

不同规格根际调控基质块对玉米生长及 Cd 吸收的影响

陈 曦^{1,2}, 左 强¹, 邹国元¹, 张 琳¹, 谷佳林¹, 宫廷刚¹, 王甲辰^{1*}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2.内蒙古师范大学民族艺术学院, 呼和浩特 011517)

摘 要:污染土壤修复一直是科学家高度关注的问题。目前通常采用的是物理、化学和生物修复方法,但上述方法都有一定局限。为了探索新的方法技术,为根际调控修复污染农田提供技术和实践依据,采用4种不同规格基质块(直径×厚度分别为50 mm×20 mm、35 mm×20 mm、50 mm×25 mm、65 mm×20 mm,质量分别为40.0、19.6、50.0、67.6 g)与含5.19 mg·kg⁻¹ Cd的土壤组合成5个处理的盆栽试验,探索不同规格根际调控基质块对玉米生长及Cd吸收的影响,进行基质块根际调控阻抗重金属研究尝试。结果表明,体积和质量最大基质块处理5比其他处理显著促进了玉米地上部生长,同时,该处理的总根系干重、块内和块外根系干重也显著高于其他处理。与不用基质块的处理1(CK)相比,应用基质块的玉米地上部Cd含量降低了11.5%~46.3%、根系降低了1.19%~56.0%,只有处理5的玉米地上部Cd含量显著下降。试验结果还表明,根际调控需要适当调节空间,验证了本科研组提出的重金属根际调控技术的可行性以及实际应用的可操作性。

关键词:根际调控;不同规格;基质块;玉米;Cd

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)09-1745-07 doi:10.11654/jaes.2013.09.006

Effects of Different Specification Rhizosphere Regulation Medium Blocks on Corn Growth and Cd Uptake

CHEN Xi^{1,2}, ZUO Qiang¹, ZOU Guo-yuan¹, ZHANG Lin¹, GU Jia-lin¹, GONG Yan-gang¹, WANG Jia-chen^{1*}

(1.Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2.College of Ethnic Arts of Inner Mongolia Normal University, Hohhot 011517, China)

Abstract: Contaminated soil remediation is always a highly concerned problem. Generally, the present remediation methods are physical, chemical, and biological, but there are some confined factors for these methods above, so exploring new methods or techniques seems very important. The aim was to research the effects of different specification rhizosphere regulation medium blocks on corn growth and Cd uptake, and conduct the attempt of using medium block rhizosphere regulation to resist heavy metals to provide technological and practical references for development of rhizosphere regulation for farmland of heavy metal polluted. In this test, a pot experiment was conducted with 5 treatments of 4 medium block specifications (Diameter × thicknesses were 50 mm×20 mm, 35 mm×20 mm, 50 mm×25 mm and 65 mm×20 mm respectively and weights were 40.0 g, 19.6 g, 50.0 g and 67.6 g, respectively) and 1 washing out medium block when corn seedlings were transplanted in the 5.19 mg·kg⁻¹ of Cd in soil. The results showed that comparing with other treatments, treatment 5 improved corn shoot growth significantly. The total root dry weights, root dry weights in the inner and outside medium block of treatment 5 were also obviously higher than those of treatments 1~4. Compared with treatment 1 (CK), the Cd contents in shoots and roots were decreased from 11.5% to 46.3% and from 1.19% to 56.0% in the all treatments, respectively, with significant decrease in shoot only in treatment 5. The experiment results also showed that rhizosphere regulation needs suitable regulative space. This current research has verified the technological practicality of heavy metal rhizosphere regulation established by our previous work and practical application maneuverability.

Keywords: rhizosphere regulation; different specification; medium block; corn; Cd

收稿日期:2012-09-19

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(20100314);国家科技支撑课题“农田有害物质循环阻控与消减关键技术研究”(2007BAD89B03);科技部科技人员服务企业项目(2009GJA00026)

作者简介:陈 曦(1983—),女,硕士,主要从事根际调控的土壤修复和功能肥料研究。E-mail:chenxiecho@yahoo.com.cn

* 通信作者:王甲辰 E-mail:hbwjce@tom.com

土壤是农业最重要的生产资料,它的质量好坏直接关系到农产品品质,进而影响人类的食品安全和健康。由于我国重金属污染面积大、危害严重^[1],引起人们高度关注^[2-4],相继开展了包括物理、化学和生物等方面的治理研究。从理论上讲,这些技术对治理重金属污染,改善土壤质量起到一定作用。但综合考虑治理难易、时间长短、花费大小和社会效益等因素,很难被大面积推广应用。主要原因是:①物理法虽然见效快,却花费太大,也常常伴随二次污染;②生物法虽然环保,花费不高,但周期太长,社会效益差;③化学法尤其是吸附、固定法虽然离实际应用较近、见效也快、花费也少^[5-6],但是调理剂加入量大、调理空间广,实施操作存在一定难度。

为了变不利为有利,使化学吸附、固定法在污染土壤上达到迅速、环保、花费低、社会效益好的目的,本研究拟采用根际微环境调控,以降低调控剂的使用剂量和调控空间。腐植酸是一种良好的有机肥和化学调控剂^[7],它含有多种活性基团,易发生络合反应^[8],在基质中含量较高。从当前生产上采用穴盘或基质块育苗得到启发即能否从作物播种开始调控,到定植时,苗带基质移栽到受污染的农田,靠块中腐植酸调节作物生长并阻控重金属吸收。所谓基质块是配以全营养的草炭为基础材料,经高压模具压缩形成的一种集腐植酸、肥料、消毒、容器等功能于一体的新型育苗产品^[9-10]。采用该技术,既减少根系与土壤重金属接触,块中的腐植酸还能扩散到土壤中,经吸附、固定重金属进一步减少作物的吸收。由于我国人多地少,不可能闲置受污染农田进行修复,而是采用边修复边生产措施以保障我国粮食安全,所以根际阻控技术符合我国国情。由于基质块育苗优点较多^[9],所以本研究采用盆栽试验,以玉米为供试作物,以 Cd 为重金属,开展在 Cd 污染土壤中^[11],基质块规格大小阻抗重金属的

效果研究。探索不同规格基质块如厚薄、直径大小等指标对玉米生长以及阻隔 Cd 吸收的影响。为开发根际调控产品提供理论依据并指导农业生产应用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试土壤

试验设在北京房山韩村河农业技术开发中心温室 50 号棚。供试土壤取自河北涿州青龙河道农田表层(0~20 cm)沙壤土,其理化性质见表 1。

1.1.2 基质块

不同规格的基质块在河北省大厂县尚各庄生产,理化性质如表 2。

1.1.3 供试作物

玉米(*Zea mays* L.)品种为绿色超人。

1.1.4 试验处理

共设 5 个处理,5 次重复,共计 25 盆。具体处理见表 3。

1.2 方法

1.2.1 作物育苗

2009 年 8 月 28 日育苗,具体方法见表 3。

表 3 处理
Table 3 Treatments

处理 Treatments	详细内容 Detail content
1(CK)	规格一,质量 40.0 g,直径×厚度为 50 mm×20 mm,定植时冲掉基质块移栽
2	规格一,质量 40.0 g,直径×厚度为 50 mm×20 mm,定植时带基质块移栽
3	规格二,质量 19.6 g,直径×厚度为 35 mm×20 mm,定植时带基质块移栽
4	规格三,质量 50.0 g,直径×厚度为 50 mm×25 mm,定植时带基质块移栽
5	规格四,质量 67.6 g,直径×厚度为 65 mm×20 mm,定植时带基质块移栽

注:规格一为生产上育苗最常用的基质块。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The physical and chemicals properties of experiment soil

有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	速钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	速磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	全镉 Total Cd/ mg·kg ⁻¹	电导率 Conductivity/ μS·cm ⁻¹	pH
4.78	0.41	20.08	9.30	0.19	42	8.62

注:电导率在土水比 1:5 条件下测定。

表 2 基质块基本性质

Table 2 The basic properties of medium block

有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	全钾 Total K/ g·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	全镉 Total Cd/ mg·kg ⁻¹	电导率 Conductivity/ μS·cm ⁻¹	pH
493.55	19.05	7.24	4.75	0.14	1190	6.10

(1)块摆放:将育苗盘洗净铺上塑料薄膜;每盘摆4行,每行10块。

(2)胀块:将装有块的育苗盘摆在架子上,然后在块间注水(不用喷壶)。使块由下至上吸水,直到块完全膨胀疏松(用细铁丝扎无硬芯)。胀块过程中水流不能过急过大,不要移动或按压,以免块散掉。块胀好后,盒内无积水。

(3)播种:将饱满、均匀的种子放入块中心孔中,每孔放3粒,用蛭石覆盖。覆盖的蛭石比块上表面稍高出0.5 cm。播种完,整盘用塑料薄膜覆盖,出苗75%左右揭膜。

(4)苗期管理:在基质块之间的缝隙浇水,见干见湿(即当需要浇水时,基质块的上、侧表面均变干)。浇完水后,由于虹吸作用,整个基质块完全吸水变湿。温度不能低于15℃,适时通风。

1.2.2 定植

先将尿素(含N 46%) $1.63\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、磷酸二氢钾(含 P_2O_5 51%, K_2O 34%) $5\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、硫酸钾(含 K_2O 50%) $1\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$,与5 kg沙土混匀后装入高25 cm、口径25 cm的塑料盆中。盆中肥料实际加入量要扣除基质块中N、P、K的量。混入Cd含量 $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}\text{ Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液25 mL,使土壤外加Cd浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且在土壤中平衡10 d。于2009年9月22日将长出4~5片真叶玉米苗移栽定植到装好土的塑料盆中,每盆两株。

1.2.3 作物管理

经过额外装盆测试合理灌水量后,每周浇水两次,每次浇750 mL。注意观察生长过程是否出现病虫害等意外,同时拔掉盆中杂草。定期测定株高、茎粗等生理数据,直到2009年11月8日收获。

1.2.4 植株指标测定

收获时测定每盆玉米地上部鲜重、干重、镉含量;根干重、根长、根体积、镉含量;不同层次土壤和基质块的镉含量。

1.2.4.1 植株地上部取样及称量

用刀片贴地皮把每盆玉米地上部取下。用自来水冲净泥土,再用去离子水冲洗3遍,用吸水纸吸干水分后称量各部分鲜重。放入105℃烘箱杀青30 min,调烘箱为80℃,直到植株干燥,冷却。用百分之一天平称重。用粉碎机粉碎进行Cd测定。

1.2.4.2 根系取样

每处理分别取4盆,分基质块内、外土体中的根系。为了取样准确、不丢失,土过20目筛分离根系。把每处理3次重复块内外根系分别洗净、吸水纸吸干水

分,称鲜重。然后烘干,称量干重。粉碎用于Cd测定。另外1次重复用于根长和体积的测定。

1.2.4.3 根长、体积测定

将玉米根洗净放入蓝墨水中浸泡6 h后,用水将根表面墨水冲掉平铺于装水的透明塑料盒中进行扫描,扫描后的图用WinRHIZO根系分析系统分析根长和体积。

1.2.4.4 植株和基质块中Cd含量测定

采用GB/T 5009.15—2003法测定,即植株样品采用电热板三角瓶消解法。用万分之一的天平称样品2.000 0 g(根1.000 0 g)加入150 mL三角瓶中,加入15 mL HNO_3 和7 mL HClO_4 加热消解,待消煮液清亮后冷却。将消化液转移定容到50 mL容量瓶中,过滤至50 mL小口方塑料瓶中待测^[12]。用购买的 $1000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 标准溶液配标准曲线待测液,用日本岛津AA-6800石墨炉原子吸收测镉的含量。同时,采用国家标准参考物质(大米中镉GBW10010和菠菜中镉GBW10015)进行分析质量控制,测定标样大米和菠菜中的Cd含量,Cd含量分别为 $0.083\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,完全符合测定物的含量标准,保证了消煮过程和测定数据的可靠性。

1.2.4.5 土壤分区和Cd含量测定

(1)土壤取样。为了研究不同区域土壤镉含量变化,所以将玉米收获后盆中土分成4个区域取样,方法如图1。

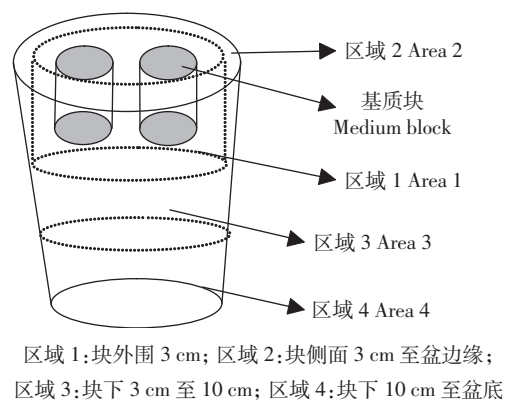


图1 盆土4个分区和基质块位置

Figure 1 Four soil areas in pot and medium block position

(2)土壤样品Cd含量测定。采用《土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》GB/T 17141—1997^[13]。具体如下:将土样风干过100目尼龙筛,用万分之一天平称样品0.300 0 g于50 mL聚四氟乙烯坩埚中。用水湿润后加入5 mL盐酸,放在通风

橱内的电热板上低温加热,使样品初步分解。当蒸发至 2~3 mL 时,取下稍冷,然后加入 5 mL 硝酸、4 mL 氢氟酸、2 mL 高氯酸,加盖后于电热板上中温加热 1 h 左右,再开盖继续加热除硅。为了达到良好的蒸除硅效果,应经常摇动坩埚。当高温加热至冒浓厚高氯酸白烟时,加盖,使黑色有机碳化物充分分解。待坩埚上的黑色有机物消失后,开盖驱赶白烟并蒸至内容物呈粘稠状。视消解情况,可再加入 2 mL 硝酸、2 mL 氢氟酸及 1 mL 高氯酸并重复上述消解过程。当白烟基本冒尽且内容物呈粘稠状时,取下稍冷。用水冲洗坩埚盖和内壁,并加入 1 mL 硝酸溶液温热溶解残渣。然后将溶液转移至 25 mL 容量瓶中,加入 3 mL 磷酸氢二铵溶液冷却后定容,摇匀备测。用 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 标准溶液配标准曲线待测液,用日本岛津 AA-6800 石墨炉原子吸收测镉的含量,同时采用国家标准参考物 GBW07403(土壤)进行分析质量控制。经过测定,土壤标样中的 Cd 含量为 $6.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,完全符合测定土壤的含量标准,保证了消煮过程和测定数据的可靠性。

2 结果与讨论

2.1 不同规格基质块对玉米生长的影响

2.1.1 地上部生物量

从表 4 可见,在高 Cd 污染条件下^[11],基质块处理促进了玉米茎叶生长。随着块的增大、增重,玉米的鲜、干重也随之增加。处理 5 的植株鲜、干重显著高于其他处理,而相对体积和重量小的块处理与对照比较差异不显著,说明不同规格基质块影响玉米地上部的生长力度不同。块越大,玉米的根际生长环境越好,提供的养分、调节物质也越充分,渗透到块外围的也越多,Cd 毒害缓解能力越强;也可能是因为基质块富含腐植酸,对土壤养分具有活化作用;同时,腐植酸分子中的酚羟基和醌基相互转化,使之可有效参与植物体内氧化还原反应,从而促进糖类、核酸和蛋白质代谢、

表 4 不同规格基质块对玉米地上部生物量的影响

Table 4 Effects of different specification medium blocks on shoot biomass of corn

处理 Treatments	鲜重 Fresh weights/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	干重 Dry weights/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$
1	$24.00\pm 4.65\text{b}$	$1.86\pm 0.73\text{c}$
2	$26.67\pm 7.64\text{b}$	$2.07\pm 0.51\text{c}$
3	$20.67\pm 7.78\text{b}$	$2.68\pm 0.07\text{bc}$
4	$27.67\pm 0.81\text{b}$	$3.37\pm 0.30\text{b}$
5	$63.30\pm 5.77\text{a}$	$7.36\pm 0.31\text{a}$

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著, $P<0.05$ 。下同。

提高呼吸酶活性^[14]。大量试验结果还表明,腐植酸在促进作物生长发育、增强抗逆性、改善作物品质和提高产量方面有明显的作用^[15-20]。潘梅香等研究表明,施用腐植酸能有效地促进甜瓜生长发育^[21]。采用生产上常用基质块(处理 2)与 CK(处理 1)相比,玉米地上部鲜、干重虽有所增加,但差异并不显著,说明基质块还相对较小,其调节能力也达不到显著影响玉米生长的程度。由于本研究是基质根际调控所开展初步探索,又无研究文献可供参考,所以本研究仅限于分析产生结果的机理。再者,虽然所设的处理是不同规格基质块,但实际上制备过程受到模具、机械等多因素限制,缺乏像同等质量不同规格、同直径不同厚度等系统研究,今后如有资助需要补充。

2.1.2 根系重量

从表 5 可见,不论是处理 5 根总干重,还是块内、块外根干重均显著高于其他处理,其他处理间的差异不显著。其原因可能主要是基质块体积和重量大到能够明显提供良好的生长空间,使根系生长较好,而块外生长环境相对较差,限制了根的生长。这一结果与前人相关研究基本一致,如王群等研究发现:腐植酸对植物的生长,尤其是根的生长,养分的吸收,细胞的伸长,还原糖的积累以及磷酸酶、过氧化物酶、转移酶和根系质膜 ATP 酶都有着显著的作用^[22]。靳志丽等研究认为:腐植酸能有效刺激根系的生理活性,提高根系抗坏血酸氧化酶、多酚氧化酶等呼吸酶的活性,增强根系的活力,并能有效促进烤烟根系生长。根干重、体积和长度均有提高^[23]。高家合研究还表明:腐植酸可促使烟棵早发快长,特别是能促进根系的生长发育^[24]。

2.2 不同规格基质块对玉米镉吸收的影响

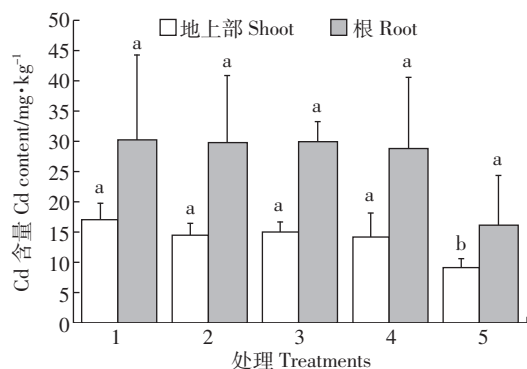
从图 2 可见,不同处理玉米根系 Cd 含量比同处

表 5 不同规格基质块对玉米根系干重的影响

Table 5 Effect of different specification medium blocks on dry weight of corn roots

处理 Treatments	总重/g Total weights	块内/g Inside block	块外/g Outside block	块内根重/根总重(RWIB/TRW)
1	$1.27\pm 0.55\text{b}$	$0.34\pm 0.28\text{b}$	$0.93\pm 0.28\text{bc}$	$0.24\pm 0.11\text{b}$
2	$0.86\pm 0.23\text{b}$	$0.31\pm 0.03\text{b}$	$0.55\pm 0.19\text{b}$	$0.37\pm 0.08\text{a}$
3	$1.00\pm 0.06\text{b}$	$0.25\pm 0.04\text{b}$	$0.75\pm 0.05\text{bc}$	$0.25\pm 0.02\text{b}$
4	$0.79\pm 0.11\text{b}$	$0.27\pm 0.03\text{b}$	$0.52\pm 0.12\text{c}$	$0.35\pm 0.06\text{ab}$
5	$2.60\pm 0.32\text{a}$	$1.09\pm 0.23\text{a}$	$1.51\pm 0.10\text{a}$	$0.42\pm 0.04\text{a}$

注:因处理 1 的基质块在定植时已被冲掉,表中根内、根外数据是根据块直径、厚度取根系样品所得。



处理间不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著

图 2 不同规格基质块对玉米镉浓度的影响

Figure 2 Effect of different specification medium blocks on cadmium content of corn

理地上部的高近一倍,说明玉米根系是 Cd 富集的重要器官。处理 1 至处理 4 的玉米地上部镉含量差异不显著,而处理 5 的含量显著低于其他处理,表明体积和重量最大的基质块显著阻隔玉米地上部对 Cd 的吸收。在所有处理中,虽然处理 5 的根系 Cd 含量最低,但所有处理间差异不显著。经计算,采用根际调控与不用的 CK(处理 1)相比,玉米地上部 Cd 含量降低了 11.54%~46.30%,同时,根系 Cd 含量也降低了 1.19%~55.99%。由于处理 3 的块小于处理 2,该处理植株地上部和根系 Cd 含量反而分别升高了 0.37%和 0.03%。由此可见,根际调控阻隔玉米对 Cd 的吸收需要一定体积,空间不足达不到显著调控效果。具体多大合适,要根据土壤污染程度、作物品种和根构型等因素进一步研究。

从上述结果可见,只有处理 5 的地上部 Cd 含量显著低于其他处理,这是由于大体积基质块腐植酸含量也大。而腐植酸主要通过吸附、络合 Cd 达到让作物少吸收的效果^[25],所以这个结果说明该处理块中腐植酸显著抑制了玉米对 Cd 的吸收。这与李静等研究结果相符,即腐植酸在低用量下促进 Cd 向植物体内迁移,而在高用量下抑制 Cd 向植物体内迁移^[26],也与

腐植酸富含羟基、酚羟基和羰基等官能团有关。这些官能团与 Cd 有很好的亲和性,变成 Cd 的络合形态从而影响植物对镉的吸收和毒害^[27-28]。袁建梅等在污灌土壤中添加腐植酸,发现其可以改变重金属形态分布,使重金属固定在土壤表面,从而降低重金属的活性、直接毒性和生物可利用性^[7]。至于所有处理根系 Cd 含量的标准差数据偏大,导致处理 5 虽然 Cd 含量最低,但与其他处理差异不显著,其原因可能主要有 3 点:①基质块压制原料填充不均匀,这是不可避免的。由于不均匀所以腐植酸含量也不均匀,造成对 Cd 吸附、络合能力产生差异,造成植株根系中含量差异规律性差。②人工装盆会不可避免地出现土、肥料及 Cd 的混合及装土压实程度的不一致,也会造成植株规律性吸收变差。③由于装盆不均匀,浇的水在盆中就会分布不均匀,造成植株生长、同植株不同根系吸收的 Cd 差异大,从而造成测定 Cd 含量差异大。3 个因素综合导致处理根系重复间 Cd 含量标准差较大。遗憾的是,本研究毕竟是首先利用压缩基质块作为高效根际调控阻抗重金属吸收,没有结果与参考文献进行比较,同时,本试验从种到收,玉米只生长 71 d,还没成熟。具体不同规格基质块处理的果实中的 Cd 含量差异、籽粒是否符合商品标准,土壤 Cd 污染是何等级时籽粒才符合商品标准等还需要进一步研究。

2.3 不同规格基质块对土壤 Cd 迁移影响

从表 6 可知,不同规格基质块对土壤 Cd 的向上迁移影响趋势一致,均在上表层聚集,但差异不规律。这表明 Cd 的向上迁移受基质块影响较小,而主要受土壤水的蒸发和作物蒸腾作用的控制。土体 Cd 含量分布表现为区域 1>区域 2>区域 3>区域 4。同时还发现,收获时基质块内镉含量是种植前的 64.14~112.29 倍,说明基质块能吸附固定 Cd。土壤表层能富集较高数量的镉的原因:土壤中的可溶态 Cd 随玉米蒸腾和土壤蒸发向上迁移;块中的腐植酸能够扩散到外围土壤中并将可溶态 Cd 吸附、络合成不易被玉米吸收态,

表 6 不同区域土壤和基质块镉含量(mg·kg⁻¹)

Table 6 Cadmium contents in different soil area and medium blocks(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	区域 1 Area 1	区域 2 Area 2	区域 3 Area 3	区域 4 Area 4	收获后基质块(NBAH)	收获后块/播种前块(NBAH/MBBS)
1	15.99±1.42	7.96±3.65	2.44±1.73	0.79±0.27	—	—
2	18.76±4.30	11.91±2.24	3.36±0.57	1.55±0.30	15.42±2.14	110.14
3	12.41±3.03	9.45±2.10	2.05±0.59	1.17±0.46	11.58±1.56	82.71
4	17.35±0.92	9.67±1.83	2.54±1.31	1.02±0.30	15.72±2.30	112.29
5	13.20±2.38	7.73±1.36	2.00±0.92	1.68±1.67	8.98±1.01	64.14

注:种植前的土壤和基质块的 Cd 含量分别为 0.19 mg·kg⁻¹ 和 0.14 mg·kg⁻¹。

从而留在表层基质和表土中。与处理5地上部Cd含量显著降低结果相结合,说明在基质块中的和从块内扩散到周围土壤中的腐植酸可吸附固定Cd,有效减少了根对它的吸收。由于下层Cd浓度降低幅度较大,这也将导致从较大块内长出的根在下层吸收相对较少的镉,从而植株地上部浓度显著降低(图2)。由于块中腐植酸渗透到土壤中,提高了土壤有机质含量。伴随土壤溶液中活性铁和活性锰的浓度相应增加,致使土壤溶液中的铁锰等氧化物对迁移重金属的专性吸附能力增强^[7,29],使得Cd不至于随浇水再回到底层。

3 结论

(1)基质块作为根际调控措施,对促进作物生长、缓解重金属毒害及减少重金属向作物地上部运输的作用显著。

(2)调节空间和腐植质量决定了根际调控能力及阻隔Cd吸收强弱。

(3)在实际应用中,应根据土壤污染程度、作物品种和根系构型等因素来确定块的大小和形状。

参考文献:

- [1] Lichner L, Dlapa P, Sir M, et al. The fate of cadmium in field soils of the Danubian lowland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 85(1-2): 154-165.
- [2] 赵传冬, 成杭新, 庄广民, 等. 中国北方某城市近郊土壤中重金属污染现状及潜在危害[J]. *物探与化探*, 2006, 30(4): 344-347, 353.
ZHAO Chuan-dong, CHENG Hang-xin, ZHUANG Guang-min, et al. The situation of soil heavy metal pollution on the outskirts of a city in The Northern China and its potential harmfulness [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2006, 30(4): 344-347, 353.
- [3] 朱 勇, 江潇潇, 许秀琴, 等. 蔬菜生产在土壤重金属污染治理中的作用[J]. *长江蔬菜*, 2007, 10: 31-33.
ZHU Yong, JIANG Xiao-xiao, XU Xiu-qin, et al. Action of vegetable production on soil heavy metal pollution abatement[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2007, 10: 31-33.
- [4] 李希春, 王景志. 浅谈重金属污染与人体健康[J]. *山东环境*, 1997, 4: 38, 8.
LI Xi-chun, WANG Jing-zhi. Brief discussion heavy metal pollution and human health[J]. *Shandong Environment*, 1997, 4: 38, 8.
- [5] 梅祖明, 袁平凡, 殷 婷, 等. 土壤污染修复技术探讨[J]. *上海地质*, 2010, 31(增刊): 128-131.
MEI Zu-ming, YUAN Ping-fan, YIN Ting, et al. Discussion on technology to soil pollution remediation[J]. *Shanghai Geology*, 2010, 31(Sup-pl): 128-131.
- [6] 周东美, 郝秀珍, 薛 艳, 等. 污染土壤的修复技术研究进展[J]. *生态环境*, 2004, 13(2): 234-242.
ZOU Dong-mei, HAO Xiu-zhen, XUE Yan, et al. Research development of soil pollution remediation techniques[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 234-242.
- [7] 蒋煜峰, 袁建梅, 卢子扬, 等. 腐植酸对污灌土壤中Cu、Cd、Pb、Zn形态影响的研究[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(6): 42-46.
JIANG Yu-feng, YUAN Jian-mei, LU Zi-yang, et al. The effect of humic acid on species of Cu, Cd, Pb, Zn in sewage farm[J]. *Journal of Northwest Normal University Natural Science*, 2005, 41(6): 42-46.
- [8] Schnfzer M, Khan S U. Humic substance in the environment Marcel DeKkar[J]. *New Tor*, 1972, 26(1): 13-15.
- [9] 左 强, 邹国元, 王甲辰. 图说营养基质块育苗新技术[M]. 北京: 中国三峡出版社, 2008, 12: 1.
ZUO Qiang, ZOU Guo-yuan, WANG Jia-chen. Illustrated books of nutrition medium block new seedling cultivation technology[M]. Beijing: Three Gorges Publishing House, 2008, 12: 1.
- [10] 曹 瑜, 李颖莉, 连敏丽, 等. 西甜瓜应用基质块高效育苗技术[J]. *西北园艺*, 2010(3): 33-34.
CAO Yu, LI Ying-li, LIAN Min-li, et al. Efficient seedling culture techniques of water melon and melon by utilizing medium block[J]. *Northwest Horticulture*, 2010(3): 33-34.
- [11] 李梦红, 张晓君, 卢 杰. 模糊综合评价在农田重金属污染评价中的应用[J]. *西南农业学报*, 2010; 23(5): 1581-1585.
LI Meng-hong, ZHANG Xiao-jun, LU Jie. Application of fuzzy comprehensive assessment in pollution assessment of heavy metal in farmland soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, 2010, 23(5): 1581-1585.
- [12] 韦璐阳, 蓝 唯, 林 鹰, 等. 土壤重金属Cd在木薯中累积特征及产地环境安全临界值[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(3): 345-348.
WEI Lu-yang, LAN Wei, LIN Ying, et al. Cd accumulation characteristics of cassava and its safe critical value in soil[J]. *J Southern Agriculture*, 2012, 43(3): 345-348.
- [13] GB/T 17141—1997, 土壤质量铅、镉的测定、石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 中华人民共和国国家标准, 1997.
GB/T 17141—1997, The soil matter determination of lead, cadmium, graphite furnace atomic absorption spectrophotometry[S]. National Standard of the People's Republic of China, 1997.
- [14] 梁镜悬. 北京腐植酸资源的开发及其综合利用概况[J]. *腐植酸*, 1987, 1: 4-7.
LIANG Jing-xuan. General situation of Beijing humic acid resources exploitation and comprehensive utilization[J]. *Humic Acid*, 1987, 1: 4-7.
- [15] 毕 军, 夏光利, 毕研文, 等. 腐植酸生物活性肥料对冬小麦生长及土壤微生物活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 99-103.
BI Jun, XIA Guang-li, BI Yan-wen, et al. Effect of humic bioactive fertilizer on winter wheat and soil microbial activity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 99-103.
- [16] 赵丽萍. HA、4-PU对水稻幼苗的影响[J]. *湘南学院学报*, 2005, 26(2): 118-121.
ZHAO Li-ping. Effect of HA, 4-PU on rice seedling[J]. *Journal of Xi-*

- angnan University, 2005, 26(2):118-121.
- [17] 孙志梅, 薛世川, 王国旗, 等. 不同腐植酸复合肥施用量对辣椒产量及其养分利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3):99-101.
- SUN Zhi-mei, XUE Shi-chuan, WANG Guo-qi, et al. Effect of the application amount of humic acid compound fertilizer on the yield and nutrient utilization rate of pepper[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3):99-101.
- [18] 周崇峻, 韩晓日, 王春枝, 等. 腐植酸液肥对大豆产量和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2):110-111.
- ZHOU Chong-jun, HAN Xiao-ri, WANG Chun-zhi, et al. Effect of humic acid fertilizer on yields and qualities of soybeans[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(2):110-111.
- [19] 许旭旦. 叶面喷洒腐植酸对小麦临界期干旱的生理调节作用的初步研究[J]. 植物生理学学报, 1983, 9(4):367-374.
- XU Xu-dan. Preliminary study on top dressing humic acid on physiological regulation for wheat critical stage drought[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1983, 9(4):367-374.
- [20] 杨志福. 腐植酸类物质在农业生产中应用的概况及前景[J]. 腐植酸, 1988(2):4-9.
- YANG Zhi-fu. General application situation and prospect analysis in agricultural production for the matters of humic acid types[J]. *Humic Acid*, 1988(2):4-9.
- [21] 潘梅香, 朱 杨, 李秀颖, 等. 腐植酸复合肥对甜瓜产量和品质的影响[J]. 现代农业科技, 2010, 5:82, 84.
- PAN Mei-xiang, ZHU Yang, LI Xiu-ying, et al. Effect of complex fertilizer of humic acid on melon yield and quality[J]. *Modern Agricultural Science & Technology*, 2010, 5:82, 84.
- [22] 王 群. 泥炭腐植酸对小麦苗期生长的促进作用及机理研究[D]. 南京:南京农业大学硕士论文, 1995.
- WANG Qun. Study on peat humic acid improving wheat seedling growth and mechanism[D]. Nanjing: Marster's Thesis of Nanjing Agricultural University, 1995.
- [23] 靳志丽, 刘国顺, 梁文旭. 腐植酸对烤烟根系生长和生理活性的影响[J]. 烟草科技, 2002, 7:36-38.
- JIN Zhi-li, LIU Guo-shun, LIANG Wen-xu. Effects of humic acid on root growth and physiological activity of flue-cured tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2002, 7:36-38.
- [24] 高家合. 腐植酸对烤烟生长的影响研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8):328-330.
- GAO Jia-he. Effects of humic acid on growth of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8):328-330.
- [25] Bloan N S, Duraisamy V P. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilization and phytoavailability of heavy metals: A review involving specific case studies[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41:233-255.
- [26] 李 静, 陈 宏, 陈玉成, 等. 腐植酸对土壤汞、镉、铅植物可利用性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(3):234-236, 240.
- LI Jing, CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, et al. Effects of phyto-availability on Hg, Cd, Pb in soil by humus[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2003, 21(3):234-236, 240.
- [27] del Castilho P, Chandron W J, Salomons W. Influence of cattle manure slurry application on the solubility of cadmium, copper, and zinc in a manured acidic loamy sandy soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22:689-697.
- [28] Riffaldi R, Levi-minzi R, Saviozzi A, et al. Sorption and release of cadmium by some sewage sludges[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12:253-256.
- [29] Mohamed I, Ahamadou B, Li M, et al. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6):973-982.