

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

金华市萤石矿区土壤氟污染评价

叶群峰, 周小玲

(浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004)

摘要: 对金华市萤石矿区村庄表层土进行了全氟(TF)、水溶态氟(WF)含量的测定. 利用单因子指数法、地质累积指数法和健康风险评估法进行了四个矿区和一个非矿区的土壤质量评价. 结果表明, 供试土壤 TF 含量范围 28.36 ~ 56 052.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 算术平均值 8 325.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均数为 1 555.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中位数为 812.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 172.07%. 供试土壤 WF 含量变化范围在 0.83 ~ 74.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 算术均值为 16.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均数为 10.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中位值为 10.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 100.10%. TF 和 WF 含量远远高于全国地氟病发生区平均水平. 供试土壤氟污染受人为因素影响显著. 杨家、冷水坑、花街矿区土壤氟污染最为严重, 大仁矿区次之, 非矿区基本没有受到氟污染. 经口摄入土壤是最主要的暴露途径, 参数敏感性分析表明儿童体重对危害商的影响最大, 3 种评价方法呈极显著正相关.

关键词: 土壤; 全氟; 水溶态氟; 地质累积指数; 单因子指数; 健康风险评价

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2648-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.043

Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas

YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling

(College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: The contents of soil total fluorine (TF) and water-soluble fluorine (WF) were measured in fluorite ore areas located in Jinhua City. The single factor index, geoaccumulation index and health risk assessment were used to evaluate fluorine pollution in soil in four fluorite ore areas and one non-ore area, respectively. The results showed that the TF contents in soils were 28.36-56 052.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ with an arithmetic mean value of 8 325.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a geometric mean of 1 555.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and a median of 812.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The variation coefficient of TF was 172.07%. The soil WF contents ranged from 0.83 to 74.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ with an arithmetic mean value of 16.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a geometric mean of 10.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and a median of 10.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The variation coefficient of WF was 100.10%. The soil TF and WF contents were far higher than the national average level of the local fluorine epidemic occurrence area. The fluoride pollution in soil was significantly affected by human factors. Soil fluorine pollution in Yangjia, Lengshuikeng and Huajie fluorite ore areas was the most serious, followed by Daren fluorite ore area, and in non-ore area there was almost no fluorine pollution. Oral ingestion of soils was the main exposure route. Sensitivity analysis of model parameters showed that children's weight exerted the largest influence over hazard quotient. Furthermore, a significant positive correlation was found among the three kinds of evaluation methods.

Key words: soil; total fluorine; water-soluble fluorine; geoaccumulation index; single factor index; health risk assessment

2011 年中国的萤石储量占到全球的 10%, 居第三位. 产量占世界 61%, 居第一位^[1]. 金华属于浙中萤石矿集区, 特别是武义县、永康市及东阳市是全国著名的萤石产地. 在氟石矿区周边区域的土壤中, 一方面由于氟元素的地质背景值高于其他区域, 另一方面受矿石的采选、加工及当地发达的氟化工产业等影响, 土壤受到不同程度的氟富集与污染^[2,3]. 氟过量摄取造成氟中毒^[4]. 土壤氟赋存形态主要有水溶态、可交换态、铁锰结合态、有机束缚态、残余态^[5], 其中水溶态氟对植物有较高的有效性, 显著影响水稻氟含量^[6]. 目前, 有关土壤氟不同赋存形态及其与土壤理化性质的相关性研究很多^[7-13], 而土壤氟污染评价方法的研究尚需完善. 针对土壤氟污染的评价方法主要是单因子指数法^[14-18], 薛粟尹等^[19]对干旱区绿洲土壤氟污染进

行了生态风险评估研究. 而利用地质累积指数法评价土壤氟污染的报道^[20,21]很少. 氟污染场地的健康风险评估文献鲜有报道^[22], 且不同评价方法间的相关性也鲜有研究. 因此从多个评价角度对氟矿区土壤进行全面评价具有一定的理论和现实指导作用.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2014 年 2 月采自金华地区武义县、永康市、东阳市及婺城区浙江师范大学校园, 共采集表层(0 ~ 20 cm)土壤样品 125 份. 土样采集后, 在室内自然风干. 仔细除去植物根系、石块、瓦砾

收稿日期: 2014-12-13; 修订日期: 2015-03-11

基金项目: 浙江省教育厅项目(Y201329218)

作者简介: 叶群峰(1977 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境污染控制与环境质量评价, E-mail: yqf@zjnu.cn

等杂物后,研磨过 200 目筛,以供土壤氟含量测定. 具体采样点信息如图 1 和表 1 所示.

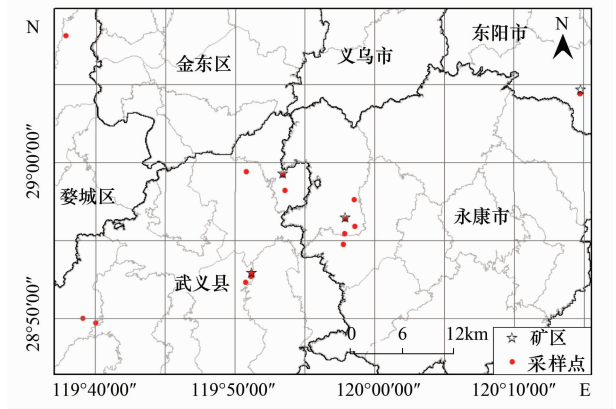


图 1 矿区及各村土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in the villages and ore areas

1.2 测定方法

土壤全氟(TF)含量测定采用 NaOH 碱熔-离子选择电极法,水溶态氟(WF)以1:5土水比,采用

70℃亚沸水振荡 0.5 h 提取,离子选择电极法测定(雷磁 PF-1-01,中国)^[12].

1.3 土壤评价方法

1.3.1 单因子指数法

根据李静等^[16]研究结果,酸性土壤以 TF 含量判断,而碱性土壤则以 WF 判断,土壤氟污染单因子指数法评价标准和划分等级参见文献[16]. 所采集的土壤样品既有酸性也有碱性土壤,因此分别以 TF 和 WF 含量进行单因子指数评价.

1.3.2 地质累积指数法

地质累积指数(I_{geo})表达式为:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C}{1.5BE}\right) \tag{1}$$

式中, C 为表层土壤中氟的含量(分别以 TF 和 WF 表示); BE 为背景含量,TF 背景含量采用金衢盆地表层土壤背景值($416\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),WF 背景值采用对照点的平均值 $1.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;1.5 为修正指数,通常用来表征沉积特征、岩石地质及其它影响. 地质累积指数分级标准参见文献[20].

表 1 采样点信息

Table 1 Information of sampling sites						
区域及样品数量	开采方式	采样点名称	样品数	采样点方位	海拔/m	采样点到矿区直线距离/km
武义县杨家($n=13$)	地下	杨家村	9	S	147	0.22
		蒋马洞村	2	S	146	1.97
		汤村	2	W	116	4.21
		双溪村	24	S	118	0.52
		选矿厂	8	S	120	0.63
永康市花街($n=56$)	地下	倪宅	4	SE	106	1.45
		花街村	5	S	100	1.83
		花川村	9	S	97	3.12
		油坑村	6	NNE	202	2.51
		上铺	5	S	73	0.13
武义县冷水坑($n=33$)	露天	对门新村	6	S	82	0.32
		冷水坑村	16	S	75	0.46
		端村	6	SSW	78	1.30
		大厦村	11	S	113	0.55
武义县和婺城区非矿区($n=12$)	/	白坛下村 ¹⁾	2	SW	170	29.3
		白姆村 ¹⁾	2	SW	163	28.9
		浙师大	8	NNW	72	29.6

1) 地质累积指数法中的 WF 对照点

1.3.3 健康风险评价法

土壤 TF 评估所需模型参数及推荐值参见环保部《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014). 皮肤接触吸收效率因子参见《工业企业土壤环境质量风险评估基准》(HJ/T 25-1999). 参数敏感性分析中有关儿童体重、儿童暴露频率、暴露于土壤的参考剂量分配系数参见浙江省《污染场地风险评估

技术导则》(DB 33/T 892-2013). 土壤氟属于非致癌物,只考虑非致癌效应. 由于当地居民经过改水措施后不再饮用地下水,因此暴露途径只考虑土壤经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入颗粒物这 3 种. 此外,矿区周边是人口密集的村庄,属于敏感用地.

(1)经口摄入土壤途径的危害商 HQ_{ois} 采用公式(2)计算:

$$HQ_{ois} = \frac{OISER_{nc} \times C}{RfD_0 \times SAF} \tag{2}$$

式中, C 为表层土壤中氟的含量, $mg \cdot kg^{-1}$; $OISER_{nc}$ 为经口摄入土壤暴露量, $kg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,根据公式(3)计算:

$$OISER_{nc} = \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c \times ABS_0}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \tag{3}$$

(2)皮肤吸收途径的危害商 HQ_{des}

采用公式(4)计算:

$$HQ_{des} = \frac{DCSER_{nc} \times C}{RfD_d \times SAF} \tag{4}$$

式中, RfD_d 为皮肤接触参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,根据公式(5)计算:

$$RfD_d = RfD_0 \times ABS_{gi} \tag{5}$$

式(4)中, $DCSER_{nc}$ 为皮肤接触的土壤暴露量, $kg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,根据公式(6)计算.

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (fspo \times EFO_c + fspi \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \tag{10}$$

以上公式中的参数含义及取值见表 2.

$$DCSER_{nc} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times ED_c \times EF_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \tag{6}$$

式中, SAE_c 为儿童暴露皮肤表面积, cm^2 ,根据公式(7)计算:

$$SAE_c = 239 \times H_c^{0.417} \times BW_c^{0.517} \times SER_c \tag{7}$$

(3)呼吸吸入土壤颗粒物途径的危害商 HQ_{pis}

采用公式(8)计算:

$$HQ_{pis} = \frac{PISER_{nc} \times C}{RfD_i \times SAF} \tag{8}$$

式中, RfD_i 为呼吸吸入参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,采用公式(9)计算:

$$RfD_i = \frac{RfC \times DAIR_a}{BW_a} \tag{9}$$

式(8)中, $PISER_{nc}$ 为吸入土壤颗粒物的土壤暴露量, $kg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,采用公式(10)计算:

表 2 风险评估模型参数及推荐值

Table 2 Risk assessment model parameters and recommended values

参数符号	参数名称	推荐值	单位
$OSIR_c$	儿童每日摄入土壤量	200	$mg \cdot d^{-1}$
ED_c	儿童暴露期	6	a
EF_c	儿童暴露频率	350	$d \cdot a^{-1}$
ABS_0	经口摄入吸收效率因子	1	无量纲
BW_c	儿童体重	15.9	kg
AT_{nc}	非致癌效应平均时间	2 190	d
RfD_0	经口摄入参考剂量	0.04	$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$
SAF	暴露于土壤的参考剂量分配系数	0.2	无量纲
ABS_{gi}	消化道吸收效率因子	1	无量纲
$SSAR_c$	儿童皮肤表面土壤黏附系数	0.2	$mg \cdot cm^{-2}$
E_v	每日皮肤接触事件频率	1	$次 \cdot d^{-1}$
ABS_d	皮肤接触吸收效率因子	0.01	无量纲
H_c	儿童平均身高	99.4	cm
SER_c	儿童暴露皮肤所占体表面积比	0.36	无量纲
RfC	呼吸吸入参考质量浓度	1.30×10^{-2}	$mg \cdot m^{-3}$
$DAIR_a$	成人每日空气呼吸量	14.5	$m^3 \cdot d^{-1}$
BW_a	成人体重	56.8	kg
PM_{10}	空气中可吸入颗粒物含量	0.15	$mg \cdot m^{-3}$
$DAIR_c$	儿童每日空气呼吸量	7.5	$m^3 \cdot d^{-1}$
$PIAF$	吸入土壤颗粒物在体内滞留比例	0.75	无量纲
$fspo$	室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例	0.5	无量纲
$fspi$	室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例	0.8	无量纲
EFO_c	儿童室外暴露频率	87.5	$d \cdot a^{-1}$
EFI_c	儿童室内暴露频率	262.5	$d \cdot a^{-1}$

1.4 数据处理与方法

数据统计与相关性分析采用 SPSS 21.0 软件.

2 结果与分析

2.1 土壤 TF 和 WF 含量

供试土壤 TF 含量变化范围是 28.36 ~ 56 052.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 算术平均值 8 325.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均数为 1 555.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中位数为 812.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 172.07%. 远远高于我国土壤(A 层)背景值 478 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [23], 也高于浙江省土壤背景值 420 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和金衢盆地表层土壤背景值 416 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [24], 甚至高于全国地氟病区平均值 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 不同矿区土壤氟含量统计结果见图 2, 按 TF 的算术均值 ($\bar{X}$) 排序为: 花街 > 冷水坑 > 杨家 >> 大仁 > 非矿区; 几何均数 ($\bar{X}_g$) 为: 杨家 > 冷水坑 > 花街 >> 大仁 > 非矿区; 中位数 (P_{50}) 为: 杨家 > 冷水坑 > 花街 >> 非矿区 > 大仁. 说明矿区土壤 TF 已发生严重氟污染, 非矿区土壤 TF 含量较低, 其中武义县的白坛下村、白姆村、上铺村以及永康市的花川村和花街村 TF 算术均值含量低于金衢盆地背景值.

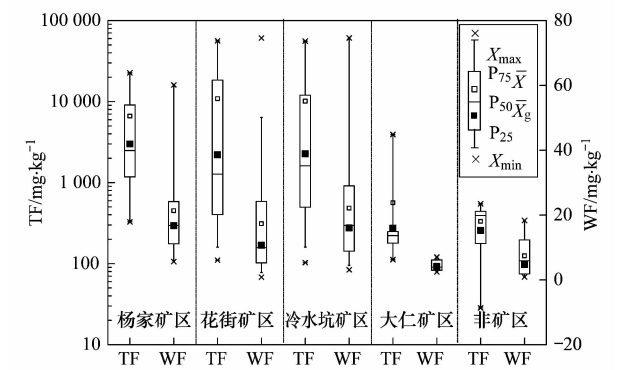


图2 金华市矿区和非矿区土壤氟含量统计

Fig. 2 Statistics of soil fluorine contents in Jinhua fluorite ore areas and non-ore area

在地氟病发生区, 土壤 WF 含量高低是地氟病产生的直接原因, 中国地氟病发生区土壤 WF 的平均含量为 2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [16]. 供试土壤 WF 含量变化范围在 0.83 ~ 74.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 算术均值为 16.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均数为 10.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中位值为 10.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 100.10%. 供试土壤 WF 含量远高于地氟病发生区平均水平. 但武义县的白坛下村和白姆村 WF 含量低于 2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. TF 和 WF 变异系数异常大, 说明供试土壤氟含量受人为因素非常显著. 不同区域算术均值排序为冷水坑 > 杨家 > 花街 > 非矿区 > 大仁; 几何均值为杨家 > 冷水坑 > 花街 > 非矿区 > 大仁; 中位数为杨家 =

冷水坑 > 花街 > 非矿区 > 大仁.

2.2 土壤污染评价

2.2.1 单因子指数法

单因子指数法评价如图 3 所示. 从 TF 角度看, 杨家矿区土壤氟污染最为严重, 花街和冷水坑矿区土壤氟污染状况基本相同, 大仁矿区土壤氟污染程度较轻, 而非矿区土壤不存在氟污染. 从 WF 角度看, 矿区与非矿区土壤都不缺氟. 杨家 and 冷水坑矿区所有土壤样本均为污染土壤, 花街矿区次之, 其次为大仁矿区, 非矿区污染土壤比例最低.

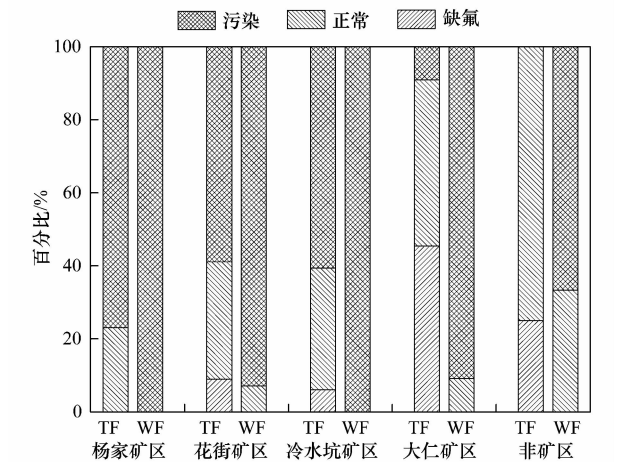


图3 不同区域土壤 TF 与 WF 单因子指数污染百分比

Fig. 3 Single factor index pollution level percentages of soil TF and WF in different areas

比较 TF 和 WF 的单因子指数法可知, 利用 WF 单因子指数法评价结果偏严重, 主要原因是矿区土壤 WF 绝大多数都超过 2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.2.2 地质累积指数法

地质累积指数法评价结果见图 4. 从 TF 角度

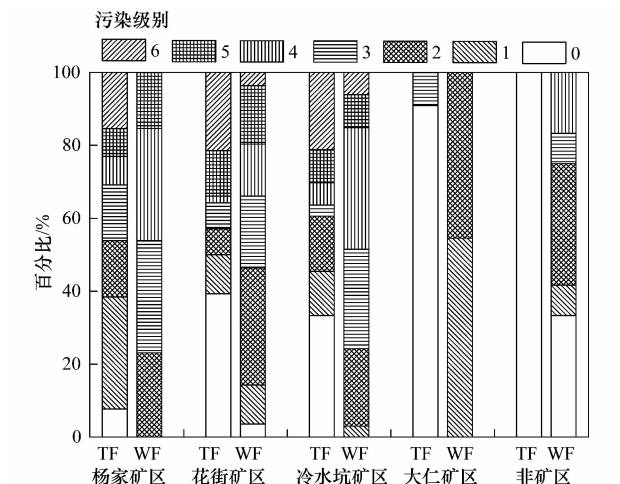


图4 不同区域土壤 TF 与 WF 地质累积指数污染级别百分比

Fig. 4 Geoaccumulation index pollution level percentages of soil TF and WF in different areas

看,杨家、花街和冷水坑这 3 个矿区土壤 TF 污染严重,大仁矿区只有 9.09% 的土壤属于 3 级,而非矿区土壤没有受到 TF 污染. 从 WF 角度看,杨家、花街和冷水坑这 3 个矿区 WF 污染严重,大仁矿区土壤 WF 污染较轻,非矿区部分土壤(浙江师范大学校园)受到了 WF 污染.

比较 TF 和 WF 的地质累积指数可知,采用 WF 评价,土壤污染偏严重. 主要原因是评价标准采用对照点的 WF 背景值,该值远低于矿区土壤 WF 含量.

单因子指数法和地质累积指数法评价结果显示:土壤 WF 比 TF 对矿区土壤的污染更严重,建议

土壤氟污染修复时主要针对 WF 采取措施,如乔沙^[25]通过施加氮肥和降氟剂降低茶叶氟含量,王凌霞等^[26]采用含钙化合物来调控土壤 WF 以降低茶叶含氟量,郜建等^[27]则用腐熟鸡粪中水溶性有机质(DOM)降低茶园土壤 WF 和有效态氟含量.

3 健康风险评估

3.1 不同暴露途径的 TF 危害商

4 个矿区和 1 个非矿区土壤在 3 种暴露途径下的危害商结果如表 3 所示,4 个矿区和非矿区不同暴露途径危害商平均值大小顺序为 $HQ_{ois} > HQ_{pis} > HQ_{des}$,说明经口摄入途径是最主要的暴露途径.

表 3 不同暴露途径下的危害商

Table 3 Hazard quotient of different exposure pathways		区域				
项目	土壤暴露途径	杨家矿区	花街矿区	冷水坑矿区	大仁矿区	非矿区
经口摄入(HQ_{ois})	最小值	4.93E-01	1.67E-01	1.55E-01	1.69E-01	4.28E-02
	最大值	3.41E+01	8.45E+01	8.38E+01	5.92E+00	8.29E-01
	平均值	1.00E+01	1.64E+01	1.53E+01	8.53E-01	5.01E-01
	风险不可接受比例 ¹⁾ /%	92.31	60.71	63.64	9.09	0.00
皮肤接触(HQ_{des})	最小值	1.21E-02	4.08E-03	3.79E-03	4.13E-03	1.05E-03
	最大值	8.34E-01	2.07E+00	2.05E+00	1.45E-01	2.03E-02
	平均值	2.45E-01	4.02E-01	3.74E-01	2.09E-02	1.23E-02
	风险不可接受比例 ¹⁾ /%	0.00	14.29	15.15	0.00	0.00
吸入颗粒物(HQ_{pis})	最小值	1.82E-02	6.14E-03	5.71E-03	6.22E-03	1.58E-03
	最大值	1.26E+00	3.12E+00	3.09E+00	2.18E-01	3.06E-02
	平均值	3.69E-01	6.05E-01	5.64E-01	3.14E-02	1.85E-02
	风险不可接受比例 ¹⁾ /%	15.38	26.79	21.21	0.00	0.00
3 种暴露途径 HQ 之和(H_{in})	最小值	5.23E-01	1.77E-01	1.64E-01	1.79E-01	4.54E-02
	最大值	3.62E+01	8.97E+01	8.89E+01	6.28E+00	8.80E-01
	平均值	1.06E+01	1.74E+01	1.62E+01	9.05E-01	5.31E-01
	风险不可接受比例 ¹⁾ /%	92.31	60.71	66.67	9.09	0.00

1) 危害商 >1 的样品数与每个矿区样品总数之比

经口摄入途径中,不同区域危害商不同,根据危害商平均值大小进行排序,花街矿区 > 冷水坑矿区 > 杨家矿区 > 大仁矿区 > 非矿区. 从风险不可接受比例大小排序,则有杨家矿区 > 花街矿区 > 冷水坑矿区 > 大仁矿区 > 非矿区;皮肤接触暴露途径,各个区域危害商平均值均小于 1,只有花街矿区和冷水坑矿区的风险不可接受比例有 15% 左右;从吸入颗粒物暴露途径看,各区域平均危害商均小于 1. 从 3 种暴露途径的综合危害指数看,各区域平均危害商大小顺序为花街矿区 > 冷水坑矿区 > 杨家矿区 > 大仁矿区 > 非矿区. 各区域的风险不可接受比例大小顺序为杨家矿区 > 冷水坑矿区 > 花街矿区 > 大仁矿区 > 非矿区. 非矿区所有土壤样品风险都可接受.

3.2 模型参数敏感性分析

通过计算 3 种暴露途径的风险贡献率可知:经口摄入土壤途径贡献率高达 94.22%,而经皮肤接触吸收与吸入颗粒物两种途径的贡献率基本相同,分别仅占 2.31% 和 3.47%. 由于经口摄入途径贡献率大于 20%,应进行该途径相关参数的敏感性分析,结果如表 4 所示. 由模型参数敏感性比例(SR)可知,3 种模型参数中,BW₀对经口摄入途径危害商的影响最大,其次是 EF₀,影响最小的参数是 SAF.

3.3 土壤风险控制值确定

基于经口摄入土壤途径风险控制值为 663.26 mg·kg⁻¹,基于皮肤接触土壤途径为 27 098.71 mg·kg⁻¹,基于呼吸吸入土壤颗粒物途径为 17 991.33 mg·kg⁻¹,基于 3 种土壤暴露途径综合非

致癌效应为 $624.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最终确定矿区土壤 TF 的风险控制值为 $624.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

表 4 模型参数敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of model parameters					
模型参数名称	模型参数符号	单位	$P_1^{1)}$	$P_2^{2)}$	SR/%
儿童体重	BW_c	kg	15.9	14.4	-110.42
儿童暴露频率	EF_c	$d\cdot a^{-1}$	350	365	100.00
暴露于土壤的参考剂量分配系数	SAF	无量纲	0.2	1	-20.00

1) 数据来自 HJ 25.3-2014; 2) 数据来自 DB 33/T 892-2013

4 3 种评价结果对比分析

对于土壤 TF,不同的评价方法得到的评价结果存在差异,本研究做了单因子指数法(P_i)、地质累积指数法(I_{geo})与健康风险评价法(HI_n)这 3 种评价结果的相关性分析,结果如表 5 所示. P_i 与 I_{geo} 相关系数为 0.804, P_i 与 HI_n 相关系数为 1.000, I_{geo} 与 HI_n 相关系数为 0.805. 3 种评价结果间显著正相关.

表 5 3 种评价结果间的 Pearson 相关系数 ($n=125$)

Table 5 Pearson correlation coefficient among the results of three kinds of evaluation ($n=125$)				
	P_i	I_{geo}	HI_n	
P_i	1			
I_{geo}	0.804 ¹⁾	1		
HI_n	1.000 ¹⁾	0.805 ¹⁾	1	

1) 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

5 结论

(1)土壤 TF 含量远远高于我国土壤(A 层)背景值,也高于浙江省土壤背景值和金衢盆地表层土壤背景值,甚至高于全国地氟病区平均值. 矿区周边土壤已发生严重氟污染. 土壤 WF 含量远高于地氟病发生区平均水平. 供试土壤氟污染受人为因素影响显著.

(2)由 TF 和 WF 的单因子指数法可知:杨家和冷水坑矿区污染最为严重,花街矿区次之,其次是大仁矿区,非矿区土壤氟污染最轻. WF 评价结果更为严重.

(3)由地质累积指数法可知:杨家、花街和冷水坑这 3 个矿区土壤氟污染严重,大仁矿区污染较轻,而非矿区土壤没有受到 TF 污染,但非矿区部分土壤(浙江师范大学校园)受到了 WF 污染.

(4)由健康风险评价法可知:供试土壤主要暴露途径是经口摄入,其贡献率高达 94.22%. 经口摄入危害商平均值大小排序为:花街矿区 > 冷水坑矿区 > 杨家矿区 > 大仁矿区 > 非矿区. 从风险不可接

受比例大小排序,则有杨家矿区 > 花街矿区 > 冷水坑矿区 > 大仁矿区 > 非矿区. 非矿区所有土壤样品风险都可接受. 参数敏感性分析表明儿童体重对危害商的影响最大,确定矿区土壤 TF 的风险控制值为 $624.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(5)3 种评价方法对供试土壤 TF 的评价结果具有极显著正相关.

参考文献:

[1] 鲍荣华,刘伟. 我国萤石资源利用状况及对策研究[J]. 国土资源情报, 2013, (11): 20-24.

[2] 余悦虎,陶建明,潘金德,等. 浙中氟石矿地区耕地土壤-农作物中氟含量分析研究[J]. 农学报, 2013, 3(5): 22-25.

[3] Shan G Q, Wei M C, Zhu L Y, *et al.* Concentration profiles and spatial distribution of perfluoroalkyl substances in an industrial center with condensed fluorochemical facilities [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490(15): 351-359.

[4] Harrison P T C. Fluoride in water: a UK perspective [J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2005, 126(11-12): 1448-1456.

[5] 易春瑶,汪丙国,靳孟贵. 华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3195-3204.

[6] An J, Lee H A, Lee J, *et al.* Fluorine distribution in soil in the vicinity of an accidental spillage of hydrofluoric acid in Korea [J]. Chemosphere, 2015, 119: 577-582.

[7] Wang C, Yang Z F, Chen L X, *et al.* The transfer of fluorine in the soil-wheat system and the principal source of fluorine in wheat under actual field conditions[J]. Field Crops Research, 2012, 137(20): 163-169.

[8] 秦樊鑫,吴迪,黄先飞,等. 高氟病区茶园土壤氟形态及其分布特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2859-2865.

[9] 于群英,李孝良,汪建飞,等. 安徽省土壤氟含量及其赋存特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7): 915-921.

[10] 薛栗尹,李萍,王胜利,等. 干旱区工矿型绿洲城郊农田土壤氟的形态分布特征及其影响因素研究——以白银绿洲为例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2407-2414.

[11] 魏俊岭,郇红建,张自立,等. 亳州中药材及产地土壤和地下水中氟化物含量[J]. 环境化学, 2011, 30(2): 454-458.

[12] 吴卫红,谢正苗,徐建明,等. 不同土壤中氟赋存形态特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 104-108.

[13] 李张伟. 粤东风凰茶区茶叶和土壤氟含量状况调查及影响因素研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1222-1225.

[14] 朱利霞,范俊玲. 河南温县地下水高氟区内土壤中氟的现状评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5780-5781.

[15] 谢正苗, 李静, 徐建明, 等. 基于 GIS 杭嘉湖平原土壤氟的质量评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 1026-1030.

[16] 李静, 谢正苗, 徐建明, 等. 我国氟的土壤健康质量指标及评价方法的初步探讨[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, **31**(5): 593-597.

[17] 陈江, 张英, 沈吉. 湖州表层土壤全氟含量分布及评价[J]. 环境保护科学, 2012, **38**(5): 65-68.

[18] Zhang C, Li Z, Gu M, *et al.* Spatial and vertical distribution and pollution assessment of soil fluorine in a lead-zinc mining area in the Karst region of Guangxi, China [J]. Plant Soil and Environment, 2010, **56**(6): 282-287.

[19] 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 等. 干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1075-1080.

[20] 李绍生. 地质累积指数法在义马矿区土壤重金属及氟污染评价中的应用[J]. 河南科学, 2011, **29**(5): 614-618.

[21] 谭婷. 成都平原土壤重金属及类金属氟砷污染研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004.

[22] Chavoshi E, Afyuni M, Hajabbasi M A, *et al.* Health risk assessment of fluoride exposure in soil, plants, and water at Isfahan, Iran[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2011, **17**(2): 414-430.

[23] 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.

[24] 汪庆华, 董岩翔, 周国华, 等. 浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(2): 81-88.

[25] 乔沙. 茶园土壤氟生物有效性及降氟措施研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.

[26] 王凌霞, 胡红青, 闵艳林, 等. 茶园土壤水溶性氟含量的模拟调控[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(7): 1517-1525.

[27] 郜红建, 金友前, 董艳红, 等. 水溶性有机质对茶园土壤氟形态的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2012, **39**(3): 389-393.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行