

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响

曹柳¹, 杨俊兴^{2*}, 郭劲君³, 郭俊梅², 郑国砥², 卢一富¹

(1. 河南省土壤重金属污染监测与修复重点实验室, 济源 459000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 3. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 利用盆栽试验研究了不同施肥处理下(CK、N、NP、NPK)3种向日葵品种(食用葵、观赏葵、油葵)对北方污染农田土壤镉(Cd)吸收和转运的影响。结果表明, 施肥可显著提高观赏葵、油葵生物量及地上部Cd富集量, 施NPK肥处理对植物促进效果最为显著。施NPK肥食用葵、观赏葵、油葵地上部Cd富集量分别可达6.89、8.92、6.97 mg·kg⁻¹, 施肥处理显著提高了向日葵对Cd的富集能力, 食用葵、观赏葵、油葵的富集系数(BCF)分别为2.63(对照)~3.10(NPK)、2.80(对照)~4.02(NPK)、2.11(对照)~3.14(NPK)。对向日葵叶片亚细胞结构中Cd分布研究发现, 将吸收的Cd富集在金属富集颗粒和细胞碎屑中是向日葵耐受Cd胁迫的主要解毒机制。综上所述, 向日葵可作为Cd污染土壤的植物修复材料, 合理施用NPK肥可明显提高植物对土壤Cd的修复效率。

关键词: 镉; 肥料; 向日葵; 吸收; 农田

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5189-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201804031

Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers

CAO Liu¹, YANG Jun-xing^{2*}, GUO Jin-jun³, GUO Jun-mei², ZHENG Guo-di², LU Yi-fu¹

(1. Key Laboratory for Monitor and Remediation of Heavy Metal Polluted Soils of Henan Province, Jiyuan 459000, China; 2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to assess the phytoextraction potential for cadmium (Cd) of three types of sunflowers (edible, ornamental, and oil sunflowers) and the effects of the application of N, NP, and NPK fertilizers on Cd uptake of the three plants using Cd-contaminated soils collected from northern China. The results showed that fertilization could significantly increase the biomass, aboveground Cd concentrations and accumulation of ornamental and oil sunflowers, and the effect of NPK fertilizer was significantly better than those of other treatments. Cd concentrations of the aboveground parts of edible, ornamental, and oil sunflowers were 6.89, 8.92, 6.97 mg·kg⁻¹, respectively. Fertilization treatment significantly improved the transport ability of Cd of the three types of sunflowers, and bioconcentration factors of edible, ornamental, and oil sunflowers were 2.63 (control) to 3.10 (NPK fertilizer), 2.80 (control) to 4.02 (NPK fertilizer), and 2.11 (control) to 3.14 (NPK fertilizer), respectively. The results further showed that the metal-enriched granules and cellular debris were the main enrichment sources in the subcellular fraction of the three types of sunflowers (more than 55%). In summary, sunflowers can be considered as plant material for remediation of Cd-contaminated soil. In addition, NPK fertilizers can effectively improve the efficiency of sunflowers.

Key words: cadmium; fertilizers; sunflowers; uptake; farmland

随着工业化的快速发展, 矿山开采、金属冶炼过程中排放的大量重金属通过大气沉降、河流等渠道进入土壤, 对环境造成了严重的危害^[1], 重金属污染的耕地面积近2 000万 hm², 耕地重金属点位超标率达19.4%, 其中土壤镉污染问题最为严重, 镉等重金属在土壤中具有隐蔽性、积累性等特点^[2], 可通过食物链富集危害人体健康, 因此针对镉污染的治理已经迫在眉睫^[3]。

植物修复土壤重金属污染有成本低、环境友好等优点, 在土壤环境修复领域受到了广泛关注^[4, 5], 寻找合适的修复材料成为了学者们广泛关注的热点问题。一方面如遏蓝菜、东南景天等植物, 具有对重金属的超富集能力, 但植株生长缓

慢, 生物量较低; 另一方面如向日葵、油菜等花卉植物, 生长较为迅速, 生物量较大, 对重金属的富集能力相对较强, 且具有一定的耐受能力, 有报道指出^[3]向日葵地上部Cd富集量可达601.95 μg·株⁻¹, 因此有潜力将向日葵应用于镉污染场地修复^[6, 7], 同时向日葵等植物是重要的经济作物且具有一定的观赏价值, 但是向日葵相对于其他超富集植物对镉的吸收量相对较低, 如何提高向日葵对

收稿日期: 2018-04-04; 修订日期: 2018-05-14

基金项目: 河南省土壤重金属污染监测与修复重点实验室开放基金项目(2017206); 国家自然科学基金项目(41771509, 41771510, 41201312, 41271478)

作者简介: 曹柳(1979~), 女, 主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复, E-mail: dwhh2008@126.com

* 通信作者, E-mail: yangjx@126.com

镉的富集能力需要进一步研究.

施用化肥是促进植物生长的重要手段之一,也是提高植物修复效率的重要手段^[8],施肥可促进植物生长,增加植物生物量,提高植物对重金属的富集量;同时施肥可与土壤重金属发生解吸吸附,影响土壤中重金属的生物有效性,改变植物对重金属元素的吸收效率^[9, 10]. 不同类型肥料由于化学成分不同与土壤中重金属具有不同的作用机制导致其对植物修复污染土壤的效果不尽相同,氮素、磷素、钾素是植物生长中所需的大量元素,而氮磷钾肥对植物重金属转运能力也具有不同的促进效果,研究发现施用氮肥降低土壤中 pH 值,增加土壤中 Cd 等重金属的生物有效性,影响植物对重金属的富集量^[11, 12];磷肥施入可提高土壤中重金属的生物有效性^[13, 14];钾素可维持植物富集重金属后体内细胞的渗透压,降低植物富集重金属对植物生

长胁迫的影响^[4, 15]. 但目前针对不同施肥模式对向日葵 Cd 吸收转运和修复效率的影响鲜有报道,机制尚不明确^[16, 17]. 本研究利用盆栽实验研究镉胁迫下,不同施肥方式对不同向日葵品种 Cd 吸收转运特性及其耐性机制,以期为合理施肥提高向日葵修复重金属 Cd 污染农田土壤措施提供科学指导和理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤取自河南省某冶炼厂周边污染农田 0~20 cm 深层层土壤,在多年冶炼生产中,重金属 Cd 通过大气沉降进入土壤,农田镉污染程度已经远高于土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995). 土壤样品自然风干研磨,过 20 目筛后备用,土壤的理化性质列于表 1. 供试 3 种向日葵品种分别为食用葵、观赏葵、油葵.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of tested soils

供试土壤类型	Cd /mg·kg ⁻¹	pH	有效磷 /mg·kg ⁻¹	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹
潮土	2.22	7.7	23.0	20.1	1.18	0.86	26.6	19.4

1.2 实验方法

本实验设 12 种处理:①食用葵+不施肥;②食用葵+N 肥;③食用葵+NP 肥;④食用葵+NPK 肥;⑤观赏葵+不施肥;⑥观赏葵+N 肥;⑦观赏葵+NP 肥;⑧观赏葵+NPK 肥;⑨油葵+不施肥;⑩油葵+N 肥;⑪油葵+NP 肥;⑫油葵+NPK 肥,每种处理重复 3 次. 实验选用氮磷钾肥分别为尿素(N)、过磷酸钙(P)、氯化钾(K),施用含量分别为 150 mg·kg⁻¹ (N)、250 mg·kg⁻¹ (P₂O₅)、100 mg·kg⁻¹ (K₂O). 各盆栽处理均设置根际袋,每盆取过 20 目筛的土壤 2 kg,其中根际袋中装土 0.5 kg,保持根际袋中土壤高度与盆中土壤高度一致,肥料施于根际袋土壤中,与土壤充分混合调节含水量为田间持水量的 70%,恒湿恒温环境下平衡 1 周,控制温度为(25±1)℃. 种子播种到根际袋土壤中,每隔 1~2 d 给土壤浇水一次,待种子发芽每穴保留 2 株幼苗,拔除多余的幼苗,温室内培养 40 d 后收获,整个实验过程不作追肥处理.

1.3 样品处理测定

土壤样品风干后,用四分法取部分样品,过 20 目筛,编号封存于塑封袋中,用于测定土壤 pH 值和有效态 Cd 含量;四分法另取部分样品,过 100

目筛,编号封存于塑封袋,用于测定土壤 Cd 全量. 对收获的植物样品用自来水和去离子水冲洗干净后,取其中 1 株放入烘箱杀青烘干至恒重,分别测量植物地上部与地下部干重,并用粉碎机粉碎装袋备用;取另 1 株植物样品放置于-80℃冰箱保存待测.

土壤 pH 值测定采用电位法(玻璃电极)进行测定(土:水比为 1:5);土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 浸提剂(土:水比为 1:10)浸提,用原子吸收光谱仪(Contr AA 700, analytikjena, 德国)测定;土壤 Cd 形态分级采用 BCR 连续浸提法分析土壤镉的化学形态,提取形态分为可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态;土壤 Cd 含量测定采用硝酸-过氧化氢法消解(USEPA 3050B),植物重金属 Cd 含量测定采用硝酸-高氯酸(5:1, 体积比)法进行消解,设置空白和国家标准物质进行化学分析质量控制,消解液采用原子吸收光谱仪(Contr AA 700, analytikjena, 德国)测定 Cd 含量.

植物叶片亚细胞结构采用差速离心法提取,称取 0.2 g 叶片鲜样,加入 5 mL 缓冲液[0.25 mol·L⁻¹蔗糖+1.0 mmol·L⁻¹二硫赤藓糖醇+50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl(pH=7.5)]. 离心机 15 000 g 下

离心 15 min, 所得沉积物为金属富集颗粒(MRG)和细胞碎屑(Cellular debris)混合组分, 加入 2 mL 超纯水使其再悬浮, 并在 100℃ 下加热 2 min 后, 加入 2 mL 1 mmol·L⁻¹ 的 NaOH 并在 70℃ 下加热 1 h, 10 000 g 下离心 15 min, 沉积物即为金属富集颗粒(MRG), 上清液为细胞碎屑(Cellular debris); 第一次离心所得上清液在 100 000 g 下离心 60 min, 沉积物为细胞器组分(Organelle), 上清液在 80℃ 变性 10 min 后冰浴冷却 60 min, 50 000 g 下离心 15 min, 沉积物为热敏感蛋白(HDP), 上清液为热稳定蛋白(HSP). 所有组分用酸洗入三角瓶, 消解和测试方法与植物 Cd 消解测定方法一致^[18, 19].

1.4 数据处理

采用 Excel、SPSS 16.0、Origin 8.0 软件处理实

验数据和绘制相关图表, 多重比较采用 Duncan 检验.

2 结果与分析

2.1 施肥对 3 种向日葵生物量的影响

由表 2 可知, 不同品种向日葵地上部与地下部生物量具有显著差异($P < 0.05$), 3 种向日葵品种地上部与地下部干重均表现为食用葵 > 油葵 > 观赏葵, 施肥对向日葵地上部与地下部生长均具有明显的促进作用, 促进效果表现为 NPK 肥 > NP 肥 > N 肥, 施 NPK 肥使食用葵、观赏葵和油葵地上部生物量分别可达 2.73、1.35 和 1.49 g·株⁻¹, 分别是对照组的 2.53、2.25 和 1.80 倍, 总株重分别可达 3.07、1.59 和 1.84 g·株⁻¹.

表 2 不同施肥处理对 3 种向日葵植株干重的影响¹⁾ (平均值 ± 标准差, n=3)/g·株⁻¹

Table 2 Effects of different fertilizer treatments on dry weights of the three sunflowers (mean ± SD, n=3)/g·plant⁻¹

品种	处理	生物量		
		地上部	地下部	总株重
食用葵	CK	1.08 ± 0.11d	0.20 ± 0.01c	1.28 ± 0.11d
	N	1.79 ± 0.07c	0.22 ± 0.01b	2.01 ± 0.06c
	NP	2.13 ± 0.03b	0.25 ± 0.02b	2.38 ± 0.04b
	NPK	2.73 ± 0.16a	0.34 ± 0.02a	3.07 ± 0.17a
观赏葵	CK	0.60 ± 0.04d	0.14 ± 0.01c	0.74 ± 0.05c
	N	0.99 ± 0.07c	0.18 ± 0.02b	1.17 ± 0.07b
	NP	1.09 ± 0.04b	0.18 ± 0.01b	1.27 ± 0.04b
	NPK	1.35 ± 0.04a	0.23 ± 0.02a	1.59 ± 0.06a
油葵	CK	0.83 ± 0.10c	0.24 ± 0.03c	1.07 ± 0.09c
	N	1.01 ± 0.02b	0.26 ± 0.01c	1.27 ± 0.02b
	NP	1.05 ± 0.03b	0.31 ± 0.01b	1.36 ± 0.03b
	NPK	1.49 ± 0.11a	0.35 ± 0.03a	1.84 ± 0.08a
ANOVA	品种	* * *	* * *	* * *
	处理	* * *	* * *	* * *
	品种 × 处理	* * *	* *	* * *

1) CK: 不施肥; N: 仅施尿素; NP: 施尿素和过磷酸钙; NPK: 施尿素、过磷酸钙和氯化钾; 数字后的不同字母表示同一向日葵品种不同施肥处理的差异性, $P < 0.05$; 双因素方差分析中, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$; 下同

2.2 施肥对 3 种向日葵植物体内 Cd 含量的影响

由表 3 可知, 3 种向日葵品种对 Cd 均具有一定的富集能力, 不同品种向日葵地上部 Cd 富集量具有显著差异($P < 0.05$), 食用葵、观赏葵、油葵地上部 Cd 富集量分别可达 5.84 ~ 6.89、6.22 ~ 8.92 和 4.68 ~ 6.97 mg·kg⁻¹. 施肥对 3 种向日葵地上部与地下部 Cd 含量增加均有明显的促进作用, 其中施 NPK 肥对向日葵体内 Cd 含量增加促进作用最显著, 与对照相比, 施 NPK 肥食用葵、观赏葵、油葵地上部 Cd 含量可达 6.89、8.92 和 6.97 mg·kg⁻¹, 分别增加 18.0%、43.4% 和 48.9%; 地下部 Cd 含量可达 2.73、2.61 和 2.58 mg·kg⁻¹, 分

别增加了 23.5%、26.7% 和 10.4%. 3 种向日葵品种对 Cd 吸收具有一定的差异, 观赏葵施 NPK 肥地上部 Cd 含量可达 8.92 mg·kg⁻¹, 明显大于食用葵和油葵.

2.3 施肥对 3 种向日葵植物体内 Cd 富集量的影响

由图 1 可知, 3 种向日葵对 Cd 的富集能力总体表现为食用葵 > 观赏葵 > 油葵, 且其吸收的 Cd 主要富集在植物地上部. 施肥对 3 种向日葵品种地上部和地下部 Cd 富集量均有明显的促进作用($P < 0.05$), 施肥后食用葵、观赏葵、油葵地上部 Cd 富集量分别可达 11.24 ~ 18.81、7.11 ~ 12.06 和 5.28 ~ 10.38 μg·株⁻¹. 施 NPK 肥对 3 种向日

葵品种地上部 Cd 富集量均具有明显的促进作用, Cd 富集量分别是对照实验组的 2.98、3.23 和 2.67 倍.

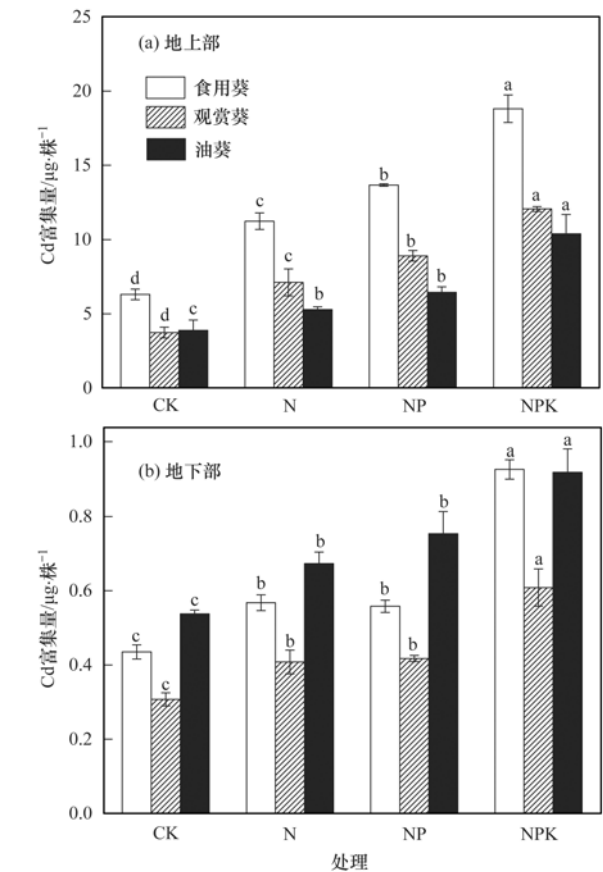
表 3 不同施肥处理对 3 种向日葵不同部位 Cd 含量的影响
(平均值 ± 标准差, $n = 3$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Effects of different fertilizers on Cd concentrations in different parts of the three sunflowers

(mean ± SD, $n = 3$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
品种	处理	Cd 含量	
		地上部	地下部
食用葵	CK	5.84 ± 0.27c	2.21 ± 0.10b
	N	6.27 ± 0.06b	2.55 ± 0.15a
	NP	6.42 ± 0.09b	2.27 ± 0.19b
	NPK	6.89 ± 0.09a	2.73 ± 0.13a
观赏葵	CK	6.22 ± 0.29c	2.06 ± 0.25b
	N	7.18 ± 0.63b	2.27 ± 0.06b
	NP	8.15 ± 0.32a	2.28 ± 0.07b
	NPK	8.92 ± 0.36a	2.61 ± 0.06a
油葵	CK	4.68 ± 0.31c	2.21 ± 0.06b
	N	5.25 ± 0.12c	2.56 ± 0.12a
	NP	6.15 ± 0.22b	2.41 ± 0.23a
	NPK	6.97 ± 0.77a	2.58 ± 0.11a
品种		***	*
ANOVA 处理		***	***
品种 × 处理		**	*

2.4 施肥对 3 种向日葵植物叶片中 Cd 亚细胞分布的影响

由表 4 可知,不同处理条件下, Cd 在 3 种向日葵叶片亚细胞结构富集量的分布趋势表现为金属富集颗粒(MRG) > 细胞碎屑(Cellular debris) > 热稳定蛋白(HSP) > 细胞器组分(Organelle) > 热敏感蛋白(HDP),食用葵、观赏葵、油葵叶片在金属富集颗粒(MRG)中 Cd 富集量分别可达 2.68 ~ 3.48、



CK: 不施肥; N: 仅施尿素; NP: 施尿素和过磷酸钙; NPK: 施尿素, 过磷酸钙和氯化钾, 下同

图 1 不同施肥处理对 3 种向日葵不同部位镉积累量的影响
Fig. 1 Effects of different fertilizer treatments on Cd amounts in different parts of the three types of sunflowers

3.38 ~ 4.32 和 3.05 ~ 4.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占叶片中富集 Cd 总量的 50% 以上, 施肥对 3 种向日葵叶片亚细胞结构中金属富集颗粒(MRG)、细胞碎屑(Cellular debris)、热敏感蛋白(HDP)中 Cd 含量增加均有明

表 4 不同施肥处理下 Cd 在 3 种向日葵叶片各亚细胞的含量(平均值 ± 标准差, $n = 3$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Cd concentrations in subcellular fractions of the leaves of the three sunflower types under different fertilizer treatments (mean ± SD, $n = 3$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

品种	处理	金属富集颗粒 (MRG)	细胞碎屑 (Cellular debris)	细胞器组分 (Organelle)	热敏感蛋白 (HDP)	热稳定蛋白 (HSP)
食用葵	CK	2.68 ± 0.42b	1.23 ± 0.23b	0.25 ± 0.03a	0.12 ± 0.01b	0.72 ± 0.03a
	N	2.84 ± 0.28b	1.44 ± 0.07b	0.17 ± 0.01b	0.14 ± 0.01b	0.45 ± 0.03c
	NP	2.80 ± 0.10b	1.65 ± 0.08a	0.15 ± 0.03b	0.16 ± 0.01a	0.43 ± 0.03c
	NPK	3.48 ± 0.37a	1.83 ± 0.06a	0.16 ± 0.03b	0.18 ± 0.03a	0.51 ± 0.01b
观赏葵	CK	3.38 ± 0.29c	1.60 ± 0.10c	0.32 ± 0.02c	0.13 ± 0.01c	0.55 ± 0.03b
	N	3.83 ± 0.19b	1.88 ± 0.01b	0.25 ± 0.04d	0.13 ± 0.01c	0.78 ± 0.07a
	NP	3.76 ± 0.06b	1.96 ± 0.23b	0.53 ± 0.01a	0.16 ± 0.02b	0.94 ± 0.22a
	NPK	4.32 ± 0.16a	2.28 ± 0.13a	0.44 ± 0.01b	0.25 ± 0.02a	0.87 ± 0.03a
油葵	CK	3.05 ± 0.24b	1.46 ± 0.14c	0.37 ± 0.01a	0.13 ± 0.01b	1.06 ± 0.18a
	N	3.31 ± 0.09b	1.82 ± 0.06b	0.24 ± 0.03b	0.17 ± 0.01a	0.69 ± 0.01b
	NP	3.27 ± 0.36b	2.26 ± 0.23a	0.21 ± 0.07b	0.17 ± 0.02a	0.87 ± 0.13ab
	NPK	4.08 ± 0.09a	1.79 ± 0.06b	0.13 ± 0.01c	0.18 ± 0.02a	0.91 ± 0.03ab

显的促进作用, 施 NPK 肥后食用葵、观赏葵、油葵细胞碎屑 (Cellular debris) 中 Cd 富集量分别是不施肥处理组的 1.49、1.13、1.34 倍, 热敏感蛋白 (HDP) 中 Cd 富集量分别是不施肥处理组的 1.50、1.92 和 1.38 倍. 施肥对食用葵、观赏葵、油葵叶片亚细胞结构细胞器组分 (Organelle) 和热稳定蛋白 (HSP) 中 Cd 含量具有不同的作用, 施 NPK 肥食用葵、观赏葵、油葵细胞器组分 (Organelle) 中 Cd 含量分别是不施肥处理的 0.64、1.38 和 0.35 倍, 热稳定蛋白 (HSP) 中 Cd 含量分别是不施肥处理的 0.71、1.58 和 0.86 倍.

表 5 不同施肥处理对 3 种向日葵根际和非根际土壤有效态 Cd 和 pH 值的影响 (平均值 $\pm$ 标准差, $n=3$)

Table 5 Effects of different fertilizer treatments on available Cd concentrations and pH values of rhizosphere and non-rhizosphere soils of the three sunflowers types (mean $\pm$ SD, $n=3$)

品种	处理	有效态 Cd/mg·kg ⁻¹		pH	
		根际土	非根际土	根际土	非根际土
食用葵	CK	0.55 $\pm$ 0.01a	0.55 $\pm$ 0.01ab	7.73 $\pm$ 0.02a	7.71 $\pm$ 0.01a
	N	0.59 $\pm$ 0.06a	0.56 $\pm$ 0.01a	7.74 $\pm$ 0.02a	7.69 $\pm$ 0.02a
	NP	0.56 $\pm$ 0.02a	0.53 $\pm$ 0.02ab	7.74 $\pm$ 0.03a	7.71 $\pm$ 0.01a
	NPK	0.60 $\pm$ 0.02a	0.53 $\pm$ 0.03b	7.72 $\pm$ 0.02a	7.71 $\pm$ 0.01a
观赏葵	CK	0.51 $\pm$ 0.02c	0.51 $\pm$ 0.01c	7.72 $\pm$ 0.04a	7.69 $\pm$ 0.01a
	N	0.53 $\pm$ 0.01bc	0.56 $\pm$ 0.02b	7.75 $\pm$ 0.03a	7.69 $\pm$ 0.01a
	NP	0.57 $\pm$ 0.03b	0.58 $\pm$ 0.01a	7.76 $\pm$ 0.01a	7.70 $\pm$ 0.02a
	NPK	0.62 $\pm$ 0.02a	0.58 $\pm$ 0.01a	7.74 $\pm$ 0.01a	7.70 $\pm$ 0.01a
油葵	CK	0.42 $\pm$ 0.02c	0.45 $\pm$ 0.05b	7.70 $\pm$ 0.01b	7.68 $\pm$ 0.02a
	N	0.49 $\pm$ 0.01b	0.48 $\pm$ 0.01ab	7.70 $\pm$ 0.01b	7.71 $\pm$ 0.02a
	NP	0.51 $\pm$ 0.03b	0.51 $\pm$ 0.02a	7.74 $\pm$ 0.02a	7.70 $\pm$ 0.01a
	NPK	0.56 $\pm$ 0.02a	0.50 $\pm$ 0.01a	7.73 $\pm$ 0.02ab	7.70 $\pm$ 0.03a

2.6 施肥对 3 种向日葵根际和非根际土壤 Cd 形态的影响

从表 6 可知土壤中 Cd 主要以可交换态 Cd 和可还原态 Cd 形式存在, 根际土壤中可还原态 Cd 含量均大于非根际土壤, 可氧化态 Cd 含量均小于非根际土壤; 施肥可明显降低根际土壤可交换态 Cd 而增加可氧化态 Cd 含量, 但对根际土壤可还原态 Cd 和残渣态 Cd 含量变化无显著影响, 与不施肥实验组相比, 施 NPK 肥实验组可使食用葵、观赏葵、油葵根际土壤可交换态 Cd 含量分别降低 19.8%、41.7% 和 30.1%, 可氧化态 Cd 含量分别增加 75.9%、116.2% 和 135.7%. 各施肥处理下, 根际土壤中可交换态 Cd 含量均小于非根际土壤, 而氧化态 Cd 含量均大于非根际土壤.

3 讨论

3.1 施肥对向日葵生长的影响

向日葵是我国常见的植物, 具有生物量大, 生

2.5 施肥对 3 种向日葵根际和非根际土壤有效态 Cd 和 pH 值的影响

由表 5 可知, 施肥对根际土壤有效态 Cd 含量具有明显的促进作用, 施肥后根际土壤有效态 Cd 含量明显大于非根际土壤, 施 NPK 肥对 3 种向日葵根际土壤有效态 Cd 含量增加促进作用最为显著, 食用葵、观赏葵、油葵根际土壤有效态 Cd 含量分别可达 0.60、0.62 和 0.56 mg·kg⁻¹, 与对照相比分别增加 9.09%、21.57% 和 33.33%. 3 种施肥方式对根际土壤和非根际土壤 pH 值的变化均未达到显著水平, 根际土壤 pH 变化范围为 7.73 ~ 7.76, 略高于非根际土壤 pH 值 (7.69 ~ 7.72).

长速度快, 易栽培等优点, 且国内外学者研究发现, 向日葵对重金属 Cd 具有较强的耐受能力^[20, 21]. 盆栽条件下, 向日葵在 Cd 含量为 50 mg·kg⁻¹ 土壤中生长未表现出明显的毒害作用^[22], 本研究用于盆栽实验的污染土壤 Cd 含量约为 2.22 mg·kg⁻¹, 因此向日葵此实验条件可正常生长.

有研究结果表明, 施肥处理可显著提高向日葵生物量, 其中施 NPK 肥促进作用最为显著, Li 等^[17] 和 Guo 等^[23] 利用盆栽实验研究苋菜和八宝景天在 Cd 胁迫下采用 NPK 配施实验组生物量均明显高于其他施肥处理. 氮 (N) 素是植物体内合成氨基酸和蛋白质等许多产物的原料^[24]; 磷 (P) 素对植物根部生长具有明显的促进作用, 也是植物体内各种脱氢酶、氨基转移酶等的主要组成元素^[25, 26], 钾 (K) 素对维持重金属胁迫下细胞内外渗透压具有明显的促进作用^[27]; 本研究结果发现, 磷肥施用对实验组的 3 种向日葵生物量具有明显的促进作用, 可能是因为植物体内磷素提高了植物对外界环境的适

表 6 不同施肥处理对 3 种向日葵根际与非根际土壤 Cd 形态的影响(平均值 ± 标准差, $n = 3$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Table 6 Effects of different fertilizer treatments on Cd species in the rhizosphere (R) and non-rhizosphere (NR) soils of the three sunflowers types(mean ± SD, $n = 3$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

品种	处理	土壤类型	Cd 含量			
			可交换态	可还原态	可氧化态	残渣态
食用葵	CK	根际	1.21 ± 0.02a	0.95 ± 0.04ab	0.29 ± 0.01c	0.09 ± 0.01b
		非根际	1.24 ± 0.05a	0.87 ± 0.07a	0.32 ± 0.03a	0.13 ± 0.01a
	N	根际	1.10 ± 0.03b	0.95 ± 0.06ab	0.34 ± 0.02b	0.08 ± 0.01b
		非根际	1.15 ± 0.12ab	0.86 ± 0.08a	0.33 ± 0.04a	0.12 ± 0.01a
	NP	根际	1.12 ± 0.02b	1.00 ± 0.01a	0.38 ± 0.04b	0.10 ± 0.01a
		非根际	1.03 ± 0.07b	0.87 ± 0.06a	0.34 ± 0.02a	0.08 ± 0.01b
	NPK	根际	0.97 ± 0.04c	0.89 ± 0.09b	0.51 ± 0.02a	0.11 ± 0.01a
		非根际	1.02 ± 0.02b	0.92 ± 0.01a	0.31 ± 0.01a	0.08 ± 0.01b
观赏葵	CK	根际	1.20 ± 0.15a	0.95 ± 0.17a	0.37 ± 0.03b	0.08 ± 0.01c
		非根际	1.00 ± 0.10b	0.75 ± 0.02b	0.32 ± 0.08a	0.08 ± 0.01a
	N	根际	1.14 ± 0.07ab	0.88 ± 0.13a	0.38 ± 0.05b	0.09 ± 0.01b
		非根际	1.15 ± 0.06a	0.75 ± 0.04b	0.24 ± 0.03a	0.08 ± 0.01a
	NP	根际	0.96 ± 0.07b	0.83 ± 0.03a	0.40 ± 0.03b	0.10 ± 0.01b
		非根际	1.04 ± 0.03a	0.81 ± 0.01a	0.28 ± 0.03a	0.08 ± 0.01a
	NPK	根际	0.71 ± 0.11c	0.80 ± 0.10a	0.80 ± 0.08a	0.13 ± 0.01a
		非根际	1.10 ± 0.08a	0.72 ± 0.04b	0.28 ± 0.06a	0.09 ± 0.01a
油葵	CK	根际	1.13 ± 0.09a	1.00 ± 0.08a	0.28 ± 0.01c	0.10 ± 0.01a
		非根际	1.09 ± 0.05ab	0.76 ± 0.03b	0.26 ± 0.01ab	0.07 ± 0.01a
	N	根际	0.87 ± 0.09b	1.10 ± 0.03a	0.42 ± 0.01b	0.10 ± 0.01a
		非根际	1.20 ± 0.08a	0.64 ± 0.04c	0.23 ± 0.02a	0.08 ± 0.01a
	NP	根际	0.95 ± 0.11b	0.94 ± 0.03b	0.69 ± 0.08a	0.09 ± 0.01a
		非根际	1.00 ± 0.06b	0.91 ± 0.03a	0.25 ± 0.02b	0.07 ± 0.02a
	NPK	根际	0.79 ± 0.06b	0.80 ± 0.10c	0.66 ± 0.04a	0.09 ± 0.01b
		非根际	0.99 ± 0.12b	0.86 ± 0.10a	0.28 ± 0.01b	0.08 ± 0.01a

应能力以及生长抗逆性^[28], 施 NPK 肥实验组的 3 种向日葵生物量均明显大于其他实验组, 可能是因为 K 肥对植物生长具有明显的促进作用^[17, 23], 但相关机制还需要进一步研究.

3.2 施肥对向日葵 Cd 积累与转运特性的影响

本研究结果表明, 施肥对 3 种向日葵吸收 Cd 均有明显的促进作用, 其中施 NPK 肥对向日葵富集 Cd 的促进作用最为显著($P < 0.05$). 各施肥处理条件下, 观赏葵地上部 Cd 富集量明显大于食用葵和油葵, 施 NPK 肥后观赏葵地上部 Cd 含量可达 $8.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是食用葵和油葵 Cd 富集量的 1.30、1.28 倍, 但是观赏葵地上部生物量相对较低, 施 NPK 肥实验组观赏葵地上部生物量分别为食用葵和油葵的 0.50、0.91 倍, 3 种向日葵对 Cd 的富集量总体表现为食用葵 > 观赏葵 > 油葵. 因此, 施肥提高向日葵对 Cd 富集能力的主要因素是促进向日葵生物量的增加.

施肥可通过改变土壤中 Cd 存在形态促进向日葵对 Cd 的吸收, 本研究结果表明, 施肥对 3 种向日葵根际土壤有效态 Cd 含量均有明显的促进作

用, 实验结果与 Li 等^[17]的研究结果一致; 土壤 pH 值是影响土壤重金属活性变化的重要因素^[29], 本实验研究结果表明, 施肥可增加向日葵根际土壤 pH 值, 变化未达到显著水平($P < 0.05$), 但根际土壤可交换态 Cd 含量均明显降低.

决定植物修复效率的影响因素主要有地上部分重金属含量和生物量, 因此植物修复中选取的植物需要具有较高的生物量, 同时还需要对重金属具有较高的富集能力^[30]. 生物富集系数(BCF = 植物地上部 Cd 含量/土壤中 Cd 含量)和转运系数(TF = 植物地上部 Cd 含量/植物地下部 Cd 含量)可用于评价植物对重金属污染土壤的修复效率. 超富集植物的富集系数和转运系数均要求大于 1^[31], 由表 7 可知 3 种向日葵的富集系数和转运系数均大于 1, 表明 3 种向日葵对 Cd 均具有较强耐受富集能力和向地上部的转运能力. 观赏葵在各施肥处理条件下转运系数均大于 3, 明显大于食用葵和油葵; 施 NPK 肥后, 食用葵、观赏葵、油葵富集系数与对照实验组相比分别增加了 17.9%、43.6% 和 48.8%, 由此可见, 观赏葵相

较于食用葵和油葵地上部 Cd 富集量较大的原因之一是将植物根部吸收的大量 Cd 向地上部转移, 施肥提高向日葵地上部 Cd 含量的原因之一可能

是因为肥料施入促进了植物根部对重金属的富集能力并提高了植物对重金属向地上部的转运能力, 降低了 Cd 对植物根部的毒害作用.

表 7 施肥处理对 3 种向日葵富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF) 的影响 (平均值 $\pm$ 标准差, $n=3$)

Table 7 Effects of different fertilizer treatments on the bioconcentration factor (BCF) and transfer factor (TF) of Cd of the three sunflower types (mean $\pm$ SD, $n=3$)					
品种	项目	CK	N	NP	NPK
食用葵	生物富集系数	2.63 $\pm$ 0.12c	2.83 $\pm$ 0.03b	2.89 $\pm$ 0.04b	3.10 $\pm$ 0.04a
	转运系数	2.64 $\pm$ 0.08ab	2.47 $\pm$ 0.13b	2.84 $\pm$ 0.22a	2.53 $\pm$ 0.13b
观赏葵	生物富集系数	2.80 $\pm$ 0.13c	3.23 $\pm$ 0.28b	3.67 $\pm$ 0.14a	4.02 $\pm$ 0.16a
	转运系数	3.06 $\pm$ 0.50a	3.16 $\pm$ 0.25a	3.58 $\pm$ 0.14a	3.42 $\pm$ 0.09a
油葵	生物富集系数	2.11 $\pm$ 0.14c	2.36 $\pm$ 0.05c	2.77 $\pm$ 0.10b	3.14 $\pm$ 0.35a
	转运系数	2.12 $\pm$ 0.12b	2.06 $\pm$ 0.13b	2.57 $\pm$ 0.29a	2.70 $\pm$ 0.18a

3.3 施肥对向日葵叶片亚细胞 Cd 分布的影响

植物亚细胞结构中 Cd 的分布可能具有不同的植物毒理学意义, 植物体内的微区分布可能揭示了植物体内对 Cd 积累的生物解毒机制^[17]. Cd 在被植物吸收进入植物叶片细胞时, 细胞壁(由蛋白质、果胶、多糖组成)表面的羟基、羧基等配位基团与 Cd 结合, 抑制 Cd 跨膜运输进入细胞结构影响植物生长生理代谢活动^[32], 细胞壁对重金属 Cd 的富集是植物细胞对重金属 Cd 解毒机制的第一道屏障. 由图 2 中不同向日葵亚细胞结构 Cd 分布的百分比可知, 观赏葵细胞碎屑 (Cellular debris, 以细胞壁为主) Cd 富集量明显大于食用葵和油葵, 表明观赏葵相较于食用葵和油葵对重金属 Cd 具有更强的耐受能力, 施肥可明显促进向日葵细胞碎屑 (Cellular debris) 中 Cd 富集量, 施用 NPK 肥后, 观赏葵细胞碎屑 (Cellular debris) 中 Cd 富集量与对照实验组相比增加了 42.5%, 可能是因为 K 素对维持植物细胞壁内外渗透压具有促进作用^[4].

当 Cd 跨膜运输进入细胞内部时, Cd 会与细胞内部如 BDM (金属富集颗粒 MRG + 热稳定蛋白 HSP) 和 MSF (细胞器组分 Organelle + 热敏感蛋白 HDP) 等结构结合形成相对稳定的物质. Li 等^[17] 和 Lavoie 等^[33] 认为可将金属富集颗粒 (MRG) 对 Cd 的富集能力作为陆生植物对重金属的生物解毒机制, 热稳定蛋白 (HSP) 中所包含的植物螯合肽和金属硫蛋白等组成成分对重金属的富集也是植物细胞重要的解毒机制^[34], 因此植物细胞 BDM 组分中 Cd 富集量是植物耐受重金属能力强弱的重要标准. 本研究结果表明, 3 种向日葵进入细胞内部后, 金属富集颗粒 (MRG) 和热稳定蛋白 (HSP) 中可富集大量的 Cd, 各施肥处理食用葵、观赏葵、油葵 BDM

组分中富集的 Cd 分别可达 61% ~ 73%、63% ~ 68% 和 58% ~ 70%; 施 NPK 肥使 3 种向日葵金属富集颗粒 (MRG) Cd 富集量增加促进效果最明显, 因此向日葵在 Cd 胁迫下的生物解毒机制以及施肥可提高植株体内 Cd 富集量的主要原因可能是植物将吸收的 Cd 富集在金属富集颗粒 (MRG) 中.

MSF 组分 (细胞器组分 Organelle + 热敏感蛋白 HDP) 是重金属致使植物体内中毒的重要靶点, 因此可利用 MSF 组分中 Cd 含量预测 Cd 对植物毒性的强弱^[33, 35]. 细胞器组分 (Organelle, 如线粒体和叶绿体) 和热敏感蛋白 (HDP, 如酶) 是植物维持正常生命活动代谢所必须的组成成分, Cd 与 MSF 组分中物质结合, 可能会导致线粒体、叶绿体以及各类酶代谢活动紊乱甚至失去其活性, 进而影响植物正常生命活动^[33]. 本研究结果表明, 施肥处理可明显提高 3 种向日葵热敏感蛋白 (HDP) 中 Cd 富集量, 可能是因为在此含量土壤中 ($Cd = 2.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 生长的向日葵并未达到影响热敏感蛋白 (HDP) 活性的临界值; 施肥可明显降低食用葵和油葵细胞器组分 (Organelle) 中 Cd 富集量, 但可促进观赏葵细胞器 (Organelle) 中 Cd 富集量, 表明施肥在促进观赏葵体内 Cd 富集量增加的同时增加了 Cd 对观赏葵生命活动影响的潜在风险.

综上所述, Cd 在食用葵、观赏葵、油葵叶片亚细胞结构中的分布趋势为金属富集颗粒 (MRG) > 细胞碎屑 (Cellular debris) > 热稳定蛋白 (HSP) > 细胞器组分 (Organelle) > 热敏感蛋白 (HDP), 向日葵叶片细胞 BDM 组分中富集的 Cd 占叶片中富集 Cd 总量的 60%, 是向日葵耐受 Cd 的重要解毒机制, 施 NPK 肥对促进向日葵金属富集颗粒 (MRG) 和细胞碎屑 (Cellular debris) 中 Cd 富集量增加最为明

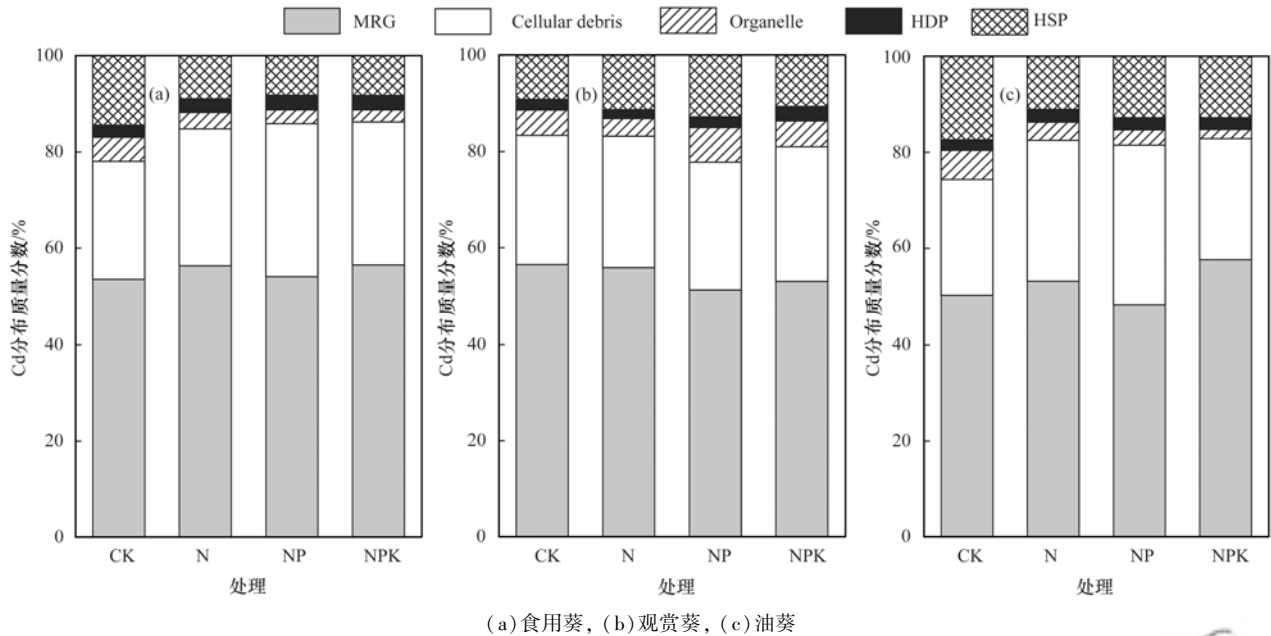


图2 不同施肥处理对3种向日葵叶片亚细胞结构中Cd分布百分比

Fig. 2 Effects of different fertilizer treatments on relative distribution of Cd in subcellular fractions of leaves of the three sunflower types

显,施肥在促进观赏葵体内Cd富集量增加的同时增加了Cd对观赏葵生命活动影响的潜在风险。

4 结论

(1)施肥处理均可以显著提高食用葵、观赏葵、油葵生物量以及对Cd的吸收富集量。NPK肥处理条件下,3种向日葵地上部Cd富集量均达到最高,且显著高于对照和其他施肥处理。3种向日葵中,食用葵在NPK处理条件下,其生物量和对Cd的富集量明显高于观赏葵和油葵。

(2)向日葵叶片中Cd亚细胞分布表明,Cd在3种向日葵叶片亚细胞结构中主要富集在金属富集颗粒(MRG)和细胞碎屑(Cellular debris),施肥提高向日葵对Cd的耐性机制是将吸收的Cd富集在对植物生命活动影响较低的金屬富集颗粒(MRG)和细胞碎屑(Cellular debris),施NPK肥对金属富集颗粒(MRG)中Cd富集量增加促进作用最为显著。

(3)NPK配施可有效提高向日葵对Cd污染土壤的修复效率。

参考文献:

- [1] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, **30**(17): 208-214.
Xing Y S, Qiao D M, Zhu G F, *et al.* Research progress of heavy pollution in soil and phytoremediation technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, **30**(17): 208-214.
- [2] Cunningham S D, Anderson T A, Schwab A P, *et al.*

Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants [J]. Advances in Agronomy, 1996, **56**: 55-114.

- [3] Finzgar N, Lestan D. The two-phase leaching of Pb, Zn and Cd contaminated soil using EDTA and electrochemical treatment of the washing solution [J]. Chemosphere, 2008, **73**(9): 1484-1491.
- [4] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, **47**(3): 207-210.
Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al.* Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, **47**(11): 902-905.
- [5] Wieshammer G, Unterbrunner R, García T B, *et al.* Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* spp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri* [J]. Plant and Soil, 2007, **298**(1-2): 255-264.
- [6] Ok Y S, Usman A R A, Lee S S, *et al.* Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil [J]. Chemosphere, 2011, **85**(4): 677-682.
- [7] Krämer U. Phytoremediation; novel approaches to cleaning up polluted soils [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2005, **16**(2): 133-141.
- [8] 冯子龙, 卢信, 张娜, 等. 农艺强化措施用于植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(2): 14-20.
Feng Z L, Lu X, Zhang N, *et al.* Research progress on application of agronomic enhancement measures in phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, **45**(2): 14-20.
- [9] 俞花美, 焦鹏, 葛成军, 等. 施肥措施对重金属污染土壤-植物系统影响的研究进展[J]. 热带农业科学, 2012, **32**(2): 61-66.
Yu M H, Jiao P, Ge C J, *et al.* Effect of fertilization measures on heavy metals contamination of soils and plant system [J].

- Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2012, **32**(2): 61-66.
- [10] Rizwan M, Ali S, Rizvi H, *et al.* Phytomanagement of heavy metals in contaminated soils using sunflower: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2016, **46**(18): 1498-1528.
- [11] Hu P J, Yin Y G, Ishikawa S, *et al.* Nitrate facilitates cadmium uptake, transport and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(9): 6306-6316.
- [12] Tsadilas C D, Karaivazoglou N A, Tsotsolis N C, *et al.* Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, N form, and year of cultivation [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(2): 239-246.
- [13] Fayiga A O, Nwoke O C. Phosphate rock: origin, importance, environmental impacts, and future roles [J]. Environmental Reviews, 2016, **24**(4): 403-415.
- [14] Cao X D, Ma L Q, Rhue D R, *et al.* Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock [J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(3): 435-444.
- [15] Sparrow L A, Salardini A A, Bishop A C. Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). Response of cvv. Russet Burbank and Kennebec to two double superphosphates of different cadmium concentration [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1993, **44**(4): 855-861.
- [16] Liu Y, Zhuang P, Li Z A, *et al.* Effects of fertiliser and intercropping on cadmium uptake by maize [J]. Chemistry and Ecology, 2013, **29**(6): 489-500.
- [17] Li N Y, Fu Q L, Zhuang P, *et al.* Effect of fertilizers on Cd uptake of *amaranthus hypochondriacus*, a high biomass, fast growing and easily cultivated potential Cd hyperaccumulator [J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, **14**(2): 162-173.
- [18] Wallace W G, Lee B G, Luoma S N. Subcellular compartmentalization of Cd and Zn in two bivalves. I. significance of metal-sensitive fractions (MSF) and biologically detoxified metal (BDM) [J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, **249**: 183-197.
- [19] Zhang H Z, Guo Q J, Yang J X, *et al.* Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of two castor (*Ricinus communis* L.) cultivars exhibit differences in Cd accumulation [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2015, **120**: 184-192.
- [20] Cornu J Y, Bakoto R, Bonnard O, *et al.* Cadmium uptake and partitioning during the vegetative growth of sunflower exposed to low Cd²⁺ concentrations in hydroponics [J]. Plant and Soil, 2016, **404**(1-2): 263-275.
- [21] 杨学乐, 何录秋, 刘寿明, 等. 向日葵、油菜对镉胁迫反应及对镉污染土地修复作用研究进展 [J]. 作物研究, 2017, **31**(1): 93-98.
- Yang X L, He L Q, Liu S M, *et al.* Research on the reaction of sunflower and rapeseed under cadmium stress and their phytoremediation for the cadmium contaminated soil [J]. Crop Research, 2017, **31**(1): 93-98.
- [22] Júnior C A L, De Sousa Barbosa H S, Galazzi R M G, *et al.* Evaluation of proteome alterations induced by cadmium stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultures [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **119**: 170-177.
- [23] Guo J M, Lei M, Yang J X, *et al.* Effect of fertilizers on the Cd uptake of two sedum species (*Sedum spectabile* Boreau and *Sedum aizoon* L.) as potential Cd accumulators [J]. Ecological Engineering, 2017, **106**: 409-414.
- [24] Liu X, Fu J W, Guan D X, *et al.* Arsenic induced phytate exudation, and promoted FeAsO₄ dissolution and plant growth in As-Hyperaccumulator *Pteris vittata* [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(17): 9070-9077.
- [25] Fayiga A O, Saha U K. Arsenic hyperaccumulating fern: implications for remediation of arsenic contaminated soils [J]. Geoderma, 2016, **284**: 132-143.
- [26] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2906-2911.
- Liao X Y, Chen T B, Yan X L, *et al.* Effects of different forms of P fertilizers on phytoremediation for As-contaminated soils using As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. Environmental Science, 2008, **29**(10): 2906-2911.
- [27] 陈同斌, 黄泽春, 黄宇营, 等. 砷超富集植物中元素的微区分布及其与砷富集的关系 [J]. 科学通报, 2003, **48**(11): 1163-1168.
- [28] DiTusa S F, Fontenot E B, Wallace R W, *et al.* A member of the Phosphate transporter 1 (Pht1) family from the arsenic-hyperaccumulating fern *Pteris vittata*, is a high-affinity arsenate transporter [J]. New Phytologist, 2016, **209**(2): 762-772.
- [29] Fitz W J, Wenzel W W, Zhang H, *et al.* Rhizosphere characteristics of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and monitoring of Phytoremoval Efficiency [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(21): 5008-5014.
- [30] Ghosh M, Singh S P. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species [J]. Environmental Pollution, 2005, **133**(2): 365-371.
- [31] Wenzel W W, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps [J]. Environmental Pollution, 1999, **104**(1): 145-155.
- [32] Koren Š, Arčon I, Kump P, *et al.* Influence of CdCl₂ and CdSO₄ supplementation on Cd distribution and ligand environment in leaves of the Cd hyperaccumulator *Noccaea (Thlaspi) praecox* [J]. Plant and Soil, 2013, **370**(1-2): 125-148.
- [33] Lavoie M, Faucheur S L, Fortin C, *et al.* Cadmium detoxification strategies in two phytoplankton species: metal binding by newly synthesized thiolated peptides and metal sequestration in granules [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **92**(2): 65-75.
- [34] Verkleij J A C, Sneller F E C, Schat H. Metallothioneins and phytochelatins; ecophysiological aspects [A]. In: Abrol Y P, Ahmad A, (Eds). Sulphur in Plants [C]. Dordrecht: Springer, 2003, 163-176.
- [35] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckmeria nivea* (L.) Gaud [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, **62**(3): 389-395.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)