

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征

代豫杰¹, 郭建英², 董智^{1*}, 李锦荣², 李红丽¹

(1. 山东农业大学林学院, 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 泰山森林生态站, 泰安 271018; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: 以乌兰布和沙漠沙冬青、花棒、猫头刺、白刺和梭梭灌木下及流动沙丘 0~100 cm 风沙土为研究对象, 通过野外分层采样与室内实验, 采用多重分形理论探讨土壤粒径分布 (particle size distribution, PSD) 和 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 及分布特征并分析其相互关系, 反映土壤结构及重金属污染状况。结果表明, $\alpha(q)$ - $f(q)$ 图像均左偏, 呈左钩状, 即不同灌木均可增加粒度级配中细小颗粒子集比例, 同时, 沙冬青、花棒可显著增加 PSD 范围、非均匀度及离散度。不同灌木下土壤重金属整体表现为 $\omega(\text{Mn}) > \omega(\text{Zn}) > \omega(\text{Cr}) > \omega(\text{Cu}) > \omega(\text{Pb}) > \omega(\text{Ni}) > \omega(\text{As}) > \omega(\text{Cd})$, 除 $\omega(\text{Cu})$ 及 $\omega(\text{Cr})$ 外, 各灌木下 0~10 cm 土层重金属含量大多高于流动沙丘; 沙冬青下 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 均值分别为 354.899、1.429 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远高于流动沙丘, 各土层间差异显著 ($P < 0.05$), $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 最大值分别出现在 $>30\sim40$ cm、 $>10\sim20$ cm 土层; 花棒下 $\omega(\text{Pb})$ 均值居各灌木之首为 13.556 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于沙冬青 3.24%, 而 $\omega(\text{As})$ 则低于沙冬青 0.37%, 但均高于流动沙丘。 φ (粉粒) 与 φ (中砂) 分别为决定风沙土中重金属含量的细粒及粗粒土壤, 8 种重金属均与 φ (黏粒)、 φ (粉粒) 正相关, 除 $\omega(\text{Cr})$ 外, 其余重金属均与 φ (中砂) 负相关, 重金属含量与多重分形参数间的相关系数与 φ (黏粒)、 φ (粉粒)、 φ (中砂) 相似, 即多重分形维数同样可较好地描述重金属含量与决定性土壤颗粒间的关系。研究显示, 沙冬青及花棒可阻滞风沙流中的细小土壤颗粒使其沉降在周围表层土壤, 并更好地改善各土层 PSD 特征, 且二者作用后的风沙土中重金属含量高于其余灌木及流动沙丘, 故可通过种植二者局部改良土壤并阻滞、原位固控重金属, 减轻下风向城市空气中的重金属污染。

关键词: 沙生灌木; 多重分形维数; 土壤粒径分布; 重金属; 乌兰布和沙漠

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4809-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201704135

Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert

DAI Yu-jie¹, GUO Jian-ying², DONG Zhi^{1*}, LI Jin-rong², LI Hong-li¹

(1. Taishan Forestry Ecosystem Research Station, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area of Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: Aeolian sandy soil was collected at depths of 0 to 100 cm at intervals of 0-10, >10-20, >20-30, >30-40, >40-60, >60-80, and >80-100 cm from under the cover of psammophilous shrubs *Ammopiptanthus mongolicus*, *Hedysarum scoparium*, *Oxytropis aciphylla*, *Nitraria tangutorum* and *Haloxylon ammodendron* and from a mobile dune in the Ulan Buh Desert. Multi-fractal theory was used to determine the soil particle size distribution (PSD), which measured the fractions of $\omega(\text{Mn})$, $\omega(\text{Zn})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Ni})$, $\omega(\text{As})$, and $\omega(\text{Cd})$, as well as their distribution status in the laboratory and analyzed correlations between the PSD and heavy metal content to identify the relationship between soil structure and heavy metal pollution. This result shows that a range of different types of shrubs can increase the distribution of fine soil particles, and specifically *Ammopiptanthus mongolicus* and *Hedysarum scoparium* can increase range, heterogeneity and degree of dispersion of the PSD. The heavy metal content in the soil under the different shrubs is ranked as $\omega(\text{Mn}) > \omega(\text{Zn}) > \omega(\text{Cr}) > \omega(\text{Cu}) > \omega(\text{Pb}) > \omega(\text{Ni}) > \omega(\text{As}) > \omega(\text{Cd})$. In the first 10 cm of the soil under the shrubs, the concentration of all heavy metals are higher than samples from the mobile dune except for Cr and Cu. Average value of $\omega(\text{Mn})$ and $\omega(\text{Cd})$ is 354.899 and 1.429 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ under *Ammopiptanthus mongolicus* and *Hedysarum scoparium* respectively. Concentrations of Mn and Cd under *Ammopiptanthus mongolicus* and *Hedysarum scoparium* shrubs are significantly higher than those of mobile dune ($P < 0.05$), and the concentration of both is significantly various between each soil layers ($P < 0.05$). The highest value for $\omega(\text{Mn})$ is in soil layer between 30 and 40 cm below the surface and the highest for $\omega(\text{Cd})$ appears between 10 and 20 cm below the surface. The average $\omega(\text{Pb})$ under *Hedysarum scoparium* is 13.556 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ which is the highest among all the shrubs, exceeding 3.24% under *Ammopiptanthus mongolicus* and higher than samples from mobile dune. However, average $\omega(\text{As})$ under *Hedysarum scoparium* is exceeded 0.37% under *Ammopiptanthus mongolicus* but still higher than samples from mobile dune. The grain size of φ (silt) and φ (medium coarse sand) are determining factors for heavy metal concentrations in fine and coarse particles of aeolian sandy

收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-06-03

基金项目: 中国水利水电科学研究院专项(MK0145B722017); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501004); 内蒙古自治区科技计划项目

作者简介: 代豫杰(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为荒漠化防治与水土流失治理, E-mail: daiyj_sdaui@163.com

* 通信作者, E-mail: nmgdz@163.com

soil. Heavy metal measurements all positively correlate with $\varphi(\text{silt})$ and $\varphi(\text{clay})$, however, they negatively correlate with $\varphi(\text{medium coarse sand})$, except for $\omega(\text{Cr})$. The correlation coefficients between heavy metal contents and the multifractal parameters are similar for $\varphi(\text{clay})$, $\varphi(\text{silt})$, and $\varphi(\text{medium coarse sand})$. Therefore, multifractal parameters can describe the correlation between heavy metals and their determinant soil grain size. This study shows that, *Ammopiptanthus mongolicus* and *Hedysarum scoparium* can entrap and deposit fine particles from the sand flow to surface soil layers around shrubs and improve the condition of PSDs for different soil layers with respect to heavy metals. Hence, in aeolian sandy soil these concentrations are higher than for mobile dunes after planting *Ammopiptanthus mongolicus* and *Hedysarum scoparium*. Therefore both should be used to promote good soil structure of particular areas to entrap and in-situ control heavy metals to decrease heavy metal pollution in downwind cities.

Key words: psammophilous shrubs; multifractal theory; soil particle size distribution; heavy metal; Ulan Buh Desert

粒径分布 (particle size distribution, PSD) 是土壤最基本的物理属性之一,其变化对土壤理化性质影响显著,而土壤是具有分形特征及自相似结构的不规则复杂多孔介质^[1,2],可供植物生长及重金属依附^[3],吸附有重金属的细小土壤颗粒可经风力作用运移至下风向城市,危害居民健康^[4,5],因此,掌握重金属与土壤颗粒间的相互关系,成为解析重金属运移机制及减轻重金属危害的前提. 有研究表明,土壤中重金属含量与 PSD 间存在一定相关性^[6],且在不同粒径土壤颗粒间非均匀分布^[7],而 Ajmone-marsan 等^[8]综合欧洲 5 个城市土壤样品的检测结果则进一步指出重金属会优先依附于小粒径土壤颗粒,因此,PSD 变化可对土壤中重金属的含量及分布状态造成影响,掌握 PSD 特征对于了解土壤重金属状况并原位控制土壤重金属污染至关重要.

分形理论是研究具有分形特征的复杂不规则几何形体的最有效方法^[9,10],但针对 PSD 状况,诸多研究仅利用单重分形维数作为评价依据^[11,12],单重分形维数仅可描述土壤的整体性和均一性特征,无法反映土壤复杂的空间变异和非均质行为^[13,14],且土壤颗粒并非均匀分布,并随土壤深度的增加而变化^[15,16],而多重分形维数的应用恰可弥补此类不足,反映土壤更为细致的 PSD 信息,准确刻画土壤局部空间变异状况及非均质特征^[13],如颗粒离散程度、测度集中程度、分布范围及分布的峰值、峰态等^[16,17]. 沙漠生态系统中灌木通过影响风沙土的颗粒分布、组成,含水量,固定、半固定沙丘表层土壤结皮形成过程及微生物活性等^[18,19],实现拦沙阻沙、固沙改土,修复区域土壤生态系统及控制沙漠化的目的,但沙漠地区频繁的风沙活动,对碳库状况、风沙土结构、颗粒组成的影响十分显著,致使细小土壤颗粒损失及碳储量变化^[15],而不同灌木对风沙流的拦截效果及对 PSD 特征的影响并不一致^[15,18,19],目前针对沙漠土壤的研究多以颗粒状况等物理性质为代表^[11~14,16~18],涉及化学性质的研究则偏重微生物活性及有机碳状况^[15,19],而土壤的物

理性质可影响其化学性质^[6~8],但从风沙土 PSD 特征出发利用多重分形维数探讨土壤颗粒与重金属含量关系的研究尚显不足,特别是灌木对 PSD 分形特征和重金属含量的影响及二者间的关系尚需深入研究,而研究结果对于筛选优良拦沙、阻沙灌木品种以减轻下风向城市由携重金属土壤颗粒导致的呼吸危害具有现实意义.

基于此,以乌兰布和沙漠中 5 种适生灌木下及流动沙丘 0~100 cm 风沙土为研究对象,通过多重分形维数分析 PSD (以 φ 计) 特征,并明晰 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 随土壤深度的变化,探讨灌木对二者的影响并揭示二者间的相互关系,通过筛选出优良的拦沙固沙及降低重金属含量效果明显的灌木品种,以期改良区域风沙土质量及拦滞、原位固控重金属污染提供基础理论及技术依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠刘拐沙头段 (39°30'16.00"N ~ 40°19'49.63" N, 106°43'36.49"E ~ 107°00'42.93"E), 属中温带大陆性干旱季风气候,年均气温 8.0℃,多年平均降水量为 142.7 mm,年蒸发能力高达 2372 mm; 多年主风向为西风及西南风,年平均风速约为 3.7 m·s⁻¹,多年平均大风日数 10~32 d. 土壤类型主要为风沙土,沙丘高度 4~10 m,且多为流动沙丘; 植被主要为白刺 (*Nitraria tangutorum*)、沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*) 等旱生灌木,并有猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*) 等相伴分布^[15],其中,白刺、梭梭、沙冬青及花棒盖度为 30%~35%,猫头刺、怪柳盖度不足 20%. 周边区域 (乌海市、鄂尔多斯市、阿拉善盟等) 约有 200 多家高耗能的电石、合金、焦炭企业,这些企业规模小、工艺落后,环境污染问题相当突出,上述区域的污染物随

风而下在沙漠内部沉积^[20].

1.2 取样及测试方法

为减少风沙对取样的影响,于2015年3~4月间相对静风日,以乌兰布和沙漠刘拐沙头段典型无植被流动沙丘为对照,选取生长4~5 a的白刺、沙冬青、花棒、梭梭、猫头刺灌木的半固定沙丘,随机设置3块5 m×5 m样地,每一样地选取3株灌木并于根系附近挖取土壤剖面采集土样(各沙丘间相距350~550 m不等).因多数灌木根系主要分布深度大致为0~40 cm,故设置具体方法为:在距植物主根系水平距离约20 cm处,开挖长40 cm、宽20 cm、深100 cm的土壤剖面,分别挖取0~10、>10~20、>20~30、>30~40、>40~60、>60~80、>80~100 cm层土样,每层取样500 g左右,装入自封袋中密封保存并编号,共378份样品.将土样带回实验室阴干,过2 mm土壤筛,并去除根系等杂物,经盐酸-双氧水(HCl-H₂O₂)消煮后,使用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000激光粒度仪测定 φ (PSD).土壤粒径按美国制分级标准,分为黏粒(0~2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)、极粗砂(1 000~2 000 μm).另取土壤样品过0.149 mm土壤筛,去除植物根系等杂物后采用王水-高氯酸(HNO₃-HCl-HClO₄)开放式消煮后^[21],样品中Cu、Cr、Mn、Ni、Zn含量使用原子吸收分光光度计测定(TAS-990型,德国),As、Pb、Cd使用原子荧光光谱仪测定(EDX-700HS型,日本),每个样品重复测定3次,记录数据,取平均值.分析测试所用试剂均为优级纯,所有样品分析过程中以国家一级标准物质土壤[GBW(E)-070009]进行质量控制,并按比例采取随机检查和异常点检查进行严格的样品质量监控,确保测试结果符合监控要求.

1.3 土壤粒径的多重分形参数

取激光粒度仪测量区间 $I = [0.02, 2\ 000]$, Φ_i 及 Φ_{i+1} 均为机测粒径范围,依据给定的尺寸 δ 将所研究的序列分为 N 个连续小片段, $N = \lg(\Phi_{i+1}/\Phi_i)$ 为常数,设第 i 个小片段序列总长为 L_i ,为使用多重分形理论分析区间 I 的PSD特征,须使各子区间长度一致,故取 $L_i = \lg(\Phi_i/\Phi_1)$ (Φ_1 为机测粒径范围首值),则出现量纲为1的新区间 $T = [0, 5]$,含100个等距子区间 $T_i = [L_i, L_{i+1}]$,在区间 T 中,含有 $N(\delta) = 2^k$ 个相同尺寸的小区间,其中 $\delta = 5 \times 2^{-k}$,每个小区间里至少包含1个测量值,为使最小的子区

间中包含有测量值, k 的取值范围为1~6. $p_i(\delta)$ 为每个子区间土壤粒径分布的概率密度(%),由尺寸 δ 和参数 q ,利用 $p_i(\delta)$ 构造配分族函数:

$$u_i(q, \delta) = p_i(\delta)^q / \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i(\delta)^q \quad (1)$$

式中, $u_i(q, \delta)$ 为第 i 个子区间的 q 阶概率, q 为整实数且 $-10 \leq q \leq 10$, $\sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i(\delta)^q$ 是对所有子区间 q 阶概率求和.则可得PSD的多重分形广义维数谱:

$$D(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\lg \left(\sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i(\delta)^q \right) / (\lg \delta) \right] / (q - 1) \quad (q \neq 1) \quad (2)$$

$$D(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\lg \left(\sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i(\delta) \lg p_i(\delta) / \lg \delta \right) \right] \quad (q = 1) \quad (3)$$

PSD的多重分形奇异性指数:

$$\alpha(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\sum_{i=1}^{N(\delta)} u_i(q, \delta) \lg p_i(\delta) / \lg \delta \right] \quad (4)$$

相对于 $\alpha(q)$ 的PSD的多重分形谱函数为:

$$f(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\sum_{i=1}^{N(\delta)} u_i(q, \delta) \lg u_i(q, \delta) / \lg \delta \right] \quad (5)$$

取 $-10 \leq q \leq 10$ 且以1为步长,由式(2)~(5)通过最小二乘拟合计算可得 $D(q)$ 、 $\alpha(q)$ 及 $f(q)$ ^[22,23],对于 $D(q)$ 文中只讨论 $q=0,1$ 时的特殊情况,分别为容量维数(D_0)、信息维数(D_1)^[17].

2 结果与分析

2.1 不同灌木下 PSD 特征

$\alpha(q)$ - $f(q)$ 图的谱宽 $\Delta\alpha(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ 、谱形 $\Delta f[f(\alpha)_{\max} - f(\alpha)_{\min}]$ 均用以刻画土壤分形的概率特征,前者表示测度的均匀程度,后者表示粒度级配所处的地位^[16],当 Δf 为正时,大概率子集占主要地位,图像呈右钩状,当 Δf 为负时,则相反.由流动沙丘及各灌木下不同深度土层所绘的曲线如图1,流动沙丘 $\Delta\alpha$ 的最大值为6.800处于>60~80 cm土层,最小值为3.703处于>80~100 cm土层, Δf 最大值为-1.068处于>30~40 cm土层, Δf 值为负,图像整体左偏,呈左钩状;沙冬青 $\Delta\alpha$ 的最大值为5.255处于>30~40 cm土层,最小值为3.604处于0~10 cm土层, Δf 最大值为-1.250<0,处在>10~20 cm土层,图像整体左偏,呈左钩状;花棒 $\Delta\alpha$ 的最大值为4.330处在>80~100 cm土层,最小值为3.604处在0~10 cm土层, Δf 最大值为-1.427处在>60~80 cm土层, Δf 值为负,图像整体左偏,呈左钩状.梭梭、猫头刺、白刺各土层的 $\alpha(q)$ -

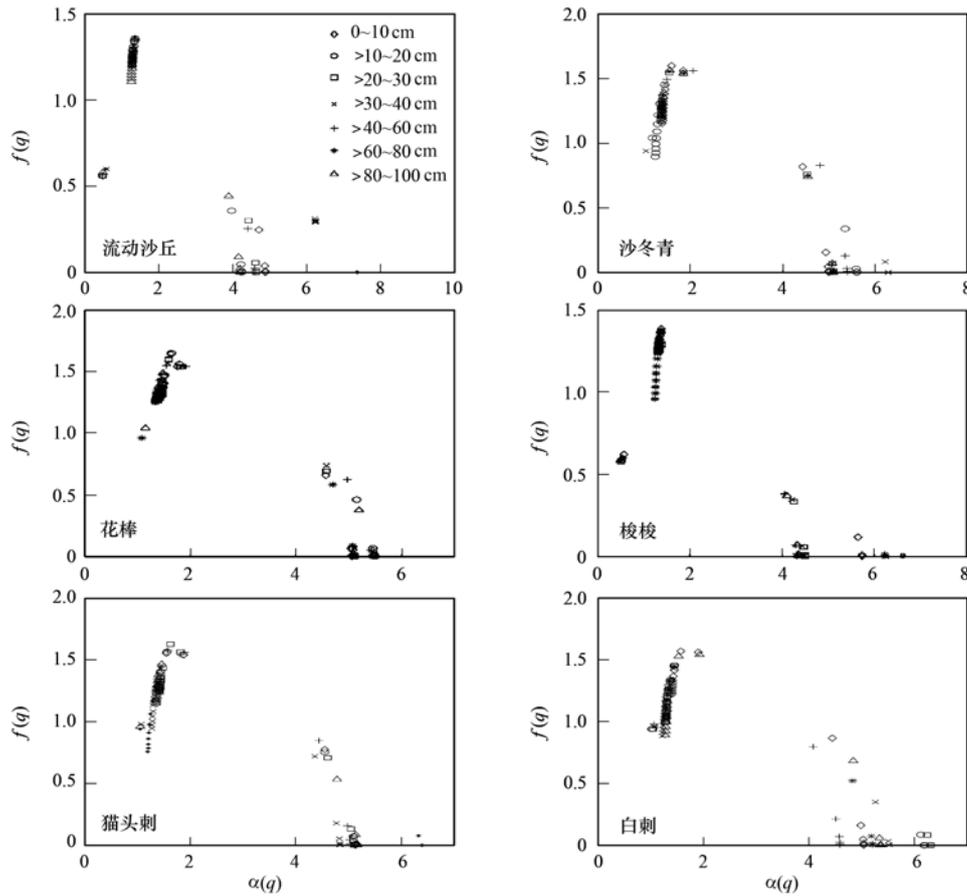


图1 不同灌木下不同深度 PSD $\alpha(q)$ - $f(q)$ 特征

Fig. 1 The $\alpha(q)$ - $f(q)$ characteristics of the PSD of different layers and shrubs

$f(q)$ 曲线 Δf 均小于 0, 图像整体左偏, 呈左钩状。

D_0 表征 PSD 范围, 数值越大则 PSD 范围越宽^[24,25]。由表 1 可知, D_0 均值的分布范围在 0.517 ~ 1.673 之间, 大小关系为沙冬青 > 花棒 > 猫头刺 > 白刺 > 梭梭 > 流动沙丘, D_0 均值沙冬青高于流动沙丘 223.60%, 花棒、猫头刺、白刺、梭梭分别高于流动沙丘 214.12%、193.62%、151.45%、1.55%, 因此, 灌木对 PSD 范围的增加作用明显, 其中沙冬青作用最优, 即乌兰布和沙漠适生灌木中沙冬青可最大程度增加 PSD 范围 ($P < 0.05$)。

D_1 表征 PSD 均匀程度, 数值越大则 PSD 不均匀程度越高^[24,25], D_1 均值的分布范围在 1.352 ~ 1.559 之间, 大小关系表现为花棒 > 猫头刺 > 沙冬青 > 白刺 > 梭梭 > 流动沙丘, 与 D_0 均值相似。 D_1 均值花棒、猫头刺、沙冬青、白刺、梭梭分别高于流动沙丘 15.31%、12.65%、12.57%、9.02%、1.48%, 因此, 灌木对 PSD 非均一性的增加作用明显, 其中花棒增幅最为显著 ($P < 0.05$), 但与猫头刺与沙冬青间差异并不十分明显。

D_1/D_0 表征 PSD 离散程度, 数值越大则 PSD

离散程度越小^[16], D_1/D_0 均值的分布范围在 0.960 ~ 2.633 之间, 大小关系为流动沙丘 > 梭梭 > 白刺 > 猫头刺 > 花棒 > 沙冬青, 与 D_0 均值完全相反, 其中沙冬青低于流动沙丘 174.27%, 花棒、猫头刺、白刺、梭梭分别低于流动沙丘 163.56%、146.07%、117.60%、5.73%, 因此, 灌木对 PSD 离散程度的增加作用明显, 其中沙冬青增幅最为显著 ($P < 0.05$)。

由表 2 可知, 流动沙丘及各灌木的 PSD 统一呈现先增加后降低的趋势, 在 φ (细砂) 时达到最大值, 且梭梭灌木的 φ (细砂) 为 67.95%, 高于其余灌木及流动沙丘, φ (极细砂) 为 2.76% 仅高于流动沙丘, φ (黏粒) 及 φ (粉粒) 均为 0。各灌木下 φ (极细砂) 均明显高于流动沙丘, 以猫头刺居首、梭梭居末; 花棒灌木下 PSD 集中于 φ (细砂) 以下, 占比达 85.03%, 高于其余灌木, 且 φ (黏粒)、 φ (粉粒) 同样居于各灌木之首。

2.2 不同灌木下土壤重金属空间分布特征

土壤中任何高浓度的重金属均被视为可产生毒性作用的环境污染物^[26], 由图 2 可知, 不同灌木下

表 1 不同灌木下不同深度 PSD 分形参数

Table 1 Fractal parameters of the PSD in different soil layers and shrubs

样地	分形参数	土层深度/cm							均值 ¹⁾
		0~10	>10~20	>20~30	>30~40	>40~60	>60~80	>80~100	
流动沙丘	D_1	1.339 ± 0.047	1.355 ± 0.045	1.342 ± 0.041	1.360 ± 0.048	1.350 ± 0.051	1.365 ± 0.043	1.355 ± 0.044	1.352 ± 0.046 ^e
	D_0	0.499 ± 0.015	0.474 ± 0.019	0.492 ± 0.011	0.593 ± 0.022	0.484 ± 0.018	0.573 ± 0.013	0.503 ± 0.015	0.517 ± 0.016 ^b
	D_1/D_0	2.686 ± 0.085	2.861 ± 0.081	2.727 ± 0.092	2.293 ± 0.088	2.789 ± 0.087	2.381 ± 0.072	2.695 ± 0.096	2.633 ± 0.086 ^a
沙冬青	D_1	1.598 ± 0.048	1.450 ± 0.045	1.545 ± 0.051	1.458 ± 0.062	1.492 ± 0.046	1.550 ± 0.046	1.563 ± 0.059	1.522 ± 0.051 ^b
	D_0	1.846 ± 0.055	1.183 ± 0.031	1.865 ± 0.036	1.040 ± 0.041	2.065 ± 0.081	1.859 ± 0.030	1.851 ± 0.043	1.673 ± 0.045 ^a
	D_1/D_0	0.866 ± 0.026	1.226 ± 0.035	0.829 ± 0.021	1.403 ± 0.025	0.722 ± 0.036	0.834 ± 0.041	0.844 ± 0.035	0.960 ± 0.031 ^b
花棒	D_1	1.641 ± 0.062	1.649 ± 0.071	1.597 ± 0.069	1.566 ± 0.075	1.546 ± 0.066	1.427 ± 0.077	1.487 ± 0.054	1.559 ± 0.068 ^a
	D_0	1.757 ± 0.054	1.796 ± 0.051	1.809 ± 0.055	1.857 ± 0.063	1.914 ± 0.047	1.090 ± 0.058	1.149 ± 0.056	1.624 ± 0.055 ^a
	D_1/D_0	0.934 ± 0.025	0.918 ± 0.033	0.883 ± 0.039	0.844 ± 0.034	0.808 ± 0.041	1.309 ± 0.046	1.294 ± 0.031	0.999 ± 0.036 ^b
梭梭	D_1	1.386 ± 0.037	1.380 ± 0.041	1.364 ± 0.039	1.365 ± 0.045	1.368 ± 0.047	1.370 ± 0.051	1.369 ± 0.052	1.372 ± 0.045 ^e
	D_0	0.575 ± 0.017	0.549 ± 0.015	0.506 ± 0.011	0.504 ± 0.026	0.500 ± 0.021	0.543 ± 0.029	0.500 ± 0.026	0.525 ± 0.021 ^b
	D_1/D_0	2.409 ± 0.065	2.513 ± 0.061	2.696 ± 0.059	2.708 ± 0.064	2.739 ± 0.068	2.523 ± 0.062	2.737 ± 0.070	2.618 ± 0.064 ^a
猫头刺	D_1	1.550 ± 0.047	1.563 ± 0.041	1.623 ± 0.052	1.453 ± 0.056	1.574 ± 0.062	1.436 ± 0.053	1.464 ± 0.057	1.523 ± 0.053 ^b
	D_0	1.883 ± 0.056	1.860 ± 0.059	1.811 ± 0.061	1.079 ± 0.043	1.886 ± 0.047	1.050 ± 0.052	1.057 ± 0.058	1.518 ± 0.054 ^a
	D_1/D_0	0.823 ± 0.022	0.840 ± 0.035	0.896 ± 0.038	1.346 ± 0.049	0.834 ± 0.041	1.369 ± 0.053	1.385 ± 0.057	1.070 ± 0.042 ^b
白刺	D_1	1.568 ± 0.049	1.456 ± 0.056	1.448 ± 0.052	1.427 ± 0.065	1.444 ± 0.043	1.446 ± 0.046	1.527 ± 0.043	1.474 ± 0.051 ^b
	D_0	1.903 ± 0.051	1.025 ± 0.056	1.040 ± 0.041	1.074 ± 0.040	1.062 ± 0.038	1.067 ± 0.033	1.927 ± 0.055	1.300 ± 0.045 ^a
	D_1/D_0	0.824 ± 0.049	1.420 ± 0.056	1.392 ± 0.046	1.329 ± 0.051	1.360 ± 0.057	1.355 ± 0.064	0.793 ± 0.041	1.210 ± 0.052 ^b

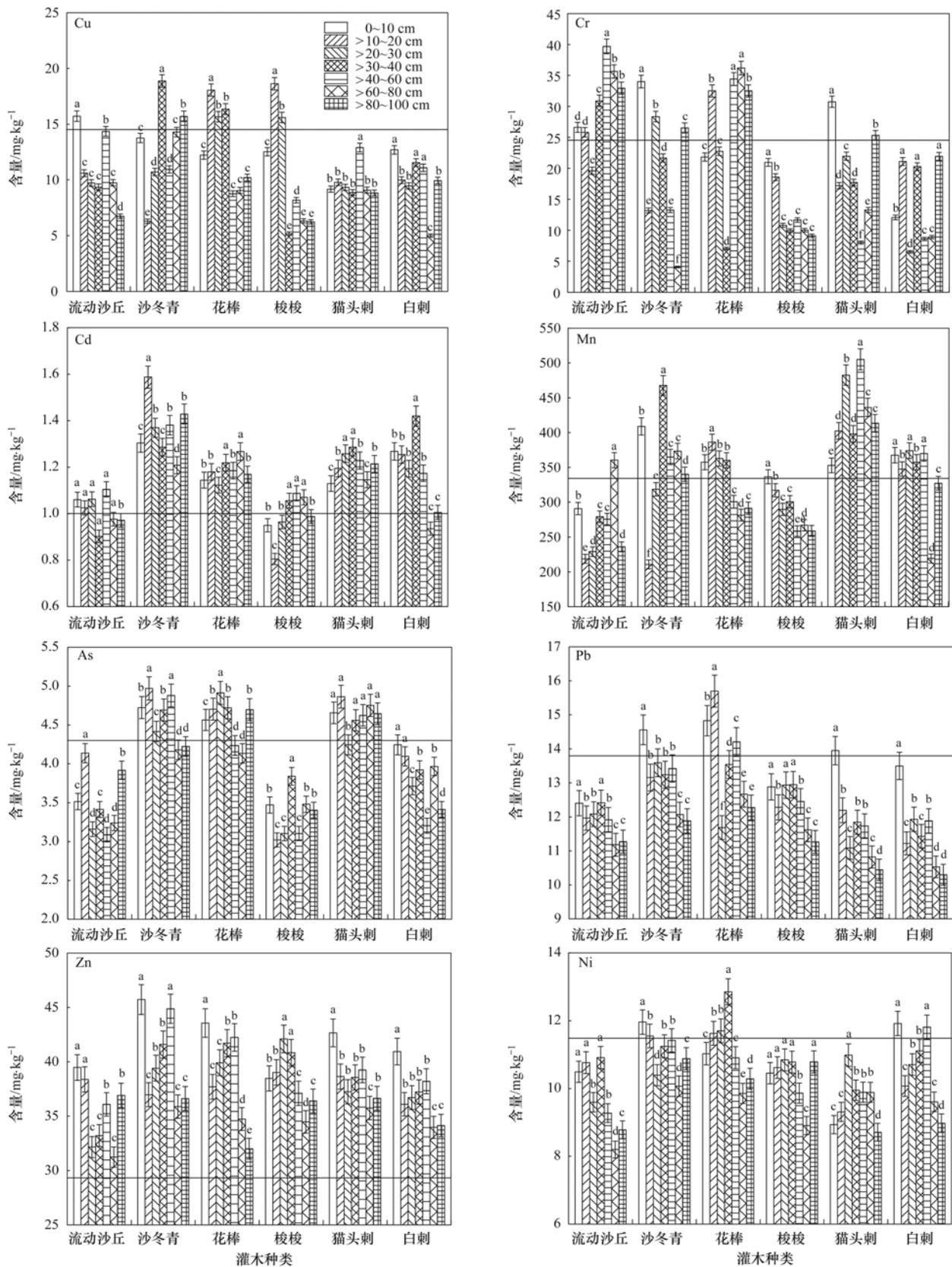
1) 不同小写字母表示不同灌木同一指标间差异显著 ($P < 0.05$, 双尾)

表 2 不同灌木下 φ (PSD) 组成/%Table 2 The φ (PSD) values under different shrubs/%

样地	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
流动沙丘	0.00	0.00	0.93 ± 0.02	59.30 ± 1.81	37.03 ± 1.13	1.58 ± 0.07	1.15 ± 0.06
沙冬青	1.95 ± 0.09	5.13 ± 0.23	12.50 ± 0.52	50.55 ± 2.06	19.09 ± 0.79	7.01 ± 0.32	3.77 ± 0.19
花棒	2.83 ± 0.11	8.86 ± 0.41	14.55 ± 0.76	58.79 ± 2.98	14.95 ± 0.79	0.03 ± 0.00	0.00
梭梭	0.00	0.00	2.76 ± 0.13	67.95 ± 2.76	25.29 ± 0.98	1.82 ± 0.07	2.18 ± 0.11
猫头刺	1.94 ± 0.07	5.40 ± 0.14	16.42 ± 0.59	43.16 ± 1.53	13.80 ± 0.51	12.26 ± 0.45	7.01 ± 0.25
白刺	0.62 ± 0.02	4.87 ± 0.12	12.55 ± 0.35	32.73 ± 0.87	20.73 ± 0.56	20.32 ± 0.54	8.18 ± 0.26

各深度土层重金属含量均较高,整体表现为 $\omega(\text{Mn}) > \omega(\text{Zn}) > \omega(\text{Cr}) > \omega(\text{Cu}) > \omega(\text{Pb}) > \omega(\text{Ni}) > \omega(\text{As}) > \omega(\text{Cd})$. 猫头刺下 $\omega(\text{Mn})$ 均值为 427.229 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于其余灌木及流动沙丘,且各土层间差异显著($P < 0.05$),随深度增加整体呈现“M”型变化,两次峰值分别出现在>20~30、>40~60 cm 土层,且0~10 cm 土层 $\omega(\text{Mn})$ 高于流动沙丘;沙冬青下 $\omega(\text{Mn})$ 均值为 354.899 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅低于猫头刺,且各土层间差异显著($P < 0.05$),而0~10 cm 土层 $\omega(\text{Mn})$ 高于流动沙丘及猫头刺. 沙冬青下 $\omega(\text{Zn})$ 均值相对较低但高于流动沙丘,各土层间差异显著($P < 0.05$),0~10 cm 土层高于流动沙丘及其余灌木. 梭梭下 $\omega(\text{Cr})$ 均值明显低于其余灌木及流动沙丘,且随土层加深 $\omega(\text{Cr})$ 逐渐降低,0~10、>10~20 cm 均显著高于其余土层($P < 0.05$);花棒及沙冬青下 $\omega(\text{Cr})$ 均值分别为 26.756、20.166 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 各土层间差异显著($P < 0.05$),沙冬青下0

~10 cm 土层 $\omega(\text{Cr})$ 高于流动沙丘. $\omega(\text{Cu})$ 均值各灌木间相差较小,沙冬青、花棒分别为 12.936、12.901 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各土层间差异显著($P < 0.05$),且二者均高于流动沙丘(10.891 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 花棒下 $\omega(\text{Pb})$ 均值为 13.556 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于其余灌木及流动沙丘,各土层间差异显著($P < 0.05$),0~10 cm 土层为 14.828 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 位于各土层之首,沙冬青下 $\omega(\text{Pb})$ 均值低于花棒 3.24%,0~10 cm 土层 $\omega(\text{Pb})$ 显著高于其余土层($P < 0.05$). 花棒下 $\omega(\text{Ni})$ 随土层加深先增加后降低,均值为 11.179 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于沙冬青 0.96%,高于流动沙丘 15.06%,除猫头刺0~10 cm 土层 $\omega(\text{Ni})$ 低于流动沙丘外,其余灌木均高于流动沙丘. 除梭梭下 $\omega(\text{As})$ 均值为 3.346 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 低于流动沙丘 4.48%外,其余灌木下 $\omega(\text{As})$ 均值皆高于流动沙丘,其中猫头刺高出 32.21%,沙冬青高出 31.15%,花棒高出 30.66%. 各灌木下 $\omega(\text{Cd})$ 皆高于流动沙丘,其中,梭梭下



不同小写字母表示相同灌木不同土层间差异显著 ($P < 0.05$, 双尾), 横线表示内蒙古土壤重金属背景值

图 2 不同灌木不同深度土层重金属含量

Fig. 2 Heavy metal contents under different levels and shrubs

$\omega(\text{Cd})$ 均值为 $0.988 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高出 1.75%,沙冬青高出 47.17%,花棒高出 20.39%,0~10 cm 土层 $\omega(\text{Cd})$ 除梭梭略低于流动沙丘外,其余灌木均高于流动沙丘。

2.3 不同灌木下 PSD 组成、参数与土壤重金属含量相关关系

重金属含量与 PSD(以 φ 计)组成及参数间 Pearson 相关分析结果见表 3。重金属含量均与 $\varphi(\text{黏粒})$ 、 $\varphi(\text{粉粒})$ 正相关,但 $\varphi(\text{黏粒})$ 与 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 关系不显著, $\varphi(\text{粉粒})$ 与 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 关系不显著,且 $\varphi(\text{粉粒})$ 与重金属含量的相关性强于 $\varphi(\text{黏粒})$,而 8 种重金属与 $\varphi(\text{极细砂})$ 、 $\varphi(\text{细砂})$ 间未呈统一相关关系;除 $\omega(\text{Cr})$ 外,其余重金属含量均与 $\varphi(\text{中砂})$ 负相关,但 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 关系不显著,同样,8 种重金属与 $\varphi(\text{粗砂})$ 、 $\varphi(\text{极粗砂})$ 间未呈统一相关关系,可见, $\varphi(\text{粉粒})$ 与 $\varphi(\text{中砂})$ 分别为决定风沙土中重金属含量的细粒土壤及粗粒土壤。

除 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 不显著, $\omega(\text{Ni})$ 95% 水平显著外,其余重金属含量均分别与 D_1 及 D_0 极显著正相关($P < 0.01$),而除 $\omega(\text{Cr})$ 与 D_1/D_0 正相关外,其余重金属均与 D_1/D_0 负相关,其中 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 极显著($P < 0.01$), $\omega(\text{Zn})$ 显著($P < 0.05$);除 $\omega(\text{Cr})$ 外,其余重金属含量均与 Δf 正相关,其中 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 极显著($P < 0.01$), $\omega(\text{Pb})$ 显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 灌木对土壤粒径的影响

沙漠区域频繁劲风所产生的分选作用使得风沙土的颗粒组成受到显著影响。贾萌萌等认为^[27],与流沙相比,以梭梭、怪柳、沙拐枣为主体的灌木防护林可通过降低风速拦截风沙流中的外来细小土壤颗粒并固持原位土壤,改善土壤质地、促进流沙固定及土壤细粒化,使分形维数增加。王利兵等^[28]同样认为沙生灌木具有对细沙、极细沙和粉沙等细小土壤颗粒的截留作用,且冠幅越大截留作用越强,代豫杰等^[15]则进一步指出不同沙生灌木对于黏粒、粉粒等细小土壤颗粒的拦截及沉降效果不尽相同^[18,19]。本实验在文献[15]的基础上将粒径细化为极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1000 μm),发现各灌木下 $\varphi(\text{极细砂})$ 均明显高于流动沙丘, $\varphi(\text{中砂})$ 均明显低于流动沙丘,而 $\varphi(\text{黏粒})$ 、 $\varphi(\text{粉粒})$ 除梭梭

外均明显高于流动沙丘, $\varphi(\text{细砂})$ 除梭梭外均低于流动沙丘,说明灌木对风沙流中细小颗粒的沉降作用可补充周围土壤因风蚀而损失的黏粒、粉粒、极细砂,使得单位体积土壤中的细小土壤颗粒数量相对增加,粗粒物质数量相对减少,即灌木可防风阻沙、拦沙并改良风沙土 $\varphi(\text{PSD})$ 状况。各灌木中梭梭的 $\varphi(\text{黏粒})$ 及 $\varphi(\text{粉粒})$ 均为 0,而 $\varphi(\text{细砂})$ 却居于首位,这可能由于梭梭初芽萌动时间为 4 月初,肉质鳞片状叶广布枝条时间为 4 月中下旬^[29],而本实验取样时间为 3~4 月,此时梭梭枝条尚处于无叶或极少叶状态,对于风沙流中极细颗粒如黏粒及粉粒的拦滞能力尚无法正常发挥,对于粒径相对较粗的细砂,拦滞能力受影响则较小,而沙冬青为常绿阔叶超旱生喜沙灌木^[30],株高冠广,对于风沙流的拦截范围大、能力强,因此,对 $\varphi(\text{黏粒})$ 、 $\varphi(\text{粉粒})$ 、 $\varphi(\text{极细砂})$ 增幅明显,对 D_0 、 D_1/D_0 改善作用显著($P < 0.05$),即沙冬青可显著增加 PSD 范围及离散程度,优化土壤质地与结构,但对表层土壤的优化作用逊于深层土壤^[31],如在 40~60 cm 土层 D_1/D_0 最小,而 D_0 最大(表 1),即 PSD 范围及离散程度均在该土层达到最大,PSD 未集中于某一狭窄粒径范围,且在分散的粒径范围内均含有细粒及粗粒物质,对此,贾等^[31]认为沙冬青根系主要分布在 50~70 cm 深度土层,而根系活动可增加团粒结构含量并一定程度促进深层土壤结构改良^[32],因此,该土壤层的 D_0 、 D_1/D_0 值优于其余土层。

3.2 土壤粒径对重金属含量的影响

土壤颗粒的大小可显著影响土壤中的重金属含量,Zong 等^[6]认为 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 在 $< 2 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒中可大量聚集,即黏粒的重金属污染高于其他粒径土壤,而 Cr 除在黏粒中大量含有外,在 1000~2000 μm 粒径范围内同样含量较高,此外, $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 随粒径的递减而大量富集,程度远高于其余重金属。由表 3 可知, $\omega(\text{Cd})$ 与 $\varphi(\text{黏粒})$ 的相关系数为 0.300,低于其余粒径范围,但数值的变化并非严格对应于粒径的递减,甚至在 $\varphi(\text{细砂})$ 及 $\varphi(\text{中砂})$ 时骤变为 -0.428 及 -0.427,与 Zong 等^[6]的研究结果存在一定差异,这可能是由于风沙土中的低水分、养分含量减弱了土壤颗粒间的黏结力及对重金属的吸附能力所致^[33]。相比于城市土壤,重金属与 PSD 间的相关关系同样具备较严格的规律,但 $\omega(\text{Cr})$ 与 $\varphi(\text{PSD})$ 间的相关系数均远低于其余重金属与 PSD 间的相关系数,其中 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 均与 $\varphi(\text{黏粒})$ 、 $\varphi(\text{粉粒})$ 、 $\varphi(\text{极细砂})$ 极显著正相关

表 3 重金属含量、PSD 组成、参数间相关关系¹⁾

	$\omega(\text{Mn})$	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Cd})$	$\omega(\text{As})$	$\omega(\text{Pb})$	$\omega(\text{Zn})$	$\omega(\text{Ni})$	D_1	D_0	D_1/D_0	Δf	$\varphi(\text{黏粒})$	$\varphi(\text{粉粒})$	$\varphi(\text{极细砂})$	$\varphi(\text{细砂})$	$\varphi(\text{中砂})$	$\varphi(\text{粗砂})$
$\omega(\text{Cu})$	0.383 [*]																	
$\omega(\text{Cr})$	-0.105	0.126																
$\omega(\text{Cd})$	0.340 [*]	0.049	-0.030															
$\omega(\text{As})$	0.457 ^{**}	0.072	0.049	0.642 ^{**}														
$\omega(\text{Pb})$	0.050	0.375 [*]	0.200	0.244	0.320 [*]													
$\omega(\text{Zn})$	0.323 [*]	0.358 [*]	-0.094	0.261	0.397 [*]	0.642 ^{**}												
$\omega(\text{Ni})$	0.154	0.438 ^{**}	-0.233	0.357 [*]	0.286	0.533 ^{**}	0.540 ^{**}											
D_1	0.593 ^{**}	0.297	0.025	0.492 ^{**}	0.697 ^{**}	0.407 ^{**}	0.411 ^{**}	0.367 [*]										
D_0	0.537 ^{**}	0.230	-0.011	0.561 ^{**}	0.691 ^{**}	0.353 ^{**}	0.426 ^{**}	0.319 [*]	0.939 ^{**}									
D_1/D_0	-0.583 ^{**}	-0.164	0.035	-0.645 ^{**}	-0.741 ^{**}	-0.251	-0.310 [*]	-0.303	-0.895 ^{**}	-0.945 ^{**}								
Δf	0.552 ^{**}	0.278	-0.056	0.530 ^{**}	0.666 ^{**}	0.346 [*]	0.459 ^{**}	0.288	0.914 ^{**}	0.876 ^{**}	-0.826 ^{**}							
$\varphi(\text{黏粒})$	0.487 ^{**}	0.379 [*]	0.072	0.300	0.523 ^{**}	0.488 ^{**}	0.425 ^{**}	0.361 [*]	0.907 ^{**}	0.804 ^{**}	-0.660 ^{**}	0.804 ^{**}						
$\varphi(\text{粉粒})$	0.493 ^{**}	0.246	0.116	0.449 ^{**}	0.639 ^{**}	0.448 ^{**}	0.332 [*]	0.407 ^{**}	0.926 ^{**}	0.798 ^{**}	-0.805 ^{**}	0.840 ^{**}	0.824 ^{**}					
$\varphi(\text{极细砂})$	0.706 ^{**}	0.291	-0.091	0.468 ^{**}	0.746 ^{**}	0.264	0.383 [*]	0.289	0.875 ^{**}	0.800 ^{**}	-0.836 ^{**}	0.817 ^{**}	0.715 ^{**}	0.801 ^{**}				
$\varphi(\text{细砂})$	-0.248	0.223	0.168	-0.428 ^{**}	-0.274	0.252	0.902	0.038	-0.300	-0.321 [*]	0.472 ^{**}	-0.310 [*]	-0.102	-0.355 [*]	-0.376 [*]			
$\varphi(\text{中砂})$	-0.647 ^{**}	-0.180	0.177	-0.427 ^{**}	-0.703 ^{**}	-0.238	-0.343 [*]	-0.285	-0.768 ^{**}	-0.699 ^{**}	0.767 ^{**}	-0.720 ^{**}	-0.563 ^{**}	-0.710 ^{**}	0.297			
$\varphi(\text{粗砂})$	0.125	-0.366 [*]	-0.279	0.327 [*]	0.101	-0.401 ^{**}	-0.178	-0.106	0.018	0.071	-0.279	0.057	-0.231	0.075	0.151	-0.913 ^{**}	-0.215	
$\varphi(\text{极粗砂})$	0.073	-0.323 [*]	-0.229	0.236	0.107	-0.381 ^{**}	-0.288	-0.213	-0.057	0.011	-0.154	-0.012	-0.230	-0.033	0.016	-0.750 ^{**}	-0.264	0.833 ^{**}

1) * * 表示在 0.01 水平上差异显著 ($P < 0.01$, 双尾), * 表示在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$, 双尾)

($P < 0.01$), 与 φ (中砂)极显著负相关($P < 0.01$), 且相关系数在 φ (极细砂)、 φ (中砂)时达到最大, 而 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 则均与 φ (中砂)、 φ (粗砂)、 φ (极粗砂)负相关, 与其余 PSD 正相关, 即重金属与细粒土壤含量正相关、与粗粒土壤含量负相关, 对此, Ajmone-marsan 等^[8]认为相互粘结的细小土壤颗粒间具有更大的接触面积, 可提供更大的接触力及吸附力, 使得重金属更多、更牢地依附于其表面, 此外, 细小土壤颗粒间相互粘结时形成的紧密空隙同样可固持重金属, 增加土壤中重金属含量, 因此, 重金属含量与细小土壤颗粒含量间呈现正相关关系、与粗粒物质含量间呈现负相关关系, 同时, 不同重金属在不同粒径土壤颗粒间的含量并非均匀分布^[7], 因此, 相关系数差异较大. 沙冬青及花棒灌木下 0~10 cm 土层 D_0 较大、而 D_1/D_0 较小(表 1), φ (黏粒)、 φ (粉粒)及 φ (极细砂)较高(表 2), 且 0~10 cm 土层沙冬青除 $\omega(\text{Cu})$ 外, 花棒除 $\omega(\text{Cr})$ 外均高于流动沙丘(图 2), 说明沙冬青及花棒可较好地拦滞风沙流中黏粒、粉粒、极细砂, 对表层土壤颗粒组成及质地的改良作用明显, 使得 PSD 范围及离散程度增加, 单位体积土壤中细小土壤颗粒含量提升, 对重金属更多、更牢地吸附及更强地原位控制, 因此, 增加种植数量可较好地拦滞风沙流中携重金属细小土壤颗粒, 减轻下风向城市的重金属对呼吸健康的危害. 而各灌木下不同土层重金属含量的差异可能与灌木根系对土壤重金属的转运机制有关^[33], 具体原因还有待进一步探讨.

4 结论

(1) 乌兰布和沙漠不同适生灌木均可拦截风沙流中的运动颗粒, 使之沉降在灌木周围, 进而改变灌木下 PSD 状况, 增加单位体积土壤中 φ (黏粒)、 φ (粉粒)、 φ (极细砂)等细小颗粒, 且灌木可明显增加 PSD 范围、非均匀程度及离散程度, 使土壤颗粒不致集中于某一狭窄的粒径范围, 同时含有细粒及粗粒物质.

(2) 不同灌木下风沙土的重金属含量均较高, 整体表现为 $\omega(\text{Mn}) > \omega(\text{Zn}) > \omega(\text{Cr}) > \omega(\text{Cu}) > \omega(\text{Pb}) > \omega(\text{Ni}) > \omega(\text{As}) > \omega(\text{Cd})$, 除 Cu 外各灌木下 0~10cm 土层重金属含量均高于流动沙丘, 即灌木可通过拦截风沙流中携重金属的细小土壤颗粒, 使其沉降在灌木周围, 增加周边表层风沙土的重金属含量从而减轻下风向城市的重金属污染.

(3) 8 种重金属均与 φ (黏粒)、 φ (粉粒)正相关, 且与 φ (粉粒)的相关性强于 φ (黏粒), 除 $\omega(\text{Cr})$ 外, 其余重金属均与 φ (中砂)负相关, 但重金属含量与其余粒径范围土壤颗粒间未出现统一相关关系, 即 φ (粉粒)与 φ (中砂)分别为决定风沙土中重金属含量的细粒土壤及粗粒土壤; 重金属含量与多重分形参数间的相关系数与 φ (黏粒)、 φ (粉粒)、 φ (中砂)相似, 即多重分形维数同样可较好地描述重金属含量与决定性土壤颗粒间的关系.

(4) 乌兰布和沙漠不同适生灌木可改变 PSD 状况及重金属含量, 其中, 沙冬青及花棒可更显著拦滞风沙流中携重金属细小土壤颗粒使之沉降, 降低下风向城市重金属污染并改善区域风沙土状况, 因此, 可在今后的沙漠化防治及重金属原位控制过程中加大种植比例.

参考文献:

- [1] Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method[J]. *Pedosphere*, 2006, **16**(2): 137-146.
- [2] Tennekoon L, Boufadel M C, Lavalley D, et al. Multifractal anisotropic scaling of the hydraulic conductivity [J]. *Water Resource Research*, 2003, **39**(7): 1193.
- [3] Gao Y, Miao C Y, Xia J, et al. Plant diversity reduces the effect of multiple heavy metal pollution on soil enzyme activities and microbial community structure[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, **6**(2): 213-223.
- [4] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **57**: 146-152.
- [5] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, northeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **408**(4): 726-733.
- [6] Zong Y T, Xiao Q, Lu S G. Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(14): 14600-14607.
- [7] Luo X S, Yu S, Li X D. Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: implications for assessing the risk to human health [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(5): 1317-1326.
- [8] Ajmone-marsan F, Biasioli M, Kralj T, et al. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(1): 73-81.
- [9] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W. H. Freeman & Co Ltd, 1982.
- [10] Giménez D, Allmaras R R, Nater E A, et al. Fractal dimensions for volume and surface of interaggregate pores-scale effects[J]. *Geoderma*, 1997, **77**(1): 19-38.
- [11] Cheng C, Wang Y J, Wang Y Q, et al. Soil fractal features of typical forest stands in Jinyun Mountain, Chongqing City,

- Southwest China[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2007, **2**(4): 429-435.
- [12] Chen X Y, Zhou J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **70**(4): 1735-1746.
- [13] 管孝艳, 杨培岭, 任树梅, 等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, **17**(2): 196-205.
- Guan X Y, Yang P L, Ren S M, *et al.* Heterogeneity analysis of particle size distribution for loamy soil based on multifractal theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, **17**(2): 196-205.
- [14] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形理论的农田土壤特性空间变异性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, **19**(5): 712-720.
- Guan X Y, Yang P L, Lv Y. Analysis on spatial variability of soil properties based on multifractal theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, **19**(5): 712-720.
- [15] 代豫杰, 李锦荣, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(7): 1069-1078.
- Dai Y J, Li J R, Guo J Y, *et al.* Soil particle multi-fractals and soil organic carbon distributions and correlations under different shrubs in Ulan Buh Desert[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(7): 1069-1078.
- [16] Wang J M, Zhang M, Bai Z K, *et al.* Multi-fractal characteristics of the particle distribution of reconstructed soils and the relationship between soil properties and multi-fractal parameters in an opencast coal-mine dump in a Loess area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(8): 4749-4762.
- [17] Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, **54**(6): 1568-1574.
- [18] Wang X P, Li X R, Xiao H L, *et al.* Evolutionary characteristics of the artificially revegetated shrub ecosystem in the Tengger Desert, northern China[J]. *Ecological Research*, 2006, **21**(3): 415-424.
- [19] Hewins D B, Sinsabaugh R L, Archer S R, *et al.* Soil-litter mixing and microbial activity mediate decomposition and soil aggregate formation in a sandy shrub-invaded Chihuahuan Desert grassland[J]. *Plant Ecology*, 2017, **218**(4): 459-474.
- [20] 陈新闻, 郭建英, 董智, 等. 绿洲边缘新月形沙丘表层沉积物粒度与重金属分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3662-3668.
- Chen X C, Guo J Y, Dong Z, *et al.* Grain size and heavy metals distribution characteristics on surface sediments of the barchans in the edge of oasis[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3662-3668.
- [21] 龙加洪, 谭菊, 吴银菊, 等. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(1): 123-126.
- Long J H, Tan J, Wu Y J, *et al.* A comparative study on the detection of heavy metal in soil with different digestion methods[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(1): 123-126.
- [22] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2005, **182**(3-4): 305-315.
- [23] Caniego F J, Espejo R, Martín M A, *et al.* Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. *Ecological Modelling*, 2005, **182**(3-4): 291-303.
- [24] Martín M Á, Montero E. Laser diffraction and multifractal analysis for the characterization of dry soil volume-size distributions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **64**(1-2): 113-123.
- [25] 周炜星, 吴韬, 于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性 II. 配分函数法[J]. *华东理工大学学报*, 2000, **26**(4): 390-395.
- Zhou W X, Wu T, Yu Z H. Geometrical characteristics of singularity spectra of multifractals II. partition function definition[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2000, **26**(4): 390-395.
- [26] Nouri J, Khorasani N, Lorestani B, *et al.* Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2009, **59**(2): 315-323.
- [27] 贾萌萌, 张忠良, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤粒径分布的分形特征[J]. *干旱区研究*, 2015, **32**(4): 674-679.
- Jia M M, Zhang Z L, Lei J Q. Fractal characteristics of soil particle size distribution in protection forest of Tarim desert highway[J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(4): 674-679.
- [28] 王利兵, 胡小龙, 余伟莅, 等. 沙粒粒径组成的空间异质性及其与灌丛大小和土壤风蚀相关性分析[J]. *干旱区地理*, 2006, **29**(5): 688-693.
- Wang L B, Hu X L, Yu W L, *et al.* Spatial heterogeneity of granule diameter and its relation with shrub size and soil erosion[J]. *Arid Land Geography*, 2006, **29**(5): 688-693.
- [29] Wei J, Zhang X M, Shan L S, *et al.* Seedling growth dynamic of *Haloxylon ammodendron* and its adaptation strategy to habitat condition in hinterland of desert[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(S1): 107-114.
- [30] Chen G Q, Huang H W, Kang M, *et al.* Development and characterization of microsatellite markers for an endangered shrub, *Ammopiptanthus mongolicus* (Leguminosae) and cross-species amplification in *Ammopiptanthus nanus*[J]. *Conservation Genetics*, 2007, **8**(6): 1495-1497.
- [31] Jia X H, Li X R, Zhang J G, *et al.* Analysis of spatial variability of the fractal dimension of soil particle size in *Ammopiptanthus mongolicus*' desert habitat[J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(5): 953-962.
- [32] Yükses T, Yükses F. The effects of restoration on soil properties in degraded land in the semi-arid region of Turkey[J]. *Catena*, 2011, **84**(1-2): 47-53.
- [33] Keller C, Hammer D, Kayser A, *et al.* Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field[J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(1): 67-81.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)