

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

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年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素

商靖敏^{1,2}, 罗维^{2*}, 吴光红¹, 徐兰², 高佳佳², 孔佩儒², 毕翔², 程志刚³

(1. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 基于洋河流域土地利用方式、海拔高度、土壤、植被类型等采集流域上下游 171 个代表性表层土壤(0~10 cm), 系统地分析了土壤总硒(Se)含量、分布及影响因素。结果表明, 洋河流域土壤总 Se 含量(以干重(dw)计, 下同)在 0.02~3.24 mg·kg⁻¹ 之间, 几何平均值为 0.30 mg·kg⁻¹, 高于北京平原(0.20 mg·kg⁻¹)、河北平原(0.19 mg·kg⁻¹) 和全国平均值(0.29 mg·kg⁻¹)。洋河流域少 Se(0.13~0.18 mg·kg⁻¹) 土壤主要分布在怀安县、宣化县以及怀来县, 多数地区土壤处于足 Se 水平(0.18~0.45 mg·kg⁻¹), 除此之外, 在万全县、兴和县、天镇县及阳高县分布有富 Se(0.45~2.0 mg·kg⁻¹) 土壤。不同土地利用类型中 Se 含量有所差异, Se 平均含量由高到低分别为: 林地>城镇工用地>草地>农业用地, 其中农业用地平均含量为 0.28 mg·kg⁻¹。成土母质、土壤类型对洋河流域 Se 含量影响较小。黏粒含量与洋河流域表层土壤中 Se 相关性最好。Se 含量随海拔增高显著增加, 随 pH 增加显著减小。TOC、Fe 和 Al 含量也是影响土壤 Se 含量的重要因素。

关键词: 土地利用; 微量元素; Se; 分布; 影响因素

中图分类号: X144; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0301-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.040

Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China

SHANG Jing-min^{1,2}, LUO Wei^{2*}, WU Guang-hong¹, XU Lan², GAO Jia-jia², KONG Pei-ru², BI Xiang², CHENG Zhi-gang³

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, College of Urban and Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Water Resources and Environmental Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on different land use types, altitudes, soil and vegetation types etc, 171 representative topsoils (0-10 cm) were collected within the Yanghe watershed, China for determining the total concentrations, spatial distribution and influencing factors of selenium(Se). The results showed that the total selenium concentrations in soils within the watershed ranged from 0.02 to 3.24 mg·kg⁻¹ dry weight(dw). The geometric mean of Se in soils within the watershed was 0.30 mg·kg⁻¹, which was higher than those in Beijing plain (0.20 mg·kg⁻¹), Hebei plain (0.19 mg·kg⁻¹) and China (0.29 mg·kg⁻¹). Soils which lacked Se (0.13-0.18 mg·kg⁻¹) were mainly distributed in Huaian, Xuanhua, and Huailai counties. Se concentrations in most areas within the watershed were sufficient (0.18-0.45 mg·kg⁻¹). In addition, Wanquan, Xinghe, Tianzhen and Yanggao counties also had some selenium-rich areas. Concentrations of Se were different under different land use types. They were of the following order: forest land > industrial and mining land > grassland > agricultural land. Agricultural land had the lowest concentrations of Se, with a mean concentration of 0.28 mg·kg⁻¹. We also found that parent materials and soil types had no significant effects on soil Se concentrations within the Yanghe Watershed. The results indicated that Se concentrations were positively and significantly correlated with clay contents and altitudes, but negatively and significantly with pH values. Furthermore, TOC, Fe and Al concentrations were also important factors influencing the Se concentrations in soils within the Yanghe Watershed.

Key words: land use; trace element; selenium; distribution; influencing factors

硒(Se)是人体必需的微量元素之一, Se 摄入不足, 会导致人和动物的多种疾病, 如人类的克山病、大骨节病、癌症、婴幼儿猝死及牧畜的白肌病的发病率和死亡率均与缺 Se 有密切关系; Se 摄入过量, 又会对人和动物产生毒害作用, 如人的毛发脱落、指甲变色, 动物的蹒跚病等^[1~4]。人体获取 Se 的主

要来源是食物, 而土壤是食物 Se 的库, 对食品、蔬

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271502, C031001); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB03030504); 科技部科技基础性工作专项(2013FY111100)

作者简介: 商靖敏(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域环境污染与防治, E-mail: shangjingmin@126.com

* 通讯联系人, E-mail: luow@rcees.ac.cn

菜甚至饮用水中 Se 的含量起着决定性的作用^[5~8]。因此,土壤 Se 含量的高低直接影响该地区食物中的 Se 含量,并最终影响人类及动物的健康。我国是大面积缺 Se 的国家,大约有 10 多个省和自治区存在不同程度的缺 Se,缺 Se 区约占国土面积的 72%,因而我国土壤缺 Se 区地方病(如大骨节病、克山病)相当流行^[9]。不同土地利用方式土壤 Se 对生态环境和食品安全甚至人体健康产生不同影响,且缺 Se 区不同土地类型土壤 Se 存在不同的消涨规律,导致一些地方出现了新的病情及潜在风险,因而开展不同土地利用土壤 Se 分布及影响因素的研究具有极为重要的意义。

近年来,对土壤 Se 的研究工作已受到环境和健康学界的高度重视,国内外学者针对不同地区土壤 Se 含量及其分布规律、影响因素展开了研究。张光弟等^[10]对湖北恩施富 Se 土壤的研究表明,控制高 Se 区 Se 元素分布的因素主要有土壤母质、富 Se 生物资源的分布和出露的岩石。章海波等^[11]对香港土壤的研究表明,影响土壤 Se 含量的主要因素是成土母质,土壤 pH 值、黏粒、有机质和 Fe、Al 含量。李杰等^[7]研究了南宁市土壤,得出了影响土壤 Se 的因素主要是土壤类型、成土母质以及土壤 pH、总有机碳(TOC)、全氮(TN)等的结论。Zawislanski 等^[12]研究了美国旧金山湾土壤,发现土壤 Se 含量与有机质、Fe 和 Al 密切相关。Zhu 等^[13]对湖北鱼塘坝土壤研究表明,影响鱼塘坝土壤 Se 含量的因素主要有相对高度与坡度、成土母质、TOC。因此,不同地区土壤 Se 含量及其影响因素具有很大的区域差异性。洋河流域是我国首都北京的重要水源地之一、我国北方典型的农牧交错带和生态脆弱区,流域内的张家口市是 2022 年冬奥会申办地;但是洋河流域也是我国严重缺 Se 地区之一^[14],其中张家口的部分地区是河北省克山病频发的重病区^[15~17],早在 20 世纪六七十年代已引起了社会的高度关注。由于洋河流域独特的地理位置、优良的气候条件,其粮食和蔬菜生产及销售规模较大,是北京、天津等地区的粮食和蔬菜供应基地之一,土壤中 Se 含量可能影响粮食和蔬菜等农作物的 Se 含量,并最终影响人类及动物的健康。目前,除洋河流域张家口市部分地区 Se 导致的克山病引起国内外关注外,流域的发源地、下游区域甚至整个流域土地利用类型对土壤 Se 含量的影响仍未见报道。以往对土壤 Se 的研究多以省市为研究对象,而以流域为对象的研究较少。本文以洋河整个流域为研究单元,探讨流

域内不同土地利用方式、成土母质、土壤类型、海拔、土壤基本理化性质等对土壤 Se 含量的影响及其空间分布,以期改善区域环境质量,防治因生命因素异常而引起的地方性疾病提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洋河发源于内蒙古兴和县和山西省阳高县,在怀安县境内由东洋河、西洋河、南洋河汇成洋河,流经宣化县、怀来县、万全县、张家口市、涿鹿等市县,在怀来县夹河村附近与桑干河汇合,注入官厅水库,是首都重要的水源地和生态保护屏障、也是我国北方典型的农牧交错区。洋河全长 262 km,流域面积 15 078 km²。研究区土地利用方式,主要为草地、耕地、林地和建设用地,耕种的作物主要有玉米、莜麦、小麦、马铃薯、葵花等及各类蔬菜^[18]。

1.2 样品采集与处理

根据土地利用方式、海拔高度、土壤和植被类型等因素,在洋河流域共设置 171 个采样点,其中林地土壤 33 个,草地土壤 20 个,城镇工矿用地土壤 61 个,农田土壤 57 个,采集表层(0~10 cm)土壤样品(图 1),每个代表性土壤样品通过梅花布点法采集 5 个土壤子样混合而成。采集的样品运回北京风干后,剔除样品中的有机残渣、植物根系、石块及其它可见杂质,研磨过 100 目筛,室温避光保存。

1.3 样品分析及数据处理

土壤样品中 Fe、Al 采用盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸电沙浴消煮(0.25 g 土加王水 10 mL,高氯酸、氢氟酸各 1 mL),ICP-OES 测定;Se 采用盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸电沙浴消煮,ICP-MS 测定(方法同上);pH 计电极法测定土壤 pH;土壤质地采用激光粒度分析仪测定;土壤总氮(TN)、总硫(TS)采用元素分析仪测定;TOC 采用测碳仪测定。实验过程中,使用国家标准物质中心提供的土壤成分分析标准样品(GSS-11)对消解过程进行质量控制,分析过程中的重复率为 20%,各种金属元素的回收率分别是:Se 为 90%~105%,Fe 为 95%~108%,Al 为 97%~107%,结果符合质量控制要求^[19]。

统计前对所有数据进行正态分布检验,其中土壤 Se 经自然对数转换后符合正态分布,pH、Fe、Al 和黏粒含量及海拔近似正态分布,TOC、TN、TS 呈非正态分布。土壤样品各指标均值比较采用 *T* 检验。不同土地利用方式、土壤类型及成土母质土壤

Se 含量比较采用单因素方差分析,单因素方差分析中所有方差具有齐性,应用 LSD 法进行均值比较,当显著性水平 $P < 0.05$ 认为均值具有显著差异。采用 ArcGIS 10.0 软件中普通克里格法球状模型拟合和绘制土壤 Se 含量空间分布,模拟的拟合参数分别

为:块金值为 0.43,基台值为 0.60,块金系数为 72%,变程为 17 091 km,预测误差分别是:平均误差为 0,标准化平均误差为 -0.06,平均标准误差为 0.35,均方根误差 0.35,标准化均方根误差 1.1. 数据统计分析采用 SPSS 20.0 和 Excel 软件处理.

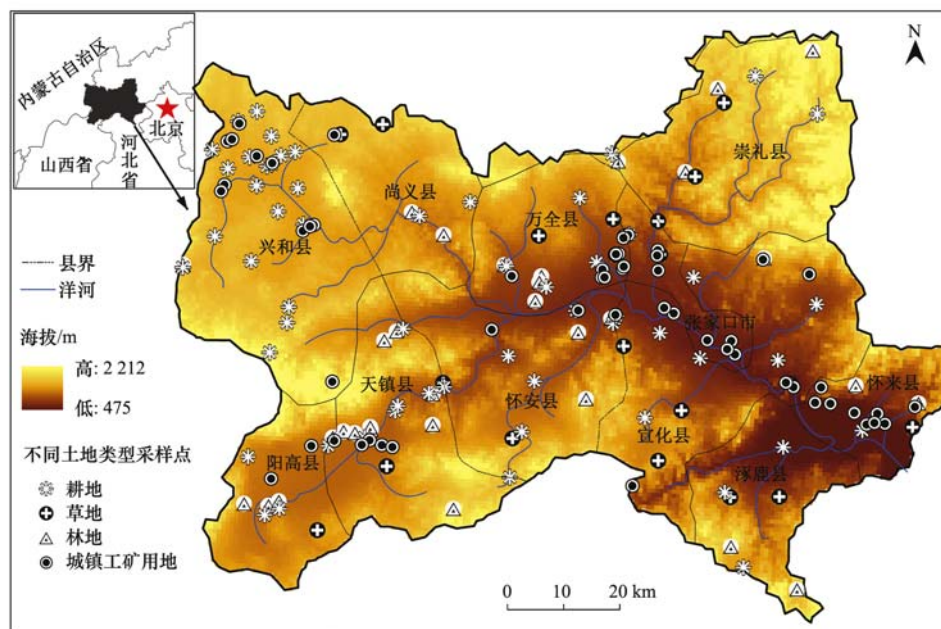


图 1 洋河流域采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites within the Yanghe Watershed, China

2 结果与讨论

2.1 洋河流域不同土地利用类型土壤的基本性质

对采集的 171 个不同土地利用类型的表层土壤样品进行统计,近 3% 的土壤呈酸性,剩余 97% 的土壤呈碱性,土壤有机碳 (TOC) 含量低于全国土壤平均水平 [$21.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,以干重(dw)计,下同] ^[20]. 土壤 Al 含量低于全国土壤背景值 (5.67%) 而 Fe 含量高于全国土壤背景值 (2.94%) ^[21],不同土地利用类型土壤的理化性质有所差别 (表 1).

2.2 洋河流域土壤的 Se 含量

对洋河流域 171 个表层土壤 Se 含量进行统计分析表明: 土壤 Se 含量几何平均值为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最大值为 $3.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位数为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各级含量水平的分布频率基本符合正态分布(图 2), 52% 的样品分布在 $0.18 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。

洋河流域土壤 Se 含量均值高于全国、北京平原、河北平原土壤 Se 的均值,但低于贵州、香港及嘉善地区(表 2),其中 42% 的样品 Se 含量高于全国土壤均值,69% 高于北京平原,71% 高于河北平原

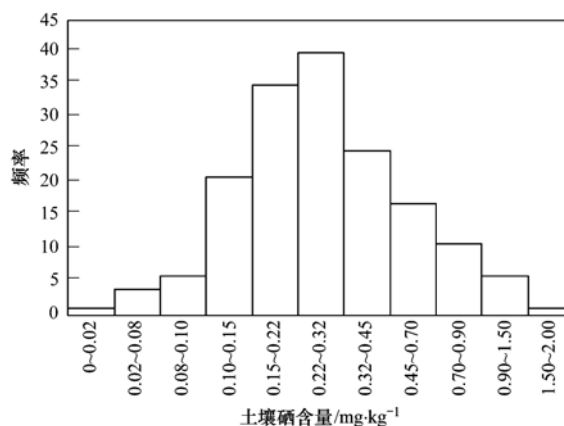


图2 洋河流域土壤 Se 含量频度分布示意

Fig. 2 Frequency distribution of soil Se concentrations in the Yanghe Watershed, China

($P < 0.05$), 与张家口克山病病区土壤 Se 含量相比^[22], 洋河流域土壤 Se 含量偏高.

2.3 不同土地利用方式土壤 Se 含量

土地利用方式对土壤 Se 含量的影响是多方面综合的结果. 洋河流域林地土壤 Se 含量最高, 农业用地最低(表 3), 这可能因为森林生态系统中 Se 转化到有机物中, 并最终在土壤表层累积, 从而导致森

表 1 洋河流域不同土地利用类型土壤的基本性质¹⁾

Table 1 Basic properties of soils under different land use types within the Yanghe Watershed, China

土地利用类型	土壤基本性质	最小值	最大值	均值 ± 标准偏差
耕地	pH(H ₂ O)	6.69	8.42	7.90 ± 0.39
	黏粒/%	2.29	34.40	10.41 ± 6.36
	TOC/mg·kg ⁻¹	43.98	168.45	74.11 ± 25.90 *
	Fe/g·kg ⁻¹	20.17	54.50	35.93 ± 6.88
	Al/g·kg ⁻¹	20.53	62.20	35.90 ± 9.13
	TS/%	0.01	0.15	0.02 ± 0.02 *
	TN/%	0.54	2.90	1.42 ± 0.55 *
草地	pH(H ₂ O)	7.90	8.60	8.32 ± 23.31
	黏粒/%	0.95	23.66	8.24 ± 8.14
	TOC/mg·kg ⁻¹	43.49	145.90	62.54 ± 23.31 *
	Fe/g·kg ⁻¹	20.96	45.33	31.30 ± 5.50
	Al/g·kg ⁻¹	13.96	43.67	31.56 ± 7.57
	TS/%	0.01	0.04	0.02 ± 0.01 *
	TN/%	0.26	2.05	0.83 ± 0.42 *
林地	pH(H ₂ O)	6.97	8.45	8.06 ± 0.33 *
	黏粒/%	0.59	21.65	76.49 ± 6.96
	TOC/mg kg ⁻¹	37.16	300.06	67.54 ± 6.67 *
	Fe/g·kg ⁻¹	22.09	63.23	37.60 ± 6.67 *
	Al/g·kg ⁻¹	22.09	63.23	32.31 ± 8.83 *
	TS/%	0.01	0.02	0.01 ± 0.00
	TN/%	0.43	2.71	1.34 ± 0.57
城镇工矿用地	pH(H ₂ O)	7.03	8.64	7.87 ± 0.32
	黏粒/%	1.17	36.80	13.24 ± 7.68
	TOC/mg·kg ⁻¹	0.99	341.15	76.70 ± 50.02
	Fe/g·kg ⁻¹	20.37	83.27	34.80 ± 9.99 *
	Al/g·kg ⁻¹	19.11	75.67	33.87 ± 9.37 *
	TS/%	0.01	0.95	0.02 ± 0.13 *
	TN/%	0.64	9.18	1.88 ± 1.25 *

1) * 由于数据呈非正态分布,中值代表总体

表 2 洋河流域表层土壤与全国各地土壤 Se 含量的比较¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Comparison of Se concentrations in topsoils within the Yanghe Watershed with those in other regions of China/mg·kg⁻¹

地区	平均值	中位数	变异系数	范围	文献
洋河流域	0.30 *	0.28	92.1	0.02 ~ 3.24	本研究
全国	0.29	0.21	87.9	0.05 ~ 0.99	[22]
北京平原	0.20	0.19	—	0.04 ~ 5.26	[23]
河北平原	0.19	—	26.0	0.05 ~ 0.34	[24]
贵州	0.37	—	59.6	0.06 ~ 1.33	[25]
香港	0.76	0.74	54.8	0.07 ~ 2.26	[9]
嘉善	0.33	—	12.0	0.06 ~ 2.73	[5]

1) * 几何平均值; “—” 文章中没有相关数据

林表层土壤 Se 含量较高;而在农田生态系统中,长期耕作会导致土壤中的 Se 被植物大量消耗,而常规施肥不能补足损失的 Se,从而致使农田土壤中 Se 含量较低^[8]. 作为食物中 Se 主要来源的土壤,Se 含量偏低将会通过影响作物间接影响人类和动物获取 Se 的数量,从而引发由缺 Se 引起的疾病. 洋河流域城镇工矿用地土壤 Se 含量波动范围很大(表 3),这可能由于城镇工矿用地受到较大人类活动影响造成

的^[23~25]. 洋河流域工业和城市化聚集区存在一批以石油和煤为能源的电力、钢铁、冶金等企业,这些企业排放的工业污染物如垃圾、废水等含有很高的 Se^[26],可能会通过直接或间接排入土壤而使土壤 Se 含量增加,另外,石油及煤燃烧排放的废气会导致大气环境中 Se 含量增加,大气沉降落到土壤上,常此以往也可能导致土壤中 Se 含量增加^[27, 28];此外,城镇垃圾堆放及农用、杀虫剂的使用、施用

粉煤灰等人为活动,都可能会增加土壤中 Se 的含量^[27, 29].

表 3 不同土地利用方式下洋河流域
表层土壤的 Se 含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Se concentrations in topsoils under different land
use types in the Yanghe Watershed, China/mg·kg⁻¹

土地利用方式	样本数	平均值	标准差	Se 含量范围
农业用地	57	0.28a	0.31	0.02~0.89
林地	33	0.45b	0.29	0.05~1.24
草地	20	0.36a	0.31	0.06~1.35
城镇工矿用地	61	0.41a	0.44	0.08~3.24

1) 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.4 土壤 Se 的空间分布

根据国内学者的研究成果,将我国土壤中的 Se 按质量分数高低划分为缺 Se 土壤(< 0.13

mg·kg⁻¹),少 Se 土壤(0.13~0.18 mg·kg⁻¹),足 Se 土壤(0.18~0.45 mg·kg⁻¹),富 Se 土壤(0.45~2.0 mg·kg⁻¹),高 Se 土壤(2.0~3.0 mg·kg⁻¹)^[30]. 基于这种划分,对洋河流域表层土壤 Se 的空间插值结果进行分级(图 3),结果表明:洋河流域少 Se 土壤主要分布在怀安县、宣化县以及怀来县,洋河流域多数地区土壤 Se 含量处于足 Se 水平,在万全县、兴和县、天镇县及阳高县分布有富 Se 土壤. 世界范围内土壤 Se 含量分布呈现出明显的地带性差异,我国土壤 Se 含量呈现有规律的地带性分布,本研究也表明洋河流域表层土壤 Se 含量也呈有规律的地带性分布,主要表现为同一地层不同采样点土壤硒含量分布规律,这与土壤对应的基底岩石、土壤类型及地形条件等因素密切相关^[31].

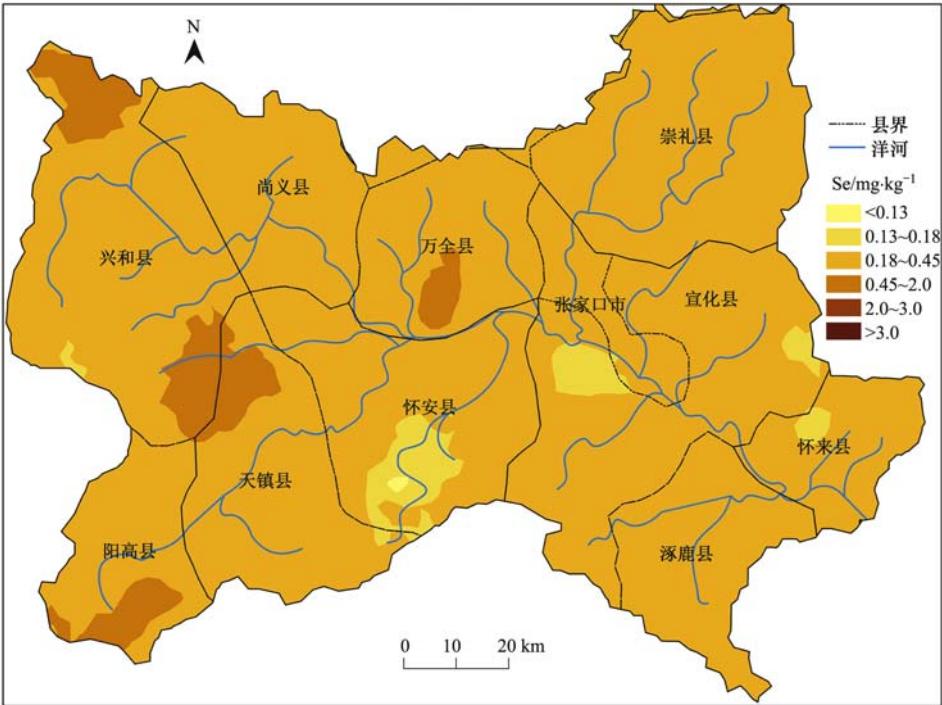


图 3 洋河流域表层土壤 Se 浓度空间分布示意

Fig. 3 Spatial distribution of Se concentrations in topsoils within the Yanghe Watershed, China

2.5 洋河流域土壤 Se 含量影响因素

2.5.1 成土母质的影响

洋河流域主要的成土母质类型是浅色结晶岩风化物、深色结晶盐风化物、碎屑沉积岩及相应变质岩风化物 and 石灰岩及相应变质岩风化物,还有少数洪积物母质. 不同母质对应土壤全 Se 含量由高到低的顺序为:洪积物>浅色结晶岩>碎屑沉积岩>深色结晶盐>石灰岩(表 4). 除洪积物母质全 Se 含量大于研究区平均值外,其余均低于研究区平均值. 成土母质是影响自然土壤 Se 含量的主要因素

之一,而洋河流域不同母质发育的土壤 Se 含量差异性并不显著,这可能是由于采样数量的限制及其他影响因素(如土壤类型、海拔等)共同作用所致.

2.5.2 不同土壤类型 Se 含量

参照全国第二次土壤普查结果的土壤类型分类,将洋河流域的土壤类型分为赤红壤、黑垆土、寒冻土、新积土和栗褐土等,其中以新积土和赤红壤的面积较大. 从表 5 可以看出,赤红壤和新积土的平均硒含量较高,最大值出现在赤红壤中,而黑垆土、寒冻土、栗褐土的 Se 含量均值相等,较前两种

土壤 Se 含量较低,仅赤红壤 Se 含量高于研究区 Se 含量均值,其余类型土壤 Se 含量均低于或等于研究区均值. 洋河流域不同类型土壤 Se 含量同中国主要土壤类型中 Se 含量基本吻合,其中赤红壤由于黏粒含量较高,质地黏重,故硒含量较高,而新积土是流水堆积物上形成的一种初育土,成土时间短,生物作用弱,母质特征明显,其物质组成可能与上游岩石组成有关^[32].

表 4 不同成土母质 Se 含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Selenium concentrations of soils developed from different parent materials/mg·kg⁻¹

母质类型	样本数	平均 Se 含量	Se 含量范围
浅色结晶岩	48	0.29a	0.09 ~ 3.24
深色结晶岩	31	0.26a	0.06 ~ 1.51
石灰岩	47	0.25a	0.02 ~ 0.99
碎屑沉积岩	37	0.27a	0.05 ~ 0.85
洪积物	8	0.59 * a	0.28 ~ 1.35

1) * 代表算数平均值; 相同字母代表差异不显著

表 5 不同土壤类型 Se 含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 5 Selenium concentrations of different soil types/mg·kg⁻¹

土壤类型	样本数	平均硒含量	硒含量范围
赤红壤	44	0.32a	0.09 ~ 3.24
黑垆土	26	0.24a	0.05 ~ 1.51
寒冻土	21	0.24 * a	0.02 ~ 0.85
新积土	75	0.30a	0.71 ~ 1.35
栗褐土	5	0.24a	0.16 ~ 0.42

1) * 代表中值; 相同字母代表差异不显著

2.5.3 海拔对土壤 Se 分布的影响

对采自不同海拔高度的洋河流域表层土壤中的 Se 与对应海拔高度作相关性分析表明(图 4),表层土壤的 Se 含量随着海拔的增高而极显著地增加($P < 0.01$),这与以往的研究结论相一致^[9]. 可能的原因是,随着海拔高度的增加,气温降低,土壤冻结和积雪期较长(例如内蒙兴和县、山西天镇县以及 2022 年冬奥会申办地张家口崇礼县),致使有机物分解缓慢,因而利于土壤中有机复合态 Se 的累积,同时土壤中易被淋溶和植物吸收的 Se 含量减少,最终使土壤 Se 得以富集^[9, 33].

2.5.4 土壤理化性质对土壤 Se 的影响

由洋河流域表层土壤的 Se 含量与土壤 pH、黏粒和 TOC 等土壤理化性质的 Spearman 相关分析表明,土壤 Se 含量与土壤 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$),与土壤黏粒($P < 0.01$)和 TOC($P < 0.01$)的含量呈极显著正相关,与 TN 和 TS 不存在相关性(表 6).

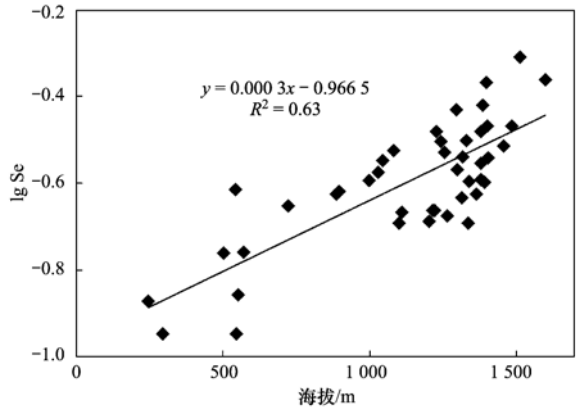


图 4 洋河流域表层土壤 Se 含量与海拔高度的相关性

Fig. 4 Correlation between Se concentrations in topsoils and altitude in the Yanghe Watershed, China

土壤中 Se 的存在形式主要有硒化物、有机硒化物、元素硒、亚硒酸盐和硒酸盐,pH 值是影响 Se 存在形式的主要因素^[34]. 亚硒酸盐广泛存在于酸性和中性条件下,而在通气良好的碱性土壤中,硒酸盐是主要的存在形式,通常情况下,硒酸盐与吸附质的亲和力较弱,更容易迁移淋溶^[35];此外,随着 pH 的增加,土壤 Se 的甲基化也开始加强,甲基化使土壤中的 Se 转移和挥发的可能性增加^[10, 36]. 因而,土壤 pH 越大,其土壤中 Se 含量越小.

土壤中 Se 的各种形态都可以与黏粒形成 Se 的复合体,廖金凤^[37]在研究海南土壤中的 Se 时发现黏粒中的 Se 含量是土壤平均含 Se 量的 4 倍,这表明土壤黏粒对 Se 有吸附和显著的富集作用. 本研究进一步证实了这些论断.

许多研究认为土壤 TOC 对 Se 全量也有显著影响,土壤 Se 含量与 TOC 呈正相关^[5, 12, 24, 38],本研究也证实了此观点. 土壤 TOC 与有机质含量密切相关^[39],而有机质对土壤 Se 的吸附与固定起重要作用. 通常情况下,有机质含量高的土壤,对土壤中 Se 的吸附能力越强,土壤中 Se 含量也相对较高^[40]. 已有的研究认为表层土壤中 80% 以上的 Se 是与土壤有机质相结合的^[41]. 洋河流域土壤全 Se 含量与 TN、TS 不存在相关性,这与李杰等^[7]和蔡子华等^[42]的研究结果不同,由此表明不同区域的地理环境可能导致 Se 在土壤中赋存形态的差异.

2.5.5 土壤 Fe、Al 的作用

洋河土壤中 Se 与 Fe、Al 含量具有显著的线性相关关系($P < 0.05$,图 5). 研究表明^[4, 43],Fe 和 Al 的氧化物对 Se 具有很强的吸附能力,其吸附能

表 6 洋河流域表层土壤 Se 含量与土壤 pH、黏粒和 TOC、TN 和 TS 的相关系数¹⁾

Table 6 Correlation coefficient between Se concentrations, pH, clay content, TOC, TN and

TP in topsoils collected from the Yanghe Watershed, China

	Se	pH(H ₂ O)	黏粒	TOC	TN	TS
Se	1					
pH(H ₂ O)	-0.54 **	1				
黏粒	0.77 **	-0.20 *	1			
TOC	0.55 **	-0.35 **	0.13	1		
TN	-0.09	-0.35 **	0.31 **	0.38 **	1	
TS	0.13	-0.16 **	0.14	0.23 **	0.30 **	1

1) * * 表示显著性水平($P < 0.01$), * 表示显著性水平($P < 0.05$)

力显著大于黏土矿物,其中 Fe 与 Se 的相关性要高于 Al,李杰等^[7]在研究南宁土壤 Se 时也得出了相同的结论;这可能是由于铁铝氧化物对 Se 的亲力和吸附力不同引起.同时,氧化铁吸附 Se 是通过 Se 进入表面配位层产生专性吸附,当对亚硒酸根吸附时,易形成呈稳定六元环结构且属于“双齿”配位的亚硒酸铁复合物,并且能在常见的 pH 范围内产生;氧化铝对 Se 的吸附主要是置换氢氧基,属于“单齿”配位的专性吸附,较易于被解析出来^[10].

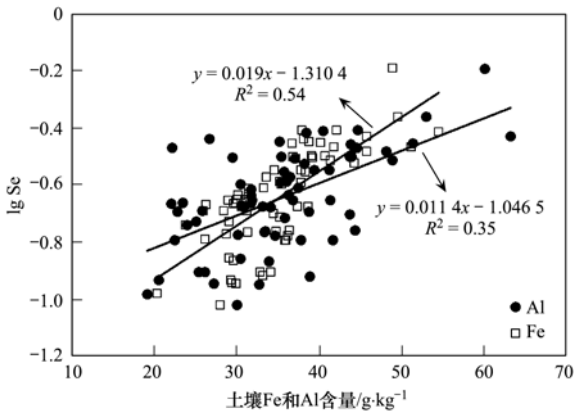


图 5 洋河流域表层土壤 Se 含量与土壤 Al 和 Fe 含量相关性
Fig. 5 Correlation between concentrations of Se and Al or Fe in topsoils collected from the Yanghe Watershed, China

3 结论

(1)洋河流域表层土壤中 Se 的含量在 0.02 ~ 3.24 mg·kg⁻¹之间,几何均值为 0.30 mg·kg⁻¹、且高于全国、北京平原、河北平原土壤 Se 的平均值,但低于贵州、香港及嘉善地区.

(2)洋河流域表层土壤 Se 含量的空间分布不均匀,少 Se 土壤主要分布在怀安县、宣化县以及怀来县,长期食用该区种植的农作物可能会对居民的健康产生影响,洋河流域多数地区土壤 Se 含量处于足 Se 水平,在万全县、兴和县、天镇县及阳高县分布有富 Se 土壤,可以考虑将该区发展为农业基地.

洋河流域土壤 Se 的垂直地理分布较明显,土壤 Se 含量随着海拔的增加而增大.

(3)不同土地利用方式 Se 含量平均值的大小顺序是:林地>工矿用地>草地>农业用地.不同成土母质中,Se 含量由高到低的顺序为:洪积物>浅色结晶岩>碎屑沉积岩>深色结晶盐>石灰岩.不同土壤类型中,赤红壤 Se 含量最高,新积土次之,黑垆土、寒冻土、栗褐土的 Se 含量平均值相等、且为最低.洋河流域表层土壤黏粒含量与土壤 Se 含量相关性最好. Se 含量随 pH 增加而显著减小. TOC、Fe 和 Al 含量也是影响洋河流域土壤 Se 含量的重要因素.

参考文献:

[1] 薛瑞玲,梁东丽,王松山,等. 外源亚硒酸盐和硒酸盐在土壤中的价态转化及其生物有效性[J]. 环境科学, 2011, **32** (6): 1726-1733.

[2] Ellis D R, Salt D E. Plants, selenium and human health[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, **6**(3): 273-279.

[3] Thomson C D. Assessment of requirements for selenium and adequacy of selenium status: a review[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2004, **58**(3): 391-402.

[4] Ben Amara I, Troudi A, Garoui E, et al. Protective effects of selenium on methimazole nephrotoxicity in adult rats and their offspring[J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2011, **63** (6): 553-561.

[5] 胡艳华,王加恩,蔡子华,等. 浙北嘉善地区土壤硒的含量、分布及其影响因素初探[J]. 地质科技情报, 2010, **29**(6): 84-88.

[6] Tan J A, Zhu W Y, Wang W Y, et al. Selenium in soil and endemic diseases in China [J]. Science of the Total Environment, 2002, **284**(1-3): 227-235.

[7] 李杰,杨志强,刘枝刚,等. 南宁市土壤硒分布特征及其影响因素探讨[J]. 土壤学报, 2012, **49**(5): 1012-1020.

[8] Qin H B, Zhu J M, Liang L, et al. The bioavailability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China[J]. Environment International, 2013, **52**: 66-74.

[9] Yu T, Yang Z F, Lv Y Y, et al. The origin and geochemical

- cycle of soil selenium in a Se-rich area of China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 97-108.
- [10] 张光弟, 葛晓立, 张绮玲, 等. 湖北恩施硒中毒区土壤硒的分布及其控制因素[J]. *中国地质*, 2001, **28**(9): 36-40.
- [11] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(3): 404-410.
- [12] Zawislanski P T, Mountford H S, Gabet E J, *et al.* Selenium distribution and fluxes in intertidal wetlands, San Francisco Bay, California[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(3): 1080-1091.
- [13] Zhu J M, Zheng B S. Distribution of selenium in a mini-landscape of Yutangba, Enshi, Hubei Province, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1333-1344.
- [14] 李艳慧, 李恋卿, 潘根兴, 等. 江苏宜兴地区农田土壤硒含量变异及其影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, **22**(3): 61-64.
- [15] 刘建明, 黄夏青, 刘振业. 张家口市崇礼县克山病病情调查报告[J]. *河北医药*, 2010, **32**(7): 868-869.
- [16] 马东瑞, 杜永贵, 贾丽辉, 等. 2006 年河北省张北县克山病监测点监测结果分析[J]. *河北医药*, 2010, **32**(7): 869-871.
- [17] 梁占魁, 王元, 张惠英, 等. 张家口地区克山病病情现状与分析[J]. *地方病通报*, 1992, **7**(4): 10-12.
- [18] 马振刚. 基于遥感技术的洋河流域土地覆被变化特征分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2008. 1-49.
- [19] HJ/T 166-2004, 土壤环境检测技术规范[S].
- [20] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. *土壤学报*, 2009, **46**(5): 851-860.
- [21] 王云. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [22] 葛晓立, 李家熙, 万国江, 等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. *岩矿测试*, 2000, **19**(4): 254-258.
- [23] 郭莉, 杨忠芳, 阮起和, 等. 北京市平原区土壤中硒的含量和分布[J]. *现代地质*, 2012, **26**(5): 859-864.
- [24] 李振宁. 河北省平原区土壤中硒异常源追踪及生态效应评价[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2010. 1-71.
- [25] 何亚琳. 贵州省土壤含硒量及其分布[J]. *土壤学报*, 1996, **33**(4): 391-397.
- [26] Huang S S, Hua M, Feng J S, *et al.* Assessment of selenium pollution in agricultural soils in the Xuzhou District, Northwest Jiangsu, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(4): 481-487.
- [27] Perkins W T. Extreme selenium and tellurium contamination in soils —An eighty year-old industrial legacy surrounding a Ni refinery in the Swansea Valley [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **412-413**: 162-169.
- [28] De Temmerman L, Waegeneers N, Thiry C, *et al.* Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 77-82.
- [29] 杨兰芳. 土壤中的硒[J]. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2000, **18**(1): 43-46.
- [30] 谭见安. 环境生命元素与克山病[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1996.
- [31] 全双梅, 连国奇, 秦趣, 等. 贵州省开阳县土壤硒含量及其制约因素研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2013, **48**(2): 105-109.
- [32] 王世纪, 吴小勇, 刘军保. 浙北地区土壤硒元素特征及其生态环境效应评价[J]. *中国地质*, 2004, **31**(S1): 118-125.
- [33] 侯少范, 李德珠, 王丽珍, 等. 暖温带地理景观中土壤硒的分异特征[J]. *地理学报*, 1992, **47**(1): 31-39.
- [34] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, **22**(1): 75-81.
- [35] 王莹. 硒的土壤地球化学特征[J]. *现代农业科技*, 2008, (17): 233-236.
- [36] Jayaweera G R, Biggar J W. Role of redox potential in chemical transformations of selenium in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(4): 1056-1063.
- [37] 廖金凤. 海南省土壤中的硒[J]. *地域研究与开发*, 1998, **17**(2): 66-69.
- [38] Shand C A, Balsam M, Hillier S J, *et al.* Aqua regia extractable selenium concentrations of some Scottish topsoils measured by ICP-MS and the relationship with mineral and organic soil components[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, **90**(6): 972-980.
- [39] Wu G H, Shang J M, Pan L, *et al.* Heavy metals in surface sediments from nine estuaries along the coast of Bohai Bay, Northern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **82**(1-2): 194-200.
- [40] 黄春雷, 宋明义, 魏迎春. 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4405-4410.
- [41] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(10): 1197-1203.
- [42] 蔡子华, 宋明义, 胡艳华, 等. 湖沼相富硒土壤的发现及其生态学意义[J]. *物探与化探*, 2011, **35**(2): 248-253.
- [43] Tolu J, Thiry Y, Bueno M, *et al.* Distribution and speciation of ambient selenium in contrasted soils, from mineral to organic rich [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **479-479**: 93-101.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenruiang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 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. 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