

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.9  
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析.....肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐迦,陈魁,邓小文(3879)

基于高分辨率MARGA分析成都市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征.....尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)

宿迁市PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子的季节特征和来源分析.....  
.....马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)

鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布.....李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析.....林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)

西安市冬季PM<sub>2.5</sub>中WSOC的光谱特性和来源解析.....杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)

长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测.....  
.....杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)

连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析.....崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛吾,曹云擎(3941)

成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析.....王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案.....严茹莎(3961)

超低改造下中国火电排放清单及分布特征.....屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征.....赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选.....赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源.....韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)

然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素.....张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制.....崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析.....李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)

长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素.....季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)

2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析.....李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)

菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响.....康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)

金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析.....刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)

典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.....孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)

微塑料对河水抗生素抗性基因的影响.....周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)

莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价.....廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)

拟柱胞藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异.....叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)

奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟.....李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)

浅基质层干植草沟运行效果的现场实验.....张佳炜,李田,张庭秀(4105)

海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输.....李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)

天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制.....石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)

过硫酸盐氧化处理含砷磷酸废水.....章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)

温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响.....刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)

ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能.....缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能.....刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)

雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨.....郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)

基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例.....  
.....吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)

基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价.....  
.....张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)

云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力.....张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)

水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期.....胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾缤,刘俊,廖柏寒(4218)

田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率.....郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果.....  
.....段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响.....杨彩迪,卢升高(4246)

土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应.....王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)

粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响.....理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)

松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响.....张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)

黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应.....李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)

土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响.....程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)

黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系.....尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)

贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性.....王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)

玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附.....刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊蕊,彭晶,铁柏清(4322)

无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法.....梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)

《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

## 田间条件下养分调控八宝景天 Cd 修复效率

郭俊梅<sup>1,2</sup>, 杨俊兴<sup>1,2\*</sup>, 杨军<sup>1,2</sup>, 郑国砥<sup>1,2</sup>, 周小勇<sup>3</sup>, 陈同斌<sup>1,2</sup>, 卞建林<sup>4</sup>, 孟晓飞<sup>1,2</sup>, 李玉峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 环境修复中心, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京瑞美德环境修复有限公司, 北京 100015; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 在田间条件下, 采用四因素三水平正交试验研究了 N、P、K 三因素不同水平对 Cd 富集植物八宝景天的生长和 Cd 吸收性的影响. 结果表明, 八宝景天生物量随施 N 水平的提高而增加, 高 N 水平下 (337.5 kg·hm<sup>-2</sup>) 八宝景天地上部生物量最大, 为不施肥处理的 0.86~2.00 倍, 但对其地上部 Cd 含量无显著影响. K 肥对八宝景天 Cd 吸收具有一定的促进作用, 高 K 水平下其地上部 Cd 含量最高达 22.05 mg·kg<sup>-1</sup>, 较不施肥处理提高 29.3%. 综合分析, NPK 肥料配施条件下, N 肥和 K 肥分别是八宝景天生长和 Cd 吸收效率的主要影响因素, 且对八宝景天 Cd 积累表现出明显的交互作用. 肥料对八宝景天 Cd 提取量影响顺序为 N > K > P, 其中对八宝景天 Cd 修复效率的促进作用主要通过提高八宝景天生物量, 高量 N 肥配施适量 P、K 肥是提高八宝景天 Cd 修复效率的最佳施肥措施, 其地上部 Cd 积累量较不施肥处理提高了 0.9~2.2 倍, 合理增施 N 肥是提高八宝景天 Cd 修复效率的主要影响因子.

**关键词:** 八宝景天; 植物修复; 镉; 氮磷钾; 施肥强化

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4226-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202002199

## Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of *Hylotelephium spectabile* Under Field Conditions

GUO Jun-mei<sup>1,2</sup>, YANG Jun-xing<sup>1,2\*</sup>, YANG Jun<sup>1,2</sup>, ZHENG Guo-di<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiao-yong<sup>3</sup>, CHEN Tong-bin<sup>1,2</sup>, BIAN Jian-lin<sup>4</sup>, MENG Xiao-fei<sup>1,2</sup>, LI Yu-feng<sup>1,2</sup>

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Remediation Environmental Restoration Co., Ltd., Beijing 100015, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** A field experiment with an orthogonally designed experiment L9(3<sup>4</sup>) was designed to investigate the effect of different N, P, and K levels on plant growth and Cd uptake by *Hylotelephium spectabile*. The results showed that the biomass of *H. spectabile* significantly increased with the N application rate. The highest dry weight in the shoot occurred in the treatments with a high level of N (337.5 kg·hm<sup>-2</sup>), which was 0.86-2.00 times higher than the value with no fertilizer treatment. The addition of K contributed to promoting the Cd absorption of *H. spectabile*, while no effect was observed when N and P were added. Consequently, NPK fertilizers contribute to increasing the Cd uptake of *H. spectabile*, and the N and K fertilizer play important role in plant growth and Cd absorption respectively. Moreover, the effect of fertilizers on Cd uptake of *H. spectabile* was in the order of N > K > P, which indicated that N fertilizer was the main factor for promoting the Cd phytoextraction efficiency of *H. spectabile* by increasing the biomass. Therefore, the application of high levels of N combined with moderate levels of P and K will be an effective approach to improve the Cd phytoremediation efficiency of *H. spectabile* by promoting its growth, and the Cd uptake can be increased by a factor of 0.9-2.2 compared to no fertilizer treatment condition.

**Key words:** *Hylotelephium spectabile*; phytoremediation; cadmium; nitrogen, phosphorus and potassium; fertilizing intensification

我国土壤环境质量状况不容乐观. 近年来, 我国农用地土壤 Cd 污染事件频发, 农产品 Cd 超标问题也越来越受到人们的重视<sup>[1~3]</sup>. 我国耕地 Cd 点位超标率达 7%, 为环境“五毒”元素之首, 受 Cd 污染农田面积超过 2 000 万 hm<sup>2</sup>, 其污染程度以轻微和轻度污染为主<sup>[4]</sup>. 针对这一现状, 植物修复以其成本低、易操作、对土壤扰动小和环境友好等优点而被认为是适用于修复大面积 Cd 污染农田的最具应用潜力的绿色修复技术, 成为国内外环境修复领域的研究热点<sup>[5,6]</sup>.

利用超富集植物修复 Cd 污染土壤的关键在于获得较大的生物量和较高的地上部 Cd 含量<sup>[7]</sup>. 然而, 目前利用 Cd 超富集植物实际应用于 Cd 污染土壤的修复过程中普遍存在生物量较小、修复效率较

收稿日期: 2020-02-27; 修订日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771509, 41907125); 国家重点研究发展计划项目(2018YFC1802604, 2018YFD0800600); 广西农田重金属污染防治关键技术研究及应用示范项目(桂科 AA17204047); 中国博士后科学基金项目(2019M650827)

作者简介: 郭俊梅(1990~), 男, 博士后, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: gjm19900321@163.com

\* 通信作者, E-mail: yangjx@126.com

低和周期较长的问题,通过农艺调控措施促进植物生长和提高土壤 Cd 有效性是强化植物修复效率的主要措施<sup>[8,9]</sup>。施肥是农业生产中提高作物产量和改善土壤质量最重要的农艺措施之一,可通过改善土壤养分状况,补充植物修复过程中损失的营养元素,有助于提高植物生物量。同时,肥料还可通过影响土壤中 Cd 的赋存形态和生物有效性,从而影响植物对 Cd 的吸收转运<sup>[10,11]</sup>。众多研究表明,施肥是提高超富集植物修复 Cd 污染土壤效率的重要辅助措施,施肥有效促进了东南景天 (*Sedum afredii* Hance)、伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*)、籽粒苋 (*Amaranthus hypochondriacus*) 和 硫华菊 (*Cosmos sulphureus*) 等植物的 Cd 修复效率<sup>[12-15]</sup>。

景天科植物八宝景天 (*Hylotelephium spectabile*) 是我国广泛种植的园林绿化植物,对土壤中 Cd 有较强的富集能力,同时兼有耐旱、适应性强、生物量较大等特点,具有应用于 Cd 污染土壤的潜力<sup>[16,17]</sup>。前期研究中,将八宝景天种植在我国北方 Cd 污染农田 ( $Cd: 2.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 上,年度 Cd 修复效率可达 3% 左右,尚需进一步提高以增加其实际应用价值。同时,通过盆栽试验研究证明了氮磷钾肥料配施显著提高了八宝景天地上部 Cd 提取量<sup>[16]</sup>。然而,目前关于养分调控超富集植物的研究多集中在肥料品种筛选及单一元素施用量的探索,且多为室内培养研究,在田间尺度上探索不同 N、P、K 施肥量配比对八宝景天 Cd 修复效率的研究尚少见报道。

因此,在本团队前期研究的基础上,本文拟采用正交设计进行 N、P、K 施肥量调控试验,研究不同肥料施用量及相互作用对八宝景天生长和 Cd 污染土壤修复效率的影响,探索出田间条件下提高八宝景天 Cd 修复效率的优化施肥模式,以期为八宝景天高效修复 Cd 污染土壤提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点概况

本试验点设置于河南省某市土壤重金属治理修复基地 ( $35^{\circ}08'33.04'' \text{ N}$ ,  $112^{\circ}31'33.16'' \text{ E}$ ),属于温带大陆性季风气候,四季分明,年气温为  $14.6^{\circ}\text{C}$ ,全年日照为  $1727.6 \text{ h}$ ,年降水量为  $860 \text{ mm}$ 。土壤类型为褐土,土壤基本理化性质如下: pH 7.7, CEC  $20.1 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质含量  $19.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮  $1.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷  $0.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全钾  $26.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效氮  $83.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $23.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $140.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试土壤中 Cd 含量为  $2.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中风险筛选值 ( $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),土

壤有效态 Cd 含量为  $0.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

供试植物为 Cd 富集植物八宝景天 (*Hylotelephium spectabile*),于温室内进行预培养。试验采用四因素三水平正交试验设计 [ $L_9(3^4)$ ],本试验设 3 个施肥水平,以不施肥为对照处理 (NOPOK0),基础施肥水平 (N1、P1 和 K1) 的设定结合八宝景天需肥特性与试验区农民习惯施肥量,设为  $112.5$  (以 N 计)、 $112.5$  (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计) 和  $112.5$  (以  $\text{K}_2\text{O}$  计)  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,以两倍基础施肥水平为中量施肥 (N2、P2 和 K2),以 3 倍基础施肥水平为高量施肥 (N3、P3 和 K3),试验共设置 10 个处理,每处理 3 次重复,每个小区面积为  $10 \text{ m}^2$ 。氮磷钾肥参照当地常用施肥种类<sup>[18,19]</sup>并结合课题组前期肥料种类筛选试验结果 (数据未发表),分别采用尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含  $\text{P}_2\text{O}_5$  16%) 和氯化钾 (含  $\text{K}_2\text{O}$  62%),均作为基肥全部施入土壤,本试验于 2017 年 4 月开展,11 月收获前分别采集各试验区八宝景天地上部样品以及对应土壤样品,同时测定各小区八宝景天地上部干生物量。

### 1.3 样品采集与分析

将收获的八宝景天样品用自来水冲洗去除表面灰尘和土壤颗粒,然后用去离子水冲洗干净,烘干粉碎后采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  (5:1, 体积比) 消解,同时设置空白对照和国家标准物质 (GBW07603) 进行化学分析质量控制 ( $95\% \pm 5\%$ ),消解液采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, 美国) 测定 Cd 含量。

各小区采集的土壤样品分别混合均匀后风干并过 20 目筛,土壤 pH 测定方法参考 ISO 10390:2005 (土水比 1:5, 质量浓度)。土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 浸提法 (GB/T 23739-2009),用电感耦合等离子体质谱仪测定 (ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, 美国)。

### 1.4 数据统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行相关试验数据的统计分析,采用最小显著差数法进行差异显著性检验 ( $P < 0.05$ ),采用 Origin pro 2018 软件进行作图。

采用生物富集系数 (bioconcentration factor, BCF) 评价八宝景天对 Cd 的富集能力,公式表示如下:

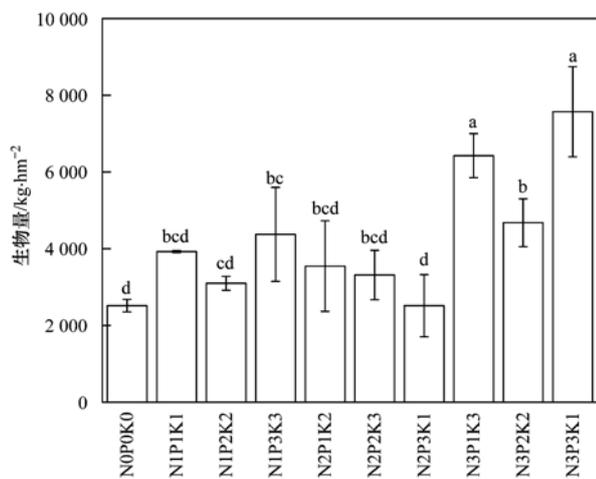
$$\text{BCF} = C_{\text{shoot}}/C_{\text{soil}}$$

式中,  $C_{\text{shoot}}$  ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和  $C_{\text{soil}}$  ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 分别表示八宝景天地上部 Cd 含量和土壤中 Cd 含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 养分调控对八宝景天生物量的影响

综合分析 N、P、K 肥料施用对八宝景天生长的影响发现(图 1),不同施肥处理下八宝景天地上部生物量在 2 516.7 ~ 7 573.3 kg·hm<sup>-2</sup> 范围之间,与不施肥对照相比,各施肥处理均提高了其地上部生物量.由图 1 可知,随着施 N 水平的增加,八宝景天地上部生物量呈增加趋势,其中以高 N 水平处理生物量最高,N3P3K1 和 N3P1K3 处理显著高于其他施肥处理,而 P、K 水平则对其生物量增加未表现出明显规律.



不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

图 1 不同施肥处理下八宝景天地上部生物量

Fig. 1 Shoot biomass of *H. spectabile* under different fertilizer treatments

### 2.2 养分调控对土壤 pH 和有效态 Cd 含量的影响

种植八宝景天后根际土壤 pH 及 DTPA 提取态 Cd 含量如图 2 所示.不同施肥处理下八宝景天根际土壤 pH 在 7.80 ~ 8.04 范围之间,土壤 DTPA 提取态 Cd 含量在 0.72 ~ 0.90 mg·kg<sup>-1</sup> 范围之间.各施肥处理间土壤 pH 和 DTPA 提取态 Cd 含量均未表现出显著差异.

### 2.3 养分调控对八宝景天 Cd 吸收的影响

不同 N、P、K 施肥量对比对八宝景天地上部 Cd 含量和生物富集系数(BCF)的影响如图 3 所示,不同施肥处理下八宝景天地上部 Cd 含量在 14.81 ~ 22.08 mg·kg<sup>-1</sup> 范围之间,各施肥处理间 Cd 含量无显著差异.N2P2K3 处理下八宝景天 BCF 最高,且显著高于 N1P1K1 处理.

### 2.4 八宝景天 Cd 提取量及 NPK 交互作用分析

不同 N、P、K 施肥量对比对八宝景天地上部 Cd 提取量的影响如图 4 所示,不同施肥量处理下八宝景天地上部 Cd 提取量在 42.3 ~ 136.6 g·hm<sup>-2</sup> 之

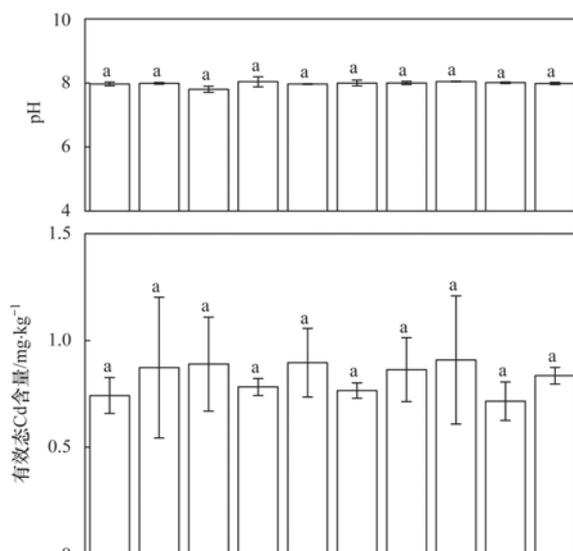


图 2 土壤 pH 及 DTPA 提取态 Cd 含量

Fig. 2 Soil pH and DTPA-extractable Cd concentrations

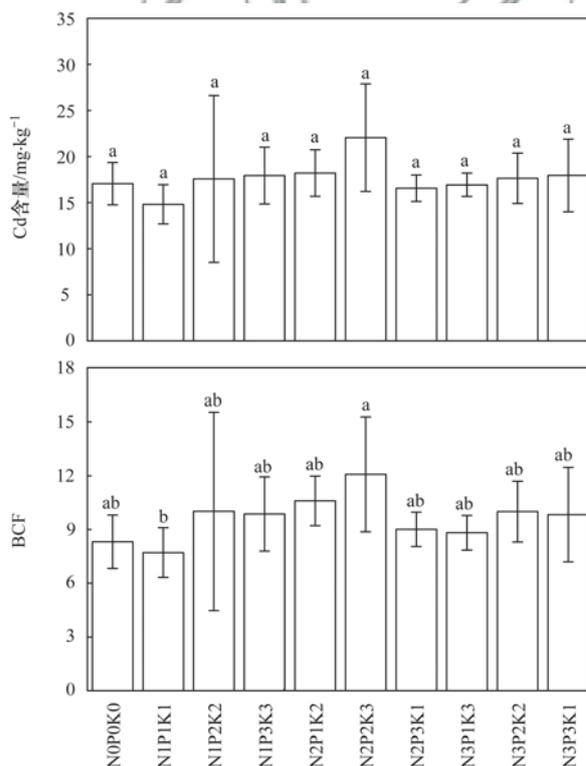


图 3 不同施肥处理下八宝景天地上部 Cd 含量及生物富集系数

Fig. 3 Shoot Cd concentrations and BCFs of *H. spectabile* under different fertilizer treatments

间.与不施肥对照相比,施肥均提高了八宝景天地上部 Cd 提取量,且不同施肥处理间差异显著,随着施 N 水平提高而呈增加趋势,其中 N3P3K1 和 N3P1K3 处理地上部 Cd 提取量最高,显著高于其他处理.

根据试验设计,对氮磷、磷钾和氮钾量因素间的交互作用进行了分析,分别将 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 施肥水平固定 337.5 kg·hm<sup>-2</sup>,根据试验结果运用插值

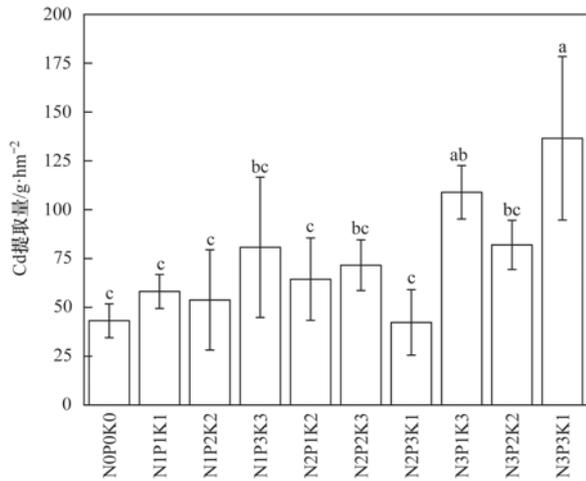


图4 不同施肥处理下八宝景天地上部 Cd 提取量

Fig. 4 Cd uptake in shoot of *H. spectabile* under different fertilizer treatments

法绘制另外两个因素对八宝景天 Cd 提取量的交互作用曲面图。由图 5 所示, 施 N 量固定的条件下, Cd 提取量随  $K_2O$  和  $P_2O_5$  的增加而提高, 且受  $P_2O_5$  的影响强于  $K_2O$ , P 和 K 间未表现出明显交互作用。施  $P_2O_5$  量固定时, Cd 提取量随施 N 水平提高而增加, 受  $K_2O$  影响较小, N 和 K 对 Cd 提取量存在较强的交互效应, 即两者配施对八宝景天 Cd 提取量的促进作用强于单一施肥。固定施  $K_2O$  水平下, Cd 提取量受  $P_2O_5$  的影响较小, 而随施 N 水平提高而增加, N 和 P 间未表现出明显交互效用。

### 2.5 不同施肥量对八宝景天 Cd 富集特征的极差分析

利用正交试验设计研究不同施肥量配比对八宝景天 Cd 提取量的影响, 通过极差分析法分析结果如表 1 所示, 肥料各因素对八宝景天生物量的影响为  $N > P > K$ , 对八宝景天地上部 Cd 含量的影响为  $K > P > N$ , 即施 N 水平对八宝景天生长影响最大, 而施 K 水平对八宝景天 Cd 吸收具有一定的影响。对八宝景天地上部 Cd 提取量而言, 肥料各因素的影响顺序依次为  $N > K > P$ , 可知提高八宝景天 Cd 提取量需首先考虑施 N 水平的影响, 其次为施 K 水平。

### 3 讨论

八宝景天是我国常见的园林花卉植物, 具有较强的 Cd 富集能力, 其耐寒、耐旱和耐高温等特性尤其适应于北方 Cd 污染农田的修复<sup>[16]</sup>。然而, 与适应于南方地区气候环境的镉超富集植物如东南景天和伴矿景天修复 Cd 污染土壤的效率相比, 在田间条件下利用八宝景天修复 Cd 污染农田时其 Cd 修复效率仍然较低, 因此, 需采取强化措施以提高其修复

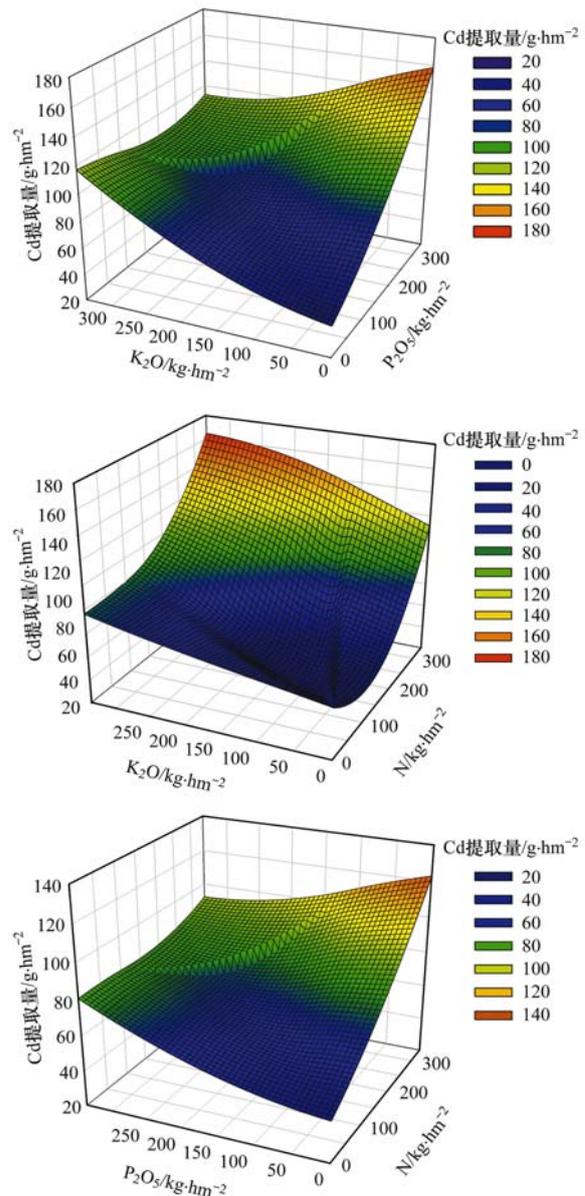


图5 氮、磷和钾肥对八宝景天 Cd 提取量的交互作用

Fig. 5 Interactions among N, P, and K treatments on Cd uptake of *H. spectabile*

效率<sup>[16]</sup>。合理的施肥可协调八宝景天对养分的需求和对 Cd 的吸收, 是提高八宝景天 Cd 修复效率的有效强化措施<sup>[20]</sup>。

本研究中, 氮磷钾施肥处理均促进了八宝景天地上部生物量的增加, 但不同 NPK 肥施用水平对其生物量增加的趋势不同, 氮素是影响植物生长最主要的营养元素, 八宝景天生物量的增加主要受施 N 水平的调控, 随着 N 肥施用量的增加而显著提高。不同学者通过试验分别研究了施 N 水平对东南景天和伴矿景天等超富集植物生长和 Cd 吸收的影响<sup>[12,21]</sup>, 结果与本研究结果一致, 在一定范围内随着供 N 水平的提高显著促进了东南景天和伴矿景天生长。磷肥在一定程度上提高了八宝景天生物量, 但不同施肥量之间差异不显著, 这与沈丽波等<sup>[12]</sup>通

表 1 不同施肥处理对八宝景天 Cd 富集特征影响的极差分析<sup>1)</sup>Table 1 Range analyses on the effect of different fertilizer treatments on Cd accumulation of *H. spectabile*

处理号	因素			生物量 /kg·hm <sup>-2</sup>	Cd 含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	Cd 提取量 /g·hm <sup>-2</sup>
	N	P	K			
N0P0K0	0	0	0	2 517	17.06	43.16
N1P1K1	1	1	1	3 925	14.81	58.16
N1P2K2	1	2	2	3 100	17.57	53.78
N1P3K3	1	3	3	4 375	17.94	80.75
N2P1K2	2	1	2	3 550	18.21	64.44
N2P2K3	2	2	3	3 317	22.05	71.56
N2P3K1	2	3	1	2 517	16.57	42.31
N3P1K3	3	1	3	6 427	16.93	108.94
N3P2K2	3	2	2	4 677	17.65	82.00
N3P3K1	3	3	1	7 573	17.95	136.55
生物量 /kg·hm <sup>-2</sup>	k <sub>1</sub>	3 800	4 634	4 672	N > P > K	
	k <sub>2</sub>	3 128	3 698	3 776		
	k <sub>3</sub>	6 226	4 827	4 706		
	R	3 098	1 124	931		
Cd 含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	k <sub>1</sub>	16.78	16.65	16.44	K > P > N	
	k <sub>2</sub>	18.94	19.09	17.81		
	k <sub>3</sub>	17.51	17.49	18.98		
	R	2.17	2.44	2.53		
Cd 提取量 /g·hm <sup>-2</sup>	k <sub>1</sub>	64.23	77.18	79.01	N > K > P	
	k <sub>2</sub>	59.44	69.11	66.74		
	k <sub>3</sub>	109.16	86.54	87.08		
	R	49.73	17.42	20.35		

1) k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub> 和 k<sub>3</sub> 分别指同一列因素第 1、2 和 3 施肥水平下对应的试验指标的平均值; R 为同一列因素各水平下试验指标平均值的极差

过盆栽试验研究 P 对伴矿景天生长和 Cd、Zn 积累的结果相似,这说明一方面本试验土壤中 P 元素养分较为丰富,另一方面在较低水平 P 肥添加条件下就已达到八宝景天最佳生长状况的 P 需求量,因而对其生长的影响较小. 钾肥对作物的增产作用一般弱于氮肥,高量 K 肥的施用不利于八宝景天地上部生物量的积累. 王林等<sup>[22]</sup>的研究发现高量 K 肥不利于龙葵生物量的增加. 窦春英<sup>[13]</sup>的研究也发现高水平 K 肥显著抑制东南景天地上部生长.

土壤中有效态重金属含量是影响植物吸收重金属的重要因素,在土壤中能影响重金属有效性的因素很多,土壤 pH 是其主要影响因素<sup>[23,24]</sup>. 众多研究表明,肥料施入土壤后,还可改变土壤 pH 等理化性质,从而影响重金属在土壤中的吸附-解吸、沉淀-溶解平衡,从而对土壤中 Cd 生物有效性产生影响<sup>[25,26]</sup>. 不同肥料和施肥水平,对根际土壤环境酸化的影响程度不同,对土壤中重金属的生物有效性的影响也不同. 李志贤等<sup>[27]</sup>的研究表明,随着尿素施用量增加,土壤 pH 显著降低, Cd 有效性显著提高. 本研究中各施肥处理对土壤 pH 和 DTPA 提取态 Cd 含量均无显著影响,其原因可能与尿素在土壤中的化学行为有关. 尿素施入土壤后首先水解为碳酸铵并进一步转化为碳酸氢铵和氢氧化铵,这一过程导致土壤 pH 快速上升,在随后的培养过程中,

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 不断氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 并释放出 H<sup>+</sup>,这一过程中土壤 pH 持续下降<sup>[28]</sup>. 由于本研究供试土壤为中性偏碱性(pH 7.7),对肥料酸化土壤具有较强的缓冲能力,同时土壤样品采集时期为八宝景天收获期,随着种植时期的延长,由于土壤的缓冲能力和作物对 N 素的吸收,导致土壤中 pH 未表现出明显变化. 此外,NPK 配施条件下过磷酸钙和氯化钾带入的 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 导致土壤盐基饱和度提高,从而导致土壤 pH 提高,以此缓冲尿素导致的土壤 pH 降低效果也可能是各施肥处理下土壤 pH 无显著差异的一方面原因<sup>[10]</sup>. 土壤 pH 与重金属有效性具有极显著相关性,pH 降低 0.5 个单位,土壤 Cd 有效性提高一倍<sup>[24]</sup>,本课题组前期通过盆栽试验研究施肥对八宝景天生长和 Cd 吸收的影响,结果表明 NPK 肥配施可显著提高土壤有效态 Cd 含量,尤其是 KCl 的施入,一方面 K<sup>+</sup> 通过交换作用将 Cd 从土壤表面释放出来,另一方面 Cl<sup>-</sup> 可与 Cd<sup>2+</sup> 形成 CdCl<sup>+</sup>、CdCl<sub>0</sub><sup>0</sup>、CdCl<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CdCl<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等可溶性络合物,降低土壤对 Cd 的吸附,提高其有效性<sup>[13,14,16,22]</sup>. 而本试验中不同 NPK 施肥水平均未对土壤 Cd 有效态产生显著影响,这可能是由于本试验条件为田间试验,土壤缓冲能力较强且土壤本身有效态 Cd 含量较高(0.84 mg·kg<sup>-1</sup>).

本研究中,八宝景天地上部 Cd 含量在不同施

肥量配比下均没有表现出显著影响,其原因可能是施肥水平的提高对八宝景天地上部生物量的提高作用更为显著,从而引起了稀释效应<sup>[16,29]</sup>,另一方面本研究供试土壤有效态 Cd 含量较高,因而投加肥料对其促进 Cd 吸收的效果较为有限.施 N 是提高八宝景天生物量的主控因素,有研究表明,随着施 N 水平的提高,伴矿景天地上部生物量增大引起稀释效应,导致其 Cd 含量显著下降<sup>[12,29]</sup>.一般研究认为由于  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Cd}^{2+}$  具有类似的核外电子构型和离子半径,施用过磷酸钙会导致超富集植物竞争吸收  $\text{Ca}^{2+}$ ,从而降低 Cd 的吸收和转运<sup>[10]</sup>.而本研究通过前期研究不同磷肥(过磷酸钙和磷酸二氢铵)对八宝景天 Cd 富集的影响发现,两种磷肥对八宝景天 Cd 吸收并无显著影响,而过磷酸钙在促进八宝景天生长上较为明显<sup>[16]</sup>.此外,过磷酸钙符合当地施肥习惯,便于田间推广应用<sup>[18,19]</sup>.本研究中不同过磷酸钙施肥量对八宝景天 Cd 吸收并未表现出明显的抑制作用,其原因可能是供试土壤为褐土,土壤中本身  $\text{Ca}^{2+}$  含量较为丰富,因而磷肥的施入对植物 Cd 吸收的影响有限.不同施肥处理对八宝景天地上部 Cd 含量的极差分析结果表明,K 肥对促进八宝景天 Cd 吸收具有一定的促进作用,而 N、P 肥作用较小.众多研究表明,施用 N 肥可通过两个方面促进植物 Cd 吸收,一方面为  $\text{NH}_4^+$  经硝化作用短时间内降低土壤 pH,另一方面则是植物吸收  $\text{NH}_4^+$  同时释放  $\text{H}^+$ ,其本质均在于降低根际土壤 pH<sup>[30]</sup>,而本研究在田间条件下开展,不同施 N 水平均未对土壤 pH 产生显著影响,因此对八宝景天 Cd 吸收影响较小.而八宝景天地上部 Cd 含量随施 K 水平的上升而呈增加的趋势,这在一定程度上弥补了由于施 N 引起稀释效率导致的地上部 Cd 含量下降.

综合分析不同肥料配施对植物生长和吸收积累 Cd 的影响发现,达到 N、P、K 养分之间的平衡是实现提高植物 Cd 修复效率的重要途径.许多研究结果表明,随着外源 P 的升高,植物根系和地上部 Zn、Cd 吸收量呈先升高后降低的趋势<sup>[31]</sup>;K 肥对植物的增产作用低于 N、P,施用 K 肥强化植物修复主要是基于 K 离子及其伴随离子对土壤重金属元素的交互作用,过量 K 肥会抑制东南景天生长,而低 N 高 K 则不利于伴矿景天对 Cd 的吸收<sup>[13,22]</sup>.本研究中施 N 虽显著增加了八宝景天地上部生物量,但未对八宝景天 Cd 吸收起到促进作用,而施 K 有助于促进八宝景天 Cd 吸收,N、K 表现出明显的协同作用.极差分析结果可知,在田间试验条件下,不同施肥量配比对八宝景天地上部 Cd 富集量的影响同其生物量的变化相关性较强,而受其地上部 Cd 含量

影响较小,主要受施 N 水平调控,施用高量 N 肥可获得较高生物量,K 肥对促进八宝景天吸收 Cd 具有一定效果,而 P 肥施用主要为补充土壤 P 素损失<sup>[20,32]</sup>.因此,高量施 N 配施一定量 P、K 肥是促进八宝景天 Cd 修复效率的最佳施肥用量与配比,其修复效率较不施肥处理提高了 0.9~2.2 倍.但沈丽波等<sup>[12]</sup>通过盆栽试验研究了施肥对伴矿景天生长和 Cd 吸收的影响,结果发现,增施钾肥配施低量 N、P 对促进伴矿景天 Cd、Zn 积累量效果最佳,其结果可能是不同试验条件、植物种类等因素导致结果差异.综上所述,可知在强化植物修复 Cd 污染土壤的过程中,不能简单将适用于一种富集植物或一种污染土壤的强化措施推广到其他植物和污染土壤,必须开展相应地模拟和田间试验来验证其强化效果并进一步优化施肥种类和配比,以使其强化植物修复效果最大化<sup>[33]</sup>.

#### 4 结论

田间条件下,本研究发现不同 N、P、K 施肥量配比对八宝景天 Cd 修复效率有显著影响.施用 N 肥是八宝景天地上部生物量增加的主控因素,且随施 N 水平的提高而提高,但对地上部 Cd 含量的无显著影响.施用 K 肥对八宝景天 Cd 吸收具有一定的促进作用,且 N、K 肥对八宝景天 Cd 积累具有明显的交互作用.P 肥主要为补充植物修复过程中土壤 P 素的损失,不同施 P 水平对八宝景天生长和 Cd 吸收无显著影响.综合分析,高量 N 肥配施适量 P、K 肥是强化八宝景天修复 Cd 污染土壤的最佳施肥措施,其地上部 Cd 积累量可提高 0.9~2.2 倍.因此,施肥对八宝景天生物量的促进作用是其强化 Cd 修复效率的主要因素,合理的肥料养分施用量和配比是强化八宝景天修复 Cd 污染土壤的有力保障.

#### 参考文献:

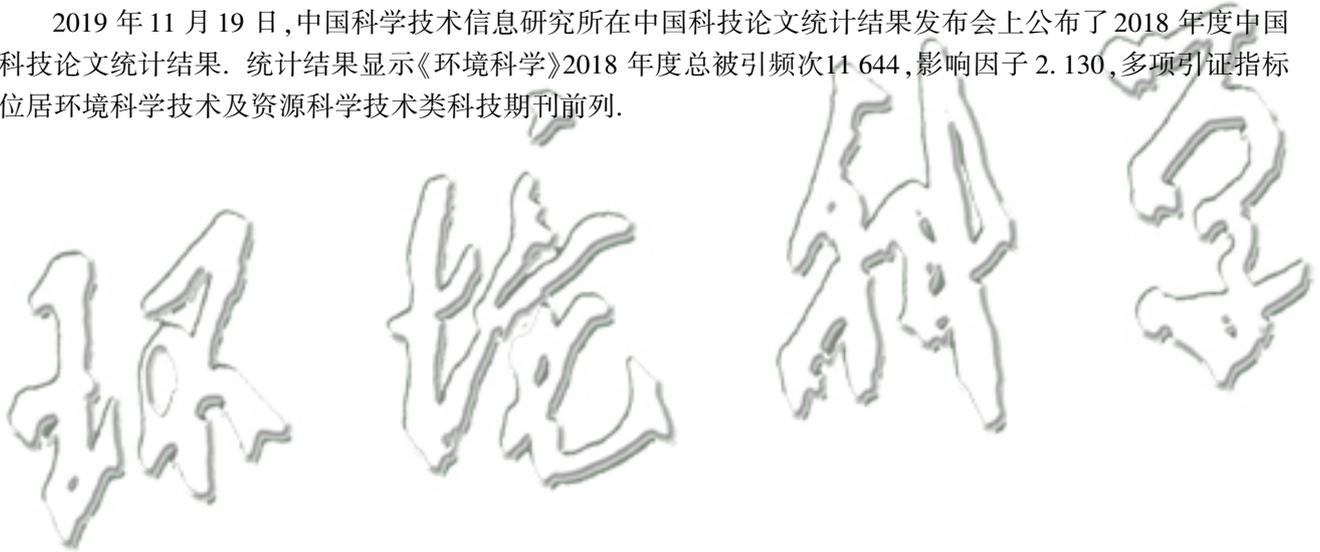
- [1] Li Z, Wu L H, Luo Y M, *et al.* Changes in metal mobility assessed by EDTA kinetic extraction in three polluted soils after repeated phytoremediation using a cadmium/zinc hyperaccumulator[J]. *Chemosphere*, 2018, **194**: 432-440.
- [2] 陈同斌, 雷梅, 杨军, 等. 关于重金属污染土壤风险控制区划的研究与建议[J]. *中国科学院院刊*, 2014, **29**(3): 321-326.
- [3] Chen T B, Lei M, Yang J, *et al.* Discussion on zoning of soil environmental risk control and remediation contaminated by heavy metals on regional scale[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2014, **29**(3): 321-326.
- [4] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 145-152.
- [5] Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 145-152.

- [ 4 ] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [ EB/OL ]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm), 2014-04-17.
- [ 5 ] Huang Y F, Chen G F, Xiong L M, *et al.* Current situation of heavy metal pollution in farmland soil and phytoremediation application[J]. *Asian Agricultural Research*, 2016, **8**(1): 22-24.
- [ 6 ] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications [ J ]. *Chemosphere*, 2013, **91** ( 7 ): 869-881.
- [ 7 ] Padmavathamma P K, Li L Y. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants [ J ]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, **184**(1-4): 105-126.
- [ 8 ] Hsu S H, Wang S L, Huang J H, *et al.* Effects of rice straw ash amendment on Cd solubility and distribution in a contaminated paddy soil under submergence [ J ]. *Paddy and Water Environment*, 2015, **13**(1): 135-143.
- [ 9 ] 王庆海, 却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术 [ J ]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(2): 261-266.  
Wang Q H, Que X E. Phytoremediation—a green approach to environmental clean-up [ J ]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(2): 261-266.
- [ 10 ] 徐明岗, 曾希柏, 周世伟. 施肥与土壤重金属污染修复 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [ 11 ] 韩月. 设施条件下不同施肥对土壤中镉的生物效性的影响 [ D ]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.  
Han Y. Effect of different fertilization on the bio-availability of Cd in soil with facility [ D ]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2006.
- [ 12 ] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及镉吸收性的影响 [ J ]. *土壤*, 2011, **43**(2): 221-225.  
Shen L B, Wu L H, Han X R, *et al.* Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [ J ]. *Soils*, 2011, **43**(2): 221-225.
- [ 13 ] 窦春英. 施肥对东南景天吸收积累镉和铜的影响 [ D ]. 杭州: 浙江林学院, 2009.  
Dou C Y. Effect of fertilizer application on soil heavy metal phytoremediation by *Sedum alfredii* Hance [ D ]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2009.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Zhou G D, Guo J M, Yang J, *et al.* Effect of fertilizers on Cd accumulation and subcellular distribution of two cosmos species (*Cosmos sulphureus* and *Cosmos bipinnata*) [ J ]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, **20**(9): 930-938.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Guo J M, Yang J, Yang J X, *et al.* Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of four *Hylotelephium spectabile* populations exhibit differences in phytoextraction potential [ J ]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, **21**(3): 209-216.
- [ 18 ] 王佃梅. 河南省济源市小麦施肥技术参数与指标体系的研究 [ J ]. *现代农村科技*, 2016, (16): 48-50.
- [ 19 ] 孔涛, 潘进军, 张海珍. 小麦氮肥定位减量施肥试验研究初探 [ J ]. *河南农业*, 2017, (34): 24.
- [ 20 ] Fayiga A O, Ma L Q, Rathinasabapathi B. Effects of nutrients on arsenic accumulation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [ J ]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **62**(3): 231-237.
- [ 21 ] 李继光, 李廷强, 朱恩, 等. 氮对超积累植物东南景天生长和镉积累的影响 [ J ]. *水土保持学报*, 2007, **21**(1): 54-58.  
Li J G, Li T Q, Zhu E, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on growth and cadmium accumulation in hyperaccumulator of *Sedum alfredii* Hance [ J ]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(1): 54-58.
- [ 22 ] 王林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤 [ J ]. *中国环境科学*, 2008, **28**(10): 915-920.  
Wang L, Zhou Q X, Sun Y B. Intensification of *Solarium nigrum* L. remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fertilizers [ J ]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(10): 915-920.
- [ 23 ] 贺京哲, 孙慧敏, 姜延吉, 等. 不同种类化肥对壤土吸附解吸铅、镉行为的影响 [ J ]. *干旱地区农业研究*, 2016, **34**(4): 146-152.  
He J Z, Sun H M, Jiang Y J, *et al.* Effects of different type fertilizers on the adsorption and desorption of heavy metals in the loess soil [ J ]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, **34**(4): 146-152.
- [ 24 ] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China [ J ]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **108**(1): 27-38.
- [ 25 ] 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 H M, 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.
- [ 26 ] Menon M, Hermle S, Günthardt-Goerg M S, *et al.* Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem [ J ]. *Plant and Soil*, 2007, **297**(1-2): 171-183.
- [ 27 ] 李志贤, 向言词, 李会东, 等. 施氮水平对玉米吸收和富集重金属 Cd、Pb 的影响 [ J ]. *水土保持学报*, 2014, **28**(6): 143-147, 166.  
Li Z X, Xiang Y C, Li H D, *et al.* Effects of nitrogen application levels on Cd, Pb uptake and accumulation by maize [ J ]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(6): 143-147, 166.
- [ 28 ] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响 [ J ]. *土壤学报*, 2010, **47**(5): 953-961.  
Zhao J, Feng W Q, Qin Y S, *et al.* Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability [ J ]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(5): 953-961.
- [ 29 ] Wu L H, Luo Y M, Christie P, *et al.* Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil [ J ]. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 819-822.
- [ 30 ] Chen Y H, Liu M J, Deng Y W, *et al.* Comparison of ammonium fertilizers, EDTA, and NTA on enhancing the uptake of cadmium by an energy plant, Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schumacher) [ J ]. *Journal of Soils and Sediments*,

- 2017, **17**(12): 2786-2796.
- [31] 黄德明, 徐秋明, 李亚星, 等. 土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(5): 966-970.  
Huang D M, Xu Q M, Li Y X, *et al.* Influence of soil N and P excess on the availability of Zn, Mn, Fe, Cu and their content in plant[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, **13**(5): 966-970.
- [32] Macted A P, Black C R, West H M, *et al.* Phytoextraction of cadmium and zinc from arable soils amended with sewage sludge using *Thlaspi caerulescens*: development of a predictive model [J]. Environmental Pollution, 2007, **150**(3): 363-372.
- [33] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, *et al.* Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*[J]. Environmental Pollution, 2006, **141**(1): 115-125.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2019年11月19日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2018年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2018年度总被引频次11 644,影响因子2.130,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



## CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020 .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Based on the MARGA .....	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Suqian City .....	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu .....	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan .....	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM <sub>2.5</sub> in Winter of Xi'an .....	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta .....	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City .....	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area .....	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer .....	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction .....	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province .....	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas .....	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City .....	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin .....	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area .....	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin .....	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River .....	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017 .....	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure .....	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir .....	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks .....	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water .....	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir .....	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources .....	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion .....	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer .....	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City .....	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism .....	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation .....	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater .....	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process .....	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature .....	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District .....	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example .....	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China .....	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province .....	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress .....	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi .....	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil .....	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources .....	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields .....	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River .....	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau .....	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland .....	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content .....	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou .....	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism .....	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil .....	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)