

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

**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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 ..... 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子浓度特征分析 ..... 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 ..... 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM<sub>2.5</sub> 化学组成与时空分布特征 ..... 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 ..... 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 ..... 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 ..... 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 ..... 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 ..... 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 ..... 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 ..... 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 ..... 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 ..... 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 ..... 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 ..... 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 ..... 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 ..... 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 ..... 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 ..... 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 ..... 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 ..... 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 ..... 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 ..... 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 ..... 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 ..... 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 ..... 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 ..... 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的  $\gamma$  辐照还原降解研究 ..... 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 ..... 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 ..... 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 ..... 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 ..... 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 ..... 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 ..... 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 ..... 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 ..... 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 ..... 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 ..... 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 ..... 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 ..... 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 ..... 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 ..... 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 ..... 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 ..... 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 ..... 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 ..... 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 ..... 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 ..... 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 ..... 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 ..... 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 ..... 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 ..... 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 ..... 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的脱除性能 ..... 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 ..... 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 ..... 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 ..... 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 ..... 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

# 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价

郭伟<sup>1</sup>, 孙文惠<sup>1</sup>, 赵仁鑫<sup>1</sup>, 赵文静<sup>1</sup>, 付瑞英<sup>1</sup>, 张君<sup>2</sup>

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学化学化工学院, 呼和浩特 010021)

**摘要:** 选择呼和浩特市居民区、科教区、城市公园、商业区、道路、工业区和开发区为研究对象, 共采集62个样品。通过分析不同功能区土壤重金属含量, 采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价重金属污染程度, 主成分分析重金属污染的成因和来源, 旨在为防治城市土壤重金属污染提供理论依据。呼和浩特市不同功能区土壤7种重金属的含量表明, 其中5种重金属的平均含量均超过内蒙古自治区土壤背景值, 重金属Cu和Zn含量分别达到背景值的2.33倍和1.85倍; 单因子污染指数评价表明, 不同功能区土壤存在不同程度重金属的污染, 重金属Cu在商业区呈重度污染。不同重金属元素平均污染程度为: Cu > Zn > Cr > Mn > As > Ni > Pb; 内梅罗综合污染指数评价表明, 商业区污染最严重, 呈重污染程度; 其次是道路, 污染水平为中度污染; 科教区和城市公园污染程度最轻。不同功能区土壤重金属的综合污染指数大小为: 商业区(3.03) > 城市道路(2.12) > 居民区(1.98) > 科教区(1.81) > 工业区(1.72) > 开发区(1.36) > 城市公园(1.28); 主成分分析表明, 呼和浩特市土壤不同重金属来源存在差异, 其中Cr、Cu、Mn、Pb和Zn主要来自交通污染源和生活废弃物的堆放, Ni和As目前仍然主要受自然因素控制, 来源于自然源。呼和浩特市土壤重金属的污染已经对城市生态系统的健康发展构成了一定程度的威胁。

**关键词:** 城市土壤; 城市功能区; 重金属污染; 特征; 评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1561-07

## Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot

GUO Wei<sup>1</sup>, SUN Wen-hui<sup>1</sup>, ZHAO Ren-xin<sup>1</sup>, ZHAO Wen-jing<sup>1</sup>, FU Rui-ying<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Resources of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

**Abstract:** The residential areas, cultural and educational areas, city parks, commercial areas, urban roads, industrial zones, and development zones in Hohhot were selected as the research objects. Sixty-two soil samples were collected by triple subsampling technique in the seven functional zones. The aim of this study is to control the soil heavy metal pollution of Hohhot and provide the basic information. To investigate and analyze the heavy metal pollution in soil in different functional zones of Hohhot, the pollution of heavy metal was assessed with single factor pollution index and Nemerow integrated pollution index, and the pollution sources were discriminated by Principal Component Analysis. Contents of seven kinds of heavy metals were analyzed in different functional zones of Hohhot. The mean contents of heavy metals in soil samples exceeded the corresponding background values in the Inner Mongolia Autonomous Region. The mean contents of Cu and Zn were 2.33 and 1.85 times, respectively, as high as the soil background values of the Inner Mongolia Autonomous Region. Single factor pollution index showed that the urban soil in Hohhot has been polluted by heavy metals. The Cu pollution was the most severe in commercial areas, and the pollution degree was in the following order: Cu > Zn > Cr > Mn > As > Ni > Pb. Nemerow integrated pollution index showed that soils from the commercial areas were seriously contaminated by heavy metals. The soil of urban roads was moderately polluted. The soils from cultural and educational areas and the city parks were slightly polluted. The Nemerow integrated pollution index of the seven areas ranked as follows: commercial areas (3.03) > urban roads (2.12) > residential areas (1.98) > cultural and educational areas (1.81) > industrial zones (1.72) > development zones (1.36) > city parks (1.28). The results of Principal Component Analysis showed that the heavy metals in soil of Hohhot came from different sources. Cr, Cu, Mn, Pb and Zn were mainly originated from anthropogenic sources while Ni and As were mainly controlled by natural sources. The healthy development of urban ecosystem has been threatened by soil heavy metal pollution in Hohhot.

**Key words:** urban soil; functional zones; heavy metal pollution; characteristic; assessment

城市是地球表层物质、能量和信息高度集中的场所, 是人类大量集中居住和活动的主要地域空间。随着人类对物质和精神财富需求的增加, 城市化已经成为人类社会发展的必然趋势。城市为人类创造巨大财富的同时也带来了一系列生态环境问题。城市土壤直接紧密地接触密集的城市人群, 与人们的生命健康息息相关, 同时城市土壤通过对水体、大

收稿日期: 2012-07-20; 修订日期: 2012-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40861018, 31200421); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0603); 教育部科学技术研究重点项目(210032); 中国博士后科学基金面上项目(20100471489); 国家科技支撑计划项目(2011BAC02B03)

作者简介: 郭伟(1976~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染的控制与治理技术、矿区生态恢复, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

气的影响进而影响整个城市环境的质量<sup>[1]</sup>. 城市土壤作为城市生态系统的重要组成部分,不仅能够对污染物质进行容纳、缓冲和净化,还可以通过生态系统将污染物危害尤其是重金属污染物作用于人类自身<sup>[2]</sup>. 例如土壤细颗粒中富集的重金属 Pb 可以通过受污染的城市土壤扬尘危害人体健康,尤其可能会造成儿童血 Pb 含量升高<sup>[3]</sup>. 刘玉燕等<sup>[4]</sup>对乌鲁木齐土壤重金属研究也证明了土壤中严重的 Pb 污染可能是乌鲁木齐城市儿童血铅超标的主要原因. 随着城市中人口的集中、工业的发展、机动车辆的增加,重金属对人体危害影响的范围、强度就越大. 所以,在城市化的进程中深入研究城市土壤重金属元素的污染并对其进行评价是非常必要的.

在已报道的城市土壤重金属污染研究中主要涉及东南沿海发达地区<sup>[5,6]</sup>,而对于生态环境极其脆弱的西北干旱半干旱地区则关注甚少. 为此,本研究针对呼和浩特市城市发展进程中对城市土壤造成的重金属污染问题进行研究,按照不同的土地利用方式对城市土壤进行分区采样,分析呼和浩特城市不同功能区土壤重金属含量,运用单项污染指数法和综合污染指数法评价城市土壤重金属的污染程度,考察不同功能区土壤重金属污染特征,探讨不同土地利用方式对城市土壤重金属污染的影响,并分析不同功能区土壤重金属污染的主要来源,以期为城市土壤重金属污染防治提供基础数据和科学依据.

## 1 研究区域概况

呼和浩特市位于我国西北部干旱半干旱地区,为内蒙古自治区的首府,地处内蒙古中部,是全区政治、经济、科技、教育、文化中心. 随着城市化进程的加快,呼和浩特市所面临的生态环境压力也在增大,主要表现在大气环境,沙尘天气肆虐,TSP 浓度居高不下;水资源短缺问题日益严重,地表水受到严重污染,地下水水位不断下降;生态环境恶化等<sup>[7,8]</sup>.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品布点与采集

城市的中心活动是人类的聚居、密集的商业活动和大规模的工业产业. 城市公园是城市的绿化场所,既保持了自然土壤和生态环境的特点又有着人工改造的特点. 因此,根据人类活动对城市土壤产

生的不同影响,把呼和浩特市划分为居民区、科教区、城市公园、商业区、道路、工业区、开发区等 7 个功能区. 共设 62 个采样点,其中居民区布设 10 个、科教区 8 个、城市公园 8 个、商业区 8 个、道路 13 个、工业区 7 个以及开发区 8 个采样点(见图 1). 对所划分的 7 个功能区于 2011 年 7~9 月间进行土壤样品采集,每个功能区土壤样品采样点随机布设,每个采样点根据具体情况采用对角线法、棋盘式法、蛇形法等进行多点取样混合一个代表样的方法,用不锈钢铲采集 0~5 cm 表层土壤,每个混合样品为 1 kg 左右. 土样避光自然风干后,对每一份样品采用四分法取样进行磨碎处理,过 100 目(0.149 mm)土壤筛,保存待消煮测定.



图 1 研究区位置及采样点分布示意

Fig. 1 Studied area and sampling location map

### 2.2 样品消解和测定

土壤样品的分析采用王水-高氯酸( $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$ )开放式消煮法<sup>[9]</sup>. 称取 1 g 左右土壤样品于消煮管中,加王水 5 mL,120℃消解 24 h 左右,至消煮液为 1 mL 左右时,冷却至室温后加高氯酸 3 mL,140℃继续消解 72 h,直至土壤消解至灰白色,消解液透明澄清为止. 消解过程结束后,冷却至室温,消解液用超纯水定容至 50 mL,然后过滤到经酸泡过的干净 PE 塑料瓶中. 空白和标准样品(GBW08303,国家标准物质研究中心)同时消解,以确保消解及分析测定的准确度和用于回收率的计算. 消解液中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 等重金属元素含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 2000 DV, PerkinElmer, USA) 进行测定,As 含量采用原子荧光分光光度计(AFS-930,北京海光分析仪器公司)进行测定.

### 2.3 污染评价法

根据不同采样点位和不同区域的整体调查,对研究区域土壤重金属污染状况采用单因子指数法和

内梅罗综合污染指数法进行综合评价<sup>[10]</sup>.

### 2.3.1 单因子指数法

单因子指数法是国内外普遍采用的方法之一,是对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价.其计算公式为:

$$P_i = c_i/S_i \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为土壤中污染物  $i$  的环境质量指数;  $c_i$  为污染物  $i$  的实测浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 选用内蒙古土壤中重金属元素的平均背景值<sup>[11]</sup>.

### 2.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗 (Nemerow) 综合污染指数法可全面反映土壤中各污染物的平均污染水平, 也突出了污染最严重的污染物给环境造成的危害. 其计算公式为:

$$P_N = \left[ \frac{(c_i/S_i)_{\max}^2 + (c_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $P_N$  为综合污染指数;  $(c_i/S_i)_{\max}$  为各污染物中污染指数最大值;  $(c_i/S_i)_{\text{ave}}$  为各污染物中污染指数的算数平均值.

依据单因子指数法和内梅罗综合污染指数法可将土壤重金属污染划分为 5 个等级. 如表 1 所示.

表 1 土壤重金属污染分级标准

Table 1 Criteria for classification of soil heavy metal pollution

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	土壤受中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重污染	土壤受污染已相当严重

## 2.4 统计分析

采用 Excel 2003、SPSS 16.0 统计软件对数据进行统计分析, 不同功能区间土壤重金属的两两比较采用 Duncan 单因素方差分析, 利用主成分分析对多种重金属元素进行降维处理.

## 3 结果与讨论

### 3.1 呼和浩特市城区土壤重金属含量分布

研究区 62 个土壤表层样品重金属含量统计结果见表 2. 结果表明, 呼和浩特市城区土壤重

金属含量普遍高于内蒙古自治区土壤背景值. 与内蒙古自治区土壤背景值标准比较, 测试样点的单个重金属超标率除 Ni、Pb、As 以外, 其他重金属超标率均在 95% 以上, 其中 Cu 超标率最大 (100%), 其次是 Zn (98.39%)、Cr (96.78%) 和 Mn (96.78%). 重金属 Cu 平均含量与背景值的比值远超过其它 6 种重金属, 是背景值的 2.33 倍. 计算各种重金属的变异系数, 7 种重金属的变异系数大小的顺序为 Pb > Cu > Zn > Cr > Mn > As > Ni.

表 2 呼和浩特城市土壤重金属含量 ( $n=62$ )/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Heavy metal concentrations in the soils of Hohhot/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	范围	$\bar{x} \pm s$	变异系数/%	超标率/%	背景值 <sup>1)</sup>	比值 <sup>2)</sup>
Cr	34.93 ~ 156.32	54.75 ± 16.13	29.46	96.78	36.5	1.58
Cu	13.79 ~ 91.04	30.07 ± 15.35	51.05	100.00	12.9	2.33
Mn	413.22 ~ 1355.44	589.42 ± 148.79	25.24	96.78	446	1.32
Ni	7.71 ~ 25.33	16.47 ± 3.27	19.85	37.10	17.3	0.95
Pb	1.17 ~ 39.00	11.63 ± 8.66	74.46	25.81	15	0.78
Zn	47.28 ~ 223.35	89.93 ± 38.07	42.33	98.39	48.6	1.85
As	3.41 ~ 8.96	6.40 ± 1.29	20.16	54.84	6.3	1.02

1) 内蒙古自治区土壤背景值; 2) 平均值/背景值

呼和浩特市城区土壤除 Pb 和 Ni 以外, Cr、Cu、Mn、Zn 和 As 的平均含量均超过内蒙古自治区土壤背景值. 其中 Cu、Cr、Mn 和 Zn 的平均含量分别为背景值的 2.33 倍、1.58 倍、1.32 倍和 1.85 倍, 其他重金属元素为背景值的 0.78 ~ 1.02 倍, 说明呼和浩特市土壤重金属污染程度不一, 已经受到外界人

为活动因素的影响. 变异系数可以反映总体样本中各采样点平均变异程度. 变异系数越大, 说明受人类活动干扰越强烈, 在空间上的分布有较大的差异<sup>[12]</sup>. Ni、As 变异系数相对较小, 均在 20% 左右变化, 说明这 2 种元素受外界影响状况基本一致, 空间分布差异小, 反映 Ni、As 在不同功能区污染

程度的相似性或污染程度相对较轻。Pb、Cu、Zn 变异系数较大,均在 40% 以上,其中 Pb 的变异系数达到了 74.46%,说明这几种元素受外界干扰较大,在空间上的分布有较大的差异,这种分异很大程度上归结为交通、商业等城市建设用地以及污染等强烈人为活动的影响。柳云龙等<sup>[13]</sup>对上海市评价结果也显示了重金属 Pb 具有较高的变异系数。

### 3.2 呼和浩特市不同功能区土壤重金属分布

呼和浩特市不同功能区土壤重金属含量水平见表 3。呼和浩特市不同功能区土壤重金属含量水平相差较大,商业区 Cr、Cu、Mn 和 Zn 含量最高,分别为背景值 2.04、3.85、1.71 和 2.58 倍;科教区 Ni 含量最高,为背景值 1.11 倍;商业区和道路 Pb 含量最高,分别为背景值 1.04 倍和 1.03 倍;科教区和城市公园 As 含量最高,分别为背景值 1.20 倍和 1.25 倍。对不同功能区重金属元素的含量进行方差分析,结果表明 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 和 As 在不同功能区的分布差异存在统计学意义( $P < 0.05$ );

对不同功能区的重金属元素两两之间的多重分析,结果表明商业区 Cr、Cu 和 Mn 含量高于其他 6 个功能区,Pb 含量高于城市公园和开发区,Zn 含量高于城市公园、工业区和开发区,差异有统计学意义( $P < 0.05$ );科教区的 Ni 高于城市公园和工业区,差异有统计学意义( $P < 0.05$ );道路 Pb 高于城市公园和开发区,差异有统计学意义( $P < 0.05$ );科教区和公园 As 高于居民区、商业区、道路、工业区和开发区,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。陈海珍等<sup>[5]</sup>的研究显示广州市不同功能区之间土壤重金属含量水平相差较大,其中商业区 Cu、Zn 和 Pb 的含量显著高于其他各功能区,汽车站 Mn 的含量最高。吴新民等<sup>[12]</sup>的研究结果也证明了南京市商业区和老居民区的重金属污染表现为较高的 Zn 积累,而风景区和高新区各重金属元素的含量较低。呼和浩特市 Cu、Zn 等重金属元素在商业区具有较高的累积,城市公园除 As 以外,其他重金属元素含量相对较低,与其他城市不同功能区土壤重金属分布特征的研究结果具有相似性。

表 3 呼和浩特市不同功能区土壤重金属含量水平<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Mean values of heavy metals concentrations in different zones of Hohhot/mg·kg<sup>-1</sup>

功能区	采样点数	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	As
居民区	10	51.35 ± 7b	31.12 ± 11.4bc	554.22 ± 52.4b	15.95 ± 2.2ab	13.58 ± 9.1ab	98.38 ± 33.5abc	6.53 ± 0.6b
科教区	8	52.35 ± 3.3b	27.34 ± 4.3bc	580.34 ± 37.1b	19.21 ± 1.6a	10.1 ± 5.2ab	103.37 ± 47.4ab	7.57 ± 0.8a
城市公园	8	44.83 ± 5b	18.61 ± 5.6c	518.22 ± 58b	15.46 ± 2.4b	5.53 ± 4.9b	60.91 ± 10.4d	7.88 ± 1.1a
商业区	8	74.43 ± 34.8a	49.62 ± 25.1a	764.65 ± 324.6a	17.32 ± 3.5ab	15.67 ± 12.1a	125.42 ± 61.7a	6.16 ± 0.5bc
道路	13	57.80 ± 8b	33.90 ± 13.8b	571.12 ± 58.3b	16.03 ± 2.9ab	15.51 ± 9.7a	92.95 ± 20abcd	5.22 ± 1.3c
工业区	7	49.74 ± 13.5b	26.68 ± 10.5bc	618.48 ± 174.8b	14.53 ± 5b	12.00 ± 7.7ab	79.74 ± 23.8bcd	5.83 ± 1.4bc
开发区	8	51.03 ± 7.3b	20.17 ± 6.2bc	542.79 ± 24.3b	16.95 ± 4ab	6.15 ± 2.5b	63.47 ± 14.7cd	6.27 ± 0.6b
背景值		36.5	12.9	446	17.3	15	48.6	6.3

1) 同一列中相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

### 3.3 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染评价

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染评价见表 4。单因子污染指数分析结果表明,不同重金属元素的污染程度大小为 Cu > Zn > Cr > Mn > As > Ni > Pb。各功能区土壤重金属的污染程度表现为 Cu 呈重度或中度污染(除城市公园和开发区轻度污染外);Zn 呈轻度污染(除居民区、科教区和商业区中度污染外);Cr 呈轻度污染(除商业区中度污染外);Mn 为轻度污染;As 无污染(除居民区、科教区和城市公园轻度污染外);Ni 无污染(除科教区轻度污染外);Pb 无污染(除商业区和道路轻度污染外)。不同功能区土壤重金属综合污染指数大小为:商业区 > 道路 > 居民区 > 科教区 > 工业区 > 开发区 > 城市公园,商业区呈重度污染,道路呈中度污

染,其他功能区均呈轻度污染。

单因子指数评价结果表明,各功能区土壤除 Ni 和 Pb 外,Cr、Cu、Mn、Zn 和 As 单因子污染指数均大于 1.0,说明呼和浩特市土壤重金属表现为富集现象。不同功能区污染程度的趋势大致为 Cu > Zn > Cr > Mn > As > Ni > Pb,其中以 Cu 和 Zn 污染程度最高。说明呼和浩特总体上 Cu 和 Zn 污染最重,其来源可能是汽车尾气和日常生产生活垃圾污染所致。内梅罗综合污染指数表明,商业区和道路综合污染指数均大于 2.0。其中商业区污染最严重,综合污染指数为 3.03,呈重污染程度。本研究商业区采样点主要位于呼和浩特市海亮广场和维多利购物中心,该地段坐落于中山西路和锡林郭勒南路交汇处,车流量大,机动车释放的污染物多;餐饮娱乐场所

表 4 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染评价指数

Table 4 Pollution appraisal indexes of soil heavy metal in the studied areas

功能区	单因子指数( $P_i$ )							综合污染指数 ( $P_N$ )
	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	As	
居民区	1.41	2.41	1.24	0.92	0.91	2.02	1.04	1.98
科教区	1.43	2.12	1.30	1.11	0.67	2.13	1.20	1.81
城市公园	1.23	1.44	1.16	0.89	0.37	1.25	1.25	1.28
商业区	2.04	3.85	1.71	1.00	1.04	2.58	0.98	3.03
道路	1.58	2.63	1.28	0.93	1.03	1.91	0.83	2.12
工业区	1.36	2.07	1.39	0.84	0.80	1.64	0.93	1.72
开发区	1.40	1.56	1.22	0.98	0.41	1.31	0.99	1.36
平均值	1.49	2.30	1.33	0.95	0.75	1.83	1.03	

较多,生活废弃物和产品包装物不断被投入到环境中,因此商业区受到交通污染和生活废弃物的综合影响,表现为商业区较高的 Cu 和 Zn 的累积,与吴新民等<sup>[14]</sup>的研究基本一致。道路污染水平为中度污染,污染程度仅次于商业区,其污染物主要来自汽车尾气排放,机动车车身、零件及轮胎等部位磨损后的粉尘<sup>[1, 15, 16]</sup>,因此主要受交通污染源的影响。城市公园综合污染指数最低,这是因为城市公园作为人工改造下的绿地,可能经过多次客土回填,重金属含量相对较低;另外,可能由于含砷农药的使用,造成 As 在城市公园中的单因子污染指数高于其他功能区。居民区的综合污染指数达到 1.98,受人类活动影响较为严重,因本次调查的居民区如发电厂宿舍、学府康都等大多数距离交通要道较近,不可避免地导致居民区受到交通污染源的影响;吴新民等<sup>[17]</sup>对居民区土壤进行剖面分析后认为,居民区土壤污染物主要来自生活废弃物;因此,生活废弃物对居民区产生的影响也不容忽视。呼和浩特市如意、金川、金桥等开发区主要是以生物医药、新材料、新能源、纺织服装为主导的高新技术产业园区,由于建成时间只有短短 20 a,客观上人类活动对该地区土壤的影响时间较短,污染程度较低。通过吴新民等<sup>[12]</sup>和钱翌等<sup>[18]</sup>的研究结果显示,南京、青岛等城市工业区的污染程度最高,并且以 Pb、Cd 等重金属的强度累积为特征,原因可能是南京、青岛等城市工业发达,大型企业分布较多。而呼和浩特市主要是内蒙古自治区的政治、经济、科技、文化和教育的中心,市区内工业分布零散,且没有较大的污染企业,因此呼和浩特市工业区的重金属综合污染程度明显低于经济发达城市<sup>[5, 18, 19]</sup>。

总体上,呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染程度与其它相关报道基本一致。但是 7 种重金属元素的污染程度明显低于广州市、汕头市等东南沿海城市<sup>[5, 6]</sup>。这可能是由于呼和浩特市作为一个新

兴的以科教发展起来的的城市,市区内重污染企业的规模和机动车数量以及人口数量等方面与东南沿海城市相比存在一定差距。同时呼和浩特虽然有着 400 多年的建城历史,但近 60 多年才有所发展,重金属受城市化进程的影响较小,在土壤中的累积时间相对较短。因此,呼和浩特市重金属污染程度要低于历史悠久且经济发达的城市。但是,近年来呼和浩特市机动车数量在逐年增加,有资料显示 2011 年呼和浩特市机动车保有量达到 52 万辆,较上年新增 9.8 万辆,人口数量也达到了 291.2 万人。随着城市化进程的加快,呼和浩特市土壤重金属的污染程度也会不断加重,土壤重金属污染状况不容乐观,因此应持续保持监测和及早采取预防措施。

### 3.4 土壤重金属的主成分分析

本研究中测定的土壤样品元素较多,数据在反映重金属元素的来源和类别信息上可能存在一定的相关性。为了压缩数据,找出真正能反映重金属污染状况的指标信息,笔者采用主成分分析方法对数据进行了降维处理。该方法能够将复杂数据变成简单类别,增强有用信息。

呼和浩特市土壤主成分分析结果如表 5。从中可见:Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 在主成分 1 中具有较高的因子载荷,这种元素组合特征通常被认为是人为源输入影响的结果。研究结果证明 Pb、Zn、Cu 主要来自于交通运输过程中重金属元素释放<sup>[20, 21]</sup>。特别是刹车磨损过程会向环境排放 Fe、Cu、Cr、Pb、Zn、Mo 和 Sb 等多种重金属元素<sup>[22, 23]</sup>。另外含铅锌铜的装饰材料 and 管材、电池等日常生活用品和废弃包装物<sup>[24]</sup>,也会造成 Cu、Zn、Cr 等重金属的富集。有研究也证实了武汉市垃圾堆放场和南京市生活垃圾场附近土壤中的重金属含量均高于当地土壤背景值<sup>[25, 26]</sup>。说明主成分 1 可能主要代表汽车交通运输以及城市生活生产废弃物等人为活动的影响。Ni 和 As 同时在主成分 2 中具有较高载荷,主要

来源于自然源,它们共同解释了原变量方差的 21.55%,表明成土母质对土壤中该类元素的控制作用。因此,主成分 2 可以归纳为自然源,与黄顺生等<sup>[27]</sup>和李增福等<sup>[28]</sup>的研究结果基本一致。第一主成分的贡献率为 65.74%,它解释的原变量方差最多,而其后的主成分 2 所解释的方差较小(21.55%),一般认为第一主成分是土壤重金属污染的主要来源。同时,呼和浩特市土壤重金属污染程度评价结果表明 Cu、Zn 和 Cr 是造成呼和浩特市土壤污染的主要元素。鉴于此,笔者认为交通源和生活废弃物是造成呼和浩特市土壤污染的主要原因。

表 5 土壤重金属元素载荷量

元素(变量)	主成分	
	主成分 1	主成分 2
Cr	0.947	0.102
Cu	0.988	0.008
Mn	0.893	0.070
Ni	0.261	0.874
Pb	0.873	-0.311
Zn	0.921	0.273
As	-0.502	0.747
贡献率/%	65.74	21.55

综上所述,呼和浩特市作为一个正在快速发展中的西部城市,随着城市化进程其土壤重金属的污染程度也会不断加重,土壤重金属污染状况不容乐观。城市土壤重金属的治理既要通过政策和法律法规的约束和防范,又必须采用不同的技术措施对重金属进行综合治理。城市交通和垃圾废弃物堆放是呼和浩特市土壤主要的重金属污染源。针对城市交通,要控制汽车尾气的排放与调整能源结构,减少机动车 Pb 等重金属的排放,将使城市大气中重金属含量减少,从而有效地减少土壤重金属污染;通过改善呼和浩特市交通状况,以减少机动车的刹车频率,缓解轮胎及车身其他部分磨损所导致的重金属释放。对于城市生活垃圾应当分类收集,储运和处理垃圾时,应将含重金属元素的垃圾与其它垃圾分开,只有在垃圾废弃物中重金属元素不超标的情况下,才能进行填埋、堆肥和焚烧处理<sup>[29]</sup>。另外,减少土壤暴露面积,增加城市绿地面积,对城市土壤加以植物覆盖,也应该成为当前较为迫切的任务。目前,世界各国对土壤重金属污染修复技术进行了广泛研究,生物修复技术治理土壤污染已成为当前环境科学研究的重要领域之一,尤其是微生物和植物联合修复技术正逐渐成为研究的热点<sup>[30]</sup>。利用某些绿

色植物(特别是超累积植物)和土壤中某些微生物(例如丛枝菌根真菌、假单胞杆菌等)从污染的土壤环境中吸收、富集、转移重金属或降低土壤重金属毒性,以达到修复城市土壤重金属污染的目的。

#### 4 结论

(1)呼和浩特市表层土壤中 Cr、Cu、Mn、Zn 和 As 的平均含量均超过内蒙古自治区土壤背景值,重金属在不同功能区中表现出不同的累积程度。Cr、Cu、Mn、Zn 在商业区具有较高的累积,而 As 在城市公园具有较高的累积。说明城市化进程已造成了呼和浩特市土壤中重金属元素的累积,对城市生态系统造成了危害。

(2)土地利用方式不同对呼和浩特市土壤重金属污染产生的影响不同,人类活动较为密集的区域如商业区,其污染程度最为严重,其次是道路,科教区污染程度最轻。

(3)呼和浩特城市土壤重金属主成分分析表明,呼和浩特市土壤重金属受人为活动影响程度不同。其中 Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 是受人为活动影响最为强烈的重金属元素,主要来自交通污染源和人们日常生活废弃物的堆放;Ni 和 As 目前受人为活动干扰较轻,主要来源于自然源。

#### 参考文献:

- [1] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [2] 刘安娜,葛本伟. 石河子市表层土壤重金属元素富集与功能区分异研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(32): 19818-19821.
- [3] Calabrese E J, Stanek E J, James R C, *et al.* Soil ingestion: a concern for acute toxicity in children[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1997, **105**(12): 1354-1358.
- [4] 刘玉燕,刘敏,刘浩峰. 乌鲁木齐市城市土壤中重金属分布[J]. *干旱区地理*, 2006, **29**(1): 120-123.
- [5] 陈海珍,龚春生,李文立,等. 广州市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境与健康杂志*, 2010, **27**(8): 700-703.
- [6] 郭岩,杨国义,董巧香,等. 汕头市典型区域土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 1067-1074.
- [7] 李志宏,刘丽英,董晓红. 呼和浩特市环境现状及其保护措施[J]. *内蒙古农业科技*, 2007, (4): 91-92.
- [8] 崔秀萍,刘果厚. 呼和浩特城市生态系统环境评价与分析[J]. *地域研究与开发*, 2011, **30**(6): 79-83.
- [9] 雷鸣,曾敏,郑袁明,等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1212-1220.
- [10] 陈怀满. *环境土壤学*[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 522-

- 523.
- [11] 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.
- [12] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 105-111.
- [13] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 599-605.
- [14] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J]. 土壤学报, 2003, **40**(6): 921-928.
- [15] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, **25**(1): 108-112.
- [16] Fernández A J, Ternero M, Barragón F J, *et al.* An approach to characterization of sources of urban airborne particles through heavy metal speciation [J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(2): 123-136.
- [17] 吴新民, 潘根兴. 城市不同功能区土壤重金属分布初探[J]. 土壤学报, 2005, **42**(3): 513-517.
- [18] 钱翌, 张玮, 冉德超. 青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析[J]. 环境化学, 2011, **30**(3): 652-657.
- [19] 李胤. 上海城市土壤重金属污染调查及评价研究——以世博区域为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [20] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析[J]. 地球化学, 2006, **35**(1): 88-94.
- [21] Al-Rajhi M A, Seaward M R D, Al-Aamer A S. Metal levels in indoor and outdoor dust in Riyadh, Saudi Arabia [J]. *Environment International*, 1996, **22**(3): 315-324.
- [22] Wählin P, Berkowicz R, Palmgren F. Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(12): 2151-2159.
- [23] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. 中国公共卫生, 2001, **17**(7): 623-624.
- [24] 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠, 等. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状[J]. 地理学报, 1997, **52**(3): 228-236.
- [25] 方满, 刘洪海. 武汉市垃圾堆放场重金属污染调查及控制途径[J]. 中国环境科学, 1988, **8**(4): 54-59.
- [26] 张辉, 马东升. 城市生活垃圾向土壤释放重金属研究[J]. 环境化学, 2001, **20**(1): 43-47.
- [27] 黄顺生, 吴新民, 颜朝阳, 等. 南京城市土壤重金属含量及空间分布特征[J]. 城市环境与城市生态, 2007, **20**(2): 1-4.
- [28] 李增福, 朱继业, 王腊春. 合肥市城市土壤重金属元素含量及空间分布特征[J]. 城市环境与城市生态, 2009, **22**(3): 24-27.
- [29] 张磊, 宋凤斌, 王晓波. 中国城市土壤重金属污染研究现状及对策[J]. 生态环境, 2004, **13**(2): 258-260.
- [30] 俄胜哲, 杨思存, 崔云玲, 等. 我国土壤重金属污染现状及生物修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(19): 9104-9106.

## CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM <sub>2.5</sub> at Dinghu Mount .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing .....	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Species in Shenzhen .....	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou .....	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China .....	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City .....	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors .....	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method .....	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River .....	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City .....	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed .....	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter .....	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary .....	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland .....	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai .....	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas .....	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province .....	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes .....	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk ( <i>Rapana venosa</i> ) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System .....	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm .....	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process .....	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon .....	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon .....	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation .....	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process .....	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon .....	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter .....	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX .....	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process .....	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System .....	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes .....	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method .....	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules .....	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picoplankton of Lakes .....	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay .....	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment .....	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities .....	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation .....	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media .....	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil .....	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot .....	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density .....	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils .....	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils .....	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant .....	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils .....	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills .....	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide .....	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC .....	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon .....	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application .....	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China .....	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

# 《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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

国内外公开发行