

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 耶海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟

施亚星¹, 吴绍华^{1,2*}, 周生路¹, 王春辉¹, 陈浩¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

摘要: 土壤-作物系统是重金属危害生态环境和人类健康的重要途径, 研究和了解土壤-作物系统中重金属元素的吸收、迁移和积累过程, 对重金属污染的防控与管理以及人类的健康具有重要意义. 本文建立作物吸收重金属的模型, 计算小麦根、茎、叶以及籽粒中的重金属含量, 分析在小麦生长周期中, 根、茎、叶以及籽粒的重金属积累随时间变化的过程, 并将预测值与实测值作对比来检验模型的精确度. 结果表明, 小麦的不同部位对重金属的吸收能力不同, 根的吸收能力最强, 叶片次之, 茎和籽粒重金属的吸收能力较弱. 小麦的各部位中不同重金属的含量也存在明显的差异, Cu 元素的含量最高, Ni 次之, Pb 元素和 Cd 元素的含量较小. 在小麦生长过程中, 茎、叶和籽粒中的重金属积累速度分别在小麦生长 90、60 和 135 d 左右开始减缓, 重金属含量逐渐达到最大值, 而根部重金属积累的速度则呈现不断增长的趋势. 本文利用数值模拟技术研究了重金属在土壤-作物系统中的吸收、迁移和积累过程, 可为防范重金属污染的生态和健康风险提供科学依据.

关键词: 昆山市; 重金属; 模拟; 小麦; 土壤-作物系统

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3996-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.043

Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System

SHI Ya-xing¹, WU Shao-hua^{1,2*}, ZHOU Sheng-lu¹, WANG Chun-hui¹, CHEN Hao¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil-crop system is an important way that heavy metals harm the ecological environment and human health. To research and understand the process of heavy metal absorption, migration and accumulation in soil-crop system is important for the prevention and control of heavy metal pollution and the health of human beings. In this paper, we established a model for crop uptake of heavy metals to calculate the heavy metals contents of wheat roots, stems, leaves and grains, and we analyzed the accumulation process of heavy metals in roots, stems, leaves and grains in the growth cycle of wheat. The predicted values were compared with the measured values to test the accuracy of the model. The results demonstrated that different parts of wheat had different heavy metal absorption capacity, the absorption of the roots was the strongest, followed by leaves, and the absorption capacity of stems and grains was weak. In addition, the contents of different heavy metals in each part of wheat were also significantly different. The content of Cu was the highest, followed by Ni, while the contents of Pb and Cd were small. In the process of wheat growth, the heavy metal accumulation rate of stem, leaf and grain began to slow down at 90, 60 and 100 days respectively, and the concentration of heavy metals reached the maximum gradually, while the accumulation rate of heavy metals in roots showed a growing trend. We studied the process of absorption, migration and accumulation of heavy metals in soil-crop system by using numerical simulation technology, which can provide scientific basis for preventing the ecological and health risks of heavy metal pollution.

Key words: Kunshan; heavy metals; simulation; wheat; soil-crop system

随着农药、化肥的广泛使用以及大范围的工业、交通排放和城市扩张, 我国土壤重金属污染的问题日益严重, 威胁到生态环境和人体健康. 土壤作为陆地生态系统的重要组成部分^[1], 为作物的生长提供必需的水分和养分, 但是土壤重金属的污染会导致重金属在作物各部位中大量富集, 抑制作物的生长^[2,3]并通过食物链迁移到动物和人体内^[4,5]. 小麦是我国重要的粮食作物, 种植面积约为 2 000 万 hm^2 , 人们所消费的农作物中小麦占 30%^[6]. 然而, 近年来, 农田土壤重金属污染造成小麦籽粒重金属

含量严重超标对农产品质量安全造成严重隐患^[7]. 因此, 在土壤重金属污染日益严重的背景下, 研究农作物(小麦)对重金属的吸收、迁移和积累具有重要的现实意义.

植物吸收重金属是一个复杂的物理、化学和生

收稿日期: 2015-11-27; 修订日期: 2016-05-31

基金项目: 中国科学院流域地理学重点实验室开放基金项目 (WSGS2015006); 江苏省科技支撑计划项目 (BE2015708)

作者简介: 施亚星 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与生态环境效应, E-mail: syxju@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wsh@nju.edu.cn

物过程,会受到植物的种类、土壤的性质(有机质含量、黏粒含量、pH 值和 CEC 等)、重金属种类和含量等的影响^[8,9]. 植物吸收农药以及有机污染物的模型被广泛使用^[6,10],但由于重金属来源的多源性和迁移转化的复杂性,国内外关于植物吸收、迁移重金属的研究相对较少. 不同重金属在作物体内的迁移能力差异很大,有研究表明,水稻和小麦中 Cd、Cr 的迁移能力最强,易于向地上部迁移,并在籽实中积累; Zn、Cu 的迁移能力居中;而 As、Pb 的迁移能力最弱,大部分积累在根部,难于向地上部迁移,Pb 进入根部后很快在根部淀积而失去活性,导致在根组织中累积的主要是 Pb 的沉淀作用^[11,12]. 大多数植物吸收的重金属主要积累在根系而在地上的含量较低^[13],小麦各部分对 Cd、Pb 和 As 等重金属的吸收呈现根>茎/叶>籽粒的规律. 重金属在土壤-作物系统中的吸收、迁移和积累过程,是研究土壤重金属临界负荷的重要组成部分. 本文研究了重金属在土壤-作物系统中的吸收、迁移和积累过程,建立作物吸收重金属的模型,并且将模型分析得到的植物吸收重金

属的数据与实际实验所测得的数据对比,探讨模型的精确性. 本文研究的作物吸收重金属模型可以用于完善土壤重金属临界负荷研究模型^[14],提高模型的精确量化,并且可以通过有效的控制重金属的排放,来防范人类粮食途径的危害与风险发生.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取苏南经济快速发展的昆山地区为研究区(图 1). 昆山市位于北纬 31°06′~31°32′,东经 120°48′~121°09′,地处上海与苏州之间,位于江苏省东南部,行政区划属苏州,市域总面积 927.68 km². 昆山市处于长江三角洲太湖平原,河网密布,地势平坦,北部为低洼圩区,中部为半高田地区,南部为滨湖高田地区. 昆山属北亚热带南部季风气候区,气候温和湿润,四季分明,雨量充沛,年平均气温 17.6℃,年平均降水量 1 200.4 mm. 昆山经济发达,城市化率高达 75.1%,2006~2011 年连续 6 年位列中国百强县第一.

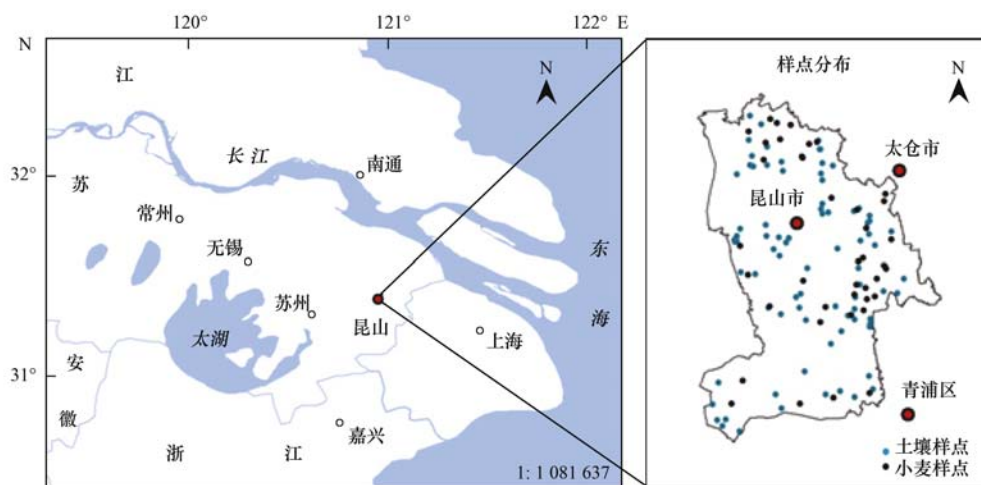


图 1 昆山市区位图与样点分布示意

Fig. 1 Location of Kunshan City and the distribution of sampling points

1.2 样品采样与测试

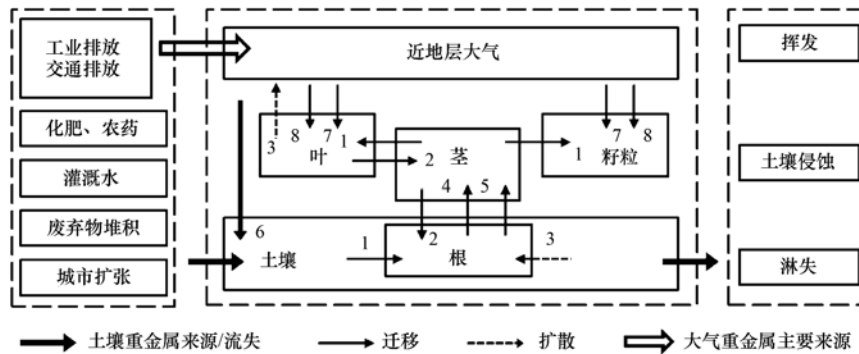
根据昆山市土壤的利用方式,在各乡镇按 0~15 cm 和 15~40 cm 分两层分别在不同功能区采取土壤样品 126 个,在其中的 40 个样点采取新鲜的小麦样品若干株,其中有 9 个分布在化工区,4 个在冶金电镀区,印染造纸区 6 个,养殖区 17 个,其他区 4 个,样品采集的时间为 2006 年. 其中,化工区,冶金电镀区以及印染造纸区是高速发展的工业化的主要类型,而养殖区是农业集约化生产的一个类型,其它区则主要包括居民区或道路附近的农田.

将小麦样品根部泥土仔细洗去,分成根、茎、叶和籽粒这 4 个部分,用自来水冲洗干净,再用双蒸水冲洗 3 遍. 然后,将样品放入烘箱中在 40℃±5℃ 左右烘至恒重,称取干物重. 再将样品粉碎,过 60 目筛,备用. 植物样品中全量 Cu、Cd、Pb 和 Ni 的分析均采用混酸(硝酸-高氯酸)消煮,使用电感耦合高频等离子体发射光谱仪(ICP)测定. 土壤样品中全量 Cu、Cd、Pb 和 Ni 采用三酸(HF-HNO₃-HClO₄)消化法制备待测液,除 Cd 采用石墨炉原子吸收法测定外,其余均采用电耦合高频等离子体发射光谱法测定.

1.3 土壤-作物系统重金属的吸收、迁移与积累

土壤重金属到达植物根系主要有两条途径,一条是质体流途径(1),即重金属随着蒸腾拉力,在植物吸收水分时与水一起到达植物根部;另一条则是扩散途径(3),即通过扩散而到达根表面^[13]. 一部分的重金属分别通过共质体途径(4)和质外体途径(5)到达植物的茎中^[15],植物的叶片和籽粒中的重金属主要来源于茎部向上的运输,植物也可通过其

叶片上的气孔吸收重金属,从而起到净化环境的作用,地质、气候条件和植物间的交互作用决定了吸收量^[16,17]. 大气中的重金属可以通过非代谢性途径(7)和代谢性途径(8)进入植物叶片和籽粒中. 植物中除了有通过木质部由下向上重金属的运输,也有由叶片、茎通过韧皮部自上向下的运输(2)过程^[13,18,19]. 此外,植物叶片中的重金属也可以扩散到近地层大气中(图2).



1. 由下向上运输(木质部); 2. 由上向下运输(韧皮部); 3. 扩散途径; 4. 共质体途径; 5. 质外体途径;
6. 自然沉降(干、湿); 7. 大气重金属沉降(非代谢性途径); 8. 大气重金属沉降(代谢性途径)

图2 土壤-作物系统重金属的迁移过程

Fig. 2 Migration process of heavy metals in soil-crop system

1.4 植物吸收重金属模型

1.4.1 土壤重金属浓度^[10]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{I_s}{M_s} - k_s \cdot C \quad (1)$$

式中, C 为土壤重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), I_s 为输入量 ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$), M_s 为土壤质量 (kg), k_s 为土壤重金属损失率 (d^{-1}), t 为时间 (d), 本研究采用测定的土壤重金属含量。

土壤中的重金属以水溶态、交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态及结晶态等多种形态存在, 其中水溶态和可交换态是植物吸收重金属的主要来源^[20], 并且水溶态、交换态的活性毒性最大^[21,22]. 土壤重金属水溶态和可交换态可以分别表示为^[23,24]:

$$c_s = \frac{(K_d \cdot C)^{1/n}}{W_s} \quad (2)$$

$$c_i = \frac{(K_c \cdot C)}{W_s} \quad (3)$$

$$K_d = \frac{1}{k \cdot \text{SOM}^a \cdot \text{clay}^b \cdot \text{pH}^c} \quad (4)$$

式中, c_s 为水溶态的重金属浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), n 为拟合值, K_d 为土壤重金属水溶态的分离系数, 实验研究表明土壤有机质 $\text{SOM}(\%)$ 、黏粒含量 $\text{clay}(\%)$

和 pH 值是决定水溶性重金属含量的关键因子, k 、 a 、 b 、 c 为常数; c_i 为可交换态的重金属浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), K_c 为土壤重金属活化率, W_s 为土壤水含量 ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其中某元素的活化率^[24,25]是指该元素有效态含量与样品中此种元素全量的比值。

1.4.2 小麦生长^[6,27]与各部分重金属积累

$$M_i(t) = \frac{M_{i,\max}}{1 + \frac{M_{i,\max} - M_{i,0}}{M_{i,0}} \times e^{-G_i \times t}} \quad (5)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = r_{s-i} \cdot [C_s(t) + C_t(t)] \cdot W_i + r_{A-i} \cdot \frac{C_A(t)}{M_i(t)} - k_i \cdot C_i(t) \quad (6)$$

式中, M_i 为植物 i 部分的质量 (kg), $M_{i,\max}$ 为 i 部分的最大质量 (kg), $M_{i,0}$ 为 i 部分的初始质量 (kg), G_i 为 i 部分的生长系数; C_i 为植物中 i 部分重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), r_{s-i} 和 r_{A-i} 为吸收率 (表1), W_i 为 i 部分的水含量 ($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_A 为大气中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), k_i 为 i 部分重金属损失率 (d^{-1}), 其中损失率是指植物体内各部分中的重金属通过运输从而被其他部分所吸收的比率总和。

1.4.3 小麦各部分的吸收率

小麦各部分的吸收率见图3. 其中 r_{R-St} 、 r_{St-L} 、

表 1 植物各部分的重金属吸收率的表达式

Table 1 Expressions of heavy metal uptake ratio of each compartment in plant

项目	根(R)	茎(St)	叶(L)	籽粒(G)
r_{S-i}	r_{S-R}	$r_{S-R} \cdot r_{R-St}$	$r_{S-R} \cdot r_{R-St} \cdot r_{St-L}$	$r_{S-R} \cdot r_{R-St} \cdot r_{St-G}$
r_{A-i}	$r_{A-L} \cdot r_{L-St} \cdot r_{St-R}$	$r_{A-L} \cdot r_{L-St}$	r_{A-L}	r_{A-G}

r_{St-G} 、 r_{L-St} 以及 r_{St-R} 为重金属被小麦各部分吸收的比率,只需考虑由上向下或由下至上的单一的运输方式而不需要考虑扩散途径[公式(7)]^[6]. 由于土壤重金属可以通过质体流和扩散两种途径进去到植物根系中,所以根系吸收土壤重金属的比率 r_{S-R} 由两部分组成[公式(8)]^[6]. r_{A-L} 和 r_{A-G} 分别为大气重金属进入叶片和籽粒的比率,由于大气重金属会通过代谢性和非代谢性途径进入叶片和籽粒,吸收率的计算也由两个部分组成[式(9)、(10)]^[10,27].

$$r_{ij} = \frac{Q_j}{K_{iw} \times M_j} \quad (7)$$

$$r_{S-R} = \frac{(Q + A_R \times f_c \times D_R) \cdot K_{Sw}}{M_s} \quad (8)$$

$$r_{A-L} = A_L \times P_L \cdot (1 - f_p) + A_L \cdot v_{dep} \cdot f_p \quad (9)$$

$$r_{A-G} = A_G \times P_G \cdot (1 - f_p) + A_G \cdot v_{dep} \cdot f_p \quad (10)$$

式中, Q_j 为植物 j 分部的流量 ($L \cdot d^{-1}$), K_{iw} 为植物中 i 部分与水之间的分配系数 ($L \cdot kg^{-1}$), A_R 、 A_L 、 A_G 分别为植物根、叶、籽粒的表面积 (m^2), f_c 为体积转换系数 ($L \cdot m^{-3}$), D_R 为扩散速度 ($m \cdot d^{-1}$), K_{Sw} 为土壤与水之间的分配系数 ($L \cdot kg^{-1}$), P_L 、 P_G 分别为植物叶片和籽粒的渗透率 ($m \cdot d^{-1}$), f_p 为大气颗粒物吸附率, v_{dep} 为颗粒沉降速度 ($m \cdot d^{-1}$).

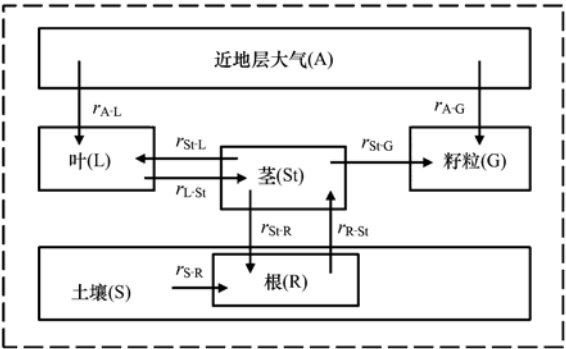


图 3 植物各部分的吸收率

Fig. 3 Uptake ratio of each compartment in plant

1.5 参数及来源

作物吸收重金属模型分析所需的数据主要为土壤、大气、作物、分配系数和其他相关数据. 本文主要研究与分析昆山地区小麦重金属的吸收、迁移和积累状况,所以作物数据主要是与小麦相关. 各

参数及其数据来源见表 2.

表 2 主要参数及其来源

Table 2 Main parameters and corresponding sources

数据类型	参数	文献
土壤数据	土壤质量 M_s	[23]
	土壤重金属含量 M	本研究
	有机质 SOM	本研究
	黏粒含量 clay	本研究
	酸碱度 pH	本研究
	土壤重金属活化率 K_c	[28~30]
	土壤含水量 W_s	[27]
大气数据	水溶系数 K_d	本研究
	大气重金属含量 C_A	[31]
	大气颗粒物吸附率 f_p	[27]
	颗粒沉降速度 v_{dep}	[27]
作物数据	小麦各部分初始质量 $M_{i,0}$	[27]
	小麦各部分最大质量 $M_{i,max}$	[27]
	小麦各部分含水量 W_i	[6,27]
	小麦各部分的表面积 A_i	[27]
	小麦各部分生长系数 G_i	[27,32]
分配系数	土壤-水 K_{Sw}	[6,33]
	大气-水 K_{Aw}	[27]
	根-水 K_{Rw}	[6]
	茎-水 K_{Stw}	[6]
	叶-水 K_{Lw}	[6]
	籽粒-水 K_{Gw}	[6]
	流量 Q	[27,33]
其他数据	体积转换系数 f_c	[6]
	扩散速度 D_R	[28]
	叶片、籽粒渗透率 P_L 、 P_G	[34]

植物吸收重金属模型分析所需的土壤基本性质来源于土壤数据库数据^[29],其中土壤酸碱度 pH、有机质 SOM 以及黏粒含量 clay 见表 3.

表 3 昆山市土壤基本性质

Table 3 Soil properties of soil in Kunshan

参数	Min	Max	Mean
酸碱度 pH	3.91	8.73	6.39
有机质 SOM/%	0.67	4.43	2.82
黏粒含量 clay/%	7.13	33.3	12.6

对重金属元素与土壤理化性质 (pH、有机质、黏粒含量) 进行回归分析,并计算得到土壤重金属水溶态的分离系数. 昆山市土壤重金属水溶系数 K_d 和活化率 K_c 见表 4.

表 4 昆山市土壤重金属水溶系数 K_d 和活化率 K_e
Table 4 Water dissolution coefficient and activation rate
of heavy metals in soil of Kunshan

项目	Cd	Cu	Pb	Zn
K_d	0.000 589	0.000 661	0.000 955	0.000 479
K_e	0.2	0.5	0.03	0.06

2 结果与讨论

2.1 模型计算结果分析

模型研究分析表明,成熟小麦的不同部位对重金属的吸收能力不同,根的吸收能力最强,叶次之,茎和籽粒重金属的吸收能力较弱(见表5),重金属大部分积累在根部,到达茎、叶片和籽粒中的重金属较少.小麦的各部位中不同重金属的含量也存在明显的差异,Cu 元素的含量最高,Ni 次之,Pb 元素和 Cd 元素的含量较小,这些都与研究区的气候,土壤性质,土壤

中重金属的含量以及重金属的可溶性有关.小麦根部 Cu 元素含量的最大值高达 $52.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最小值也达到了 $15.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于其他元素,这是因为土壤中 Cu 的可溶性含量相对较高,当土壤中 Cu 的浓度与 Pb 和 Ni 的浓度相近时(见表6),均值分别为 29.14 、 36.33 和 $29.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,小麦各部位吸收 Cu 的能力要明显大于 Pb 和 Ni. 尽管 Cd 元素的可溶性最大,但由于土壤中 Cd 的浓度很小,最大值仅为 $1.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,所以能被植被吸收的 Cd 含量也很小,根中 Cd 的含量的平均值为 $0.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大值也只有 $2.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤中 Pb 和 Ni 元素的可溶性含量低,可迁移和被植物吸收的含量都很低,小麦根吸收 Pb 和 Ni 的均值分别只有 $3.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中表5是40个小麦样本的统计值,表6是全部126个土壤混合样本的统计值.

表 5 小麦吸收重金属的统计参数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 5 Basic statistical parameters of heavy metals uptake by wheat/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	根			茎			叶			籽粒		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Cu	15.4	52.8	24.85	2.20	7.54	3.55	3.54	12.1	5.71	2.62	8.99	4.23
Cd	0.21	2.10	0.38	0.03	0.35	0.06	0.06	0.61	0.11	0.04	0.39	0.07
Pb	1.48	5.78	3.51	0.34	1.15	0.72	0.54	2.09	1.27	0.10	0.38	0.23
Ni	6.38	3.51	9.35	0.88	2.01	1.30	1.39	3.19	2.04	0.22	0.49	0.32

表 6 土壤重金属浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 6 Concentrations of heavy metals in soil/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	Min	Max	Mean
Cu	18.07	61.88	29.14
Cd	0.10	1.01	0.18
Pb	12.34	48.13	29.23
Ni	24.67	56.67	36.33

小麦叶片中重金属的含量稍大于茎与籽粒中的含量,而茎与籽粒中的重金属含量相近.通过比价 Cu 元素在小麦茎、叶和籽粒中的含量发现,三者的差距不是非常明显,均值分别为 3.55 、 5.71 和 $4.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大值为 $12.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cd 元素在小麦茎、叶和籽粒中含量很低,均值仅为 0.06 、 0.11 和 $0.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Pb 和 Ni 元素可溶性较低并且绝大部分被根部吸收,所以最终到达茎、叶和籽粒部分的含量很小,其中 Pb 的均值为 0.72 、 1.27 和 $0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Ni 的均值为 1.30 、 2.04 和 $0.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.2 小麦生长与重金属的积累过程

根据小麦各部分的生长率 G_i 、初始质量 $M_{i,0}$ 以及最大质量 $M_{i,\max}$,可以得到小麦生长过程中各部分质量的变化情况[图4(a)].小麦从播种到出苗需

要 $6\sim7\text{ d}$ 左右的时间,根、茎、叶开始生长,而小麦籽粒的出现则大约需要 2 个月的时间.其中,根、叶质量的增长速度较为缓慢,茎和籽粒的增长速度较快,可以发现在 90 d 左右时小麦根、茎和籽粒质量的增长速度都开始放缓,逐渐达到最大质量.小麦各部分分别通过木质部运输和韧皮部运输的流量变化见图4(a)和图4(b),可以发现,小麦通过木质部(由下向上)传输的流量远大于韧皮部(由上向下),根部向上运输的流量大于其他各部分,而茎和叶向下运输的能力要比根和籽粒强,籽粒两种运输的能力都比较弱.

随着时间的变化,小麦根、茎、叶和籽粒中的重金属积累过程存在着差异(图5).重金属分别通过蒸腾拉力(植物水分吸收)、扩散以及大气中重金属的沉降,到达小麦的根部,种植初期,根部重金属含量的增长十分缓慢,随着种植天数的增加,根部重金属含量由缓慢增长逐渐变成快速增长,不同于茎、叶和籽粒的积累过程,根部重金属的积累没有减缓的趋势也不会在成熟期趋向于某一个值.小部分的重金属分别通过共质体途径和质外体途径到达小麦的茎部,茎部的重金属含量在种植初期不断增长,小

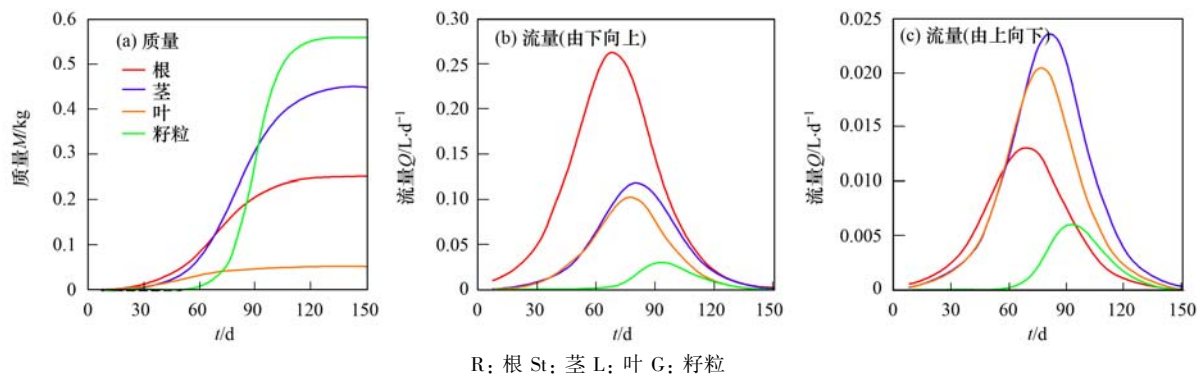


图4 小麦生长过程中质量和流量的时间变化

Fig. 4 Changes of mass and flow rate during the growth of wheat

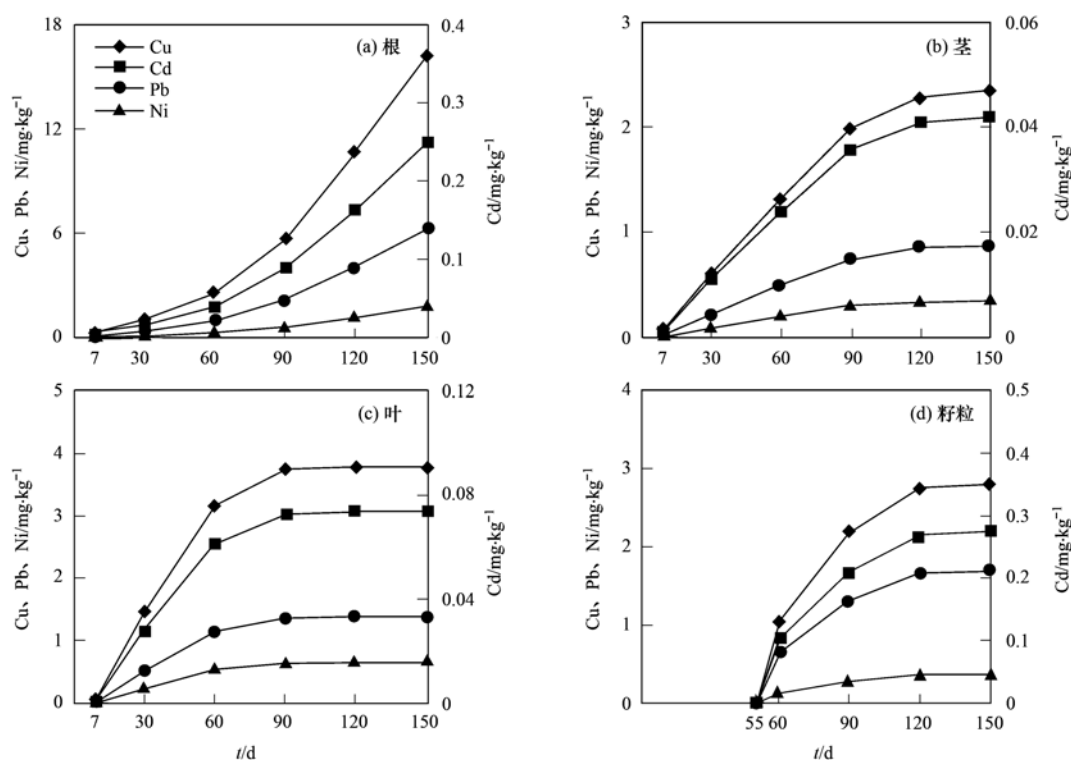


图5 铜、镉、铅、镍元素在小麦体内的积累过程

Fig. 5 Simulation of the accumulation process of Cu, Cd, Pb and Ni in wheat

麦生长 90 d 左右,茎部重金属的增长速度开始减缓,重金属含量逐渐趋于稳定值,并在小麦的成熟期达到积累的最大浓度. 叶和籽粒中的重金属来源于茎部向上运输和大气重金属沉降,它们的重金属含量在种植初期快速增长,但分别从 60 d 和 135 d 左右开始减缓增长速度,逐渐达到最大值.

2.3 模拟含量与实测含量的比较验证

为了更清楚地比较模拟值与实测值的差异,本研究将模型分析计算得到的小麦根、茎、叶与籽粒中重金属的含量与实测含量进行了比较验证(图 6). 从图 6 可以看出根部 Cu、Cd 和 Pb 元素含量的模拟结果较为理想,而 Ni 元素模拟值与实测值的波

动幅度有较大差距,但两者的波动趋势基本吻合. 茎部 Cu 和 Ni 元素含量的模拟效果良好,Pb 元素模拟值与实测值的波动趋势基本吻合,但实测值的波动幅度较大,除少数样点外,Cd 元素的实测值都要大于模拟值,而且波动的幅度也很大,模拟效果较差. 小麦叶中,Cu 元素的模拟值略大于实测值,而 Cd、Pb 以及 Ni 元素的模拟值要略小于实测值,Pb 和 Ni 元素实测值的波动幅度较大. 小麦籽粒中 Cu 与 Cd 元素的模拟效果较好,Pb 和 Ni 元素模拟值与实测值的波动趋势基本吻合,但两者的模拟值都要略高于实测值,Ni 元素的实测值波动幅度较大. 通过小麦根、茎、叶与籽粒中重金属的模拟含量与实测含量的对

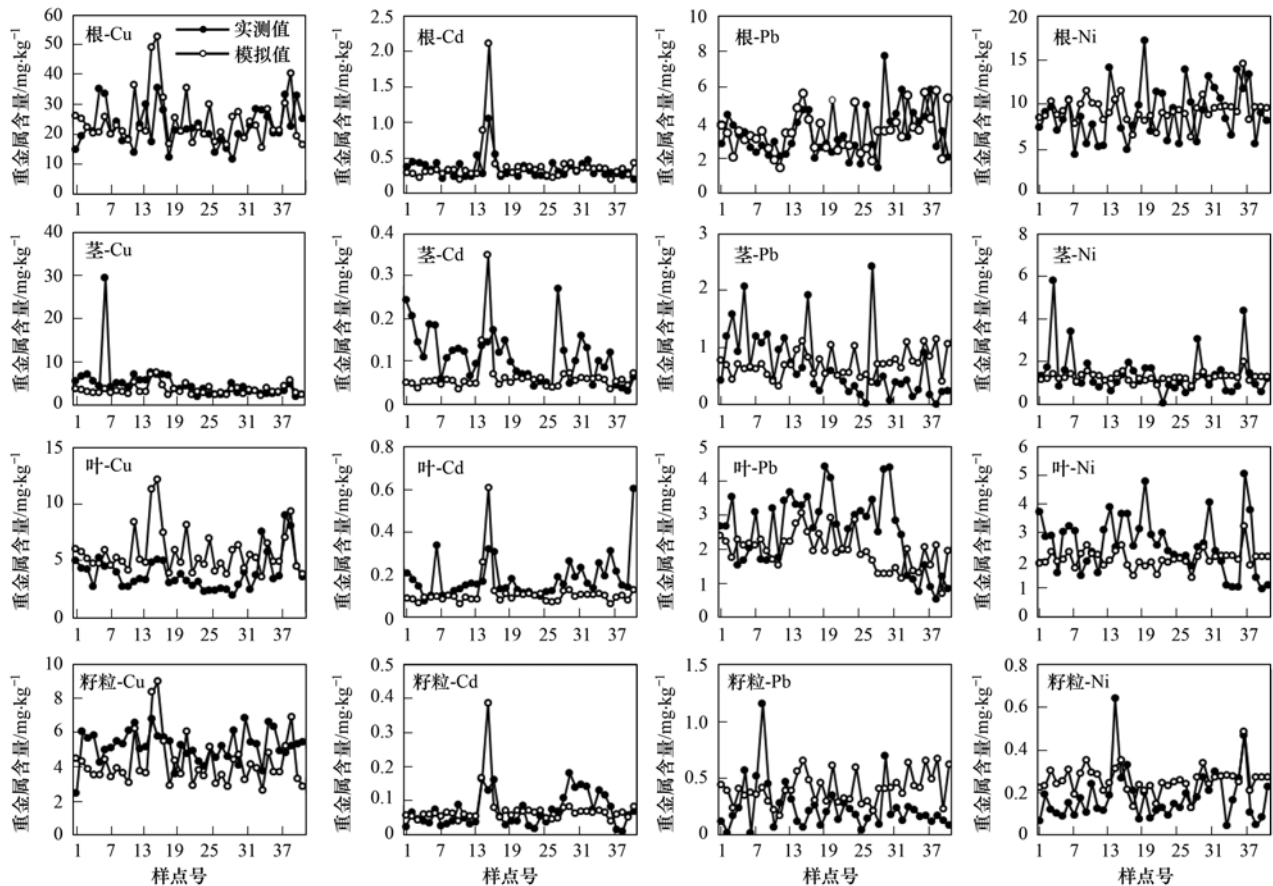


图6 铜、镉、铅、镍元素预测值与实测含量比较

Fig. 6 Comparison between predicted values(Cu, Cd, Pb, Ni) and measured values

比,可以对模型的模拟结果进行检验,发现模拟结果较为良好,大体上能预测出小麦各部分中重金属的含量.模拟值与实测含量的验证结果同时也说明模型难以抓住实际含量的大幅度波动的现实.

2.4 模型讨论

本研究根据土壤重金属不同的形态来研究植物中重金属吸收,较为完整地研究了重金属在植物各部分(根、茎叶以及籽粒)的吸收、迁移和积累过程,可为防范重金属污染的生态和健康风险提供科学依据.本研究所建立的植物吸收重金属模型是完善土壤重金属临界负荷研究的一部分,可以提高临界负荷计算模型的精确量化.传统的临界负荷研究中,有关收获作物中重金属的含量一般参考平均值、经验值或采用富集系数来计算,缺少模型的精确量化,本研究建立的模型可以解决这一问题.临界负荷是重金属排放控制和管理的重要工具,不同风险管理目标下精确量化的临界负荷,可为不同来源的重金属输入通量管理提供决策参考,来防范重金属污染风险的发生.此外模型可以省去植物样本的采取、处理和测定分析的过程,为今后的研究提供了方便.

由于植物重金属的吸收会受到土壤空间异质性、植物的种类、自然环境等多种因素的影响,这些因素对重金属吸收、迁移的影响十分复杂,所以重金属的植物吸收一直是国内外研究的难点,且国内外关于植物重金属吸收模型的研究也很少.本研究通过模型所得到的一些元素的预测值和实测值会出现差异较大的情况,也是由植物重金属的吸收、迁移、积累过程的复杂性决定的.实测值具有较大的波动性,而模拟值较为稳定,波动较小,这也一定程度上说明模型难以抓住实际含量的大幅度波动的现实.随着本研究的不断深入,今后的研究会根据不同植物的种类、不同的自然环境要素以及土壤空间异质性来完善此模型,提高其预测的精度,并用此模型来解决更多的科学问题.

3 结论

(1)本研究模拟土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程,建立的作物吸收土壤重金属模型,模拟效果良好,为防范重金属污染的生态和健康风险提供科学依据.

(2)小麦的不同部位对重金属的吸收能力不同, 根的吸收能力最强, 叶片次之, 茎和籽粒重金属的吸收能力较弱。小麦的各部位中不同重金属的含量也存在明显的差异, Cu 元素的含量最高, Ni 次之, Pb 元素和 Cd 元素的含量较小。

(3)小麦生长过程中, 茎、叶和籽粒中的重金属积累速度分别在小麦生长 90、60 和 135 d 左右开始减缓, 重金属含量逐渐达到最大值, 根部重金属积累的速度呈现不断增长的趋势。

(4)小麦根部 Cu 和 Cd 元素, 茎部 Cu 元素, 叶片中 Cu、Cd 和 Pb 元素以及籽粒中 Cu 和 Cd 的模拟效果较好, 小麦各部分中 Cu 和 Cd 两种元素含量的模拟值总体比 Pb 和 Ni 元素更加精确, 模拟效果更好。

参考文献:

- [1] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
- [2] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [3] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2322-2328.
- [4] 邓继福, 王振中, 张友梅, 等. 重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. 环境科学, 1996, **17**(2): 1-5.
- [5] 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2736-2741.
- [6] Fantke P, Charles R, de Alencastro L F, *et al.* Plant uptake of pesticides and human health: Dynamic modeling of residues in wheat and ingestion intake[J]. Chemosphere, 2011, **85**(10): 1639-1647.
- [7] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 488-495.
- [8] French C J, Dickinson N M, Putwain P D. Woody biomass phytoremediation of contaminated brownfield land [J]. Environmental Pollution, 2006, **141**(3): 387-395.
- [9] Schrauzer G N. Trace elements in the environment biogeochemistry, biotechnology and bioremediation [J]. Biological Trace Element Research, 2006, **109**(3): 301.
- [10] Trapp S, Legind C N. Uptake of organic contaminants from soil into vegetables and fruits[A]. In: Swartjes F A (Ed.). Dealing with Contaminated Sites: From Theory towards Practical Application[M]. Netherlands: Springer, 2011. 369-408.
- [11] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, **21**(2): 110-116.
- [12] 王新, 梁仁禄. 土壤-水稻系统中重金属复合污染物交互作用及生态效应的研究[J]. 生态学杂志, 2000, **19**(4): 38-42.
- [13] 吕小王. 植物对土壤中重金属的吸收效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [14] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4600-4608.
- [15] Chori Z, Ifikhar H, Bhatti M F, *et al.* Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soil [A]. In: Ahmad P (Ed.). Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015. 385-409.
- [16] 周震峰, 刘康, 孙英兰. 苏南农村地区大气 PM_{2.5} 元素组成特征及其来源分析[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(3): 24-28.
- [17] 鲁敏, 李英杰. 绿化树种对大气金属污染物吸滞能力[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(1): 51-52.
- [18] 李红霞, 林文波, 李玉庆, 等. 植物修复重金属污染沉积物的模型仿真及验证[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2119-2124.
- [19] Trapp S. Plant uptake and transport models for neutral and ionic chemicals [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2004, **11**(1): 33-39.
- [20] Alloway B J. The origin of heavy metals in soils [A]. In: Alloway B J (Ed.). Heavy Metals in Soils (2nd ed.) [M]. London: Blackie Academic and Professional, 1995. 38-57.
- [21] 刘霞, 刘树庆, 唐兆宏. 河北主要土壤中 Cd、Pb 形态与油菜有效性的关系[J]. 生态学报, 2002, **22**(10): 1688-1694.
- [22] 黄明丽. 苏南典型区土壤-作物系统重金属的空间分布及健康风险评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2007.
- [23] 吴绍华. 经济快速发展下土壤重金属积累过程模拟及风险预测预警[D]. 南京: 南京大学, 2009.
- [24] 刘慎坦. 土壤中重金属可交换态分析方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [25] 万红友, 周生路, 赵其国, 等. 苏南经济快速发展区土壤有效态镉含量影响因素及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(2): 213-218.
- [26] 潘根兴, 高建芹, 刘世梁, 等. 活化率指示苏南土壤环境中重金属污染冲击初探[J]. 南京农业大学学报, 1999, **22**(2): 46-49.
- [27] Rein A, Legind C N, Trapp S. New concepts for dynamic plant uptake models [J]. SAR & QSAR in Environmental Research, 2010, **22**(1-2): 191-215.
- [28] Verma P, George K V, Singh H V, *et al.* Modeling rhizofiltration: heavy-metal uptake by plant roots [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2006, **11**(4): 387-394.
- [29] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南典型区土壤基本性质的时空变化——以昆山市为例[J]. 地理研究, 2006, **25**(2): 303-310.
- [30] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南经济快速发展区土壤有效态铅、镉含量影响因素及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1566-1573.
- [31] 战雯静, 张艳, 马蔚纯, 等. 长江口大气重金属污染特征及沉降通量[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 900-905.
- [32] Cao T T. Fate and a prediction model of pesticides residues evolution in plants [D]. Switzerland: Ecôle Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.
- [33] Hung H, Mackay D. A novel and simple model of the uptake of organic chemicals by vegetation from air and soil [J]. Chemosphere, 1997, **35**(5): 959-977.
- [34] Trapp S. Fruit Tree model for uptake of organic compounds from soil and air [J]. SAR & QSAR in Environmental Research, 2007, **18**(3-4): 367-387.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行