某区域土壤中某金属元素是否超出了环境安全范围.

3 结论

(1) 以 Fe 为标准化元素,建立了伊犁河流域地

Pb,这与单因子污染评价中是一致的,说明这两种重金属元素除了受到本身母质的影响,还受到了一定程度的人为扰动.

2.4 土壤重金属环境洁净度评价

土壤中重金属元素的含量除了外源添加外,主要取决于土壤母质含量、元素本身的地球化学活性和土壤的发育过程. 若某土壤母质中某重金属元素本身含量很高,则不应该称之为污染,所以笔者提出以洁净程度描述土壤中重金属元素的含量状况. 根据土壤重金属环境质量标准^[27]对伊犁河流域主要土壤类型主要重金属进行环境洁净度评价,评价结果如表 6 所示. Cu、Zn、Pb 在 4 种土类中均为优于二级的洁净度; Hg 参照的是背景值标准评价体系,在 4 种土类中为一级洁净度; As 在灰钙土中表现为中度污染,在栗钙土、黑钙土中表现为二级洁净度,在盐碱土中表现为优于二级洁净度.

区黑钙土、栗钙土、灰钙土及盐碱土中 Cu、Zn、Pb、As、Hg 的环境地球化学基线模型,并分别计算得到各土类各金属元素的地球化学理论基线值. 4 种土类中变异程度较大,受人为扰动较明显的元素主要为 As、Pb、Zn,并且不同土类中其变异程度不同. 因土壤母质和发育程度,流域内土壤中各金属元素的化学基线值与新疆地区背景值存在不同程度的差异,Cu、Pb 的化学基线值是背景值的 1.50 ~ 2.20 倍,As 的化学基线值是背景值的 0.96 ~ 3.91 倍,Zn 的化学基线值与背景值差异不大,Hg 的化学基线值则小于背景值.

(2) 以环境地球化学基线为基础的基线因子污染评价结果显示:伊犁河流域 4 种典型土壤类型中以 As 的污染最为严重,在黑钙土、栗钙土、灰钙土中分别存在 7.14%、9.76%、7.50% 的样点为重度污染;盐碱土中有一个样点同时存在 Cu 的中度污染及 Zn 的重度污染;栗钙土中存在 7.32% 的样点为 Pb 的重度污染,灰钙土中有 2.50% 的样点为 Pb 的中度污染;Hg 在盐碱土中有一个样点为中度污染;且 As 和 Pb 的变异程度最大,受人为扰动较大.

以土壤背景值为基础的单因子污染评价及内梅罗污染评价结果显示:伊犁河流域地区最主要的环境污染元素为 As, 其次为 Cu、Zn、Pb, 而 Hg 元素未对该地区土壤产生任何污染. 土壤重金属环境洁净度评价结果显示: Cu、Zn、Pb 在 4 种土壤类型中均为优于二级的洁净度; Hg 为一级洁净度; As 在灰钙土中表现为中度污染, 在栗钙土、黑钙土中表现为二级洁净度, 在盐碱土中为优于二级洁净度.

(3) 基线因子污染评价建立在地球化学基线的基础上, 充分考虑到土壤中金属元素的化学迁移特性及土壤的发育过程, 使得评价结果更加符合现实意义, 并能将污染状况精确到某个点位, 对该点位进行污染等级评价. 单因子污染评价及内梅罗污染评价建立在土壤背景值基础上, 由于背景值难以精确确定, 降低了该方法的现实指导意义, 且单因子污染评价更适合用来确定土壤中的主要污染因子, 比较适用于单一因子污染特定区域的评价, 内梅罗污染评价则存在以点代面的缺点. 土壤重金属环境洁净度评价则以土壤环境安全度为主要评价目的.

参考文献:

- [1] Salminen R, Gregorauskien V. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, **15**(5): 647-653.
- [2] Frattini P, De Vivo B, Lima A, *et al.* Elemental and gamma-ray surveys in the volcanic soils of Ischia Island, Italy [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2006, **6**(4): 325-339.
- [3] Albanese S, De Vivo B, Lima A, *et al.* Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2007, **93**(1): 21-34.
- [4] Tarvainen T, Kallio E. Baselines of certain bioavailable and total heavy metal concentrations in Finland [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(8): 975-980.
- [5] Cicchella D, De Vivo B, Lima A. Background and baseline concentration values of elements harmful to human health in the volcanic soils of the metropolitan and provincial areas of Napoli (Italy) [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2005, **5**(1): 29-40.
- [6] Galán E, Fernández-Caliani J C, González I, *et al.* Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soils of South-West Spain [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, **98**(3): 89-106.
- [7] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [8] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3654-3662.
- [9] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. *生态学报*, 2012, **32**(10): 3144-3153.
- [10] 施加春, 刘杏梅, 于春兰, 等. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(5): 824-830.
- [11] 王济, 王世杰, 欧阳自远. 贵阳市表层土壤中汞的环境地球化学基线及污染研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1417-1421.
- [12] 王济, 王世杰, 欧阳自远. 贵阳市表层土壤中铅的环境地球化学基线研究[J]. *生态环境*, 2007, **16**(4): 1154-1159.
- [13] 王济, 曾希柏, 王世杰, 等. 贵阳市表层土壤中砷的地球化学基线及污染状况研究[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(6): 1159-1163.
- [14] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 地球化学基线的确定方法研究——以攀枝花地区为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003, **30**(4): 422-428.
- [15] 滕彦国, 倪师军, 庾先国, 等. 应用标准化方法评价攀枝花地区表层土壤的重金属污染[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(3): 374-379.
- [16] 刘久臣, 刘晓端, 徐清, 等. 上海崇明岛表层土壤重金属元素分布特征与环境地球化学基线值研究[J]. *岩矿测试*, 2010, **29**(3): 245-249.
- [17] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. 121-170.
- [18] 滕彦国, 倪师军. 地球化学基线的理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 3-53.
- [19] Covelli S, Fontolan G. Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines [J]. *Environmental Geology*, 1997, **30**(1-2): 34-45.
- [20] Colizza E, Fontolan G, Brambati A. Impact of a coastal disposal site for inert wastes on the physical marine environment, Barcola-Bovedo, Trieste, Italy [J]. *Environmental Geology*, 1996, **27**(4): 270-285.
- [21] Windom H L, Schropp S J, Calder F D, *et al.* Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States [J]. *Environmental Science and Technology*, 1989, **23**(3): 314-320.
- [22] Loring D H. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1991, **48**(1): 101-115.
- [23] Rule J H. Assessment of trace element geochemistry of Hampton Roads harbor and lower Chesapeake Bay area sediments [J]. *Environmental Geology and Water Sciences*, 1986, **8**(4): 209-219.
- [24] Schropp S J, Lewis F G, Windom H L, *et al.* Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element [J]. *Estuarine*, 1990, **13**(3): 227-235.
- [25] Donoghue J F, Ragland P C, Chen Z Q, *et al.* Standardization of metal concentrations in sediments using regression residuals: an example from a large lake in Florida, USA [J]. *Environmental*

- Geology, 1998, 36(1-2): 65-76.
- [26] 滕彦国. 攀枝花地区土壤环境地球化学基线研究[D]. 成都:成都理工大学, 2001. 49-55.
- [27] GB 15618-2008, 土壤重金属环境质量标准[S].
- [28] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 329-483.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行