

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离

徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文

(浙江省地质调查院, 杭州 311203)

摘要: 明确硒元素含量不同来源组分(自然背景组分和外源输入组分)贡献率是评价富硒土地资源是否具有可持续利用性的前提。以嘉兴市秀洲区富硒土地资源区为研究区域,通过地学分析和多元统计交互验证,将该区域土壤硒来源定性分离为自然背景组分和含外源输入组分,并采用频数分布函数为工具,对硒含量不同来源组分的贡献率进行定量分离。结果表明,秀洲区富硒土地硒含量来源自然背景组分的贡献率占90%,外源输入组分占10%,表明秀洲区富硒土地资源具有可持续开发利用的潜力。

关键词: 富硒土壤; 来源分析; 定量分离; 频数分布函数; 浙北平原

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2775-07

Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain

XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, MA Xue-wen

(Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China)

Abstract: To clarify the contribution of different component of selenium is the basis for evaluation of the sustainable development and utilization of selenium-rich soil. Xiuzhou district, where the soil is rich in selenium, was chosen as the study area, and its soil selenium content was qualitatively separated as the natural background component and the exogenous component through cross-validation of integrated geo-analysis and multivariate statistics. Subsequently, the contribution rate of the different component of the selenium content was separated quantitatively using frequency distribution functions. The results showed that the natural background component accounted for 90% in the soil selenium content and the exogenous component accounted for 10%, which indicated that the land sources rich in selenium in Xiuzhou district has the potential for sustainable development and utilization.

Key words: selenium-rich soil; source identification; quantitative partitioning; frequency distribution function; plain in Northern Zhejiang Province

硒是分散元素,因性质相似,在地壳中,一般和金属硫化物伴生,岩石中的硒不能被作物吸收。经过风化、物理、化学、微生物等作用,岩石中的硒被转化成氧化物,被冲刷进土壤,以各种形态存在于其中。土壤硒元素含量总体上受成土母质和植物富集作用的控制,如浙江长兴县地区发育于龙潭组含煤地层的高硒土壤^[1],但在不同空间尺度上其来源却大相径庭,即主要控制因素存在显著差异。在国家尺度层面,土壤硒元素来源可能主要受成土过程的影响,例如我国主要岩石硒元素含量仅为 $0.058 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而我国主要土壤类型硒含量均值却高达 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明岩石风化成土过程中,硒元素含量趋向相对累积。在省域层面上,土壤硒含量可以主要受基岩含硒量的制约,如由基底岩石原地风化形成的贵州省土壤^[2],也可能受大气降尘改变表生环境中硒的迁移循环过程的影响,如浙江省的表层土壤^[3]。而不合理的人类活动,如未能因地制宜的土地耕作方式加剧富硒碳质岩石中硒元素的释放,

导致湖北渔塘坝地区的硒中毒风险的增加^[4];嵊州含硒量很低的晶屑凝灰岩母质上发育的山地黄泥土,在科学种植良好草被影响下而具有较高的硒含量,而发育于硒含量较高的紫砂岩上的土壤,由于缺乏植被的养护,长期受冲刷,其硒含量反而较低^[5]。

总之,土壤中的硒有两种主要来源:一是成土母质^[6],二是人为来源^[7,8],目前的研究多仅限于对两者的定性分析,缺乏定量分离。秀洲地区几乎无基岩出露,更无高硒岩层,如页岩及煤层分布,距此地最近的高硒岩层主要为出露于浙江长兴与安吉等地的黑色页岩和含煤地层^[9]。本研究对秀洲区富硒土壤硒来源进行定量分离,以明晰其主要归因于成土母质,或依赖于外源输入,关系到该区富硒土地资源后续的持续开发与利用。

收稿日期: 2012-10-22; 修订日期: 2013-01-18

基金项目: 嘉兴市秀洲区富硒土地资源调查项目

作者简介: 徐明星(1983~),男,博士,工程师,主要研究方向为土壤资源与环境, E-mail: xumingxing535005@163.com

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析测试

研究区位于嘉兴市秀洲区,面积约 80 km²,该区地势低平,水网发育,水稻土和潮土是主要的土壤类型. 表层(0~20 cm)土壤样品采集,按自然田块进行布设,样品密度为每 30~50 亩 1 件,采集样品 1 295 件;测制土壤剖面 12 条,按土壤发生层采集样品 33 件(图 1).

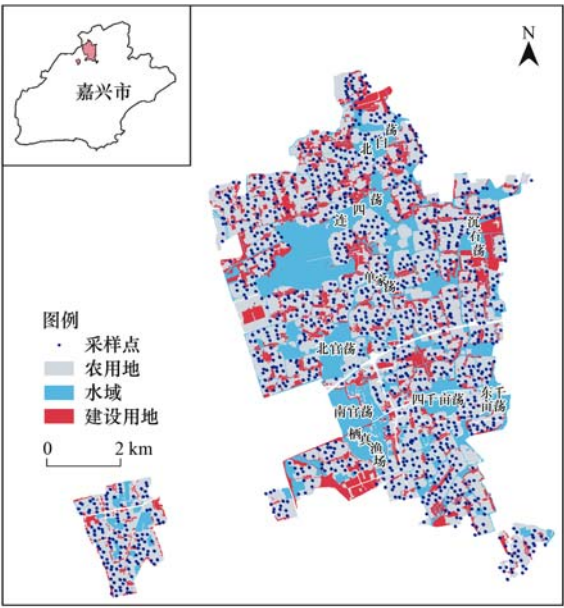


图 1 研究区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

样品由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心完成. Se 和 Hg 采用原子荧光光谱法(AFS)测定, Cd、Pb、Ni 采用等离子质谱法(ICP-MS)测定,有机碳和 pH 分别采用氧化还原容量法和 pH 计电极法

(ISE)测定. Se 的形态分析采用七态提取法:以水为提取剂提取水溶态,以氯化镁为提取剂提取离子交换态,以醋酸-醋酸钠为提取剂提取碳酸盐结合态,以焦磷酸为提取剂提取弱有机结合态(腐殖质态),以盐酸羟胺为提取剂提取铁锰结合态,以过氧化氢为提取剂提取强有机质结合态,以氢氟酸为提取剂提取残渣态.

1.2 数据处理

实验数据的统计分析采用统计分析软件 SPSS 16.0 完成,相关性分析通过 Pearson 双侧显著检验法完成,组分来源拟合效果采用 *F* 显著性检验. 样品空间分布图由 Arcgis 9.3 制作完成,其他插图由 Origin 7.5 制作完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤地球化学统计特征

由表 1 可见,秀洲区表层土壤 Hg 和 Cd 元素含量显著高于嘉兴市土壤元素背景值,且具有较大的变异系数,分别为 0.59 和 0.54,表明两元素含量在空间分布上具有较大的变异性; Pb 和 Ni 元素含量则与其背景值较为接近,变异系数均较小,分别为 0.15 和 0.10,表明两元素含量在空间分布上具有较小的变程;就全硒和有效硒含量而言,两者的变异系数介于上述两类变异程度之间,分别为 0.20 和 0.27. 同一地区不同元素含量在空间上变异程度差异可能受多种因素影响,包括外源物质的输入.

对全硒含量而言,与土壤有机碳之间显著($P < 0.01$)相关(图 2),说明 Se 在表层土壤中的富集与含碳物质关系密切,而土壤中有机质是碳元素最大的载体,对 Se 元素具有强烈的吸附与固定作用,与嘉善 Se 元素的表生富集现象相吻合^[10,11].

表 1 秀洲区土壤理化性质描述性统计表($n=1\,295$)

Table 1 Descriptive statistics of soil physicochemical properties in Xiuzhou district ($n=1\,295$)

项目	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差 (SD)	变异系数 (CV)	背景值 ^[12] /mg·kg ⁻¹
Hg	0.05	1.65	0.28	0.16	0.59	0.16
Se	0.07	1.34	0.43	0.08	0.20	0.28
Cd	0.07	2.28	0.21	0.11	0.54	0.15
Pb	19.70	94.40	33.41	5.00	0.15	29.7
Ni	20.50	49.40	36.13	3.56	0.10	34.5
浸提性 Se	0.00	0.05	0.02	0.00	0.27	/
有机碳	0.13	5.55	2.58	0.61	0.23	/

有研究指出,有机结合态硒是土壤中硒的主要存在形态^[13],但也有土壤中硒以残渣态为主的报道^[14]. 与上述研究结果相一致,土壤各形态硒含量

在秀洲区 12 个剖面表层土壤样品中具有相对稳定的分布模式(图 3),其中强有机态是硒元素的主要赋存形态,其次为残渣态,再次为腐殖酸态,其他各

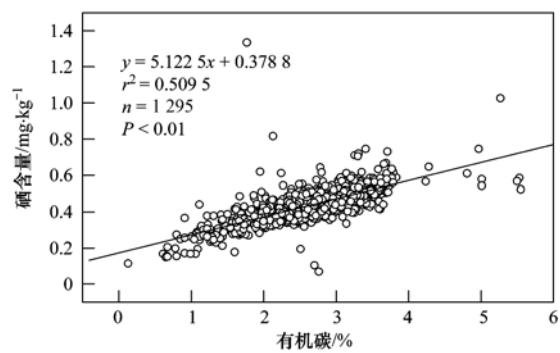


图2 Se与有机碳含量之间的相关性

Fig. 2 Correlation between soil organic carbon content and selenium content

形态含量较低.

对各形态硒含量进行相关分析(表2),强有机质态、腐殖质态、碳酸盐态和残渣态之间相关显著,但与水溶态、离子交换态和铁锰氧化态之间无显著相关. 结果与王松山等^[15]对我国15类土壤硒元素形态与土壤理化性质之间的相关研究相一致,与方金梅^[16]对福州214个土壤样品形态分析的结果亦相似.

秀洲区地势较低,地下水位较高,水系发达,较易接受物质,特别是可溶性物质,故硒常趋向积聚,加之农耕历史悠久,土壤熟化程度高,尤其是北部典

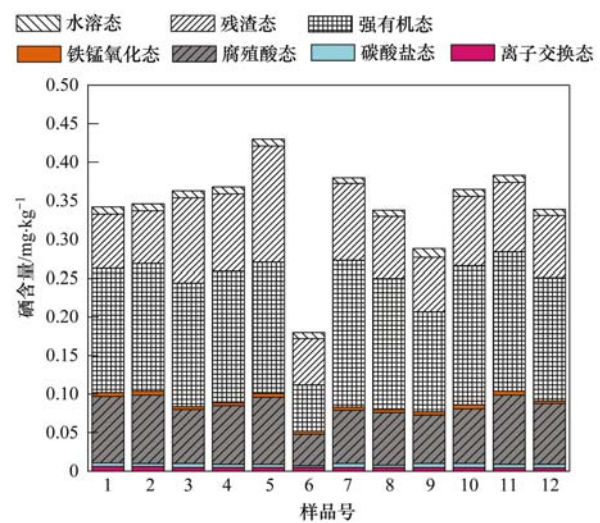


图3 土壤各形态硒含量分布

Fig. 3 Distribution of soil selenium species

型湖沼相沉积环境,有机质含量较丰富. 由于有机质对硒具有较强的吸附能力,加之秀洲所在浙北地区具有较高硒含量成土母质($0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和地球化学背景值($0.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[10],有机质吸附作用对富硒土壤的形成起了至关重要的作用. 综合上述分析表明,调查区富硒土壤形成主要是成土母质、地形和有机质综合作用的结果.

表2 土壤各形态硒含量相关系数¹⁾(n=12)

Table 2 Correlation between different soil selenium species (n=12)

	水溶态	离子交换态	碳酸盐态	腐殖酸态	铁锰氧化态	强有机态	残渣态
水溶态	1	0.156	0.287	0.151	0.289	-0.099	-0.050
离子交换态		1	-0.153	0.065	0.463	-0.062	-0.197
碳酸盐态			1	0.543	0.094	0.645 *	0.204
腐殖酸态				1	0.479	0.750 **	0.354
铁锰氧化态					1	0.261	0.183
强有机态						1	0.472
残渣态							1

1) * 和 ** 分别代表在 0.05 和 0.01 的置信水平下显著相关,下同

2.2 富硒土壤硒含量来源定性探讨

2.2.1 地质环境与硒的富集

岩石中硒的含量是土壤和植物硒的主要来源,全球范围内,许多学者已经公布了岩石中硒元素浓度的相关数据^[17~20]. 花岗岩和片麻岩中的硒元素含量较低,而在黑色页岩和磷酸盐岩中的含量相对较高. 李家熙等^[21]认为高硒土壤主要继承富硒岩石和煤层,页岩的硒含量通常较高,是高硒土壤形成的重要条件,在韩国的黑色页岩覆盖区土壤硒元素含量就具有相对高值^[22]. 我国恩施地区的高硒土壤则主要继承了碳质页岩富硒特征^[4]. 王美珠

等^[23]对我国部分地区高硒低硒土壤的原因作了初步探讨,认为母质(母岩)类型是导致土壤含硒量高低的主要原因,生物、气候、地形等对土壤含硒量的消长也起着一定作用.

长江三角洲表层土壤硒含量与深层土壤硒含量之间具有很好的对应性^[24],即深层土壤具有较高硒含量的地区,表层土壤亦具有较高的硒含量,在一定程度上说明长三角表层土壤硒含量受成土母质的控制. 秀洲位于长江三角洲冲积平原,该区表层土壤硒元素具有相对较高的地球化学背景,与其深层土壤之间亦具有较好的对应关系,表明秀洲区表层土

壤富硒在极大程度上仍来源于成土母质.

2.2.2 表生地球化学作用与硒的富集

(1) 硒元素含量的垂向分布

已有大量研究报道了硒含量在土壤剖面中的分布模式,例如土壤硒含量随深度的增加而增加^[25,26],0.6~0.9 m 深度处土体全硒和水溶态硒含量要显著高于表层 0.3 m 的土体^[25]. 章海波等^[27]基于 51 个土壤剖面的研究指出,香港地区硒主要分布在心土层和底土层. 王美珠等^[23]系统总结我国主要土壤类型硒含量的垂向分布:①上高下低,生物积累>淋溶作用;②上低下高,生物积累<淋溶作用;③上下相近,生物积累=淋溶作用. 王莹^[28]把硒的剖面分布特点归纳为:①表聚型,即随着土壤深度的增加而降低;②心土层聚集类,这类土壤由于心土层有黏粒或铁氧化物等聚集,从而与硒结合发生聚集;③均匀分布类;④随土壤深度的增加而增加的分布类型.

在秀洲区布设的 12 个土壤剖面,深度介于 0.3~1.0 m 之间,按照土壤发生层取样,12 个剖面硒含量随深度变化如图 4. 土体剖面硒元素含量的分布模式几乎均表现为线性表聚型,即从表层到深部硒含量逐渐降低,未出现突变,一定程度上反映秀洲区土壤硒含量并未显著受到外源输入的影响,可能主要还是由成土母质造成. 这与嘉善地区土体深度在

1 m 范围内的硒元素含量变化保持一致^[10],一般认为土壤硒的表聚性与土壤表层富含腐殖质等有机物质有关.

(2) 多元统计分析对硒来源的定性指示

在长期的自然和人类活动影响下,土壤元素发生了迁移、分散和富集作用,一些地球化学性质相似的元素呈现有规律的组合,呈现良好的共同消长的关系和较好的相关性、聚集性. 研究客观事物中多变量间的相互依赖统计规律性可采用多元统计方法,利用该方法指示元素组合特征及分布规律,可以帮助解释推断异常的成因,从而达到区分外源输入和自然来源(成土母质)的目的. 考虑到全区表层样本量较大,不符合统计学的最佳统计样本数,故本研究将秀洲区划分为 1 km×1 km 的网格(共计 104 个),对网格内部的土壤元素含量进行几何平均后,采用多元统计方法进行硒来源的探讨.

1) 主成分分析

综合土壤学知识,主成分分析已被广泛应用于土壤微量元素来源的判别中^[29,30]. 经主成分分析后,秀洲地区硒和其他元素含量可由 2 个主成分解释,占 69.39%,矩阵经旋转后方差占有率保持不变. 第一主成分(PC1)占方差的 40.87%,包括 Hg、Pb 和 Ni,第二主成分(PC2)占方差的 28.51%,包括 Se 和 Cd(表 3).

本研究定义 PC1 为自然组分,因为该成分中微量元素的迁移和行为主要是由成土母岩控制. 此外,Pb 和 Ni 元素含量较接近背景值,符合自然来源微量元素含量低于人为来源含量的特征. 定义 PC2 为含外源输入组分,结合 Se 和 Cd 元素含量高于其环境背景值的特征(表 1),Se 和 Cd 元素含量可能受到人类活动等诸多外源输入的一定影响.

2) 聚类分析

聚类分析的结果(图 5)验证了主成分分析的原理. 结果显示两组元素:第一组包括 Hg、Pb 和 Ni 元素,表明它们之间具有较好的相关性,第二组包括

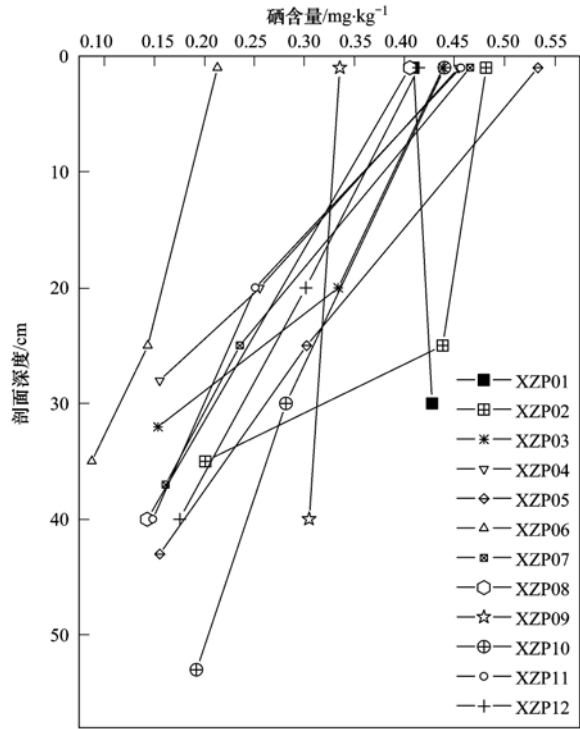


图 4 秀洲区土壤剖面硒含量随深度变化曲线

Fig. 4 Vertical distribution of soil selenium in Xiuzhou district

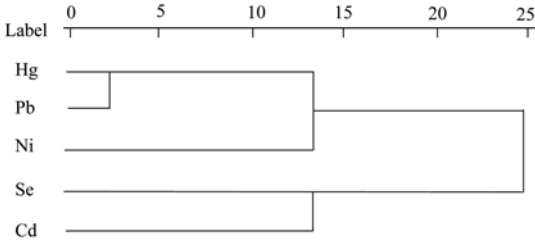


图 5 硒与其它重金属含量的聚类分析图

Fig. 5 Dendrogram of cluster analysis for contents of selenium and other heavy metals in soil

Se 和 Cd 元素. 基于先前的主成分分析讨论, 聚类结果再次验证了 Hg、Pb 和 Ni 元素主要受成土母质的控制和影响, Se 和 Cd 元素含量存在一定的外源输入.

表 3 硒与其它重金属元素含量的主成分分析表

Table 3 Principal component analysis for contents of selenium and other heavy metals						
主成分	初始特征值			旋转主成分荷载		
	特征值	解释方差/%	累积贡献率/%	特征值	解释方差	累积贡献率/%
1	2.04	40.88	40.88	2.04	40.87	40.87
2	1.42	28.49	69.37	1.43	28.51	69.37
3	0.83	16.66	86.03			
4	0.55	10.91	96.94			
5	0.15	3.06	100.00			

元素	主成分矩阵		旋转矩阵	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Hg	0.72	-0.55	0.70	-0.57
Cd	0.49	0.64	0.51	0.63
Pb	0.94	0.02	0.94	-0.01
Ni	0.63	0.18	0.64	0.15
Se	-0.06	0.82	-0.03	0.83

3) 相关分析

采用皮尔逊相关分析 (Pearson correlation) 来探讨硒元素含量与其它重金属含量之间的相关关系. 由表 4 可见, 硒元素与 Hg、Cd、Pb 和 Ni 元素之间均显著 ($P < 0.05$) 相关, 特别是与 Cd 元素的相关性较强, 主要归因于上述元素 (Ni 除外) 主要为亲硫元素, 具有较为相近的元素地球化学特征.

表 4 表层土壤硒含量与其它重金属含量相关性列表

Table 4 Correlation between contents of selenium and other heavy metals in soil					
元素	Hg	Se	Cd	Pb	Ni
Se	-0.054 *	1	0.296 **	0.093 **	0.060 *

2.3 外源输入对土壤硒贡献的定量分离

通常认为自然背景下具有同一成土母质的土壤, 其微量元素含量一般呈正态或对数正态分布^[31], 但外源输入的影响, 不同来源微量元素的富集, 使其频数密度函数呈偏态分布. 空间上每点元素的含量可以看作自然背景叠加人类活动排放等外源输入的结果, 不同组分有其自身的统计特征, 因此微量元素含量的频数分布特征可以分解为不同来源组分频数密度函数的线性组合^[32]. 假设秀洲区土壤硒含量有 i 个来源, f_i 代表第 i 个组分的原型分布函数, $p_i(a_i, b_i)$ 为第 i 个来源组分的理论频数分布, a_i 和 b_i 代表它的原型函数参数, p_i 为比重系数, 代表不同组分在总体分布中的比重. 秀洲区硒元素含量的整体分布特征 $[f(p, a, b)]$ 可以表示为^[33]:

$$f(p, a, b) = p_1f_1(a_1, b_1) + p_2f_2(a_2, b_2) + \dots + p_i(a_i, b_i) \tag{1}$$

不同组分需要选择适宜的分布类型. 正态分布是元素含量分布函数中的常见类型. 以正态分布的概率密度函数作为不同来源组分分布函数的原函数:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

对实测数据进行频数分布分析后, 以各组段硒元素含量最小值为自变量 x_i , 以“频数/组距”为因变量 y_i , 根据式 (1) 和 (2), 用最小二乘法计算各待定参数, 分离不同组分来源的贡献率. 各组分来源贡献率可表达为:

$$\text{Contr}(i, x_i) = \frac{p_i f_i(x_i, a_i, b_i)}{f(x_i, a, b)} \tag{3}$$

式中, $\text{Contr}(i, x_i)$ 为样品中硒含量为 x_i 的贡献率, p_i 、 $f(x, a, b)$ 、 $f_i(x, p_i, a_i, b_i)$ 含义与式 (1) 相同.

因为具有同一来源呈正态分布元素含量的概率累积呈直线, 初步判定秀洲区硒元素含量具有 3 个来源组分 (图 6), 但组分 A 与组分 B 之间虽然存在拐点, 但与直线偏离幅度并不大, 可能因为秀洲区北部成土母质为湖相沉积, 而南部偏冲积沉积, 两个组分来源仍然属于自然来源组分; 组分 C 则为来源于人类活动及大气沉降等的外源输入组分.

根据最小二乘法拟合, 分离出 Se 元素的不同组分来源. 分离结果的 R^2 接近 1.0, 通过显著性检验, 拟合效果很好, 拟合参数见表 5, 其中硒元素外源输入组分 C 的平均含量为 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分离效果见图 7.

根据正态分布函数的含义, μ 代表样本均值, σ 代表样本标准差. 比重系数 p 显示 (表 5), 秀洲区

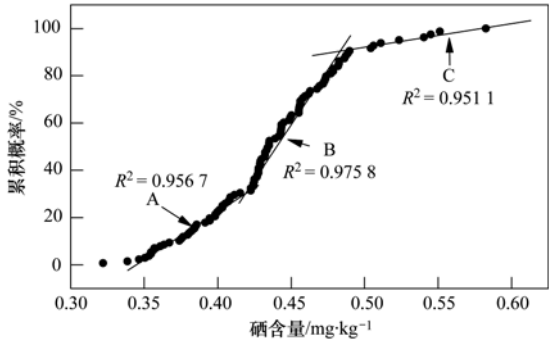


图 6 硒含量的概率累积分布

Fig. 6 Probability cumulative curves of selenium content

Se 元素含量存在一定的外源输入组分,但贡献率较小,仅为 0.1,结合前述该区地质地貌环境,表明秀洲区土壤富硒成因主要归因于成土母质较高的硒含量,通过多元统计方法的交互验证,以及频数分布含

量的分离,该区表层土壤硒含量的外源输入仅占 10%,表明该区的富硒土壤资源具有可持续开发利用的潜力.

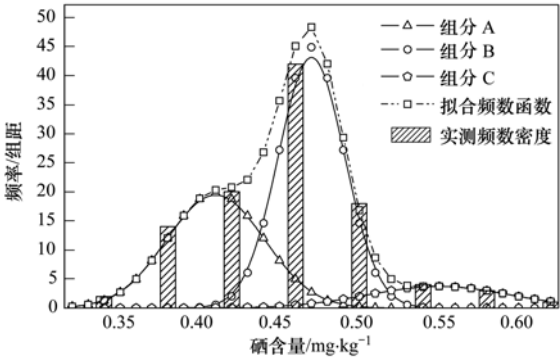


图 7 硒元素不同来源组分频数密度函数的分离

Fig. 7 Separation of the frequency function of selenium components from different sources

表 5 硒元素不同组分来源参数拟合结果

Table 5 Fitting parameters for the separation of the selenium components with different sources

拟合参数	组分 A			组分 B			组分 C		
	p	μ	σ	p	μ	σ	p	μ	σ
硒	0.36	0.41	0.06	0.54	0.47	0.04	0.10	0.55	0.09

3 结论

(1)在地学分析和多元统计交互验证定性分析硒元素来源的基础上,以频数分布函数为工具的变量分离方法,能够为进一步有效分离硒元素来源组分的贡献率提供支撑.

(2)秀洲区土壤硒含量 90% 来自成土母质的贡献,10% 来自于人类活动、大气沉降等外源输入,表明该地区富硒土壤具有可持续发开利用的潜力.

(3)利用统计方法研究人为活动的影响分量可能存在一定不确定性,特别是本研究分析测试的土壤元素种类较少,多元统计结果的说服力相对较差,还需进一步深入的研究. 将来需结合大气沉降通量动态监测,以求更加精准研究人为活动对土壤硒含量的贡献.

参考文献:

[1] 龚淑英, 郭新荣, 徐平, 等. 浙江省长兴县富硒资源区及富硒农产品的调研[J]. 茶叶, 2010, 36(4): 221-231.
[2] 王甘露, 朱笑青. 贵州省土壤硒的背景值研究[J]. 环境科学, 2003, 16(1): 23-26.
[3] 郦逸根, 董岩翔, 郑洁, 等. 浙江富硒土壤资源调查与评价[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 323-330.
[4] 朱建明, 左维, 秦海波, 等. 恩施硒中毒区土壤高硒的成因: 自然硒的证据[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 397-400.
[5] 何振立, 章明奎, 黄昌勇, 等. 嵊县几种主要土壤硒的状况

及有效度评价[J]. 生态学报, 1994, 14(1): 51-56.
[6] Malisa E P. The behaviour of selenium in geological processes [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2001, 23(2): 137-158.
[7] Zhu J M, Wang N, Li S H, et al. Distribution and transport of selenium in Yutangba, China; Impact of human activities [J]. Science of the Total Environment, 2008, 392(2-3): 252-261.
[8] Lim T T, Goh K H. Selenium extractability from a contaminated fine soil fraction; Implication on soil cleanup [J]. Chemosphere, 2005, 58(1): 91-101.
[9] 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.
[10] 蔡子华, 宋明义, 胡艳华. 嘉善县富硒土壤资源调查研究报告[R]. 杭州: 浙江省地质调查院, 2009.
[11] 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.
[12] 董岩翔, 郑文, 周建华. 浙江省土壤地球化学背景值[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
[13] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 上海不同地区土壤中硒的形态分布及其有效性研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 398-403.
[14] Sharmasarkar S, Vance G F. Fractional partitioning for assessing solid-phase speciation and geochemical transformation of soil selenium[J]. Soil Science, 1995, 160(1): 43-55.
[15] 王松山, 梁东丽, 魏威, 等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823-830.
[16] 方金梅. 福州市土壤硒形态分析及其迁移富集规律[J]. 岩

- 矿测试, 2008, **27**(2): 103-107.
- [17] Gamboa-Lewis B A. Carbon, nitrogen, phosphorous, sulfur and selenium cycles [A]. In: Nriagu J O (Ed.). *Environmental Biogeochemistry* [M]. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1976. 389-409.
- [18] Swaine D J. Selenium: from magma to man [A]. In: Hemphill D D (Ed.). *Trace substances in environmental health* [M]. Missouri: University of Missouri Press, 1978. 129-134.
- [19] Bowen H J M. *Environmental chemistry of the elements* [M]. London: Academic Press, 1979. 333.
- [20] Adriano D C. *Trace elements in the terrestrial environment* [M]. New York: Springer-Verlag, 1986. 533.
- [21] 李家熙, 黄怀曾, 刘晓瑞. 环境地球化学在农业和生命科学上的应用研究[J]. 第四纪研究, 1999, **19**(3): 224-230.
- [22] Parka M, Chon H T, Marton L. Mobility and accumulation of selenium and its relationship with other heavy metals in the system rocks/soils-crops in areas covered by black shale in Korea [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, **107**(2): 161-168.
- [23] 王美珠, 章明奎. 我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J]. 浙江农业大学学报(农业与生命科学版), 1996, **22**(1): 89-93.
- [24] 南京地质调查中心. 长江三角洲地区多目标区域地球化学调查报告[R]. 南京: 南京地质调查中心, 2009.
- [25] Girling C A. Selenium in agriculture and the environment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1984, **11**(1): 37-65.
- [26] Skinner C P, Vance G F. Soil-geology selenium relationships in disturbed and native ecosystems [A]. In: Barnhisel R, Buchanan B (Eds.). *Land reclamation-a different approach*, vol 18 [M]. Lexington: American Society for Surface Mining and Reclamation, 2001. 300-316.
- [27] 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.
- [28] 王莹. 硒的土壤地球化学特征 [J]. 现代农业科技, 2008, (17): 235, 236.
- [29] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源 [J]. 地理科学, 2008, **28**(1): 45-50.
- [30] 李进玲. 上海滨海农业土壤重金属分布特征的解析与评价 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [31] 夏增禄, 李森照, 李廷芳. 土壤元素背景值及其研究方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1997. 314-325.
- [32] Wu S H, Zhou S L, Yang D Z, *et al.* Spatial distribution and sources of soil heavy metals in the outskirts of Yixing City, Jiangsu Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(S1): 188-198.
- [33] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用 [J]. 自然科学进展, 2001, **11**(3): 269-176.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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

国内外公开发刊