

镉胁迫下富铁有机肥对芒草生长及镉富集的影响

陈粮, 向莎, 丁曼琳, 马晶晶, 王影, 姜利红, 肖云花

引用本文:

陈粮, 向莎, 丁曼琳, 马晶晶, 王影, 姜利红, 肖云花. 镉胁迫下富铁有机肥对芒草生长及镉富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 323–330.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0312>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

易降解有机物及其施加方式对高粱吸收镉的影响

段明梦, 王帅, 黄道友, 许超, 王辉, 李佰重, 龙世方, 朱奇宏

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1000–1007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1116>

生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响

文炯, 李祖胜, 许望龙, 陈鸽, 白玲玉, 曾希柏, 吴家梅

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2496–2502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0419>

土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究

何赢, 杜平, 石静, 秦晓鹏, 徐刚, 吴明红

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1734–1740 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1423>

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143–2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762–2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈粮, 向莎, 丁曼琳, 等. 镉胁迫下富铁有机肥对芒草生长及镉富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 323-330.

CHEN L, XIANG S, DING M L, et al. Effects of iron-rich organic fertilizer on the growth and cadmium accumulation of *Miscanthus sinensis* Anderss under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 323-330.



开放科学 OSID

镉胁迫下富铁有机肥对芒草生长及镉富集的影响

陈粮, 向莎, 丁曼琳, 马晶晶, 王影, 姜利红*, 肖云花*

(湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要:为了探究镉胁迫下富铁有机肥对芒草生长及镉富集的影响,通过盆栽试验,设置CK(不施肥)、ZCK(施加普通有机肥)和Z2、Z3(施加不同浓度富铁有机肥)处理。结果表明:与CK相比,所有施肥处理均促进了芒草生长,改善了土壤理化性质,抑制了芒草富集重金属,且其中Z2、Z3比ZCK对芒草生长的效果更好。相对于ZCK,Z3的芒草干质量显著增加了131.80%,Z2的芒草根长显著增加了54.22%。此外,Z2地上部的镉含量相比于ZCK显著降低了49.86%,Z3地下部的镉含量相比于CK显著降低了58.94%。研究表明,施加富铁有机肥相对于普通有机肥更能有效促进芒草生长并抑制芒草对镉的富集,该肥料具有对轻度镉污染土壤进行边修复边生产的应用潜力。

关键词:硫酸亚铁;富铁有机肥;芒草;镉胁迫

中图分类号:X173;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0323-08 doi:10.11654/jaes.2023-0312

Effects of iron-rich organic fertilizer on the growth and cadmium accumulation of *Miscanthus sinensis* Anderss under cadmium stress

CHEN Liang, XIANG Sha, DING Manlin, MA Jingjing, WANG Ying, JIANG Lihong*, XIAO Yunhua*

(College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of iron-rich organic fertilizer on the growth and cadmium accumulation of *Miscanthus sinensis* Anderss under cadmium stress. Pot experiments were conducted to set up CK (no fertilization), ZCK (regular organic fertilizer), and Z2 and Z3 (application of different concentrations of iron-rich organic fertilizer) treatments. The results showed that, compared with CK, the application of the organic fertilizer treatment promoted the growth of *Miscanthus sinensis*, improved the soil physicochemical properties, and inhibited the absorption of heavy metals by *Miscanthus sinensis*. At the same time, Z2 and Z3 had a better effect on *Miscanthus sinensis* growth than ZCK. Compared to ZCK, the dry weight of Z3 significantly increased by 131.80%, and the root length of Z2 significantly increased by 54.22%. In addition, the cadmium content in the aboveground portion of Z2 significantly decreased by 49.86%, and the underground portion of Z3 significantly decreased by 58.94% compared to ZCK. In summary, applying iron-rich organic fertilizer is more effective in promoting the growth of *Miscanthus sinensis* and inhibiting its absorption of cadmium compared to regular organic fertilizer. This fertilizer has the potential to be used for both the remediation and production of lightly cadmium-contaminated soil.

Keywords: ferrous sulfate; iron-rich organic fertilizer; *Miscanthus sinensis*; cadmium stress

收稿日期:2023-04-20 录用日期:2023-08-03

作者简介:陈粮,男,湖南浏阳人,硕士研究生,主要从事环境生物学研究。E-mail:cl907180157@163.com。

向莎与陈粮同等贡献。

*通信作者:肖云花 E-mail:huazipiaoling.123@163.com; 姜利红 E-mail:jlh_8241@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41807135);湖南省教育厅科学研究项目(21A0142, 18B107, 20A233);国家大学生创新创业训练项目(S202210537012)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(41807135); Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China (21A0142, 18B107, 20A233); National College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program(S202210537012)

随着矿区的不断开采,重金属在土壤胶质颗粒的吸附下不断积累,农业生态环境受到了严重威胁^[1]。据2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤点位超标率为19.4%,镉、砷、铅等重金属为主要污染物,湖南地区以镉污染问题最为突出^[2]。镉是植物生长发育过程中一种非必需元素,植物吸收镉会影响抗氧化酶活性、改变细胞膜通透性、损伤细胞器、抑制生长等^[3-4]。镉也是一种高度致癌金属,可通过食物链积累严重影响人类身体健康^[5]。因此,加强对重金属污染土壤的修复迫在眉睫。目前,常见的土壤重金属修复方法有植物修复法、生物还原法、电动力学法、洗涤法等,但这些方法存在耗时长或成本高的缺点^[6]。我国人均耕地少,农田备用资源不足,因此不宜进行长时间的土壤修复而不生产粮食,也不适宜广泛使用价格昂贵的物理化学修复方法。近年来使用有机肥修复土壤重金属的技术逐渐成为研究热点^[7-8]。

有机肥是一种以天然有机物质为原料,通过堆肥、发酵或其他特定处理方式制成的肥料^[9]。与化肥相比,它具有增加土壤肥力、提高土壤质量、减少环境污染等优势^[10]。有机肥中的有机酸和腐殖质可以与重金属形成络合物,减少重金属对植物的吸收和毒害作用^[11]。同时,有机肥可以通过改善土壤结构和提高土壤活性,从而减少重金属的有效性^[12]。目前,有机肥的组成元素依然是以氮、磷、钾为主,以其他微量元素为主的有机肥研究较少。但微量元素对作物及土壤理化性质的影响也十分重要。例如铁离子可以影响植物细胞的光合作用、呼吸作用和活性氧的清除^[13]。铁元素可以与重金属形成稳定的络合物,减少重金属的可溶性和生物有效性^[14]。富铁有机肥在修复土壤重金属污染方面或许具有巨大的应用潜力,但目前相关的研究较少。

芒草是一类常见的多年生禾本科植物,通常具有高度的抗逆性,能够在多种土壤类型下生长^[15-16]。由于耐受性和适应性,芒草现已被广泛用作饲料植物、土壤保持植物和观赏植物。此外,芒草还可以用作能源作物,可被作为生物质原料用于生产生物燃料或生物质颗粒^[17],是近年来农业领域中备受关注的植物之一。

本研究采用添加硫酸亚铁的富铁有机肥,以能源植物芒草为研究对象,探究富铁有机肥对植物生长的影响,评估富铁有机肥的肥效价值,同时探究富铁有机肥对土壤镉形态及芒草镉富集的影响,研究其在土壤修复中的应用价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物:芒草种子来自于湖南农业大学芒草联合实验室。

供试土样:土样采自湘西花垣县铅锌矿区周边废弃的农用耕地,根据GB 15618—2018测定土样重金属,发现镉含量达到污染风险管制值。

供试有机肥:普通有机肥由猪粪和秸秆外堆置2个月完成,富铁有机肥由猪粪和秸秆外加七水硫酸亚铁堆置2个月完成。土壤样品理化性质如表1所示。

表1 土壤样品和有机肥的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples and organic fertilizers

参数 Parameter	土样 Soil	有机肥 Organic fertilizer		
		ZCK	Z2	Z3
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.09	22.87	20.53	14.93
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.59	11.87	8.80	6.47
全钾/(g·kg ⁻¹)	14.61	10.11	8.38	8.08
碱解氮/(g·kg ⁻¹)	0.12	0.41	0.29	0.32
速效磷/(g·kg ⁻¹)	0.01	2.08	3.27	2.45
速效钾/(g·kg ⁻¹)	0.33	2.45	2.38	2.02
有机质/%	6.09	50.98	38.47	44.25
pH	6.04	8.30	7.64	7.13
铁含量/(g·kg ⁻¹)	20.54	4.80	15.32	28.73
镉含量/(mg·kg ⁻¹)	11.70	0.75	0.74	0.74

1.2 盆栽试验

试验设置4个施肥处理,每个处理设置3个平行。CK为阴性对照组(不施肥);ZCK为阳性对照组(施加普通有机肥);Z2、Z3为试验组(施加富铁有机肥),分别外加1%和2%的七水硫酸亚铁。有机肥的理化性质见表1。

将风干后的土样与肥样过100目筛后按比例(50:1)进行均匀混合,每个盆中装入800g混合土样。芒草种子经过3d低温春化后于温室下(23℃)播种,每个盆中种植3株,每隔2d观察其生长状况并定量浇水,在第90天收获。

1.3 指标测定

1.3.1 芒草生理指标测定

芒草种植90d后收获,收获前,用叶绿素仪(JC-YLS01)测定叶绿素含量。收获后将芒草洗净,吸干水分后用分析天平测定鲜质量,用卷尺测定芒草的株高和根长,再将芒草置于105℃烘箱杀青30min

后,调至60℃烘干至恒质量,测定芒草干质量并计算含水量。

1.3.2 芒草重金属镉含量测定

将烘干的芒草分为地上部和地下部,分别研磨后过100目筛。称取0.2g样品采用王水-高氯酸消煮法^[18]进行消煮,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP-7200,赛默飞,英国)分别测定芒草地上部和地下部的镉含量。

1.3.3 土壤理化指标测定

取根际土壤样品,于40℃持续烘干至恒质量,随后研磨过100目筛。土壤pH值的测定按照国家标准HJ 962—2018。土壤全氮和水解性氮(碱解氮)的测定方法按照国家标准LY/T 1228—2015。土壤全钾和速效钾的测定方法按照国家标准LY/T 1234—2015。土壤全磷测定采用HClO₄-H₂SO₄法^[19]。土壤有机质、速效磷的测定方法分别按照国家标准NY/T 1121.6—2006和NY/T 1121.7—2014。

1.3.4 土壤重金属镉总量及镉形态测定

总量测定^[20]:取研磨后的土样0.5g,加入8mL王水(HNO₃:HCl=1:3),加弯颈漏斗于电热板80℃加热1h,再升温至150℃加热1h,降温冷却后加入2mL高氯酸,升温至190℃持续2h,再升温至220℃,去漏斗,消解至白色粉末,上清液澄清透明,过滤定容后即可使用ICAP-7200进行镉含量测定。

镉形态测定:取磨后的土样1.0g,采用BCR连续提取法提取土壤中的4种镉形态^[21],使用ICAP-7200进行镉含量测定。

1.4 数据分析

生物富集系数(Biological concentration factor, BCF)和转移系数(Transfer factor, TF)是衡量植物对重金属的富集能力和植物体内转运重金属能力强弱的标准。

生物富集系数为植物体内重金属含量与植物所在土壤环境的重金属含量之比。

转移系数为植物地上部重金属含量与植物地下部重金属含量之比。

原始数据处理和计算使用Excel完成,显著性差异分析使用IBM SPSS Statistics 26和Minitab 16完成,相关性分析在网站(<https://www.cloudtutu.com>)完成,绘图由Graph prism pad 8.0和Origin 64完成。

2 结果与分析

2.1 富铁有机肥对芒草生长的影响

第90天,各处理中的芒草生长情况如图1所示。

与CK相比,各施肥处理组的芒草生长情况较好,eg施肥处理之间差异不大(图1a)。通过对芒草生长指标的进一步测定,结果发现施加富铁有机肥可以显著提升芒草的鲜质量和干质量。CK的鲜质量为1.06g·株⁻¹,而ZCK、Z2、Z3分别为2.32、2.71、2.97g·株⁻¹,相对于CK分别显著提升了118.87%、155.66%、180.19%(图1b)。CK和ZCK的干质量分别为0.21g·株⁻¹和0.52g·株⁻¹,而Z3的干质量达到1.02g·株⁻¹,相对于CK和ZCK显著提升了385.72%和96.15%(图1c)。对于芒草生物量的提升,Z3效果最好。Z3的含水率仅为68.87%,显著低于CK的81.53%和ZCK的79.53%(图1d),有利于降低其蒸腾作用并提高其抗逆性^[22]。对于芒草株高和根长的提升,Z2效果最佳,其株高和根长分别为89.75、24.04cm,相比于CK(48.87、14.28cm)分别显著提升了83.65%、68.35%(图1e、图1f)。对于叶绿素,Z2和Z3相比于CK均显著提高,分别达到了11.05、11.77spad(图1g),有利于促进芒草生长。

2.2 富铁有机肥对芒草富集重金属镉的影响

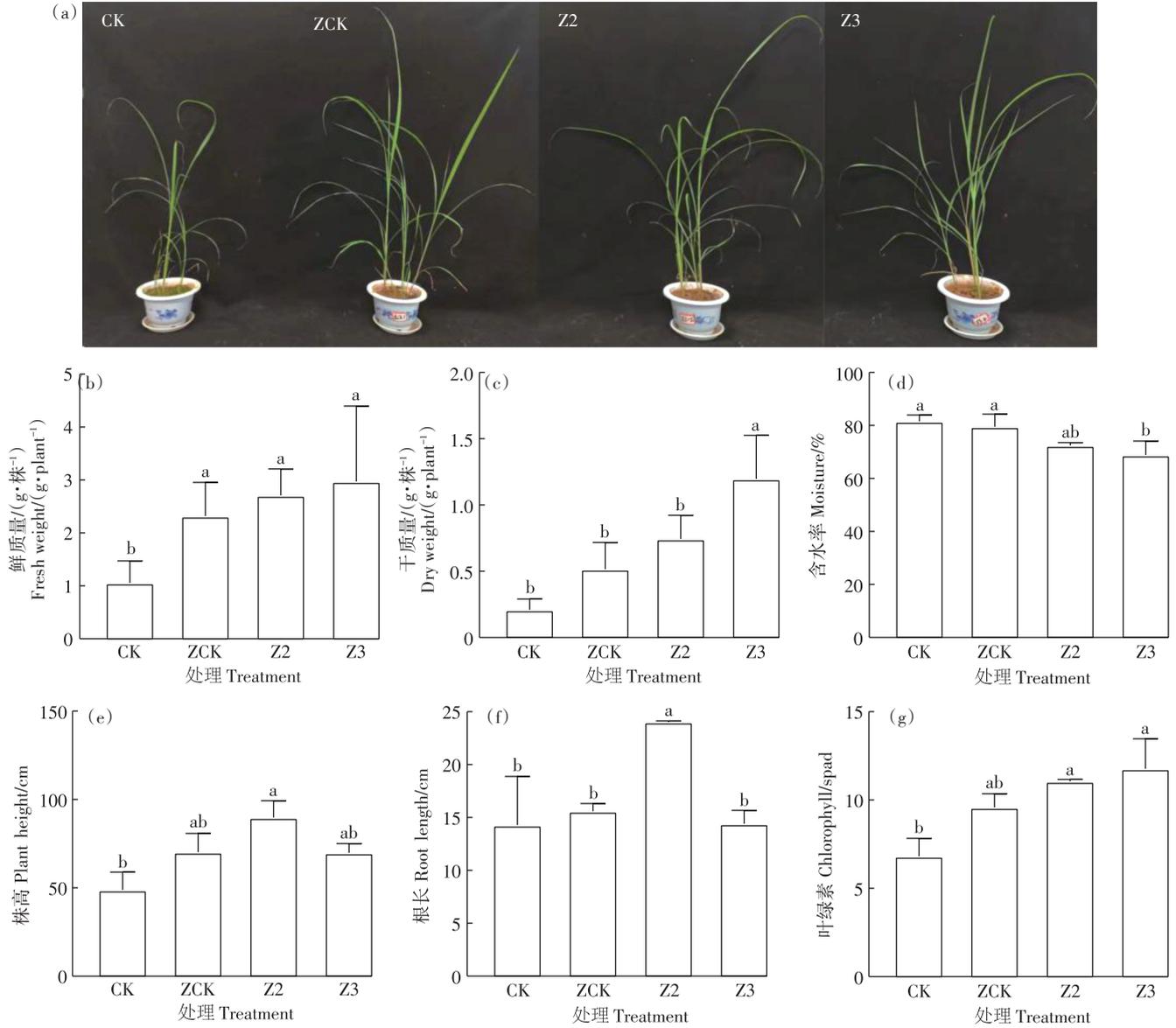
芒草的镉含量如图2所示。其中,4个处理中芒草总镉富集量无显著差异,分别为0.0032、0.0030、0.0024、0.0030mg·株⁻¹。与CK(3.73mg·kg⁻¹)和ZCK(3.67mg·kg⁻¹)相比,Z2地上部的镉含量为1.84mg·kg⁻¹,显著降低了50.67%和49.86%。与CK(32.93mg·kg⁻¹)和ZCK(19.25mg·kg⁻¹)相比,Z3地下部的镉含量为7.90mg·kg⁻¹,显著降低了76.00%和58.94%。与ZCK相比,Z2主要抑制芒草地上部富集镉,Z3主要抑制芒草地下部富集镉。

2.3 富铁有机肥对土壤理化性质的影响

芒草收获时的土壤理化性质如图3所示,与CK相比,施肥处理的全氮、全磷、碱解氮、速效钾和有机质都有所增加。与ZCK相比,Z2的全氮和碱解氮分别达到3.63g·kg⁻¹和76.96mg·kg⁻¹,显著提升了111.04%、29.61%。Z3的碱解氮达到90.73mg·kg⁻¹,显著提升了52.80%。与ZCK相比,Z2的速效钾,Z2、Z3的pH都显著降低,而全钾各处理间则无显著差异。结果表明,富铁有机肥进一步提升了氮和有机质含量,降低了pH。

2.4 富铁有机肥对土壤镉及其形态的影响

如图4a所示,与CK相比,施肥处理土壤总镉含量无显著差异。土壤镉形态的变化主要集中在酸可提取态与可氧化态(图4b)。与CK相比,ZCK的酸可提取态占比降低,Z2、Z3的占比增加。各施肥处理的可氧化态占比均增加。与ZCK相比,富铁有机肥主



不同的小写字母代表处理间存在显著差异($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters represent significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同处理下芒草的生长指标

Figure 1 Growth indicators of *Miscanthus sinensis* Anderss under different treatments

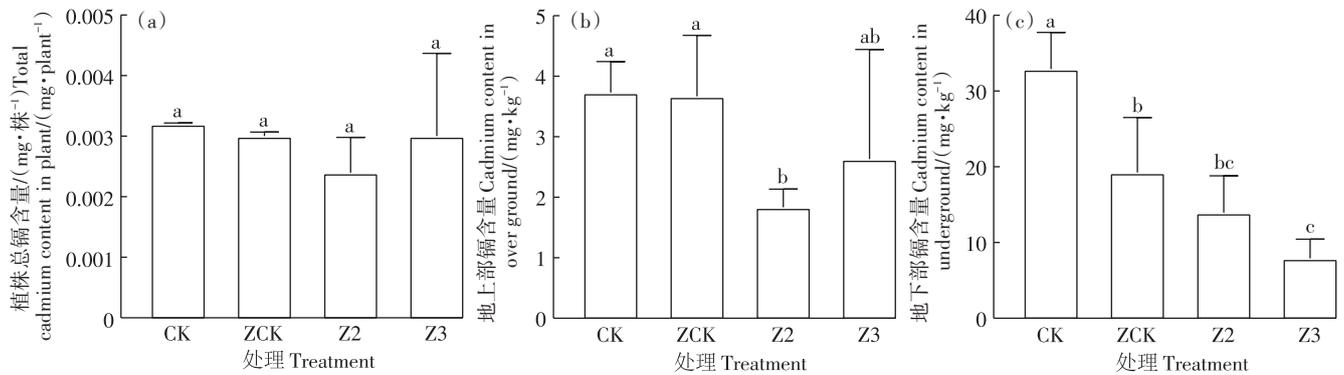


图2 不同处理下芒草各部分的镉含量

Figure 2 Cadmium content in various parts of *Miscanthus sinensis* Anderss under different treatments

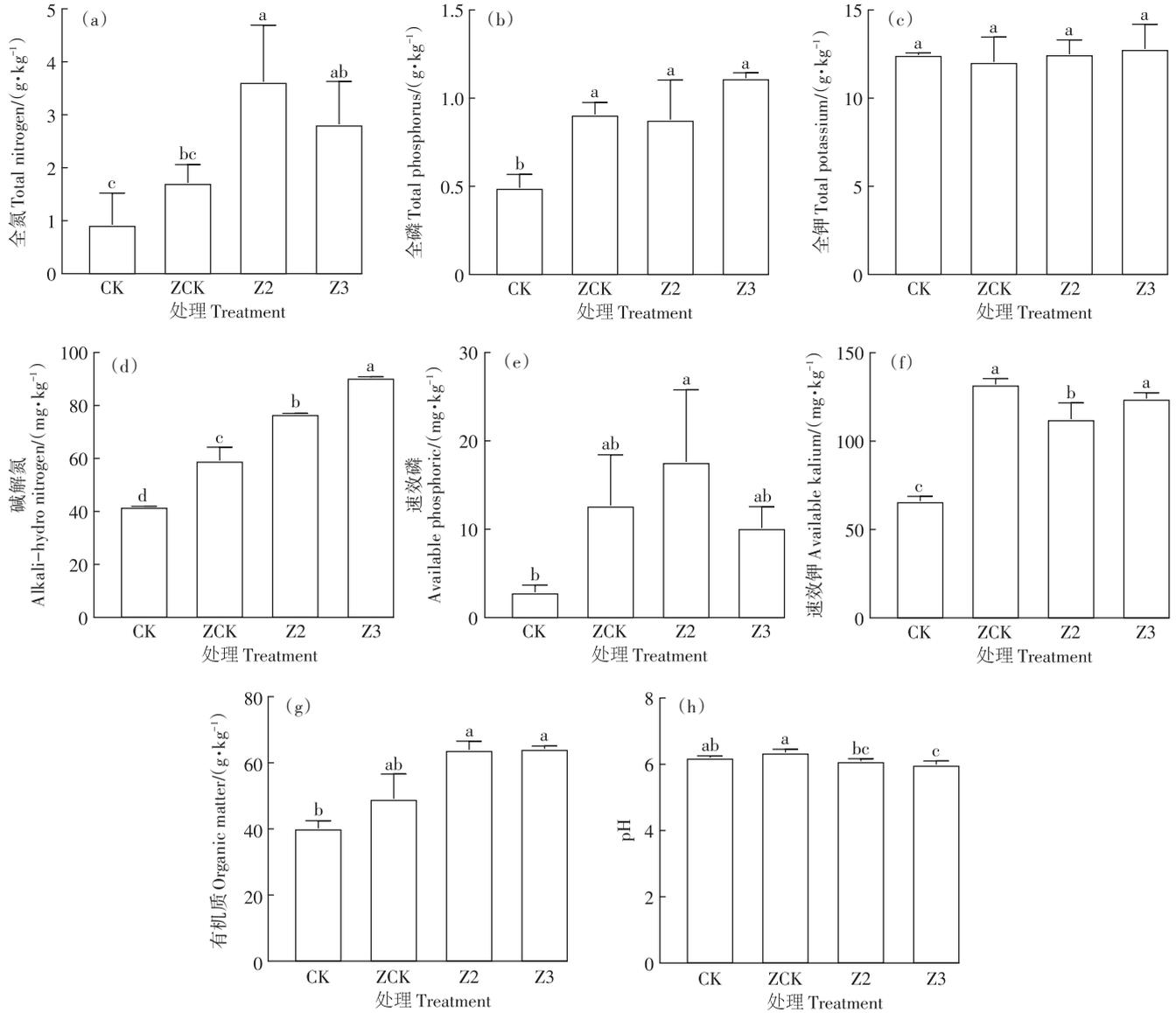


图3 土壤理化性质指标

Figure 3 The soil physicochemical properties indicators

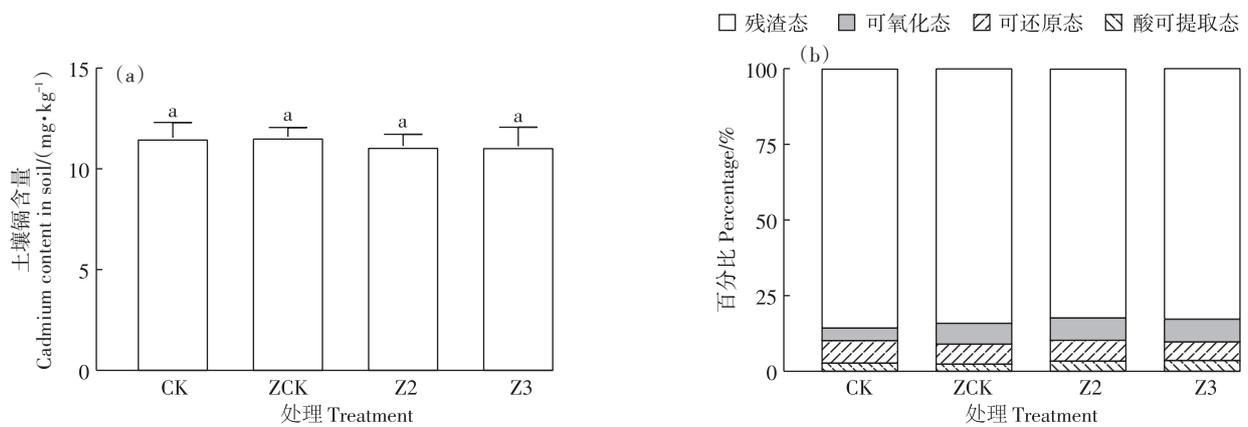


图4 土壤镉含量及镉形态

Figure 4 Soil cadmium content and cadmium forms

表2 不同处理的富集系数与转移系数

Table 2 Biological concentration factor and transfer factor of different treatments

项目 Item	CK	ZCK	Z2	Z3
BCF	0.968±0.187a	0.588±0.183ab	0.517±0.292ab	0.353±0.124b
TF	0.113±0.006a	0.195±0.019a	0.080±0.056a	0.182±0.075a

注:同一行不同小写字母代表处理间存在显著差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences among different treatments ($P<0.05$).

要增加了酸可提取态和可氧化态的占比。

2.5 富集系数与转移系数分析

芒草的BCF与TF如表2所示。与CK相比,ZCK、Z2、Z3的BCF下降了39.26%、46.69%、63.53%,其中Z3降幅达到了显著水平。芒草的TF在4个处理间无显著差异。由此推测,有机肥可能主要通过抑制芒草对镉的富集降低芒草体内的镉含量,而非改变其对镉的转移能力。

2.6 相关性分析

根据相关性分析(图5)可知,土壤全磷含量与芒草的根长、叶绿素、鲜质量、干质量显著正相关。土壤全氮、速效磷、速效钾与芒草的BCF显著负相关,土壤pH与芒草的TF显著正相关。株高与土壤理化性质则不存在显著相关性。

3 讨论

3.1 富铁有机肥对芒草生长和镉富集的影响

本试验中,施加富铁有机肥促进了芒草叶绿素的

合成,有利于芒草更好地进行光合作用,增加其生物量。亚铁离子在植物根系表面氧化形成的三价铁会在根表面沉积形成根表铁膜,阻止植物对重金属的吸收^[23]。以此推测,Z3主要抑制芒草地下部富集镉可能是形成了较厚的根表铁膜。相关性分析表明速效磷与芒草的BCF显著负相关,且重金属离子与磷形成的金属磷酸盐可降低植物体内金属离子的运输^[24]。Z2有机肥中速效磷含量相对较高,这可能是Z2主要抑制芒草地上部富集镉的原因。芒草总镉富集量没有显著差异,可能是生物量增加产生的结果。

3.2 富铁有机肥对土壤理化性质和镉形态的影响

本试验中,施加富铁有机肥提升了全氮和有机质含量,降低了pH。这是因为外源铁会改变微生物群落结构,而维持铁稳态对根瘤菌和豆科植物共生是至关重要的^[25-26]。本试验研究中富铁有机肥可能通过增加固氮微生物的丰度,从而提升土壤养分。土壤中重金属的生物活性和毒性取决于重金属的形态^[27],酸可提取态与可还原态镉在酸性条件或氧化作用下容易以离子形态存在于土壤中,迁移性较强,易被植物吸收。而可氧化态与残渣态镉通常以稳定的化合物存在,迁移性弱,不易被植物吸收。在本试验中,富铁有机肥主要增加了酸可提取态和可氧化态的占比。对于酸可提取态的增加,一方面,可能是因为硫酸根离子发生水解反应产生氢离子使土壤pH降低,导致酸可提取态镉含量增加。另一方面,可能是施肥处理抑制了对酸可提取态镉的吸收,而CK处理则富集了较多酸可提取态镉。对于可氧化态的增加,可能是三价铁离子水解形成的多核络合物与土壤溶液中的重金属聚沉、凝絮生成沉淀^[28]。此外,一部分亚铁可形成纳米硫酸铁氧化物,其对重金属具有较强的专属化学吸附作用^[29-30]。虽然pH的降低可能提高镉在土壤中的有效性,但铁离子参与的系列反应或许能够降低其迁移率和毒性。

近年来,有研究发现在土壤修复过程中通常会形成有机质-铁氧化物-重金属的三相体系,三者之间的相互作用相当复杂,并非单一的促进或抑制作用,

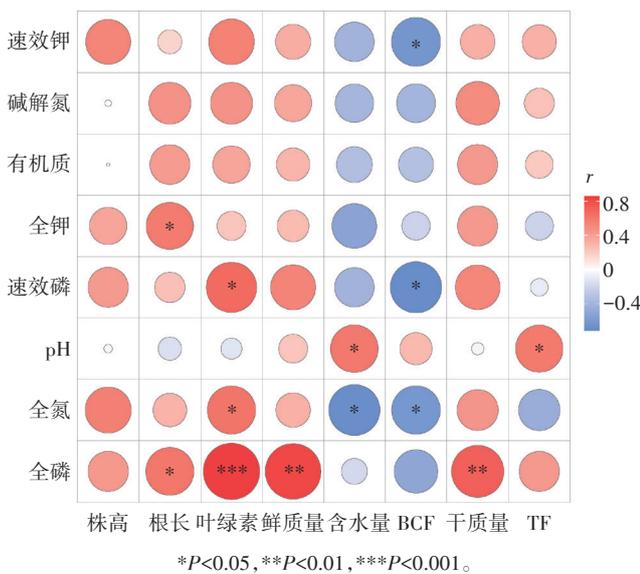


图5 土壤理化性质与植物生长及品质的相关性热图 (基于pearson分析)

Figure 5 Heat map of correlation between soil physicochemical properties and plant growth/quality based on Pearson analysis

对土壤重金属的迁移和形态转化有重要影响^[31]。而铁如何通过与土壤重金属以及土壤多相(有机物、无机物及微生物等)的相互作用来影响土壤重金属的转化迁移还有待进一步研究。

4 结论

(1) 镉胁迫下富铁有机肥能够促进芒草生长,增加芒草的生物量和叶绿素含量。

(2) 镉胁迫下富铁有机肥能够抑制芒草对镉的富集。

(3) 镉胁迫下富铁有机肥能够增加土壤的全氮和有机质含量,降低土壤pH。

参考文献:

- [1] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320. ZHOU J J, ZHOU J, FENG R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3): 315-320.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] 杨红霞, 陈俊良, 刘崑. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 1-8. YANG H X, CHEN J L, LIU W. Research progress on cadmium toxicity and detoxification mechanism in plants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 1-8.
- [4] SHI G, XIA S, LIU C, et al. Cadmium accumulation and growth response to cadmium stress of eighteen plant species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 23071-23080.
- [5] 崔玉静, 黄益宗, 朱永官. 镉对人类健康的危害及其影响因素的研究进展[J]. 卫生研究, 2006, 35(5): 656-659. CUI Y J, HUANG Y Z, ZHU Y G. Adverse health effects of cadmium and related factors[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2006, 35(5): 656-659.
- [6] KHALID S, SHAHID M, NIAZI N K, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 182: 247-268.
- [7] 吴迪, 马利民, 杨毅, 等. 设施菜地镍污染土壤修复调理剂筛选及修复效果研究[J/OL]. 吉林农业大学学报, 1-8[2023-04-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20221114.1330.005.html>. WU D, MA L M, YANG Y, et al. Study on the screening of conditioners and effect of remediation for nickel contaminated facility vegetable soils[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1-8[2023-04-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20221114.1330.005.html>.
- [8] 韩澄宇, 顾兆林. 钝化剂-有机肥联合修复作用下重金属污染土壤修复效应研究[J/OL]. 地球环境学报, 1-16[2023-04-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1482.X.20230327.1023.002.html>. HAN C Y, GU Z L. Study on the remediation effect of heavy metal-contaminated soil under the combined action of passivating agent and organic fertilizer[J/OL]. *Journal of Earth Environment*, 1-16[2023-04-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1482.X.20230327.1023.002.html>.
- [9] 宋冠林, 王安琪, 路来风, 等. 生物有机肥发酵菌剂的制备工艺优化[J]. 天津科技大学学报, 2022, 37(6): 18-26. SONG G L, WANG A Q, LU L F, et al. Optimization of preparation technology of fermentation agent of bio-organic fertilizer[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2022, 37(6): 18-26.
- [10] 王文丽, 李娟, 赵旭. 生物有机肥对黄芪品质和根际土壤细菌群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(11): 83-92. WANG W L, LI J, ZHAO X. The effects of biological organic fertilizer on crop quality and rhizosphere soil bacteria community of *Astragalus mongholicus* Bunge[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(11): 83-92.
- [11] PONTONI L, VAN HULLEBUSCH E D, FABBRICINO M, et al. Assessment of trace heavy metals dynamics during the interaction of aqueous solutions with the artificial OECD soil: evaluation of the effect of soil organic matter content and colloidal mobilization[J]. *Chemosphere*, 2016, 163: 382-391.
- [12] HONG Y, LI D, XIE C, et al. Combined apatite, biochar, and organic fertilizer application for heavy metal co-contaminated soil remediation reduces heavy metal transport and alters soil microbial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158033.
- [13] MURGIA I, MARZORATI F, VIGANI G, et al. Plant iron nutrition: the long road from soil to seeds[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(6): 1809-1824.
- [14] 雷鸣, 曾敏, 胡立琼, 等. 3种含铁材料对重金属和砷复合污染底泥稳定化处理[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3983-3988. LEI M, ZENG M, HU L Q, et al. Stabilization of multi-metals and arsenic in combined contaminated sediment by three iron-based materials[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(9): 3983-3988.
- [15] SONG Z, XU Q, LIN C, et al. Transcriptomic characterization of candidate genes responsive to salt tolerance of *Miscanthus* energy crops[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(7): 1222-1237.
- [16] GUO H, FENG X, HONG C, et al. Malate secretion from the root system is an important reason for higher resistance of *Miscanthus sacchariflorus* cadmium[J]. *Physiologia Plantarum*, 2017, 159(3): 340-353.
- [17] GHIMIRE B K, SEONG E S, NGUYEN T X, et al. Assessment of morphological and phytochemical attributes in triploid and hexaploid plants of the bioenergy crop *Miscanthus × giganteus*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 89: 231-243.
- [18] GONG L, QIU D P, YAO X S, et al. Determination of heavy metals in the plant sample pretreatment methods[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(2): 022008.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 刘书铭. 外加功能菌/菌群-芒草联合修复土壤重金属镉污染[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021. LIU S M. Remediation of Cd contami-

- nated soil by combined remediation approaches of addition of functional bacteria/microflora and *Miscanthus*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [21] TOKALIOĞLU Ş, KARTAL Ş, ELÇİ L. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 413(1/2):33-40.
- [22] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地几种植物蒸腾速率的季节变化特征[J]. 内蒙古林学院学报, 1998, 20(1):7-12. ZHANG G S, WANG L H, DONG Z, et al. The character of seasonal change in transpiration of four plants in Maowusu sands[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1998, 20(1):7-12.
- [23] LIU W J, ZHU Y G, HU Y, et al. Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(18):5730-5736.
- [24] 陈世宝, 朱永官, 杨俊诚. 土壤-植物系统中磷对重金属生物有效性的影响机制[J]. 环境工程学报, 2003, 4(8):1-7. CHEN S B, ZHU Y G, YANG J C. Mechanism of the effect of phosphorus on bio-availability of heavy metals in soil-plant systems[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2003, 4(8):1-7.
- [25] LI T, LI J, ZHAN X, et al. Application of exogenous iron alters the microbial community structure and reduces the accumulation of cadmium and arsenic in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(8):1311.
- [26] YI L, ZIMO X, WEIFENG W, et al. Iron in the symbiosis of plants and microorganisms[J]. *Plants*, 2023, 12(10):1958.
- [27] YANG Z, CHANG J, LI X, et al. The effects of the long-term freeze-thaw cycles on the forms of heavy metals in solidified/stabilized lead-zinc-cadmium composite heavy metals contaminated soil[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(6):2934.
- [28] YANG Z, MA J, LIU F, et al. Mechanistic insight into pH-dependent adsorption and coprecipitation of chelated heavy metals by *in-situ* formed iron (oxy)hydroxides[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 608:864-872.
- [29] 王一凡. 共存金属离子对共沉淀铁氧化物的转化与稳定性的影响[D]. 上海:华东师范大学, 2021. WANG Y F. Effects of coexisting metal ions on the transformation and stability of co-precipitated iron oxides[D]. Shanghai:East China Normal University, 2021.
- [30] 王旌, 付融冰, 罗启仕, 等. 亚铁盐对城市污泥中重金属的稳定化作用研究[J]. 环境科学, 2010, 31(4):1036-1040. WANG J, FU R B, LUO Q S, et al. Stabilization of heavy metals in sewage sludge by using a ferrous Iron[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(4):1036-1040.
- [31] BAO Y, BOLAN N S, LAI J, et al. Interactions between organic matter and Fe(hydr)oxides and their influences on immobilization and remobilization of metal (loid)s: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(22):4016-4037.