

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价铈在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李磊,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素

杨阳^{1,2}, 李艳玲^{1,2}, 陈卫平^{1*}, 王美娥¹, 彭驰¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 本研究以湖南省攸县为例, 测定重金属镉 (Cd) 在 585 个灌溉水样品和 625 对土壤蔬菜样品中的含量水平, 结合农业与气象调查数据, 应用典型相关分析及路径分析模型研究各环境因子对于 Cd 在土壤-蔬菜系统累积水平的影响. 结果表明研究区灌溉水、土壤、蔬菜中 Cd 含量差异较大. 蔬菜 Cd 富集因子 (PUF) 服从自然对数分布, 有 10% 的概率大于 1. 土壤 pH 和土壤有机质对 PUF 有着显著的直接效应, 土壤阳离子交换量, 灌溉水 pH, 降雨量和氮肥施肥量通过与 pH 及土壤有机质的关系间接影响 PUF 变化. 研究区土壤 pH 和土壤有机质含量较低, 对于 Cd 在土壤-蔬菜系统中的累积风险应给予一定关注.

关键词: 路径分析模型; 环境因子; 蔬菜 Cd 富集因子; 典型相关分析; Gaussian 分布方程

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0399-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201606075

Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors

YANG Yang^{1,2}, LI Yan-ling^{1,2}, CHEN Wei-ping^{1*}, WANG Mei-e¹, PENG Chi¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The consumption of vegetables is a probable cause of Cd exposure in several world areas including China. In this study, we selected the prefecture of Youxian, southern China, as a case to analyze the influences of various environmental factors on Cd accumulation in vegetables based on a large scale agricultural and climatologically survey and collection of 585 irrigation water and 625 paired soil-vegetables samples. The results showed the concentration of Cd differed greatly in the irrigation water, soil and vegetables. The average daily dose for the adult populations consumed vegetables cropping in affected areas was slightly above the tolerable daily intake level, suggesting a potential health risk. The vegetables Cd uptake factor followed the natural lognormal distribution, and had a 10 percentile probability of higher than 1. The PUF values exhibited comparable results and appeared to define a reasonable and consistent Cd risk assessment. Many environmental variables (soil pH, soil organic matter, cation-exchange capacity, rainfall, water pH, and nitrogenous fertilizer usage) exhibited significant correlations with the concentrations of Cd in the soil-vegetable system. The canonical corresponding analysis and path model analysis found that soil pH and soil organic matter (SOM) had major direct effects on PUF. The close correlations between rainfall, water pH, nitrogen fertilizer usage and PUF were mainly resulted from the direct effect of soil pH and SOM. The high field-moisture capacity in the study area generated a rapid acidification causing the migration of Cd to weaker bounding sites thus promoting the vegetables uptake. The excessive application of nitrogen fertilizers led to a substantial loss of SOM and worsening of soil acidification ultimately causing increasing Cd accumulation in vegetables. Considering that the soil pH and SOM in the study area were maintained at a low level, the accumulation risk of Cd in soil-vegetable system needs to be addressed. The influence of environmental factors on vegetables accumulating Cd needs to be fully considered for better and safer vegetables production.

Key words: path analysis model; environmental factors; vegetables Cd uptake factor; canonical correlation analysis; Gaussian distribution function

我国蔬菜播种面积和产量均居世界首位^[1,2]. 但受工业化和城市化影响, 蔬菜重金属污染日益严重, 以镉 (Cd) 超标最为突出, 这对我国蔬菜生产和出口造成了巨大影响^[3~5]. 长期食用 Cd 超标蔬菜会增加人体患病及致癌风险^[6,7]. 如何控制和预防蔬菜 Cd 污染, 提高蔬菜品质, 已成为我国改善民生的广泛关注^[2,3,8]. 蔬菜对 Cd 的累积与环境因子 (土壤性质、灌溉条件、气候条件和施肥条件等) 关

系密切^[5~7,9,10]. 而目前有关蔬菜 Cd 累积影响因子的研究主要集中在土壤总 Cd 含量, 土壤酸化程度, 土壤理化性质或不同蔬菜种类等单一因素^[1,8,11], 缺乏对蔬菜 Cd 累积有显著贡献的土壤条件、气候条

收稿日期: 2016-06-13; 修订日期: 2016-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173123); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室项目 (SKLURE2013-1-04)

作者简介: 杨阳 (1990 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态风险评估, E-mail: yangyang_st@cees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

件、灌溉条件和施肥条件的综合分析。

本文以湖南省主要蔬菜产区攸县为研究对象,运用典型相关分析(CCA)和路径分析模型,对研究区蔬菜 Cd 含量及其与土壤 Cd 含量、土壤理化性质、气候条件和灌溉条件的相互作用关系进行综合分析,量化各环境因子对蔬菜 Cd 累积影响程度,以期为区域蔬菜 Cd 污染现状改善提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

攸县位于湖南省东南部(图 1),下辖 17 个乡镇,总面积为 2 648 km²,总人口 80.4 万,为中亚热带季风湿润气候。湖南攸县为我国重要的粮食和蔬菜基地,近年来的“镉米”事件对该地农业生产造成了一定的经济损失,但该地蔬菜 Cd 含量特征仍不明确^[12]。根据攸县蔬菜分布特征进行野外实地考察和采样,用手持 GPS 精确定位。

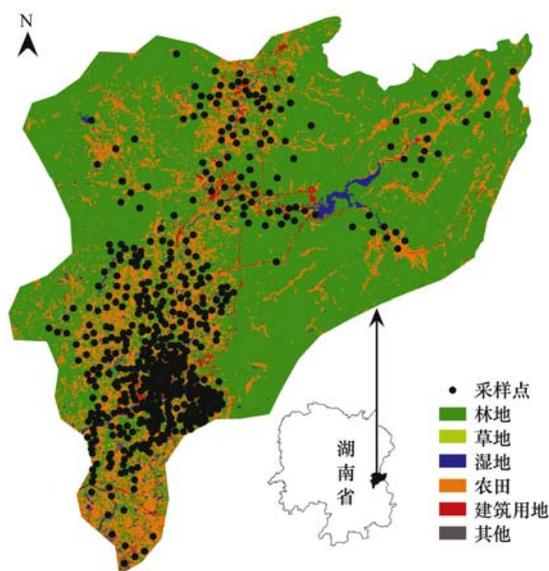


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Research area and distribution of sampling stations

1.2 样品采集与实验分析

每个样点随机布设 2~3 个 2 m × 2 m 的样方,记录样方内蔬菜名称,种属,类别,采集 5~10 株完整蔬菜(叶菜)后密封保存于样品袋中,共采集 625 个叶菜样品,涉及 26 个品种,分别为白菜苔、包菜、菠菜、白菜芯、大白菜、冬苋、儿菜、红菜苔、花菜、芥菜、芥蓝、毛葱、芹菜、上海青、生菜、水葱、塔菜、茼蒿、香菜、小白菜、小青菜、油菜苔、油菜芯、油麦菜、榨菜和紫甘蓝。

在每个蔬菜采样点对应采集土壤样品 1 份(5

点混合采样法,采样深度 0~10 cm),共采集 625 个土壤样品,密封保存。在蔬菜生长区域采集相应灌溉水样品,保存于酸化后的 50 mL 样品瓶中低温保存。共采集灌溉水样品 585 个,灌溉水 pH 采用便携式 pH 计进行现场测定。

土壤样品经风干、研磨、过 100 目尼龙筛后密封保存,用于测定土壤 pH,有机质含量(SOM),粒度,阳离子交换量(CEC)等基本物理性质,测定方法参见文献[13]。应用四酸法(HCl-HNO₃-HF-HClO₄)^[12]消解土壤样品。蔬菜样品经自来水冲洗后去除不可食用部分,再用去离子水清洗后于 105℃ 下杀青 30 min,60℃ 烘至恒重,粉碎后用 HNO₃-HClO₄^[12]法消解。

应用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)检测样品 Cd 含量,应用 GSS-5 和 GSB-5 对土壤和蔬菜进行质量控制,标准回收率在 81.3%~118% 之间。

1.3 数据处理

植物富集因子(PUF)^[9]常被用在生态风险评价中,以分析植物对某微量元素的富集水平,也可用来降低不同土壤环境引起的不确定性^[10]。计算方程如下:

$$PUF = V_{Cd}/S_{Cd} \quad (1)$$

式中,PUF 为植物 Cd 富集因子, V_{Cd} 和 S_{Cd} 分别为蔬菜和土壤中的 Cd 含量。

对蔬菜 Cd 富集因子(PUF)分布情况的分析有助于更全面地分析 Cd 在土壤-蔬菜系统中的富集情况。本研究中应用 3 参数 Gaussian 分布方程^[3,10]对研究区蔬菜 Cd 富集因子(PUF)进行拟合,拟合方程为:

$$y = a \times \exp[-0.5 \times (x - x_0)/b]^2 \quad (2)$$

式中, y 表示 PUF 在 x 时的概率, a 为常数,PUF 累积概率通过经验方程计算获得:

$$F(x) = 0.5 + 0.5 \times \text{erf}[(x - x_0)/b\sqrt{2}] \quad (3)$$

式中, $F(x)$ 表示 PUF $\leq x$ 时的累积概率,erf 为误差函数^[10], x_0 和 b 表示观测值的平均值和标准差。

传统的相关分析和回归分析不能充分表征各因子交互性,易造成指标信息量缺失^[6]。路径分析模型(PA)可以将因子相关系数分割成直接效应和间接效应,并检验各效应关系显著性水平^[14]。本文应用路径分析模型(PA)来研究各环境因子与蔬菜 Cd 富集因子(PUF)的直接和间接效应关系^[4](图 2),其中直接效应(路径系数)表示为 P_{ij} ,用单箭头表示;间接效应表示为 $r_{ij} \times P_{ij}$,用双箭头表示。相关

系数、直接效应和间接效应间的相互关系参见方程(4).

$$r_{i7} = P_{i7} + \sum_{j=1, j \neq i}^6 r_{ij} \times P_{j7} \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

PA 模型显著性应用可决系数(R^2)和均方根误差(RMSE)进行检验^[4]. 大样本分析中,多变量正态性水平难以充分满足,因此应用 Bootstrap 模拟对各变量直接和间接效应进行检验^[14].

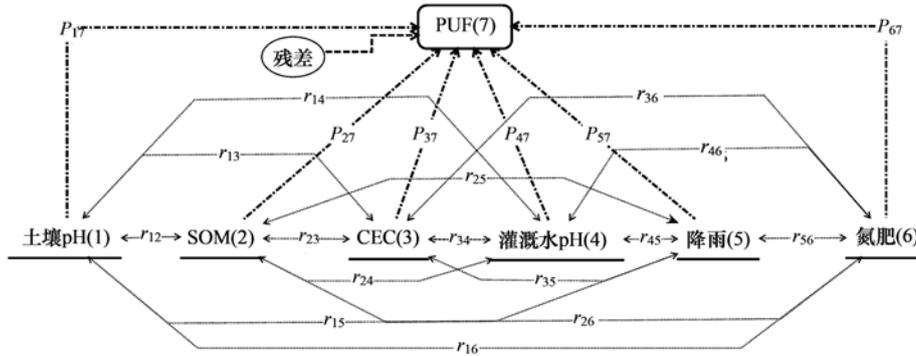


图2 PUF 与环境因子相关关系的路径分析模型

Fig. 2 Schematic depiction of the path analysis model for the relationship between PUF and environmental factors

1.4 数据分析

相关报道指出降雨量、蒸发量、气温和辐射量均对蔬菜 Cd 吸收有一定影响^[9,15],因此将这 4 个变量作为气候因子引入到环境因子分析中. 2010 ~ 2014 年攸县年均降雨量、蒸发量、辐射量和气温分别为(1 484.2 ± 356.8) mm、(1 485.7 ± 46.8) mm、(1.24 ± 0.06) MJ·(m²·d)⁻¹和(18.1 ± 0.6)℃. 气候数据(栅格数据集)来自于攸县气象局. 不同化肥施肥量与蔬菜生长关系密切^[10],因此氮肥、钾肥、磷肥和复合肥这 4 种当地主要施用肥料也作为环境因子引入到环境因子分析中. 施肥量数据通过分镇入户调查的方式获取,攸县氮肥、钾肥、磷肥和复合肥年均施肥量分别为(332 ± 60)、(109 ± 18)、(159 ± 30)和(480 ± 70) kg·hm⁻².

土地利用数据采用 2014 年 TM 影像数据,利用 ENVI 4.8 和 ArcGIS 10.0 参照中国遥感解译分类标准^[16]进行影像解译. 相关分析和数据拟合应用 Matlab 7.14,典型相关分析(CCA)应用 Canoco 4.5, 路径分析

模型构建和 Bootstrap 模拟检验应用 Amos 17.0.

2 结果与讨论

2.1 农田生态系统 Cd 富集特征

研究区土壤 pH 平均值为 5.26 (表 1),有 69.8% 的样点(436/625) pH 均低于 5.5. 与湖南省第二次土壤普查值相比^[17](pH = 5.9),攸县土壤酸化较为严重. 土壤、灌溉水及蔬菜中 Cd 含量变幅均较大,变异系数分别为 65.8%、106.4% 和 134.3%. 土壤 Cd 富集程度较高,平均含量为 0.47 mg·kg⁻¹,为湖南省土壤 Cd 背景值^[18](0.126 mg·kg⁻¹)的 3.7 倍,超标率为 98.1% (613/625),为国家农田土壤环境标准^[19](GB 15618-1995,0.30 mg·kg⁻¹)的 1.6 倍,超标率为 69.6% (435/625); 灌溉水 Cd 平均含量为 0.12 μg·L⁻¹,各灌溉水样品均低于国家地表水环境质量标准^[20](GB 3838-2002, Grade III, 5 μg·L⁻¹); 蔬菜 Cd 平均含量为 0.06 mg·kg⁻¹,相对土壤 Cd 含量较低.

表 1 攸县水体、土壤和蔬菜中 Cd 含量及主要环境因子测定值

Table 1 Descriptive statistics of Cd concentration in water, soil and vegetables as well as major environmental factors in the Youxian prefecture

统计量	土壤 pH	灌溉水 pH	黏粒/%	土壤有机质 /g·kg ⁻¹	阳离子交换量 /mol·kg ⁻¹	土壤 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	灌溉水 Cd 含量 /μg·L ⁻¹	蔬菜 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹
最小值	3.40	4.08	43.3	5.3	4.1	0.01	0.01	0.003
最大值	7.98	7.50	79.2	93.4	15.9	3.00	1.50	1.81
平均值	5.26	5.53	66.8	21.1	8.1	0.47	0.12	0.06
标准差	0.83	0.77	10.7	11.8	1.7	0.31	0.13	0.08
变异系数/%	15.7	13.8	16.0	56.2	21.4	65.8	106.4	134.3

应用重金属暴露风险评价模型^[5,7]对研究区成人经食用蔬菜摄入 Cd 风险水平进行评估(暴露参

数选取见文献[21,22]),结果显示经蔬菜摄入的日平均 Cd 暴露剂量(以 BW 计,下同)为 0.11

$\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 略高于美国毒物与疾病登记署 (ATSDR) 规定的相应标准^[23] [$0.1 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$], 存在一定健康风险. 考虑到湖南省人群蔬菜平均摄入量达到 $357.3 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 在我国各省份中仅次于湖北省^[22], 因此经食用蔬菜摄入 Cd 的潜在危害也较大, 应引起当地政府部门和民众的足够重视.

2.2 PUF 变化特征

研究区土壤 Cd 含量与蔬菜 Cd 含量显著相关 ($r = 0.299^{**}$), 但土壤 Cd 对蔬菜 Cd 累积程度解释率较低 ($R^2 = 0.15, P < 0.05$), 与其他研究结果类似^[4,10]. 应用蔬菜 Cd 富集因子 (PUF) 对 Cd 在土壤-蔬菜系统中的富集程度进行标准化, 结果表明研究区 PUF 平均值为 0.15, 变化幅度较大 (0.007 ~ 2.1). 与其他地区报道的蔬菜 Cd 富集特征相比 (表 2), 研究区 PUF 变化范围较小, 平均水平较低, 这种差异可能与区域环境因子不同相关^[9]. 对 PUF 进行对数转换后, 应用 3 参数 Gaussian 分布方程对其进行拟合, 拟合结果如图 3 所示, 其中 $R^2 = 0.97$, $\text{RMSE} = 0.002$, 拟合方程显著 ($P < 0.001$), 可见研究区 PUF 服从自然对数正态分布. 由图 3 可知, 研

究区 PUF 对数平均值 (x_0) 为 0.13, 变化幅度近 3 个数量级, 主要集中在 0.05 ~ 0.26 之间 (对 25% 和 75% 分布进行对数转换).

应用 3 参数 Gaussian 分布方程, Zhang 等^[3] 对我国蔬菜 Cd 富集因子 PUF 进行拟合, Chen 等^[10] 对美国加州蔬菜 Cd 富集因子进行拟合. 与两者的拟合结果相比, 研究区 PUF 在数量特征和分布特征上均有一定相似性 (图 3). 可见本文所研究 PUF 具有一定的代表性, 可以在该区域进行的健康风险评价中起到表征作用, 并对其他地区有关 PUF 的研究提供参考.

表 2 蔬菜 Cd 富集因子变化范围和均值比较

Table 2 Means and ranges of PUF of Cd in vegetables for different studies

样本量	最小值	最大值	平均值	文献
158	0.045	12.3	1.03	[3]
747	0.12	1.31	0.41	[9]
70	0.11	8.71	1.77	[10]
/	0.004	13.3	0.68	[24]
625	0.007	2.1	0.15	本研究

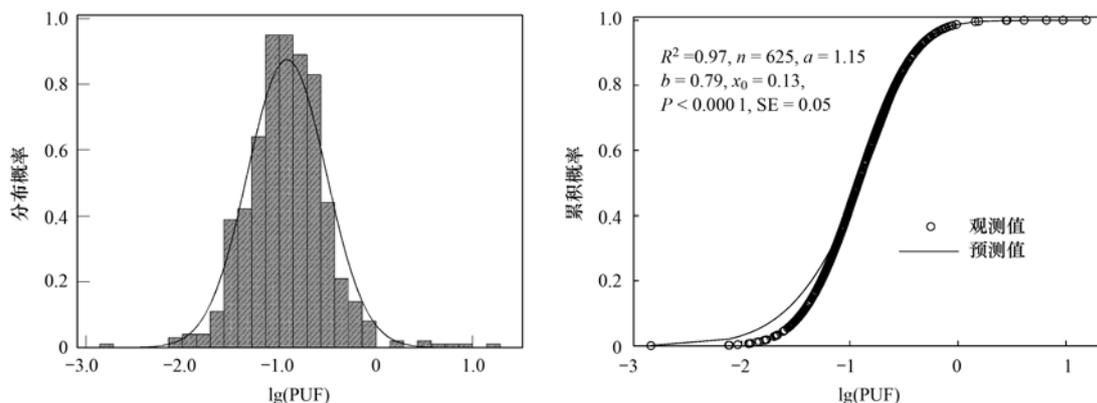


图 3 蔬菜 Cd 富集因子 (对数转换) 可能性概率分布

Fig. 3 Measured and predicted cumulative probability distribution of PUF (log-transformation) of Cd in vegetables

2.3 PUF 与各环境因子相关关系

相关分析表明 (表 3) 土壤 pH、土壤阳离子交换量 (CEC)、土壤有机质 (SOM)、灌溉水 pH 和降雨量与 PUF 呈显著负相关. 施肥量与 PUF 呈显著正相关, 以氮肥施肥量影响最为显著 ($r = 0.240^{**}$). 应用典型相关分析 (CCA) 研究各环境因子与土壤 Cd、蔬菜 Cd 和 PUF 变化关系, 结果表明前 3 个排序轴可解释 Cd 在土壤-蔬菜系统富集变异程度的 91.8%, 其中第 1 排序轴解释量占到 43.9%. 根据 CCA 排序关系, 各环境因子可分为 3 个方向 (图 4), 第 1 方向包括灌溉水 pH 和 SOM, 其中 SOM 为该方向主要影响因子; 第 2 方向包括降雨量, CEC 和土

壤 pH, 其中土壤 pH 在该方向作用显著; 不同化肥施肥量均位于第 3 方向, 其中氮肥施肥量 (N) 为该方向主要影响因子.

Fu 等^[25] 指出同一方向内各环境因子对解释变量存在类似的驱动关系. Monte Carlo 检验显示第 1 排序轴与土壤 pH ($r = 0.60^{***}$) 与 SOM ($r = 0.41^{***}$) 呈极显著正相关, 与氮肥施肥量呈极显著负相关 ($r = -0.21^{***}$). 因此推断研究区各环境因子中, 土壤有机质 (SOM), 土壤 pH 和氮肥施肥量 (N) 分别为 3 个方向上对 Cd 在土壤-蔬菜系统富集程度影响最为显著的环境因子. 各环境因子质心离土壤 Cd 较近, 离蔬菜 Cd 和 PUF 距离较远, 可见土

壤 Cd 空间变异更易受较多环境因子影响, 而 PUF 与蔬菜 Cd 的关系更为密切. 另外由结果可知, 在多

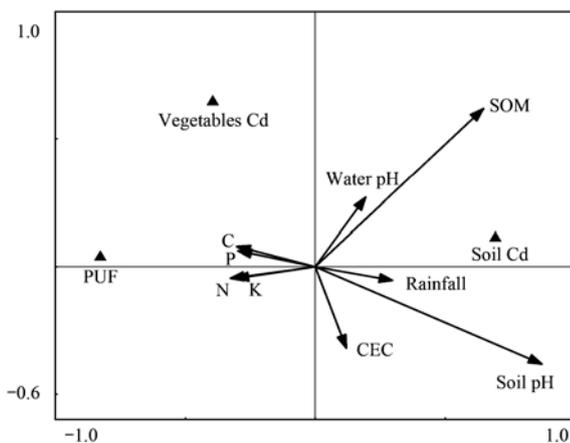
因子分析中, 单一相关分析的应用不能充分反映各环境因子与主要变量之间的相互效应关系.

表 3 各环境因子相关关系及其对 PUF 的直接作用¹⁾

Table 3 Relationship between each environmental factor and their direct effects on PUF

	SOM	土壤 pH	CEC	灌溉水 pH	降雨	氮肥施肥量
SOM	-0.411 **					
土壤 pH	0.119 **	-0.686 **				
CEC	0.059	-0.003	-0.055 *			
灌溉水 pH	0.128 **	0.122 **	-0.017	-0.118 **		
降雨	0.203 **	0.127 **	0.006	0.130 **	-0.156 **	
氮肥施肥量	-0.310 **	-0.196 **	-0.112 **	-0.201 **	-0.315 **	0.240 **
直接作用	-0.511 ***	-0.254 ***	-0.128	0.002	-0.011	0.022

1) 对角线数字为各因子与 PUF 的相关性水平, 其余数字表示各环境因子间的相关系数; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, *** 表示在 0.001 水平(双侧)上显著相关



N、P、K 和 C 分别代表氮肥、磷肥、钾肥和复合肥

图 4 基于 CCA 分析的各环境因子与 PUF、土壤 Cd 和蔬菜 Cd 含量相关关系

Fig. 4 Influence of environmental factors on PUF, soil Cd, and vegetables Cd based on CCA analysis

2.4 路径模型分析

相关分析和典型相关分析(CCA)显示土壤 pH、SOM、CEC、灌溉水 pH、降雨量和氮肥施肥量为 6 个影响 PUF 变化的主要环境因子. 因此将这 6 个变量引入到路径分析模型(PA, 图 2)中进一步分析各环境因子与 PUF 变化间的效应关系. 结果表明 PA 模型解释程度为 0.582, RMSE = 0.24, 模型对各变量解释程度较好, 通过显著性检验.

土壤 pH ($P_{17} = -0.254^{***}$) 与 SOM ($P_{27} = -0.511^{***}$) 对 PUF 变化有显著的直接作用(P 表示直接作用, 表 3), 可见土壤 pH 和 SOM 是 PUF 变化的主要驱动因子. 灌溉水 pH 及降雨量与 PUF 显著相关(相关系数分别为 -0.118^* 和 -0.156^*), 但直接作用并不显著. 而灌溉水 pH 和降雨量与土壤 pH 和 SOM 均呈显著正相关(表 3), 可见灌溉水 pH 和降雨量通过影响土壤 pH 和 SOM 进而影响 PUF 变化. 相关报道指出降雨和灌溉水通过调节土壤水分

含量, 影响土壤微生物活动程度, 改变土壤氧化还原状态, 进而影响田间 pH 与 SOM 变化^[15]. 而研究区雨量充沛, 灌溉用水资源便利, 因此对土壤 pH 和 SOM 变化影响较为显著. 考虑到研究区土壤 pH 和有机质含量较低, 蔬菜 Cd 累积风险需引起当地有关部门的一定关注.

氮肥施肥量与 PUF 呈显著正相关($r = 0.240^{**}$), 但对 PUF 直接作用并不显著, 而氮肥施肥量与土壤 pH 和 SOM 呈显著负相关. 由此可见氮肥施肥量对 PUF 的影响也是通过其对土壤 pH 和 SOM 的间接效应实现. Liu 等^[26] 指出我国南方施肥量显著超标, 造成了严重的土壤酸化和土壤微量元素流失等问题. 入户调查显示研究区各乡镇化肥平均施用量均接近 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远远超过国际平均水平^[26], 而氮肥的过量施用加重了土壤酸化和土壤 SOM 的流失, 进而促进了 Cd 在蔬菜中的富集. 相关研究指出 Cd 在土壤-蔬菜系统中的富集与土壤养分库中各微量元素(如 Al、Fe、Mn 和 Zn)含量关系密切^[1,4,5,27], 在将来的研究中, 其他微量元素的引入有助于更全面地了解蔬菜 Cd 累积特性与各环境因子之间的相互效应关系.

3 结论

攸县土壤 Cd 含量水平较高, 研究区成人经食用蔬菜摄入 Cd 风险水平略高于 ATSDR 规定的标准值, 具有一定的健康风险. 研究区 PUF 在风险评价中有一定参考作用, Gaussian 分布方程对蔬菜 Cd 富集因子(PUF)拟合效果显著. 灌溉水 pH, 降雨和施肥量通过影响土壤 pH 和土壤有机质进而影响 PUF 变化. 土壤基本性质, 气候条件, 灌溉条件和施肥量对蔬菜 Cd 累积水平影响的综合研究有助于了解各环境因子在蔬菜 Cd 累积过程中的作用关系.

路径分析模型,典型相关分析(CCA)与传统多元分析方法的联用有助于深入了解各环境因子间的相互效应关系.

参考文献:

- [1] Shentu J L, He Z L, Yang X E, *et al.* Accumulation properties of cadmium in a selected vegetable-rotation system of southeastern China[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, **56**(15): 6382-6388.
- [2] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. *中国农业科学*, 2007, **40**(11): 2507-2517.
Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(11): 2507-2517.
- [3] Zhang H Z, Luo Y M, Song J, *et al.* Predicting As, Cd and Pb uptake by rice and vegetables using field data from China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(1): 70-78.
- [4] Ding C F, Zhang T L, Wang X X, *et al.* Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, **61**(43): 10273-10282.
- [5] Huang Z, Pan X D, Wu P G, *et al.* Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China[J]. *Food Control*, 2014, **36**(1): 248-252.
- [6] Zhao H R, Xia B C, Fan C, *et al.* Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 45-54.
- [7] Nabulo G, Young S D, Black C R. Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(22): 5338-5351.
- [8] 郑向群, 郑顺安, 李晓辰. 叶菜类蔬菜土壤铬(Ⅲ)污染阈值研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 3039-3044.
Zheng X Q, Zheng S A, Li X C. Pollution threshold value of soil chromium (Ⅲ) for leafy vegetables [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 3039-3044.
- [9] Swartjes F A, Versluijs K W, Otte P F. A tiered approach for the human health risk assessment for consumption of vegetables from with cadmium-contaminated land in urban areas [J]. *Environmental Research*, 2013, **126**: 223-231.
- [10] Chen W P, Li L Q, Chang A C, *et al.* Characterizing the solid-solution partitioning coefficient and plant uptake factor of As, Cd, and Pb in California croplands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(1-3): 212-220.
- [11] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1076-1085.
Li R Z, Pan C R, Xu J J, *et al.* Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1076-1085.
- [12] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4283-4290.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of cd in rice grains[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4283-4290.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] Shipley B. Confirmatory path analysis in a generalized multilevel context[J]. *Ecology*, 2009, **90**(2): 363-368.
- [15] Reiser R, Simmler M, Portmann D, *et al.* Cadmium concentrations in New Zealand pastures: relationships to soil and climate variables[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, **43**(3): 917-925.
- [16] GB/T 21010-2007 土地利用现状分类[S].
GB/T 21010-2007 Current and use classificatoin[S].
- [17] 文星, 李明德, 涂先德, 等. 湖南省耕地土壤的酸化问题及其改良对策[J]. *湖南农业科学*, 2013, (1): 56-60.
Wen X, Li M D, Tu X D, *et al.* Acidification problems of arable land in Hunan province and its improvement countermeasures [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013, (1): 56-60.
- [18] 国家环境保护局, 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. 87-98, 342-381.
State Environmental Protection Administration of China, Total station of China environment monitoring. Chinese soil element background values [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1990. 87-98, 342-381.
- [19] GB 15618-1995 土壤环境质量标准[S].
GB 15618-1995 Environmental quality standard for soils[S].
- [20] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [21] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 346-351.
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. 257.
State Environmental Protection Administration of China. Exposure factors handbook of Chinese population [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2013. 257.
- [23] ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological profile for cadmium [M]. Atlanta, GA: US Department of Health and Human Services, Public Health Services, 2012.
- [24] CDFA. Supplement to the development of risk-based concentrations for arsenic, cadmium, and lead in inorganic fertilizers [M]. Sacramento, California: Prepared by MWH, 2002.
- [25] Fu J, Zhao C P, Luo Y P, *et al.* Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **270**: 102-109.
- [26] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [27] Yang J X, Guo H T, Ma Y B, *et al.* Genotypic variations in the accumulation of Cd exhibited by different vegetables[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(8): 1246-1252.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172