

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价

陈莹^{1,2}, 刘汉焱^{1,2}, 刘娜^{1,2}, 蒋珍茂^{1,2}, 魏世强^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 作物重金属累积主要受土壤中重金属有效性的制约, 由于土壤种类和污染特征的差异, 目前尚无公认的有效态测定方法。为筛选建立适宜土壤铅(Pb)和镉(Cd)有效性评价的方法, 本文选择重庆市4种性质差异较大的典型农地土壤: 酸性紫色土、中性紫色土、石灰性黄壤和钙质紫色土, 系统比较了氯化钙(CaCl_2)、醋酸铵(NH_4OAc)、盐酸(HCl)、乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA)和二乙基三胺五乙酸(DTPA)这5种化学提取方法与梯度扩散薄膜技术(DGT)对供试土壤Pb和Cd的提取能力, 并以黑麦草为指示植物开展盆栽试验, 探讨不同提取剂提取量与植物Pb和Cd累积能力的相关性, 进而综合评价不同方法的适宜性。结果表明, 不同提取方法对Pb和Cd的提取量存在明显差异: 酸性紫色土和石灰性黄壤中以HCl-Pb提取态含量最高, 中性紫色土和钙质紫色土中则以EDTA-Pb提取态含量最高; 除钙质紫色土以EDTA-Cd提取态含量最高外, 其余3种土壤则是以HCl-Cd提取态含量最高。考虑提取量与植物吸收量之间的相关关系, 在相同类型土壤上, 可选择除 CaCl_2 外的5种提取方法作为Pb的评价方法, Cd则是6种提取方法均较适合。在不同类型土壤中, EDTA-Pb提取态和DGT-Cd提取态含量与黑麦草地上部Pb和Cd含量相关性最高, 相关系数分别为0.941和0.919, 说明EDTA提取适用于不同类型土壤间Pb生物有效性的比较与评价, 而Cd则以DGT技术最好, 化学提取剂中以HCl较为适宜。

关键词: 农地土壤; 铅(Pb); 镉(Cd); 有效性; 黑麦草

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3494-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012011

Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil

CHEN Ying^{1,2}, LIU Han-yi^{1,2}, LIU Na^{1,2}, JIANG Zhen-mao^{1,2}, WEI Shi-qiang^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: The accumulation of heavy metals in crops is largely dependent on the availability of heavy metals in soils. Due to the differences of soil types and pollution characteristics, there is no widely recognized method for the determination of the bio-available heavy metals in soils such as Pb and Cd. In order to screen and establish suitable methods, the extractable abilities of five extractants (CaCl_2 , NH_4OAc , HCl, EDTA, and DTPA) and Gradient Diffusion Film Technology (DGT) on four typical farmland soils with very different properties in Chongqing (acid purple soil, neutral purple soil, calcareous yellow soil and calcareous purple soil) were systematically compared. Simultaneously, pot experiments were carried out with *Lolium perenne* L. as an indicator plant to explore the relationship between the extractable soil Pb and Cd and their accumulation in plants. The feasibility of the tested methods were evaluated based on the extractability and co-relationships. The results showed that the extractability of the tested extractants for soil Pb and Cd varied a lot. HCl showed highest extractability on Pb in acid purple soil and calcareous yellow soil, while EDTA did the best in neutral purple soil and calcareous purple soil; HCl showed best extractability in all soils except calcareous purple soil, where EDTA was the best. Considering the correlation between the extraction amount and uptake by plant, all the extraction methods could be applied for the evaluation of the bioavailability of soils Pb and Cd except CaCl_2 for Pb due to its weak extractability for Pb for a specific soil type. For the comparison of heavy bioavailability in different soil types, EDTA-extractable Pb and DGT-extractable Cd were recommended due to their well co-relationships between extractable amount in soil and uptake by plant (*Lolium perenne* L.) as indicated by the correlation coefficients of 0.941 and 0.919, respectively. HCl was relatively suitable as Cd extractant compared to others if DGT method could not be used.

Key words: farmland soil; lead; cadmium; availability; *Lolium perenne* L.

农地土壤环境质量直接关系到农产品安全, 土壤重金属污染是当前全球日益突出的土壤环境问题, 污染土壤中的重金属可通过食物链传递危害人体健康^[1]。2014年全国土壤污染状况调查公报结果显示, 我国耕地土壤点位超标率达19.4%, 主要以镉、镍、铜、砷、汞和铅等重金属污染为主^[2], 其中农用地以铅(Pb)和镉(Cd)污染较为严重, 对农产品

安全和人群健康构成了严重威胁^[3~5]。

作物对土壤中重金属的吸收累积不仅与土壤中

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-01-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 重庆市科学技术委员会重点研发计划项目(cstc2017shms-zdyfX0008)

作者简介: 陈莹(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属修复, E-mail: 479076414@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqwei@swu.edu.cn

重金属的总量有关,更主要地受其中有效态含量的制约^[6]. 重金属的有效态通常是指土壤中可被生物吸收的形态,包括水溶态、酸溶态、螯合态和吸附态,以及某些易分解的有机态和易分化的矿化态等^[7]. 近几十年来,污染土壤中重金属的有效性测定和评价是国内外土壤重金属污染研究的热点. 我国农地土壤重金属的空间分布特征差异较为明显,不同区域成土母质的差异,背景值的不同造成土壤重金属含量在空间上分布存在明显差异^[8~12];南方农地土壤重金属含量明显高于北方,尤其是矿产资源较为丰富的西南地区,其农地土壤 Pb 和 Cd 的含量明显高于背景值. 为保证农产品安全,目前全国各地均在开展受污染农田安全利用与修复技术的应用与示范推广工作,土壤重金属有效性既是评价技术实施效果的重要内容之一,也是确立优化技术措施的重要基础.

目前重金属有效态含量最常用的评价方法是化学提取法,包括单一提取法和连续分级提取法^[13],以提取剂对土壤重金属的提取效率及其与作物生长的相关性作为适宜评价方法的筛选依据. 单一提取剂提取法,因其操作简便而受到广泛关注. 国家环境保护标准(HJ 804-2016)推荐使用 DTPA 浸提出的金属元素作为土壤中的有效态元素;有研究发现,CaCl₂ 提取方法更能有效地预测水稻籽粒中 Cd 和 Ni 的积累情况^[14];EDTA 和 HCl 适合作为对贵州省典型土壤中的 Pb 和 Cd 有效态提取的提取剂^[15]. 但单一化学提取法缺乏对提取过程中痕量金属再吸附和再分配等问题以及重金属在根部环境中动态变化的考虑^[16]. 英国发明的梯度扩散薄膜通过模拟在生物扰动情况下,重金属从土壤固相解析并补给到土壤液相中的动力学过程,能够更好地反映土壤固相对重金属生物有效性的影响^[17~19]. 有研究证明,在温室条件下,DGT 提取的有效态 Cu、Zn 和 Pb 与高粱的吸收量呈显著相关^[20];通过在中国 15 个省的不同土壤上开展种植小白菜的温室试验,发现在评估不同类型土壤

中的生物利用度方面 DGT 技术优于传统技术^[21]. DGT 技术近年来受到较多关注,但受限于样品保存条件、后期操作及昂贵的价格,DGT 技术在实践中的广泛应用仍然受到限制.

我国土壤类型丰富多样,不同区域重金属污染成因、污染程度及土壤中重金属赋存形态各异,同时不同提取剂的提取机制和能力等存在较大差异,迄今尚缺乏土壤重金属有效性评价的公认方法,难以实现对不同区域和不同类型土壤重金属有效性的比较与评价^[22,23]. 为此,需要以不同农业生态区域单元为基础,对现有主要方法进行系统比较,筛选适应区域条件的重金属有效性测定方法,为建立以有效态含量为基础的统一的土壤环境质量评价方法提供基础. 本研究选取重庆市 4 种性质差异较大的典型农地土壤为研究对象,以生长速度较快,对重金属有较强的耐受性和富集能力,同时常作为土壤养分有效性评价的模式植物——黑麦草为供试植物^[24],开展温室盆栽试验,系统比较氯化钙(CaCl₂)、乙酸铵(NH₄OAc)、盐酸(HCl)、乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA)和二乙基三胺五乙酸(DTPA)这 5 种单一化学提取法以及梯度薄膜扩散技术(DGT)等几种现行常用方法对土壤中的 Pb 和 Cd 的提取能力及其与黑麦草 Pb 和 Cd 累积量相关性的差异,筛选合适的评价方法,以期为区域农地土壤修复技术效果及污染风险评价提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为重庆市 4 种典型农地土壤,包括酸性紫色土、中性紫色土、石灰性黄壤以及钙质紫色土,分别取自重庆市粮食主产区江津区、合川区、北碚区和潼南区代表性农地耕层(0~20 cm). 供试土壤去除砾石及植物残体,自然风干后混匀过 2 mm 筛备用. 供试土壤基本理化性质见表 1,基本理化性质测定方法见参考文献[25],所有供试土壤 Pb 和 Cd 含量均未超过农用地土壤污染风险筛选值.

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Characteristics of selected soils											
土壤类型	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	速效氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	Cd 全量 /mg·kg ⁻¹	Pb 全量 /mg·kg ⁻¹	土壤质地/%		
									砂粒	粉粒	黏粒
酸性紫色土	6.04	29.42	205.59	23.40	88.28	22.00	0.39	65.40	32.00	36.00	32.00
中性紫色土	7.30	31.63	105.91	24.26	233.22	24.71	0.40	66.60	44.00	34.00	22.00
石灰性黄壤	7.67	19.01	67.28	24.93	193.48	22.14	0.45	83.00	20.00	44.00	36.00
钙质紫色土	7.81	22.55	80.99	25.69	161.04	23.00	0.42	99.25	8.00	30.00	62.00

1.2 试验设计

1.2.1 污染土壤培养制备

为比较不同提取剂对 4 种类型土壤中 Pb 和 Cd

两种重金属元素的提取能力,参照国家《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),采用外源添加法将土壤重金属污染程

度调节为低、中和高这 3 个水平,同时设置 1 个不添加外源重金属对照处理(CK). 3 个 Pb 处理添加的外源 Pb 含量分别为 200、400 和 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,记为 Pb200、Pb400 和 Pb800; 3 个 Cd 处理外源 Cd 添加含量分别为 1、2 和 4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,记为 Cd1、Cd2 和 Cd4. 按照设计的土壤重金属污染水平分别以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的形式加入 Pb 和 Cd 至设计含量,充分混匀,补充去离子水至 60% 的田间持水量,培养过程全程在西南大学资源环境学院温室中进行,室温[温度控制(25 ± 3) $^{\circ}\text{C}$]下避光陈化培养 90 d,使土壤中 Pb 和 Cd 分布均匀并达到转化平衡后备用. 采用王水-高氯酸法消解土壤样品^[25],原子吸收分光光度仪测定全 Pb 含量,石墨炉 AAS 测定消解液中的全 Cd 含量,以国家标准物质 GBW07404(GSS-4) 和 GBW07428(GSS-14) 为土壤内标样品控制分析质量,每个处理设置 3 个重复.

1.2.2 黑麦草盆栽试验

将上述陈化的土壤均匀装入 PVC 塑料盆中

表 2 黑麦草 Pb 和 Cd 含量测定的回收率

Table 2 Recovery rate of Pb and Cd determination in *Lolium perenne* L.

黑麦草所在 Pb 污染土壤	测定值范围 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	测定平均值 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	加标回收率 /%	黑麦草所在 Cd 污染土壤	测定值范围 $/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	测定平均值 $/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	加标回收率 /%
酸性紫色土 Pb0	4.9 ~ 5.2	5.2	98 ~ 104	酸性紫色土 Cd0	4.7 ~ 5.1	5.0	94 ~ 102
中性紫色土 Pb0	5.0 ~ 5.2	5.1	100 ~ 104	中性紫色土 Cd0	5.0 ~ 5.4	5.2	100 ~ 108
石灰性黄壤 Pb0	4.8 ~ 5.3	5.2	96 ~ 106	石灰性黄壤 Cd0	4.9 ~ 5.2	5.1	98 ~ 104
钙质紫色土 Pb0	5.1 ~ 5.6	5.3	102 ~ 112	钙质紫色土 Cd0	4.8 ~ 5.3	5.1	96 ~ 106

1.2.3 CaCl_2 、 NH_4OAc 、HCl、EDTA 和 DTPA 提取态中 Pb 和 Cd 含量的测定

称取过 2 mm 筛的 5.00 g 土壤样品置于 100 mL 离心管中,按照 1:10 的土水比添加 50.00 mL 的 5 种提取剂溶液,5 种提取剂分别为 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙(CaCl_2)、1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵(NH_4OAc)、0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸(HCl)、0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙二醇四乙酸二钠盐(EDTA)和 0.005 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 二乙基三胺五乙酸(DTPA), 25°C 恒温条件下,以 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 在水平往复振荡机中振荡 2 h,然后在 3 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 20 min,上清液经过 0.45 μm 的滤膜过滤后,原子吸收分光光度仪测定 Pb 含量,石墨炉 AAS 测定 Cd 含量.

1.2.4 DGT-Cd 和 DGT-Pb 有效态含量的测定

称取过 2 mm 筛的土壤样品 30.00 g 于烧杯中,加入最大田间持水量 60% 的去离子水,搅拌 5 min,密封后恒温(25°C)平衡 24 h,然后再次添加超纯水使土壤达到最大田间持水量,平衡 48 h,土壤表面可看到光滑平整的水膜.待土壤加水平衡后,用干净塑料勺舀取处理好的土壤放入 DGT 装置的内腔中,在桌面上轻轻抖动,使得土壤与 DGT 装置暴露面充分

(1.5 $\text{kg}\cdot\text{盆}^{-1}$),选取饱满的一年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)种子,在每盆土壤中均匀播种 10 颗种子,喷洒去离子水使土壤水分含量保持在田间持水量的 60%,每周通过称重法调节水分含量一次.待黑麦草长出 2 片真叶时间苗,每盆定植黑麦草 8 棵.待生长 60 d 后,测量黑麦草株高,然后按地上部和地下部分别进行收获.用去离子水充分冲洗不同处理的植物样品以去除黏附于植物样品上的泥土和污物,用滤纸吸干,分别称量地上部及地下部生物量(鲜重),装入样品袋.植物样品在 105°C 杀青 30 min 后, 70°C 烘至恒重,称量各处理干物质量,然后粉碎待分析.植物样品采用浓 HNO_3 与 HClO_4 混合液(体积比为 3:1)进行消解,原子吸收分光光度仪测定 Pb 含量,石墨炉 AAS 测定 Cd 含量,采用加标回收法控制对黑麦草中 Pb 和 Cd 测量的精密度及准确度,分别采用 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Pb) 和 5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (Cd) 的标液加标($n=5$)进行分析,加标回收率在 90% ~ 120% 之间,符合分析需求,具体结果见表 2.

接触,继续添加土壤直至填满内腔.将装好土壤的 DGT 装置转移到放有少量去离子水的自封袋中,袋口处于半封闭状态.DGT 装置在恒温条件下放置 24 h 后,取出膜心,利用去离子水冲洗膜心表面,将膜心撬开,取出固定膜,放入离心管中(膜的正面朝上),加入 1.8 mL 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 ,静置提取 24 h,取出固定膜,提取液经 3% HNO_3 稀释并使用 ICP-MS 进行测定,按照公式计算土壤样品中重金属生物有效性含量^[26~27].公式如下:

固定膜结合的重金属量(M):

$$M = c_e(V_{\text{HNO}_3} + V_{\text{gel}})/f \quad (1)$$

式中, c_e 为 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 溶液中重金属浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); V_{HNO_3} 为浸泡结合相的 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 溶液体积; V_{gel} 为固定膜体积,记为 0.2 mL; f 为每种金属的洗脱因子,Cd 为 0.938,Pb 为 0.955.

DGT 富集重金属的含量(C_{DGT}):

$$C_{\text{DGT}} = M\Delta g/DA t \quad (2)$$

式中, t 为 DGT 装置放置时间(s), A 为 DGT 装置(膜)接触面积, $A=3.14\text{ cm}^2$, Δg 为扩散层厚度(0.08 cm), D 为凝胶层中重金属的扩散系数, 25°C

下 Cd 为 $6.38 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, Pb 为 $8.41 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

1.3 数据处理

本试验数据运用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 进行整理与分析,运用 Origin 8.0 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 不同类型土壤中不同 Pb 和 Cd 污染程度对黑麦草生长的影响

重金属不同污染水平下黑麦草地上部生物量及株高见表 3. 从中可知,酸性紫色土中黑麦草地上部生物量随 Pb 含量的增加而增加,较对照增幅为 1.98%~21.48%;石灰性黄壤中与之相反,随 Pb 含量的增加生物量较对照减少 21.12%~27.53%;中性紫色土中呈先增加后减少的趋势,以 Pb 含量为 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时生物量最大;在钙质紫色土中,当 Pb 含量达到 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,黑麦草地上部生物量仅为对照的 55.15%. 统计分析表明,仅有钙质紫色土高含量 Pb 会导致黑麦草生长受到显著影响,与对照之间差异达到 $P < 0.05$ 的统计显著水平,其他 3 种

土壤上黑麦草生物量尽管有增减,但均无显著性统计差异. Pb 对黑麦草株高的影响与其对生物量的影响并不完全一致,例如酸性紫色土上,随土壤 Pb 含量的增加生物量增加但株高显著下降,当土壤 Pb 含量达到 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时,株高较对照之间的差异达到统计显著水平.

就 Cd 而言,在中性紫色土中黑麦草地上部生物量和株高均随 Cd 含量的增加而增加,地上部生物量较对照增幅为 36.49%~44.94%,对黑麦草的生长起促进作用;而在石灰性黄壤中,外源添加 Cd 降低了其地上部的生物量,株高也随之降低,当 Cd 含量达到 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,黑麦草地上部生物量为对照的 63.14%,株高较对照减少 36.85%,抑制了其生长. 酸性和钙质紫色土中黑麦草的地上部生物量和株高随外源 Cd 含量的增加有所变化,但均与对照无显著性差异. 结果表明,在土壤试验 Pb 和 Cd 含量范围内,不同类型土壤上黑麦草生长对 Pb 和 Cd 的响应存在明显差异,同时可改变其生长形状,但 Pb 和 Cd 对黑麦草生物量的积累总体影响较小.

表 3 不同类型土壤中黑麦草的生长情况¹⁾

Table 3 Growth of <i>Lolium perenne</i> L. in different types of soils						
土壤类型	外源添加 Pb 含量 /mg·kg ⁻¹	地上部生物量(鲜重) /g·盆 ⁻¹	株高/cm	外源添加 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	地上部生物量(鲜重) /g·盆 ⁻¹	株高/cm
酸性紫色土	CK	8.10 ± 0.72a	43.02 ± 3.50a	CK	8.10 ± 0.72a	43.02 ± 3.50ab
	Pb200	8.26 ± 1.13a	41.50 ± 3.75ab	Cd1	8.38 ± 1.17a	41.35 ± 4.62b
	Pb400	9.84 ± 1.04a	40.39 ± 4.17b	Cd2	9.40 ± 1.28a	44.84 ± 5.16a
	Pb800	9.47 ± 1.61a	39.15 ± 5.37b	Cd4	9.60 ± 0.53a	41.84 ± 3.51b
中性紫色土	CK	7.81 ± 1.43a	38.11 ± 4.50a	CK	7.81 ± 1.43b	38.11 ± 4.50b
	Pb200	7.93 ± 0.75a	39.64 ± 3.73a	Cd1	11.32 ± 0.47a	43.68 ± 4.88a
	Pb400	8.27 ± 0.73a	39.91 ± 5.19a	Cd2	10.66 ± 0.52a	43.37 ± 5.66a
	Pb800	7.40 ± 1.46a	37.86 ± 4.78a	Cd4	10.80 ± 0.81a	41.59 ± 6.29a
石灰性黄壤	CK	8.90 ± 0.86a	42.81 ± 3.92a	CK	8.90 ± 0.86a	42.81 ± 3.92a
	Pb200	7.02 ± 1.98a	37.77 ± 6.24b	Cd1	7.72 ± 0.11ab	37.27 ± 6.31b
	Pb400	6.45 ± 1.00a	39.60 ± 5.17ab	Cd2	5.62 ± 0.78c	38.48 ± 4.23b
	Pb800	6.84 ± 0.07a	40.96 ± 5.81ab	Cd4	6.08 ± 0.82bc	38.21 ± 6.49b
钙质紫色土	CK	7.76 ± 0.87a	40.12 ± 4.74a	CK	7.76 ± 0.87a	40.12 ± 4.74a
	Pb200	5.97 ± 1.69ab	40.31 ± 5.62a	Cd1	8.18 ± 1.72a	41.00 ± 5.19a
	Pb400	6.51 ± 0.21a	39.15 ± 4.43a	Cd2	7.51 ± 0.60a	41.02 ± 3.48a
	Pb800	4.28 ± 0.54b	38.95 ± 4.82a	Cd4	7.43 ± 1.36a	38.60 ± 4.96a

1) 同一列中相同小写字母表示同种土壤处理间无显著差异,不同小写字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 黑麦草对 Pb 和 Cd 的富集

图 1 为不同土壤不同 Pb 和 Cd 污染程度下黑麦草地上部和地下部对 Pb 和 Cd 的富集情况,其富集系数^[28] (BCF) 见表 4. 重金属元素和土壤类型不同,黑麦草地上部和地下部对重金属的累积特征有所差异. 图 1(a) 所示,总体上黑麦草地上部对 Pb 的累积能力高低顺序为酸性紫色土 > 钙质紫色土 > 中性紫色土 > 石灰性黄壤,其地上部 Pb 含量分别为 53.97~114.78、12.96~119.95、15.66~98.71 和 11.41

~71.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 随外源 Pb 含量的增加,黑麦草的地上部 Pb 富集量的变化趋势也因土壤类型的不同而异. 酸性紫色土上,在外源 Pb 含量低于 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,黑麦草地上部 Pb 含量先呈线性快速增长,后增长变缓;其余 3 种土壤上黑麦草地上部 Pb 含量变化趋势相似,在土壤 Pb 含量 200~400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部 Pb 增加较缓,当 Pb 含量高于 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其 Pb 含量快速增加. 黑麦草地下部对 Pb 的累积能力远远大于地上部,其大小顺序与地

上部有所不同,为酸性紫色土 > 钙质紫色土 > 石灰性黄壤 > 中性紫色土,地下部富集 Pb 含量分别为 129.54 ~ 1 473.58、90.53 ~ 715.22、114.59 ~ 544.76 和 70.70 ~ 568.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 当外源 Pb 含量在 200 ~ 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,酸性紫色土中的黑麦草地下部对 Pb 的富集一直呈线性快速增长趋势,这说明

当外源 Pb 添加量超过 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,Pb 向黑麦草地上部的转运相对减少,更多的 Pb 富集在地下部.除酸性紫色土外,其余 3 种土壤上黑麦草地下部的富集能力相似,尤其在外源 Pb 高于 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,富集能力均变大,以中性紫色土上黑麦草地下部的富集能力最低.

表 4 黑麦草对 Pb 和 Cd 的富集系数¹⁾
Table 4 Enrichment coefficients of Pb and Cd in *Lolium perenne* L.

土壤类型	外源添加 Pb 含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部 富集系数	地下部 富集系数	外源添加 Cd 含量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部 富集系数	地下部 富集系数
酸性紫色土	CK	0.16 ± 0.01d	0.46 ± 0.04d	CK	9.96 ± 0.25a	21.89 ± 1.21a
	Pb200	0.26 ± 0.01c	1.03 ± 0.04c	Cd1	7.64 ± 0.14b	21.59 ± 0.66a
	Pb400	0.34 ± 0.01b	1.51 ± 0.01b	Cd2	7.31 ± 0.06c	16.41 ± 1.28b
	Pb800	0.83 ± 0.06a	2.06 ± 0.02a	Cd4	6.90 ± 0.06d	21.60 ± 0.52a
中性紫色土	CK	0.24 ± 0.00a	1.06 ± 0.06a	CK	2.95 ± 0.28c	16.14 ± 1.64b
	Pb200	0.20 ± 0.00b	0.91 ± 0.02b	Cd1	3.41 ± 0.24b	15.12 ± 0.26b
	Pb400	0.13 ± 0.01c	0.66 ± 0.02c	Cd2	3.80 ± 0.13ab	16.91 ± 1.16b
	Pb800	0.12 ± 0.01d	0.68 ± 0.01c	Cd4	4.22 ± 0.27a	19.42 ± 0.86a
石灰性黄壤	CK	0.13 ± 0.03b	1.15 ± 0.01b	CK	2.22 ± 0.41b	8.08 ± 0.45b
	Pb200	0.18 ± 0.01a	1.22 ± 0.04a	Cd1	2.68 ± 0.11a	8.62 ± 1.44ab
	Pb400	0.12 ± 0.01b	0.74 ± 0.00c	Cd2	2.05 ± 0.04b	10.76 ± 0.93a
	Pb800	0.09 ± 0.00c	0.64 ± 0.01d	Cd4	1.95 ± 0.05b	6.76 ± 0.12c
钙质紫色土	CK	0.16 ± 0.01bc	1.09 ± 0.00b	CK	2.95 ± 0.27b	10.50 ± 0.34b
	Pb200	0.21 ± 0.01a	1.27 ± 0.04a	Cd1	3.23 ± 0.03a	13.40 ± 0.53a
	Pb400	0.17 ± 0.01b	0.86 ± 0.00c	Cd2	2.53 ± 0.09c	13.50 ± 0.73a
	Pb800	0.14 ± 0.00c	0.84 ± 0.00c	Cd4	2.04 ± 0.02d	11.07 ± 0.70b

1) 同一列中相同小写字母表示同种土壤处理间无显著差异,不同小写字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

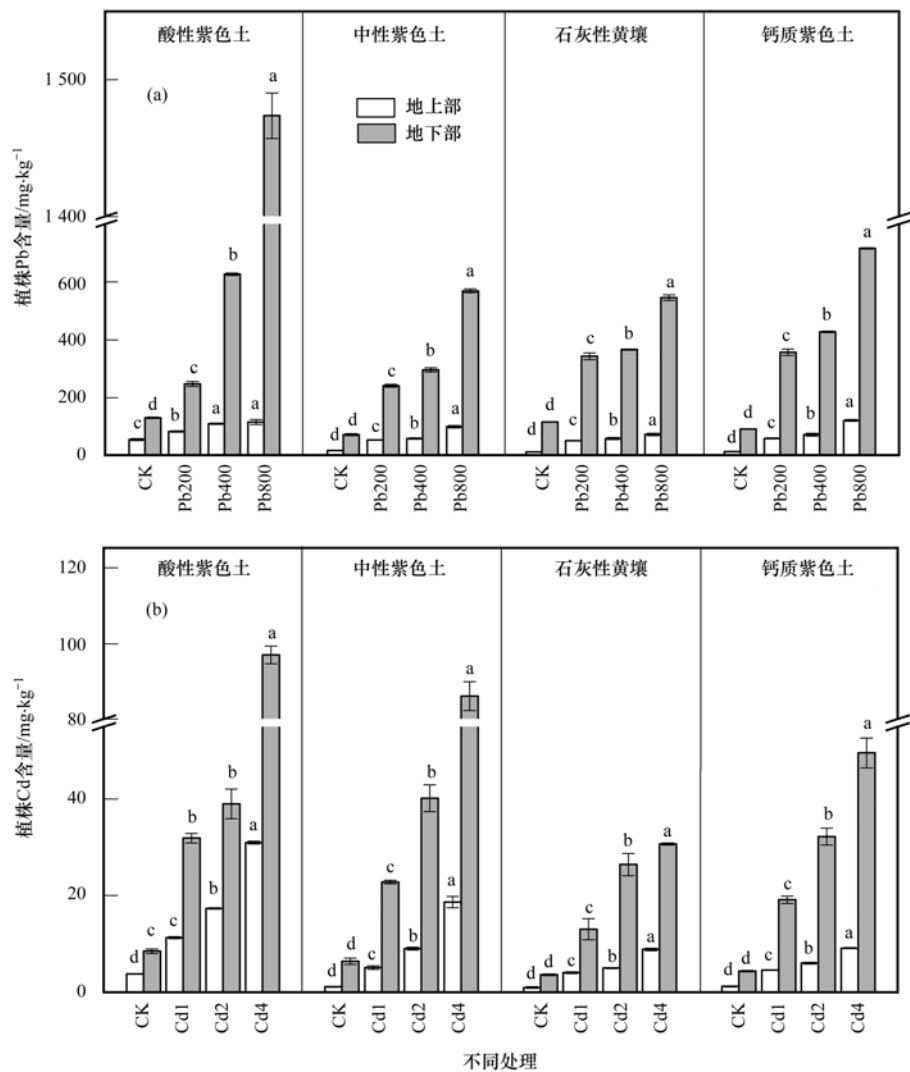
由图 1(b)可见,Cd 的累积情况与外源 Cd 添加量的关系更为密切,黑麦草地上部和地下部 Cd 富集量大体上均随着外源添加 Cd 污染程度的增加而几乎呈线性增长.酸性紫色土中黑麦草地上部和地下部富集能力高于其余 3 种土壤,在石灰性黄壤中的黑麦草富集能力最弱,未添加外源 Cd 时其地上部和地下部 Cd 富集含量仅为酸性紫色土的 25.98% 和 42.62%. 当外源 Cd 低于 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其余 3 种土壤中黑麦草地上部富集 Cd 能力相似,添加量超过 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后,石灰性黄壤和钙质紫色土中的黑麦草富集速度变缓;而就地下部而言,当外源 Cd > 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,石灰性黄壤和钙质紫色土中的黑麦草富集速度也存在小幅度的变缓.

黑麦草地上部和地下部在不同土壤中对 Pb 和 Cd 富集情况的不同导致其 Pb 和 Cd 富集系数(见表 4)也随之存在较大差异.其中富集能力最强,生长在酸性紫色土中的黑麦草,Pb 富集系数随外源 Pb 添加量的增加而增大,在试验 Pb 含量达最大时(800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其地上部和地下部富集系数最大,分别为 0.83 和 2.06;而 Cd 富集系数却随 Cd 含量的增加而减小,未进行外源添加时其地上部和地下

部富集系数为最大值,分别为 9.96 和 21.89,随 Cd 含量的增加,黑麦草根系滞留 Cd 的比例增加.

2.3 5 种化学提取法及 DGT 提取 Pb 和 Cd 的含量

提取剂对土壤重金属的提取能力与后续测定精度及检出限关系密切,适宜用于评价土壤重金属有效性的提取剂需要对相应重金属有较高的提取能力,同时对重金属的提取量与土壤重金属全量应有较好相关性.图 2 和图 3 是相同类型土壤中不同提取方法对 Pb 和 Cd 的提取量与土壤中 Pb 和 Cd 全量的线性拟合关系.除 CaCl_2 -Pb 提取态外,其他化学提取剂提取的 Pb 含量与各类型土壤中 Pb 全量均有较好的相关性,大体上随土壤中重金属全量的增加而增加.对其余 4 种化学提取剂的提取能力进行比较,酸性紫色土和石灰性黄壤中 HCl -Pb 提取态含量最高,酸性紫色土 HCl -Pb 提取率高达 28.42% ~ 30.83%,但 HCl 却对钙质紫色土中的 Pb 提取率较低,提取率仅有 0.70% ~ 6.14%.而在钙质紫色土中则是 EDTA 对其 Pb 的提取能力最强,与中性紫色土中结果一致. CaCl_2 对土壤 Pb 的提取能力很低,在土壤外源添加 Pb 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其提取率仅为 0.54% ~ 0.68%.对 Cd 而言,5 种化学提取剂提取



同一土壤类型中相同小写字母表示不同外源重金属添加量处理间无显著差异,字母不同表示有显著差异 ($P < 0.05$)

图1 黑麦草对 Pb 和 Cd 的富集

Fig. 1 Accumulation of Pb and Cd in *Lolium perenne* L.

的 Cd 含量均与土壤中 Cd 全量呈极显著相关关系 ($P < 0.01$),并且均有较高的提取率. HCl 对酸性紫色土、中性紫色土和石灰性黄壤中的 Cd 提取能力强,其中对酸性紫色土中 Cd 的提取率高达 48.77%~52.57%. 钙质紫色土中 EDTA 对 Cd 的提取能力较之其余 4 种化学提取剂更强.

不同类型土壤间各提取方法的 Pb 和 Cd 提取量与土壤重金属全量的相关系数见表 5. 除 CaCl_2 -Pb 提取态含量与土壤 Pb 全量呈显著相关 ($P < 0.05$) 外,其余 4 种均呈极显著相关 ($P < 0.01$),此

时 EDTA-Pb 提取量与土壤 Pb 全量的相关系数达到 0.986. 而 5 种化学提取剂对 Cd 的提取量与土壤 Cd 全量则是都呈极显著相关关系 ($P < 0.01$).

DGT 技术主要基于自由扩散原理(Fick 第一定律),通过扩散层的梯度扩散等获得目标离子在土壤介质中的生物有效态含量,所以其平衡吸附量较低,但试验结果表明在相同类型土壤中其 Pb 和 Cd 吸附量随外源污染程度的增加而增加,且与重金属全量有很好的相关性,但在不同类型土壤间吸附量与土壤重金属全量无明显相关.

表5 不同类型土壤间各提取态 Pb 和 Cd 含量与 Pb 和 Cd 全量的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients between extractable and total Pb and Cd in different types of soils

元素	CaCl_2	NH_4OAc	HCl	EDTA	DTPA	DGT
Pb	0.562 *	0.798 **	0.685 **	0.986 **	0.984 **	0.450
Cd	0.856 **	0.987 **	0.926 **	0.961 **	0.965 **	0.415

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关,下同

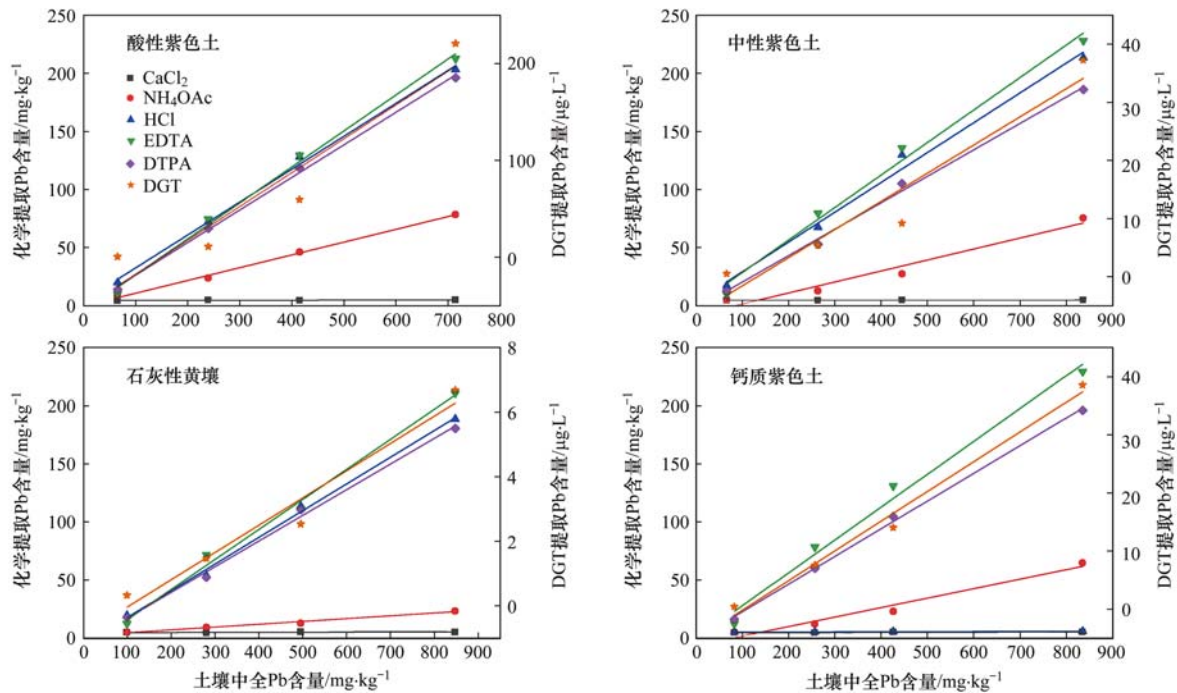


图2 相同类型土壤中各提取态 Pb 含量与 Pb 总量的相关关系

Fig. 2 Correlation between each extractable Pb and total contents of Pb in the same type of soil

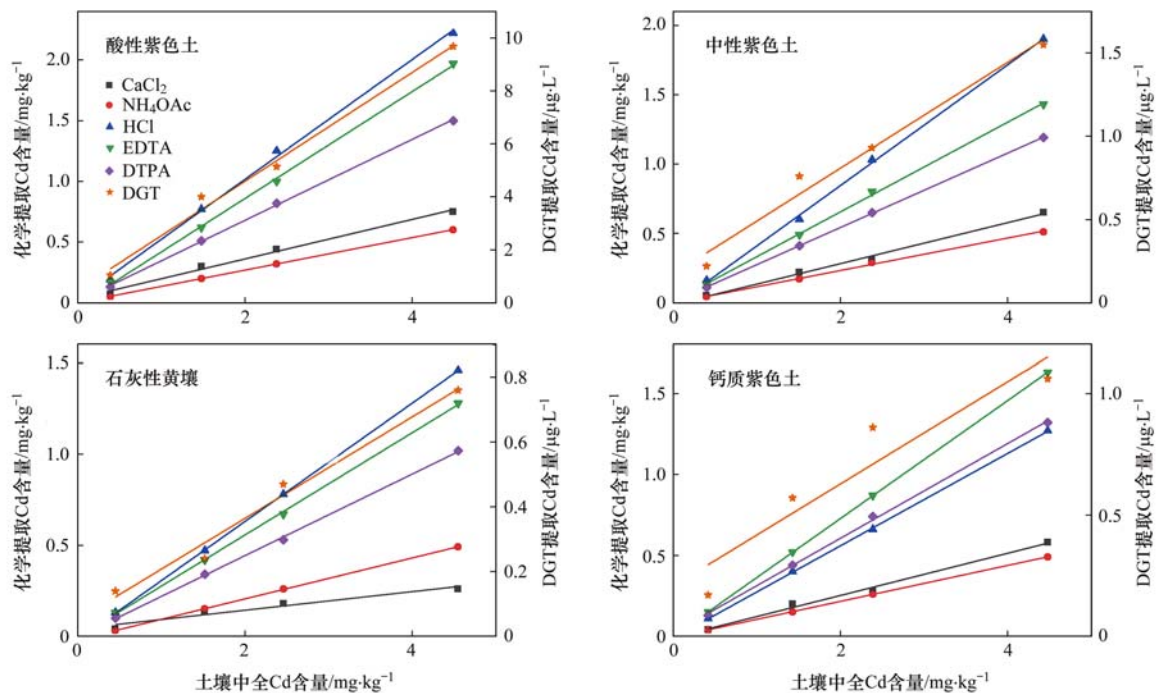


图3 相同类型土壤中各提取态 Cd 含量与 Cd 总量的相关关系

Fig. 3 Correlation between each extractable Cd and the total contents of Cd in the same type of soil

2.4 黑麦草 Pb 和 Cd 含量与土壤中 Pb 和 Cd 各提取态含量相关关系

2.4.1 相同类型土壤中黑麦草 Pb 和 Cd 含量与各提取态含量相关关系

对于适宜的土壤重金属有效性评价方法的筛选,除需要提取剂有较高的提取能力外,植株吸收量与提取量之间的良好相关性是决定方法适宜性的根

本依据. 图4和5是黑麦草地上部的 Pb 和 Cd 富集量与不同提取方法提取的各类型土壤中有效态 Pb 和 Cd 含量之间的线性拟合关系图. 根据线性拟合相关分析(表6),4种土壤中除 CaCl_2 外,其余5种方法的 Pb 提取态含量与黑麦草地上部 Pb 富集含量呈极显著相关($P < 0.01$),其中 EDTA 提取的有效 Pb 含量与黑麦草地上部富集的 Pb 含量的相

关性在 4 种土壤上均优于其他 5 种提取方法,最高相关系数达到 0.986;对 Cd 而言,6 种方法的 Cd 提取态与黑麦草地上部 Cd 富集含量均呈极显著相关性($P < 0.01$),酸性紫色土上 HCl-Cd 和 DTPA-Cd 提取态含量与黑麦草地上部富集的 Cd 含量相关性最好,相关系数高达 1.000.中性紫色土上 HCl-Cd 提取态的相关程度优于其他 5 种方法,而石灰性黄壤上 DTPA 提取态的相关程度最

佳,钙质紫色土上螯合剂(EDTA 和 DTPA)提取的有效 Cd 与黑麦草地上部富集的 Cd 含量相关性最好.总体上,对于相同类型土壤,除 CaCl_2 -Pb 提取态含量与黑麦草地上部富集含量无明显相关关系外,其余 Pb 和 Cd 提取态含量均与黑麦草地上部吸收量存在良好的相关性.结果表明,同类土壤中除 CaCl_2 -Pb 外,其余方法均适用于土壤 Pb 和 Cd 有效性的比较.

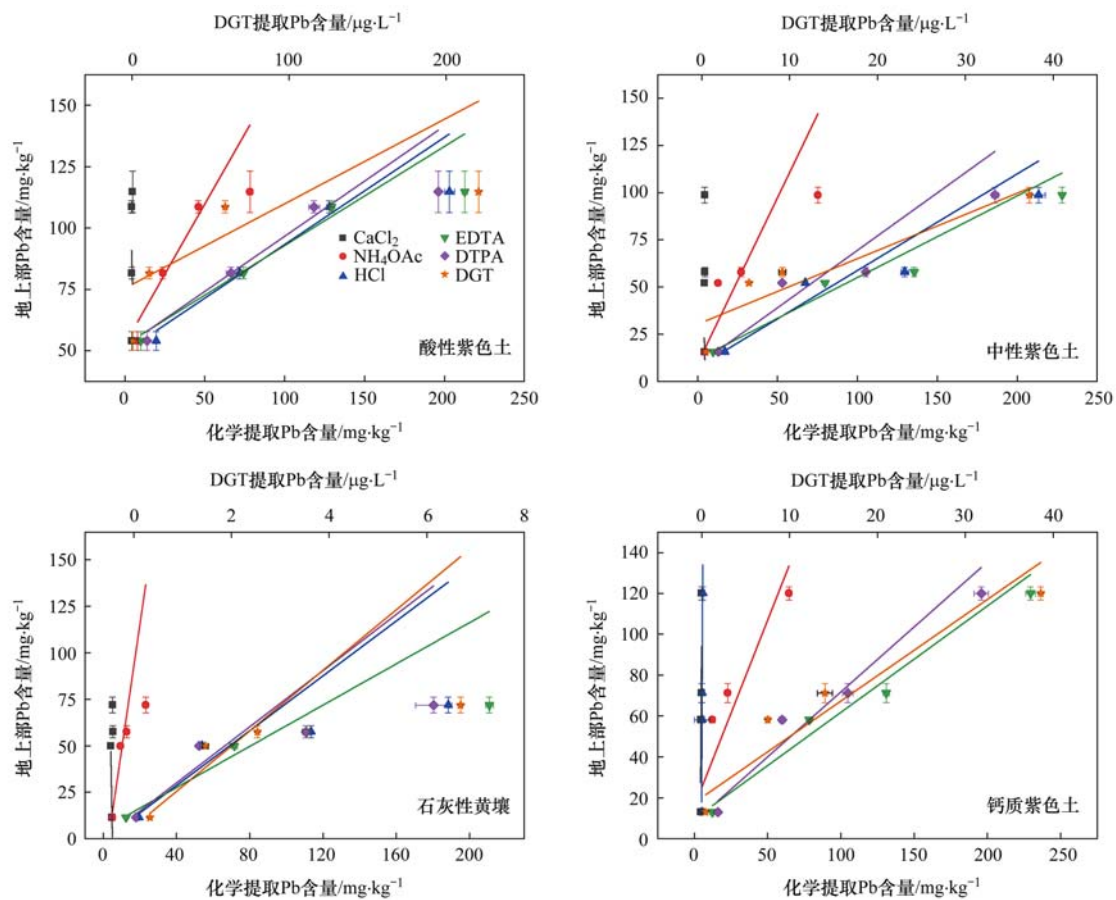


图 4 黑麦草地上部 Pb 含量与相同类型土壤中各提取态 Pb 含量的相关关系

Fig. 4 Correlation between Pb content in the aboveground tissue of *Lolium perenne* L. and extractable Pb in the same type of soil

表 6 黑麦草地上部 Pb 和 Cd 含量与相同类型土壤中各提取态 Pb 和 Cd 含量的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between Pb and Cd content in the aboveground tissue of *Lolium perenne* L. and extractable Pb and Cd in the same type of soil

土壤类型	元素	CaCl_2	NH_4OAc	HCl	EDTA	DTPA	DGT
酸性紫色土	Pb	0.472	0.905 **	0.915 **	0.965 **	0.952 **	0.804 **
	Cd	0.995 **	0.999 **	1.000 **	0.999 **	1.000 **	0.995 **
中性紫色土	Pb	0.518	0.936 **	0.974 **	0.986 **	0.977 **	0.937 **
	Cd	0.991 **	0.992 **	0.995 **	0.994 **	0.994 **	0.976 **
石灰性黄壤	Pb	0.263	0.878 **	0.894 **	0.907 **	0.888 **	0.827 **
	Cd	0.988 **	0.987 **	0.987 **	0.987 **	0.988 **	0.962 **
钙质紫色土	Pb	0.729 *	0.918 **	0.895 **	0.986 **	0.970 **	0.962 **
	Cd	0.975 **	0.975 **	0.977 **	0.977 **	0.981 **	0.981 **

2.4.2 不同类型土壤中黑麦草 Pb 和 Cd 含量与各提取态含量相关关系

在重金属有效态测定中,常常会涉及到不同土

壤类型之间的重金属有效性的比较,所以方法的适宜性还需要考虑土壤类型之间的差异.图 6 和图 7 是对不同类型土壤间黑麦草地上部 Pb 和 Cd 富集

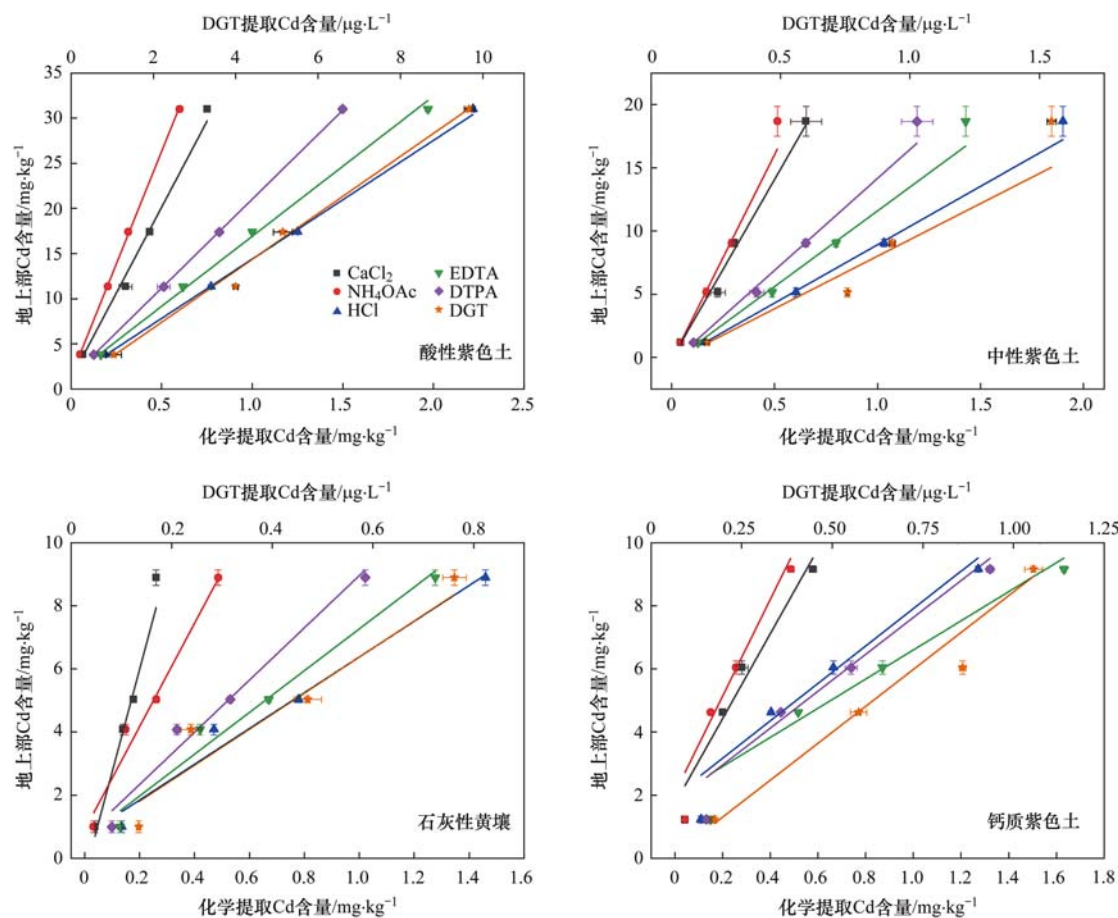


图5 黑麦草地上部Cd含量与相同类型土壤中各提取态Cd含量的相关关系

Fig. 5 Correlation between Cd content in the aboveground tissue of *Lolium perenne* L. and extractable Cd in the same type of soil

含量与不同提取方法提取的 Pb 和 Cd 含量的线性拟合关系. 根据相关性结果分析(表7),黑麦草地上部 Pb 富集含量与 CaCl_2 -Pb 提取态未表现出明显相关关系,除了与 NH_4OAc -Pb 提取态呈显著相关($P < 0.05$),与 HCl -Pb 提取态、 EDTA -Pb 提取态、 DTPA -Pb 提取态和 DGT -Pb 提取态均呈极显著相关($P < 0.01$),此时 EDTA -Pb 提取态含量与黑麦草地上部富集量相关性最好,相关系数为 0.941,其次为

DTPA -Pb 提取态,相关系数为 0.910,这说明整合剂更适宜于提取不同类型土壤中的 Pb. 对 Cd 污染土壤分析,6 种提取方法的提取量与黑麦草地上部 Cd 富集量均极显著相关($P < 0.01$),此时 DGT 技术提取的有效态 Cd 与黑麦草相关性最优,相关系数为 0.919. 在 5 种化学提取剂中, HCl -Cd 提取态含量与黑麦草地上部富集量相关系数为 0.860,优于另外 4 种化学提取方法.

表7 黑麦草地上部 Pb 和 Cd 含量与不同类型土壤中各提取态含量的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between Pb and Cd content in the aboveground tissue of *Lolium perenne* L.

and extractable Pb and Cd in different types of soils

元素	CaCl_2	NH_4OAc	HCl	EDTA	DTPA	DGT
Pb	0.345	0.824 *	0.742 **	0.941 **	0.910 **	0.609 **
Cd	0.803 **	0.739 **	0.860 **	0.741 **	0.729 **	0.919 **

3 讨论

3.1 不同土壤类型对黑麦草富集 Pb 和 Cd 的影响

不同类型土壤中黑麦草的生长情况存在较为明显的差异,植物对重金属的吸收情况是影响其生长的重要因素之一. 土壤基本理化性质是影响植物吸收的关键,以 pH 为影响植物体内 Pb 和 Cd 转运的

第一要素^[29~31]. pH 与重金属有效性呈显著负相关关系,酸性土壤 pH 低,重金属的可溶性高,土壤中其它形态重金属会向有效态进行转化,促进植物对重金属的吸收,本试验中酸性紫色土中的黑麦草富集 Pb 和 Cd 的量最大. 另外三种土壤为中性和碱性土壤,pH 较高,土壤中的 Pb 和 Cd 会通过络合、螯合及沉淀等作用以难溶的碳酸盐等形式存在,溶解

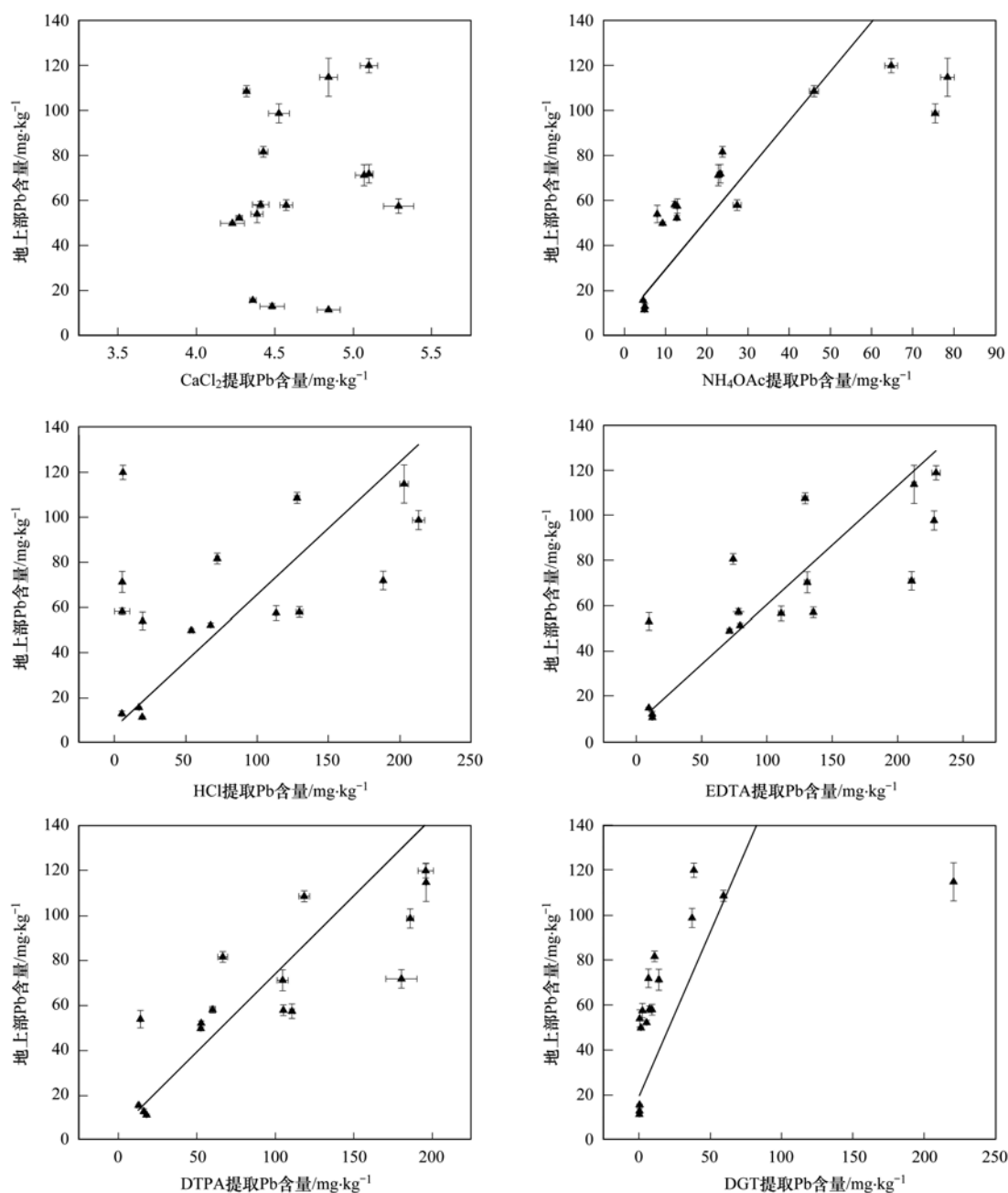


图6 黑麦地上部 Pb 含量与不同类型土壤中各提取态 Pb 含量的相关关系

Fig. 6 Correlation between Pb content in the aboveground tissue of *Lolium perenne* L. and extractable Pb in different types of soils

度较小,土壤溶液中活性 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 浓度也较低,导致重金属的迁移性以及生物有效性低。中性紫色土有机质含量相较其余 3 种供试土壤较高(见表 1),试验结果显示 Cd 在中性紫色土中的富集量相对较高,这可能正是因为有机质对 Cd^{2+} 的影响比 Pb^{2+} 要大^[32],有相关研究发现^[33],土壤有机质含量与土壤有效态重金属含量大多呈正相关,土壤有机质对重金属存在“活化作用”,促使中性紫色土中的黑麦草能吸收较多的 Cd。石灰性黄壤和钙质紫色土中的黑麦草对 Pb 和 Cd 的吸收少,除受 pH 影响外,石灰性黄壤中所含碳酸钙含量高, Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 与 Ca^{2+} 可能会发生交换,尤其当 pH 处于 7.5~8 之间

时,可能会形成微溶的 $PbCO_3$ 和不溶的 $CdCO_3$,致使黑麦草对铅和镉不易吸收^[34~37]。而钙质紫色土黏粒含量高,粘粒矿物的阳离子交换性能可对铅和镉进行离子交换性吸附^[38],也是导致植物吸收少的可能原因之一。

3.2 不同提取方法评价土壤中 Pb 和 Cd 的生物有效性

适宜评价方法的选择需考虑提取能力和提取量与植物吸收量之间的相关程度等方面^[39~41]。无论是在相同还是不同类型土壤中, $CaCl_2$ 对 Cd 提取能力以及与植物的相关性均较好,适宜用于土壤中 Cd 的有效性评价,对 Pb 却是相反的。 $CaCl_2$ 提取的是

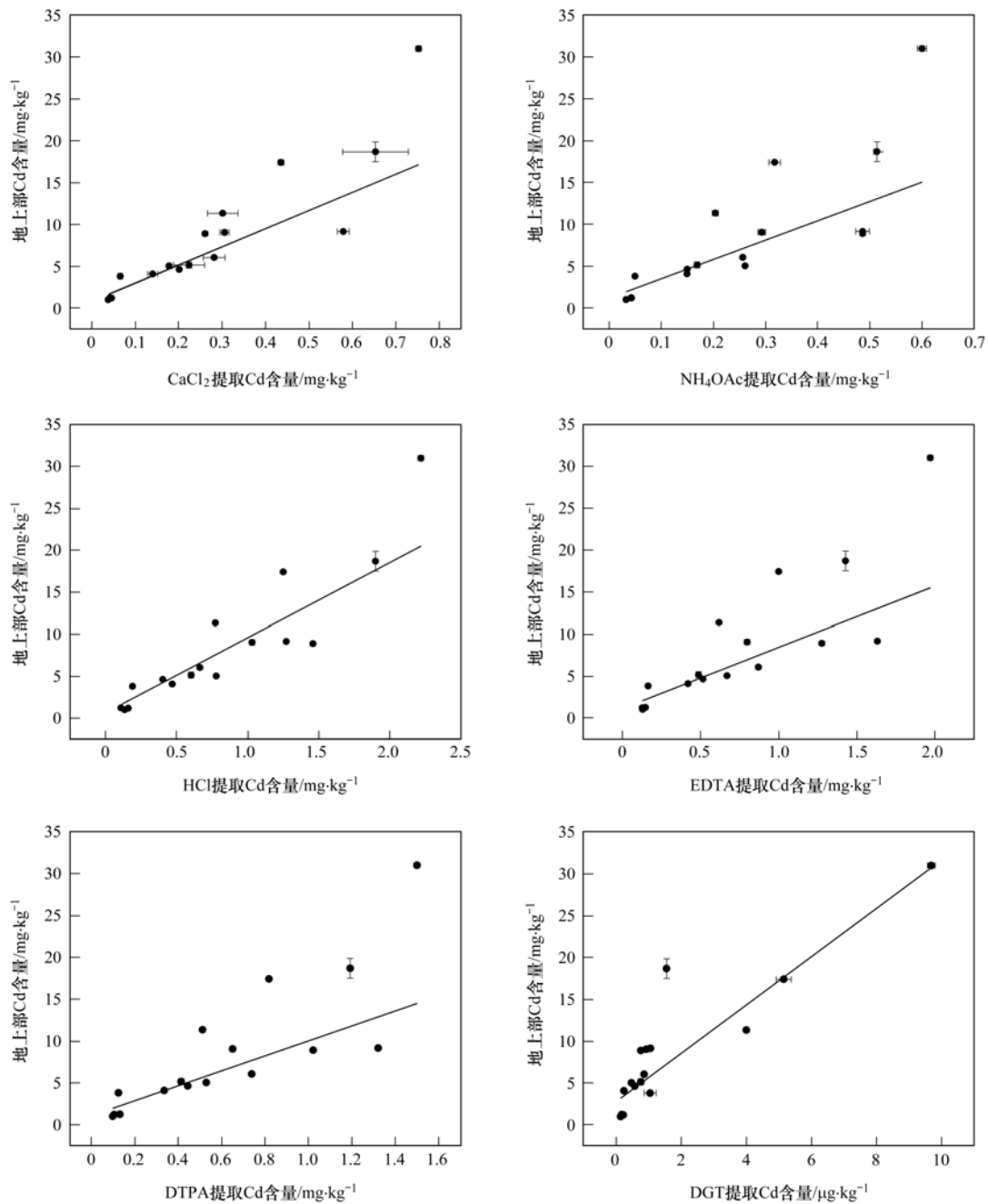


图7 黑麦草地上部 Cd 含量与不同类型土壤中各提取态 Cd 含量的相关关系

Fig. 7 Correlation between Cd content in the aboveground tissue of *Lolium perenne* L. and extractable Cd in different types of soils

水溶态重金属,使用 CaCl_2 进行提取时对土壤结构的破坏较小,是很接近土壤本身状态的提取剂.但土壤中的铅大多存在于稳定晶格中较难溶出,致使其对 Pb 提取能力很弱,造成测定的困难与不准确,并且 CaCl_2 -Pb 提取态含量与植物的相关性也不好,不能较好地反映植物对 Pb 的吸收情况. EDTA 对 Pb 的提取率高,与指示植物的相关性,无论是在相同还是不同类型土壤中均为最好.有相关研究表明,植物吸收 Pb 的主要形态为交换态 Pb,碳酸盐态 Pb 和铁锰氧化态 Pb 在一定条件下也可被植物吸收^[42], EDTA 提取的主要为交换态、水溶态以及部分络合态的金属,提取时对土壤 pH 值的影响不大,本试验

结果也证明使用 EDTA 提取为评价土壤中 Pb 有效性的最优方法.通常 DGT 技术所能测量的形态包括游离金属离子、不稳定无机络合形态和不稳定有机络合形态,往往这些形态是产生生物毒性的形态^[43].进入土壤中的 Cd 很少向下迁移,长时间累积在 0~20 cm 的表层中,会通过植物的作用向上进行迁移^[44],而 DGT 的富集过程正是模拟目标离子在环境中的迁移和生物吸收过程.在不同类型土壤中,6 种提取方法提取的 Cd 与植物的吸收量均有较好的相关性,但 DGT 对 Cd 的吸附量与其相关性明显优于其他 5 种化学提取方法.而 DGT 对 Pb 的吸附量低,且与植物的相关性差,不宜用于不同类型土壤

上有有效 Pb 的评价。

4 结论

(1) 综合考虑提取剂对土壤重金属的提取能力以及与指示植物黑麦草重金属富集的相关程度, 在相同类型土壤上, 除 CaCl_2 -Pb 提取态外, 其余提取方法均适宜于同类土壤上 Pb 和 Cd 生物有效性的评价。

(2) 对于不同类型土壤间 Pb 和 Cd 生物有效性的评价, EDTA 对 Pb 的提取能力高, 同时提取的 Pb 与黑麦草 Pb 吸收富集相关性最好, 适宜于不同土壤类型 Pb 有效性的比较; Cd 的适宜方法与 Pb 不同, 以 DGT 技术富集的 Cd 与黑麦草 Cd 吸收富集的相关性最好, 化学提取剂中综合考虑提取能力及其与植物吸收富集 Cd 的相关性, 以 HCl-Cd 提取态较好, 推荐作为区域主要农地土壤铅和镉生物有效性的评价方法。

参考文献:

- [1] Shi T R, Ma J, Wu X, *et al.* Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **164**: 118-124.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [3] 陈奕云, 唐名阳, 王淑桃, 等. 基于文献计量的中国农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2016, **47**(1): 219-225.
Chen Y Y, Tang M Y, Wang S T, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil of China based on bibliometrics [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(1): 219-225.
- [4] 王珊, 郑莉, 张晓, 等. 某河流域典型地区农田土壤中重金属铅、镉、铬的生态和健康风险评估[J]. 中国卫生工程学, 2020, **19**(3): 321-325.
Wang S, Zheng L, Zhang X, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metal (Pb, Cd and Cr) in farmland soil in a typical region of a river basin [J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2020, **19**(3): 321-325.
- [5] 王婧, 何祖安, 谢曙光, 等. 湖北省农田土壤重金属铅、镉、铬的健康风险评估研究[J]. 环境卫生学杂志, 2019, **9**(3): 258-263, 268.
Wang J, He Z A, Xie S G, *et al.* Health risk assessment of heavy metals (Pb, Cd and Cr) in farmland soil of Hubei Province [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2019, **9**(3): 258-263, 268.
- [6] 杨梦丽, 叶明亮, 马友华, 等. 基于重金属有效态的农田土壤重金属污染评价研究[J]. 环境监测管理与技术, 2019, **31**(1): 10-13, 38.
Yang M L, Ye M L, Ma Y H, *et al.* Review on heavy metal pollution evaluation in farmland soil based on bioavailable form of heavy metal [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(1): 10-13, 38.
- [7] 贺建群, 许嘉琳, 杨居荣, 等. 土壤中有效态 Cd、Cu、Zn、Pb 提取剂的选择[J]. 农业环境保护, 1994, **13**(6): 246-251.
He J Q, Xu J L, Yang J R, *et al.* Study of the extractants for available Cd, Cu, Zn and Pb in soils [J]. *Agro-environmental Protection*, 1994, **13**(6): 246-251.
- [8] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 692-703.
Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 692-703.
- [9] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [10] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1432-1439.
Li Y L, Lu Y F, Chen W P, *et al.* Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- [11] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4670-4683.
Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al.* Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- [12] 黄颖. 不同尺度农田土壤重金属污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Huang Y. The exploring of heavy metal pollution source apportionment in various scale of agricultural soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [13] 陈飞霞, 魏世强. 土壤中有效态重金属的化学试剂提取法研究进展[J]. 干旱环境监测, 2006, **20**(3): 153-158.
Chen F X, Wei S Q. Study of chemical extraction of heavy metals in soil [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2006, **20**(3): 153-158.
- [14] Ma Q, Zhao W F, Guan D X, *et al.* Comparing CaCl_2 , EDTA and DGT methods to predict Cd and Ni accumulation in rice grains from contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114042.
- [15] 冯艳红, 张亚, 应蓉蓉, 等. 不同提取剂对土壤中重金属有效态的提取效果研究[A]. 见: 2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷)[C]. 合肥: 中国环境科学学会, 2018. 960-965.
- [16] Chomchoei R, Shiowatana J, Pongsakul P. Continuous-flow system for reduction of metal readsorption during sequential extraction of soil [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, **472**(1-2): 147-159.
- [17] Zhang H, Davison W. Performance characteristics of diffusion gradients in thin films for the in situ measurement of trace metals in aqueous solution [J]. *Analytical Chemistry*, 1995, **67**(19): 3391-3400.
- [18] Cornu J Y, Parat C, Schneider A, *et al.* Cadmium speciation assessed by voltammetry, ion exchange and geochemical calculation in soil solutions collected after soil rewetting [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(4): 502-508.
- [19] Degryse F, Smolders E, Parker D R. Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications-a review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, **60**(4): 590-612.
- [20] Agbenin J O, Welp G. Bioavailability of copper, cadmium,

- zinc, and lead in tropical savanna soils assessed by diffusive gradient in thin films (DGT) and ion exchange resin membranes [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184** (4): 2275-2284.
- [21] Dai Y C, Nasir M, Zhang Y L, *et al.* Comparison of DGT with traditional extraction methods for assessing arsenic bioavailability to *Brassica chinensis* in different soils [J]. *Chemosphere*, 2018, **191**: 183-189.
- [22] Maderova L, Watson M, Paton G I. Bioavailability and toxicity of copper in soils; integrating chemical approaches with responses of microbial biosensors [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(6): 1162-1168.
- [23] Adamo P, Iavazzo P, Albanese S, *et al.* Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **500-501**: 11-22.
- [24] 陈迪, 李伯群, 杨永平, 等. 4 种草本植物对镉的富集特征 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 960-966.
- Chen D, Li B Q, Yang Y P, *et al.* Cadmium accumulation characteristics of four herbs [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 960-966.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] Ding S M, Wang Y, Zhang L P, *et al.* New holder configurations for use in the diffusive gradients in thin films (DGT) technique [J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(91): 88143-88156.
- [27] Wang Y, Ding S M, Gong M D, *et al.* Diffusion characteristics of agarose hydrogel used in diffusive gradients in thin films for measurements of cations and anions [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, **945**: 47-56.
- [28] 李庆华. 人工湿地植物重金属分布规律及富集性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Li Q H. Spatial distribution and accumulation characteristics of heavy metals in constructed wetlands plants [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [29] McLaughlin M J, Smolders E, Degryse F, *et al.* Uptake of metals from soil into vegetables [A]. In: Swartjes F A (Ed.). *Dealing with Contaminated Sites* [M]. Dordrecht: Springer, 2011.
- [30] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鏊, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究 [J]. *地学前缘*, 2005, **12**(1): 252-260.
- Yang Z F, Chen Y L, Qian X, *et al.* A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, **12**(1): 252-260.
- [31] 邹富桢, 龙新宪, 余光伟, 等. 混合改良剂钝化修复酸性多金属污染土壤的效应——基于重金属形态和植物有效性的评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1787-1795.
- Zou F Z, Long X X, Yu G W, *et al.* In-situ remediation of a multi-metal contaminated acid soil using organic-inorganic mixed amendments—Evaluation by heavy metal fractions and phytoavailability [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1787-1795.
- [32] 杨璐, 张智, 李余杰, 等. 西南地区典型农田土壤中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附特性研究 [J]. *土壤通报*, 2018, **49**(4): 985-992.
- Yang L, Zhang Z, Li Y J, *et al.* Adsorption characteristics of Cd^{2+} and Pb^{2+} in typical agricultural soils in the southwest of China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(4): 985-992.
- [33] 刘景, 吕家珑, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 含量及活化率的影响 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 914-919.
- Liu J, Lü J L, Xu M G, *et al.* Effect of long-term fertilization on content and activity index of Cu and Cd in red soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(3): 914-919.
- [34] 周航, 曾敏, 刘俊, 等. 施用碳酸钙对土壤铅、镉、锌交换态含量及在大豆中累积分布的影响 [J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(4): 123-126.
- Zhou H, Zeng M, Liu J, *et al.* Influence of application CaCO_3 on content of Pb, Cd, Zn exchangeable in soil and the cumulative distribution of soybean plants [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(4): 123-126.
- [35] Elkhatib E A, Elshebiny G M, Balba A M. Lead sorption in calcareous soils [J]. *Environmental Pollution*, 1991, **69**(4): 269-276.
- [36] Santillan-Medrano J, Jurinak J J. The chemistry of lead and cadmium in soil: solid phase formation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, **39**(5): 851-856.
- [37] Jalali M, Moharrami S. Competitive adsorption of trace elements in calcareous soils of western Iran [J]. *Geoderma*, 2007, **140**(1-2): 156-163.
- [38] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 土壤中铅的来源及生物有效性 [J]. *土壤通报*, 2005, **36**(5): 765-772.
- Yang J Y, Yang X E, He Z L. Resource and bio-availability of lead in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, **36**(5): 765-772.
- [39] 袁波. 北碚区菜地土壤铅、镉全量与有效态含量分析与评价 [D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [40] 褚卓栋, 张桂银, 薛培英, 等. 根际和非根际土壤有效铅镉的浸提剂筛选 [J]. *中国农学通报*, 2008, **24**(4): 298-302.
- Chu Z D, Zhang G Y, Xue P Y, *et al.* Comparison of available Pb, Cd results extracted by different extractions in rhizosphere and non-rhizosphere soils [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, **24**(4): 298-302.
- [41] 刘小莲, 杜平, 陈娟, 等. 基于梯度扩散薄膜技术评估稻田土壤中镉的生物有效性 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(12): 2429-2437.
- Liu X L, Du P, Chen J, *et al.* Evaluation of cadmium bioavailability via diffusive gradients in thin film technology for agricultural soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2429-2437.
- [42] 何峰, 苗金燕, 魏世强. 外源砷、铅在三类紫色土中形态分配与其化学、生物有效性研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, **21**(S1): 44-47.
- He F, Miao J Y, Wei S Q. Speciation distribution and its chemical, biological availability of arsenic, lead added in acid, neutral and alkali purple soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, **21**(S1): 44-47.
- [43] 范洪涛, 孙挺, 隋殿鹏, 等. 环境监测中两种原位被动采样技术——薄膜扩散平衡技术和薄膜扩散梯度技术 [J]. *化学通报*, 2009, **72**(5): 421-426.
- Fan H T, Sun T, Sui D P, *et al.* In-situ passive sampling techniques for environmental monitoring-diffusive equilibrium in thin-films and diffusive gradients in thin-films technique [J]. *Chemistry*, 2009, **72**(5): 421-426.
- [44] 刘丽. 重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移转运与调控及其健康风险评估 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- Liu L. Translocation, migration, and control of heavy metals and health risk assessment in soil-vegetable system [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)