

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱耕, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭氧原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛昱, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系

王梦梦, 何梦媛, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要: 水稻是高累积镉(Cd)的农作物,其吸收累积 Cd 的量受多种因素影响. 为明确田间条件下,土壤中 Cd 含量和土壤性质与稻米 Cd 含量的定量关系,在水稻收获时通过对 60 个不同田块的土壤和稻谷进行点对点采样,分析土壤 Cd 含量、土壤 pH 值、土壤有机质(SOM)、土壤阳离子交换量(CEC)和稻米中 Cd 含量,并通过线性相关与多元回归分析,研究 Cd 污染稻田土壤性质与稻米 Cd 含量的定量关系. 结果表明:所采稻田土壤 Cd 含量范围为 0.15~2.54 mg·kg⁻¹,其对应的稻米 Cd 含量范围为 0.02~2.00 mg·kg⁻¹;简单线性相关分析表明,土壤全 Cd 含量与水稻籽粒 Cd 含量达到了极显著相关水平($P < 0.01$),相关性系数 $r = 0.392$ ($n = 60$);土壤 pH、有机质(SOM)和阳离子交换量(CEC)对稻米 Cd 含量也有一定的影响,但未达到显著水平;土壤 pH 与稻米 Cd 含量的关系呈现为:当 pH 小于 6.5 时,稻米 Cd 含量随着 pH 的升高而增加,当 pH 大于 6.5 时,稻米 Cd 含量随着 pH 的升高而降低. 将土壤全 Cd 含量、土壤 pH、有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)与稻米中 Cd 含量进行多元回归分析,得到 5 个稻米中 Cd 含量预测方程,其相关系数 r 均达到极显著水平($P < 0.01$),其中包括全部变量在内的预测方程的相关性系数最高,可以较好地预测此地水稻籽粒中 Cd 含量.

关键词: 土壤-水稻系统; Cd 含量; 土壤理化性质; 相关性分析; 定量关系

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1918-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201709039

Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains

WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Pollution Prevention Control and Remediation, College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Rice is a crop with the potential for high accumulation of Cd, which can be affected by many factors. Sixty pairs of soil and rice samples from different plots were collected and analyzed, in order to understand the quantitative relationships between the Cd content in soil and the properties of soil and the Cd content in rice grains under field conditions, by simple and multiple regression analyses. The results showed that the Cd contents in soil and rice grains ranged from 0.15-2.54 mg·kg⁻¹ and 0.02-2.00 mg·kg⁻¹, respectively. According to the result of simple regression analysis, there were significantly positive correlations ($P < 0.01$) between the Cd contents in soil and rice grains ($r = 0.392$); the pH, SOM, and CEC in soil also had certain effects on Cd accumulation in rice grains, which were not significant, however. When the soil pH was < 6.5 , the Cd content in rice grains increased with increasing soil pH, but decreased with increasing soil pH when the soil pH was > 6.5 . The Cd content, pH, SOM, and CEC in the soil and the Cd content in rice grains were analyzed by multiple regression analysis, and five equations, which all reached extremely significant levels ($P < 0.01$), were obtained. The equation that included the four variables (Cd content, pH, SOM, and CEC in soil) had the most r , and it could predict the Cd content in rice grains better, given the conditions of the present study.

Key words: soil-rice system; cadmium; soil properties; correlation analysis; quantitative relationship

镉(Cd)是人体非必需且有毒的元素,进入人体的 Cd 与体内的蛋白质及各种酶发生作用,而使之失去活性,并在人体某些器官中积聚起来造成慢性中毒,诱发各种疾病^[1]. 我国是世界上最大的水稻生产国和消费国,水稻是我国的第一大粮食作物^[2],稻米是我国的主要口粮,在全国居民口粮消费结构中约占 65% 的比例^[3]. 然而,水稻具有累积重金属 Cd 的习性,通过吸收、转运将 Cd 积累至稻米中^[4]. 随着我国工业化进程的加速和社会经济的发展,重金属污染问题日趋严峻,水稻的生产受重金属 Cd 污染的影响也日益加剧,严重威胁着粮食

生产安全^[5,6].

土壤中重金属是稻米重金属的来源,是影响稻米安全性的重要因素. 但除土壤总 Cd 含量外,土壤的理化性质也影响水稻对 Cd 的吸收,如土壤 pH^[7]、有机质^[8]、电导率^[9]、土壤质地和阳离子交换量^[10]等. 大量盆栽试验结果表明土壤理化性质及

收稿日期: 2017-09-05; 修订日期: 2017-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801103); 国家自然科学基金项目(41271488)

作者简介: 王梦梦(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复, E-mail: 1469107803@qq.com

* 通信作者, E-mail: dcsu@cau.edu.cn

重金属含量与作物重金属含量之间有良好的相关性且相关性系数也较高。易亚科等^[11]的研究表明,在双因素分析中,土壤 pH 对水稻 Cd 含量的影响达到极显著水平;赵雄等^[5]的研究表明,糙米 Cd 含量与土壤总 Cd 含量呈显著正相关关系,且相关性系数达到 0.9 以上;郑春荣等^[12]将取自辽宁、广西土壤进行盆栽试验结果表明,水稻 Cd 含量与土壤 Cd 含量均达到极显著相关性,相关性系数达到 0.9 以上。

不同于盆栽试验的高相关性系数和极显著相关性,大田环境下由于土壤类型和理化性质具有一定的空间异质性,作物生长环境条件不均一^[13],因此有与盆栽试验不同的研究结果。有研究表明土壤 pH 是影响水稻吸收 Cd 的重要因素^[14],pH 的变化影响 Cd 的存在形态。廖启林等^[15]的研究结果表明,大田条件下,土壤全 Cd 含量、pH、有机质、CEC 与水稻 Cd 含量不存在显著相关性;李志博等^[16]的研究表明土壤有机质对水稻吸收 Cd 的影响不能纳入回归方程预测模型中。

本文选择我国南方中南地区某县 14 个乡镇的 60 块不同 Cd 污染程度稻田为研究对象,通过点对点土壤和稻谷采样,分析土壤和稻谷 Cd 含量和土壤 pH、有机质(SOM)、土壤阳离子交换量(CEC)指标,探讨田间条件下水稻土壤理化性质、全 Cd 含量对水稻 Cd 含量的影响过程,并通过多元回归分析研究水稻 Cd 含量与土壤 Cd 含量及土壤理化性质之间的定量关系,以期为指导水稻安全生产提供实际科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤和作物样品采集

2015 年 10 月晚稻收获时在我国南方中南地区某县 14 个乡镇 60 块稻田布设采样点,采集土壤和对应的晚稻样品共 60 对。

采样点选点要求为:①周边无明显重金属污染源;②灌溉水系相同,水质符合国家农田灌溉水质标准;③水源充足,可保证全生育期淹灌需要;④非潜育化稻田所占比例 70% 以上。

土壤样品采集原则:①采用“S”形布点取样,每个样要求不低于 5 个取样点采土混匀,取样深度为 0~20 cm,混合土样以 1.5 kg 左右为宜;②采样时,需除去土壤表层植被和枯枝落叶,铲除表层 1 cm 左右的表土。稻谷样品采集原则:①采用“S”形布点取样,采集区内采取 10 个样点的样品组成一个混合样;②采样时,避免采集到空穗、虫病害、

长势显著低于平均水平的水稻稻谷。所采集的样品装入样品袋中密封保存,尽快运回室内,于无污染处风干,备用。

1.2 样品处理与测定

土壤样品风干后,用四分法取出一部分混匀的风干土样,过 1 mm 孔径筛,储存于塑封袋内,编号,用于测定土壤 pH、CEC;用四分法再取出一部分,全部过 0.149 mm 孔径筛,储存于塑封袋内,编号,用于测定土壤全 Cd 含量、土壤有机质。水稻籽粒样品分析前,70℃,48 h 杀青烘干,取出后脱壳,再用粉碎机粉碎,制成糙米样品,置于塑封袋内,编号,用于测定水稻重金属 Cd 含量。

土壤 pH 依照 NY/T 1121.2-2006 采用电位法(玻璃电极)进行测定(土液比为 1:2.5);土壤有机质采用重铬酸钾外加热法进行测定;土壤阳离子交换量依照 NY/T 295-1995 进行测定;土壤全 Cd 含量依照 GB/T 17141-1997 中的石墨炉原子吸收分光光度法进行测定,Cd 元素检出限为 0.01 mg·kg⁻¹;稻谷中 Cd 含量依照《食品安全国家标准-食品中 Cd 的测定》(GB 5009.15-2014)中石墨炉原子吸收分光光度计方法进行测定,Cd 元素检出限为 0.01 mg·kg⁻¹;土壤全 Cd、土壤 pH、有机质、CEC 质量控制标样的编号分别为 GBW-07410、GBW-07417a(ASA-6a)、GBW07415(ASA-4)、GBW07415(ASA-4);土壤样品 Cd 元素测定时标准物质编号为 GBW-07410,Cd 元素的回收率为 102%;水稻样品分析使用的标准物质编号为 GBW10049(GSB-27),Cd 元素的回收率为 105%。

1.3 数据统计分析

使用 Excel 2010、SPSS 17.0 数据处理软件对本数据进行处理、统计分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤性质、土壤 Cd 含量及水稻 Cd 含量特征分析

所采集的 60 对样品的土壤理化性质、土壤全 Cd 含量、稻谷 Cd 含量数据特征见表 1。从中可知,所采集的 60 对样品土壤 Cd 含量、pH、CEC、有机质均为正态分布。采样区土壤全 Cd 含量范围为 0.15~2.54 mg·kg⁻¹,最高含量为最低含量的 16.9 倍,平均值为(0.69±0.44)mg·kg⁻¹,变异系数为 63.77%,属于中等变异程度;土壤样本 pH 值范围为 4.85~7.63,平均值为(5.79±0.65),土壤样本总体处于酸性,其中强酸性、酸性、中性和碱性的

样点数分别为 3、49、7、1 个, 变异系数为 11.23%, 属于中等变异程度; 土壤 CEC 含量范围为 8.68 ~ 26.37 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 (14.00 ± 3.57) $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 25.50%, 属于中等程度变异; 土壤有机质含量范围为 13.5 ~ 76.3

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 (45.1 ± 11.9) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 26.39%, 属于中等程度变异; 稻米 Cd 范围是 0.02 ~ 2.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高含量为最小含量的 100 倍, 平均值为 (0.55 ± 0.44) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 80.0%, 属于中等程度变异.

表 1 土壤全 Cd 含量、pH、CEC、SOM 以及稻米 Cd 含量统计结果

Table 1 Descriptive statistics of the Cd content, pH, CEC and SOM in soil, and the Cd content in rice grains

指标	样本数/个	范围	分布类型	算术均值	标准差	变异系数/%
土壤 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	60	0.15 ~ 2.54	正态	0.69	0.44	63.77
pH	60	4.85 ~ 7.63	正态	5.79	0.65	11.23
CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	60	8.68 ~ 26.37	正态	14.00	3.57	25.50
SOM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	60	13.5 ~ 76.3	正态	45.10	11.90	26.39
稻米 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	60	0.02 ~ 2.00	正态	0.55	0.44	80.00

2.2 稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量及土壤性质的相关关系

2.2.1 稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量之间的关系

图 1 为本采样区域内土壤全 Cd 含量与晚稻稻米 Cd 含量直线相关关系, 可以看出本区域内田间条件下稻米 Cd 含量与土壤全 Cd 含量呈现极显著 ($P < 0.01$) 正相关性, 相关系数为 0.392 ($n = 60$). 不同于盆栽试验或田间小区试验中稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量具有的较高的相关性, 在实际水稻田条件下, 很多研究表明稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量相关性出现减弱现象. 汤丽玲^[17]对采自江苏省部分地区水稻与土壤样品中 Cd 含量进行调查分析, 结果表明稻米中 Cd 含量与土壤 Cd 含量之间没有明显的相关性; 赵科理^[13]对浙江温岭、嵊州、南浔土壤 Cd 含量和稻米 Cd 含量相关关系进行研究, 结果表明虽然达到了极显著相关, 但是相关性系数仅为 0.21; 陈岭啸等^[18]研究长江三角洲典型地区的土壤-水稻系统, 结果表明土壤中 Cd 的含量与水稻籽粒中 Cd 的含量几乎不存在相关性; 王恒^[19]对延边水稻灌区的土壤-水稻系统重金属迁移特征调查研究, 结果表明, 稻米中 Cd 与土壤中 Cd 的相关性

达到极显著相关, 但是相关性系数为 0.36. 这表明在田间条件下, 除了土壤 Cd 含量的影响外, 稻米 Cd 含量还受到土壤其他性质的影响. 本采样区 14 个乡镇 60 块稻田的 60 对样品的相关性分析表明, 田间条件下稻米 Cd 含量与土壤全 Cd 含量有极显著正相关 ($P < 0.01$) 关系, 相关系数达到了 0.392 ($n = 60$).

2.2.2 稻米 Cd 含量与土壤 pH 之间的关系

大量研究表明, 农作物对土壤重金属的吸收受土壤酸碱度 (pH) 的影响^[20~23]. 本研究所采土壤样本 pH 与稻米 Cd 含量的关系如图 2(a) 所示, 可以看出本田间条件下稻米 Cd 含量与土壤 pH 之间并无显著相关性, 两者相关系数 r 仅为 -0.066 . 图 2(b) 中, 将 pH 每变化 0.6 个单位划分一个等级, 细化土壤 pH 变化对稻米 Cd 含量的影响后发现, 当土壤 pH 小于 6.5 时, 随着土壤 pH 值的增加, 稻米 Cd 均值含量是增加的, 并在 5.9 ~ 6.5 之间达到最大值; 当 pH 大于 6.5 时, 随着 pH 的升高, 稻米 Cd 均值含量呈下降趋势. pH 对稻米 Cd 含量的影响趋势在 6.5 时出现转折, 说明土壤 pH 对稻米 Cd 含量的影响并不是单一的增或减趋势, 故简单线性相关分析的结果并未显示较好的相关性关系. 土壤 pH 对稻米 Cd 含量的影响不同范围有不同结果是由于土壤中 Cd 形态变化不同造成的. 土壤 pH 是影响土壤重金属 Cd 溶解度、形态变化、迁移和生物有效性的主要因子之一^[24]. 邓朝阳等^[25]的研究表明, pH 是影响 Cd 存在形态的最主要因素. 夏汉平^[26]认为 pH 值为 4.0 时, 溶液态 Cd 比例达 50%, 当 pH 值大于 6.0 时, Cd 开始出现沉淀如 CdS 、 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 、 CdCO_3 等; 廖敏等^[27]研究表明, 投加石灰于酸性土壤上直至中性, 土壤水溶态、交换态及

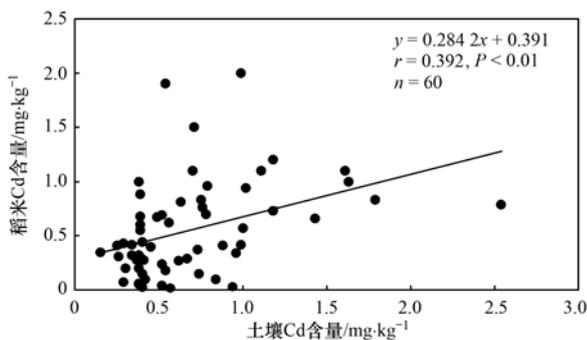


图 1 土壤全 Cd 含量与稻米 Cd 含量相关关系

Fig. 1 Relationship between the Cd contents in soil and rice grains

可氧化态 Cd 含量随着石灰用量的增加而逐渐降低; 钱翌等^[28]的研究结果发现, 当向土壤中单一添加柠檬酸时, 随着柠檬酸浓度的提高, 土壤中可交换态 Cd 的含量逐渐增加; 潘杨等^[29]将采自湖南、湖北、浙江省的部分稻米与土壤进行试验, 结果表明土壤 pH 在 5.0~6.0 之间, 稻米吸收 Cd 的能力最强, pH 大于 6.0 时, 吸收能力明显下降; Zhao 等^[30]的研究认为要使稻米 Cd 含量超过 0.2 mg·kg⁻¹ 的限值, 在 pH=5.0 的土壤上, Cd 含量只需达到 0.18 mg·kg⁻¹, 在 pH=7.0 的土壤上, Cd 含量需要超过 0.9 mg·kg⁻¹; 易亚科等^[11]的盆栽试验表明在土壤酸度为 4.0~8.0 范围内, 稻米 Cd 含量呈现先增后减趋势, 且在 6.0 时达到最大值. 因此, 生产上通过施用石灰来治理 Cd 污染稻田土壤时要考虑所针对土壤的 pH, 只有把土壤 pH 调到 6~6.5 以上才能有效降低稻米中 Cd 含量.

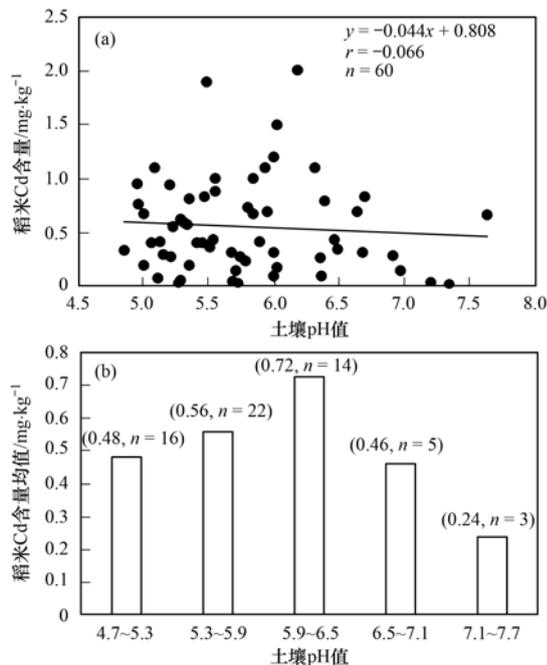


图 2 土壤酸碱度对稻米 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effects of soil pH on the Cd content in rice grains

2.2.3 稻米 Cd 与土壤 CEC、SOM 之间的关系

由图 3(a)可以看出, 随着土壤 CEC 的增加, 水稻籽粒累积 Cd 的量呈下降趋势, 二者呈现负相关关系, 但土壤阳离子交换量(CEC)与稻米 Cd 含量的相关性系数仅为 -0.115, 未达到显著性; 由图 3(b)可以看出, 随着土壤中 SOM 含量的增加, 水稻籽粒累积 Cd 的量呈增加趋势, 二者呈现正相关关系, SOM 与稻米 Cd 的相关性系数为 0.253, 也未达到显著性. CEC、SOM 影响重金属 Cd 的固-液分配, 从而影响水稻对重金属的吸收. 一般来说,

随着土壤 CEC 的增大, 土壤中负电荷量越高, 从而提供更多吸附点位来固定重金属离子^[31, 32]. 廖启林等^[15]的研究表明, 当土壤 Cd 含量偏高时, CEC 的增加会对稻米吸收 Cd 产生明显制约作用, 土壤 Cd 含量偏低时 CEC 的增加基本不对稻米吸收 Cd 产生影响; 沈阳张士灌区水稻土壤理化性质与 Cd 存在形态相关性分析表明, 弱酸提取态是影响水稻植株吸收 Cd 含量的主要因素, 而弱酸提取态与土壤 CEC 含量呈显著相关关系^[33]. SOM 被认为是影响土壤重金属有效性的最主要因素之一. 华珞等^[34]的研究表明, 施入有机肥后土壤中有效态 Cd 的含量明显降低; 赵科理^[13]认为稻米 Cd 的吸收与 pH、有机质的空间相关性最强; 王维^[35]的研究表明, 稻米 Cd 含量与 SOM 呈显著负相关. 但也有研究认为^[16, 36]有机质对稻米吸收土壤 Cd 没有太大影响. 本研究结果表明, 田间条件下 CEC、SOM 对稻米 Cd 含量均有影响, 但单项简单相关的关系未达到显著性.

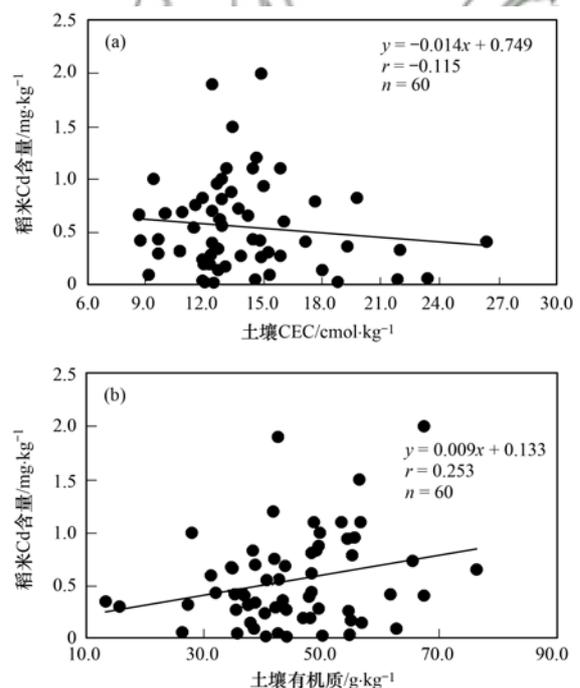


图 3 土壤有机质、阳离子交换量与稻米 Cd 含量的相关关系

Fig. 3 Relationship between SOM and CEC in soil and the Cd content in rice grains

2.3 多因素影响的稻米 Cd 含量预测模型的建立

本研究表明, 土壤全 Cd 含量与稻米 Cd 含量之间呈极显著相关关系, 土壤 pH、CEC、SOM 对稻米 Cd 含量也有影响但单项相关性并不显著. 由于土壤理化性质影响着重金属的形态分布, 控制着重金属的固-液相分配, 从而影响植物对重金属的吸收,

因此为了提高模型预测效果,将土壤理化性质也作为变量.本文采用对数模型,将土壤全 Cd 含量与

土壤理化性质相结合应用多元回归分析,得到水稻籽粒 Cd 含量的预测方程如表 2 所示.

表 2 水稻籽粒 Cd 含量预测模型¹⁾

Table 2 Models predicting the Cd content in rice grains

编号	预测方程($n = 60$)	r	P
1	$\lg Cd_{\text{rice}} = 0.673 \lg Cd_{\text{soil}} - 0.279$	0.347 **	<0.01
2	$\lg Cd_{\text{rice}} = 0.773 \lg Cd_{\text{soil}} - 2.343 \lg pH + 1.526$	0.416 **	<0.01
3	$\lg Cd_{\text{rice}} = 0.887 \lg Cd_{\text{soil}} - 2.362 \lg pH - 1.075 \lg CEC + 2.785$	0.475 **	<0.01
4	$\lg Cd_{\text{rice}} = 1.043 \lg Cd_{\text{soil}} - 0.731 \lg SOM - 2.414 \lg pH + 2.838$	0.443 **	<0.01
5	$\lg Cd_{\text{rice}} = 1.22 \lg Cd_{\text{soil}} - 0.874 \lg SOM - 2.448 \lg pH - 1.179 \lg CEC + 4.476$	0.509 **	<0.01

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

由表 2 可知,在简单回归方程里,土壤 Cd 含量与稻米 Cd 含量呈极显著相关关系,并且控制着 34.7% 的模型变异.在多元方程里,引入 pH 可以将模型的预测能力提高到 41.6%.进一步引入第 3 个变量,回归模型的相关系数继续升高,在土壤全 Cd 含量、pH、CEC 这 3 个因子的共同控制下,回归模型的预测能力上升为 47.5%.在土壤全 Cd 含量、pH、SOM 这 3 个因子的共同控制下,回归模型的预测能力为 44.3%.继续引入第 4 个变量,在土壤全 Cd 含量、SOM、CEC、pH 这 4 个因子的共同控制下,回归模型的相关系数达到最大,为 50.9%.故相比较下,方程 5: $\lg Cd_{\text{rice}} = 1.22 \lg Cd_{\text{soil}} - 0.874 \lg SOM - 2.448 \lg pH - 1.179 \lg CEC + 4.476$,可以较好地预测南方某县水稻籽粒积累重金属 Cd 的量.

虽然随着变量的不断引入,表 2 中回归方程的相关系数逐渐增大且均达到极显著水平,但是最大值也仅为 0.509.这也说明大田试验较盆栽试验而言,预测模型的相关系数明显较低.汤丽玲^[17]建立了实际大田中水稻 Cd 与土壤 Cd 和 pH 之间的相关模型,虽然预测模型达到了极显著的相关水平,但是其相关系数仅为 0.565;赵科理^[13]以浙江实际水稻田为研究对象,建立了水稻籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 含量、pH 值之间的关系,多元回归方程达到极显著相关,相关性系数为 0.518.

稻米累积重金属受水稻基因、外界环境以及二者的交互作用的影响^[37, 38].本研究中模型的相关性系数仅为 0.509,首先是因为本研究主要是针对土壤全 Cd 含量、pH、有机质、CEC 进行研究,实际水稻产区中影响籽粒累积重金属 Cd 的因素复杂,除了以上土壤理化性质外还包括土壤质地、氧化还原电位等;其次是因为土壤生物有效态 Cd 的含量较土壤全 Cd 含量更能反映土壤中 Cd 的生物可利用量大小.土壤中 Cd、特别是其生物有效态含量对稻米吸收 Cd 有显著影响^[5, 39~41].潘杨等^[29]以湖南

益阳为研究对象,研究土壤全 Cd 以及有效态 Cd 与稻米重金属 Cd 的关系,结果表明,有效态 Cd 与稻米 Cd 的决定系数均比稻米 Cd 与土壤全 Cd 决定系数大;再次是因为不同品种的水稻以及同一品种的不同基因型在吸收累积重金属时有差异.李正文等^[42]分析了种植于太湖地区同一地块(乌栅土)的 57 个水稻籽粒中的 Cd 含量,结果发现,籽粒 Cd 积累在 $0.026 \sim 0.139 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,品种间存在显著差异;曾翔等^[43]结果表明糙米含 Cd 量在特种稻、常规早籼稻、三系杂交晚稻、两系杂交晚稻、常规晚籼稻、常规粳稻中呈现依次降低的趋势;Liu 等^[44]采用盆栽试验,将 20 个水稻基因型分别种植于添加 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 的土壤中,结果发现了不同基因型糙米 Cd 积累在 $0.87 \sim 2.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,基因型的糙米 Cd 含量存在显著差异.本研究的采样区范围为 14 个乡镇的 60 块稻田,范围较大,水稻品种也超过 10 个,建立的包括土壤全 Cd 含量、pH、SOM、CEC 在内的稻米 Cd 含量多元回归预测方程达到极显著相关,控制着 50.9% 的模型变异.

3 结论

(1) 在田间条件下,土壤全 Cd 含量与稻米 Cd 含量呈极显著正相关,但相关性系数仅为 0.392.

(2) 土壤 pH 对稻米 Cd 含量的影响呈现当 pH 小于 6.5 时,随着土壤 pH 的升高稻米 Cd 含量增加,当 pH 大于 6.5 时,稻米 Cd 含量随着 pH 的升高呈降低趋势.

(3) 采用对数模型,将土壤全 Cd 含量、pH、SOM、CEC 同时考虑与稻米 Cd 含量进行多元回归分析,得到的模型能较好地预测当地水稻籽粒中 Cd 的含量.

参考文献:

- [1] 唐贞,杨仁斌,雷鸣,等.湘潭某工业园周边稻田土壤及稻米镉污染的风险评价[J].湖南农业大学学报(自然科学

- 版), 2012, **38**(1): 92-95.
- Tang Z, Yang R B, Lei M, *et al.* Risk assessment of Cd in paddy soil and rice sample collected from an industrial park of Xiangtan[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2012, **38**(1): 92-95.
- [2] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(7): 1257-1263.
- Zhan J, Wei S H, Niu R C. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: a review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(7): 1257-1263.
- [3] 罗琼, 王昆, 许靖波, 等. 我国稻田镉污染现状·危害·来源及其生产措施[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(30): 10540-10542.
- Luo Q, Wang K, Xu J B, *et al.* Cadmium pollution Situation, harm, source and production measures in paddy field of China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(30): 10540-10542.
- [4] 朱智伟, 陈铭学, 牟仁祥, 等. 水稻镉代谢与控制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(18): 3633-3640.
- Zhu Z W, Chen M X, Mou R X, *et al.* Advances in research of cadmium metabolism and control in rice plants [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(18): 3633-3640.
- [5] 赵雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(11): 2236-2240.
- Zhao X, Li F Y, Zhang D M, *et al.* Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(11): 2236-2240.
- [6] 肖相芬, 张经廷, 周丽丽, 等. 中国水稻重金属镉与铅污染 GAP 栽培控制关键点分析[J]. *中国农学通报*, 2009, **25**(21): 130-136.
- Xiao X F, Zhang J T, Zhou L L, *et al.* Analysis on key points for controlling cadmium and lead contamination during rice production [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(21): 130-136.
- [7] McBride, Murray B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH [J]. *Soil Science*, 2002, **167**(1): 62-67.
- [8] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. *云南农业大学学报*, 2005, **20**(4): 539-543.
- Du C Y, Zu Y Q, Li Y. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, **20**(4): 539-543.
- [9] McLaughlin M J, Palmer L T, Tiller K G, *et al.* Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(5): 1013-1018.
- [10] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(3): 289-292.
- Zu Y Q, Li Y, Chen H Y, *et al.* Research on factors influencing concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn in vegetables [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, **22**(3): 289-292.
- [11] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(3): 428-436.
- Yi Y K, Zhou Z B, Chen G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(3): 428-436.
- [12] 郑春荣, 孙兆海, 周东美, 等. 土壤 Pb Cd 污染的植物效应 II——Cd 污染对水稻生长和 Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(5): 872-876.
- Zheng C R, Sun Z H, Zhou D M, *et al.* Plant responses to soil lead and cadmium pollution II. Effects of soil cadmium pollution on wetland rice growth and its uptake of cadmium [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(5): 872-876.
- [13] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 14-92.
- Zhao K L. Spatial relationships of heavy metals in soil-rice system and the quantitative model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. 14-92.
- [14] 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.
- [15] 廖启林, 刘聪, 王轶, 等. 水稻吸收 Cd 的地球化学控制因素研究——以苏锡常典型区为例[J]. *中国地质*, 2015, **42**(5): 1621-1632.
- Liao Q L, Liu C, Wang Y, *et al.* Geochemical characteristics of rice uptake of cadmium and its main controlling factors: a case study of the Suxichang (Suzhou-Wuxi-Changzhou) typical area [J]. *Geology in China*, 2015, **42**(5): 1621-1632.
- [16] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 基于稻米摄入风险的稻田土壤镉临界值研究: 个案研究[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(1): 76-81.
- Li Z B, Luo Y M, Song J, *et al.* Critical values for Cd in paddy field based on Cd risk of rice consumption: a case study [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(1): 76-81.
- [17] 汤丽玲. 作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 699-703.
- Tang L L. Effects of soil properties on crop Cd uptake and prediction of Cd concentration in grains [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(2): 699-703.
- [18] 陈岭啸, 宋垠先, 袁旭音, 等. 长江三角洲典型地区土壤-水稻系统中 Cd 的分布及其迁移制约因素[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, **33**(3): 288-295.
- Chen L X, Song Y X, Yuan X Y, *et al.* Distribution of Cd and impact factors on the migration in soil-rice system in typical area of Yangtze River Delta Region [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, **33**(3): 288-295.
- [19] 王恒. 吉林省土壤-水稻系统环境质量分析评估及重金属复合污染研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014. 65-75.
- Wang H. Soil quality and heavy metals contamination in soil-rice system in Jilin province [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology), 2014. 65-75.
- [20] 廖启林, 刘聪, 朱伯万, 等. 凹凸棒石调控 Cd 污染土壤的作用及其效果[J]. *中国地质*, 2014, **41**(5): 1693-1704.
- Liao Q L, Liu C, Zhu B W, *et al.* The role and effect of applying attapulgite to controlling Cd-contaminated soil [J]. *Geology in China*, 2014, **41**(5): 1693-1704.

- [21] 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 等. 江苏典型地区水稻与小麦字实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 2013, **40**(1): 331-340.
Liao Q L, Liu C, Cai Y M, *et al.* A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 2013, **40**(1): 331-340.
- [22] 刘丹青, 陈雪, 杨亚洲, 等. pH值和Fe、Cd处理对水稻根际及根表Fe、Cd吸附行为的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(14): 4306-4314.
Liu D Q, Chen X, Yang Y Z, *et al.* Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(14): 4306-4314.
- [23] Li W L, Xu B B, Song Q J, *et al.* The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 407-420.
- [24] 叶新新, 孙波. 品种和土壤对水稻镉吸收的影响及镉生物有效性预测模型研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(3): 360-365.
Ye X X, Sun B. Reviews on the effects of rice cultivars and soil types on Cd absorption and prediction model for Cd bioavailability [J]. *Soils*, 2012, **44**(3): 360-365.
- [25] 邓朝阳, 朱霞萍, 郭兵, 等. 不同性质土壤中镉的形态特征及其影响因素[J]. 南昌大学学报(工科版), 2012, **34**(4): 341-346.
Deng Z Y, Zhu X P, Guo B, *et al.* Distribution and influence factors of Cd speciation on the soil with different properties[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2012, **34**(4): 341-346.
- [26] 夏汉平. 土壤-植物系统中的镉研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 1997, **3**(3): 289-298.
Xia H P. Studies on cadmium in soil-plant system[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1997, **3**(3): 289-298.
- [27] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(1): 81-86.
Liao M, Huang C Y, Xie Z M. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, **19**(1): 81-86.
- [28] 钱翌, 刘莹. 单一及复合有机酸对土壤中镉形态的影响研究[J]. 土壤通报, 2012, **43**(1): 186-189.
Qian Y, Liu Y. Effects of single and combined organic acids on form of Cd in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(1): 186-189.
- [29] 潘杨, 赵玉杰, 周其文, 等. 南方稻区土壤pH变化对稻米吸收镉的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, **43**(16): 235-238.
Pan Y, Zhao Y J, Zhou Q W, *et al.* Influence of soil pH on cadmium absorption by rice in main rice production region of South China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(16): 235-238.
- [30] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 750-759.
- [31] Hooda P S, Alloway B J. Cadmium and lead sorption behaviour of selected English and Indian soils[J]. *Geoderma*, 1998, **84**(1-3): 121-134.
- [32] 张磊, 宋凤斌. 土壤吸附重金属的影响因素研究现状及展望[J]. 土壤通报, 2005, **36**(4): 628-631.
Zhang L, Song F B. Adsorption of heavy metals by soils and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, **36**(4): 628-631.
- [33] 付玉豪, 李凤梅, 郭书海, 等. 沈阳张士灌区彰驿站镇土壤与水稻植株镉污染分析[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(7): 1965-1972.
Fu Y H, Li F M, Guo S H, *et al.* Cadmium pollution in soil and rice plants in Zhangyizhan town of Zhangshi irrigation area of Shenyang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(7): 1965-1972.
- [34] 华路, 陈世宝, 白玲玉, 等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. 农业环境保护, 1998, **17**(2): 55-59, 62.
Hua L, Chen S B, Bai L Y, *et al.* Amelioration of soils polluted by cadmium and zinc by organic matter[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, **17**(2): 55-59, 62.
- [35] 王维. 水稻镉吸收的区域模型及其调控研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012. 17-27.
Wang W. Rice cadmium uptake by the regional model and its regulation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012. 17-27.
- [36] 潘杨. 土壤镉污染与稻米镉富集关联性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. 24-32.
Pan Y. The study of relevance between soil cadmium pollution and cadmium accumulation in rice [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. 24-32.
- [37] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究——品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1346-1352.
Xu Y L, Chen N C, Xu S G, *et al.* Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: cultivars versus types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(7): 1346-1352.
- [38] 滕振宁, 张玉焯, 方宝华, 等. 用AMMI双标图分析早稻稻米镉含量的基因型与环境互作效应[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(4): 692-697.
Teng Z N, Zhang Y Z, Fang B H, *et al.* AMMI-Biplot analysis of genotypic and environmental effects on cadmium content in early rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(4): 692-697.
- [39] Huang J H, Wang S L, Lin J H, *et al.* Dynamics of cadmium concentration in contaminated rice paddy soils with submerging time[J]. *Paddy and Water Environment*, 2013, **11**(1-4): 483-491.
- [40] Zhao K L, Liu X M, Xu J M, *et al.* Heavy metal contaminations in a soil-rice system: identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 778-787.
- [41] 赵兴敏, 董德明, 花修艺, 等. 污染源附近农田土壤中铅镉铬砷的分布特征和生物有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(8): 1573-1577.
Zhao X M, Dong D M, Hua X Y, *et al.* Distribution characters and bioactivity of lead, cadmium, chromium and arsenic in farmland soils near pollution sources [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(8): 1573-1577.
- [42] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003,

24(3): 112-115.

Li Z W, Zhang Y L, Pan G X, *et al.* Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(3): 112-115.

- [43] 曾翔, 张玉焯, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, **22**(1): 67-69, 83.

Zeng X, Zhang Y Z, Wang K R, *et al.* Genotype difference of brown rices in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, **22**(1): 67-69, 83.

- [44] Liu J G, Li K Q, Xu J K, *et al.* Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes[J]. *Field Crops Research*, 2003, **83**(3): 271-281.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017年10月31日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续16次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)