

玉米幼苗根系对Cr(III)的吸收动力学特征及途径探讨

居静, 王欣, 陈永林, 盛海君, 汪晓丽, 赵海涛

引用本文:

居静, 王欣, 陈永林, 盛海君, 汪晓丽, 赵海涛. 玉米幼苗根系对Cr(III)的吸收动力学特征及途径探讨[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 754-760.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0857>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源Ca²⁺对模拟酸雨胁迫下不同抗性水稻根系氮吸收的影响

张元棋, 梁婵娟

农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2468-2477 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0245>

微塑料与铅复合污染对水稻幼苗根系生长和氧化应激的影响

刘玲, 洪婷婷, 胡倩男, 谢瑞丽, 周颖, 王玲, 汪承润

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2623-2633 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0523>

钒胁迫对紫花苜蓿生长及钒积累与转移的影响

武振中, 杨金燕, 张有贤

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1198-1207 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1165>

施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 张兴, 陈璐, 郭大维, 党秀丽

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1635-1643 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0106>

小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究

彭维新, 庄玉婷, 梁智淇, 俞政男, 吴道铭, 张学平, 曾曙才

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1707-1717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0241>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

居静, 王欣, 陈永林, 等. 玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收动力学特征及途径探讨[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 754-760.

JU J, WANG X, CHEN Y L, et al. Kinetic characteristics and pathways of Cr(Ⅲ) uptake by maize seedling roots[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 754-760.

玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收动力学特征及途径探讨

居静¹, 王欣¹, 陈永林², 盛海君¹, 汪晓丽¹, 赵海涛^{1*}

(1. 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 扬州大学, 江苏 扬州 225127; 2. 句容市农业技术推广中心, 江苏 镇江 212499)

摘要:为探讨玉米幼苗对Cr(Ⅲ)的吸收途径,通过水培试验方法,研究了不同Cr(Ⅲ)处理浓度(0~20 mg·L⁻¹)对玉米幼苗Cr(Ⅲ)的吸收动力学特征的影响,以及ATP酶抑制剂、离子通道抑制剂、Fe(Ⅲ)对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响。结果表明:玉米幼苗根系吸收Cr(Ⅲ)的最大吸收速率(V_{max})为121.4 mg·kg⁻¹·d⁻¹,显著高于地上部的16.3 mg·kg⁻¹·d⁻¹($P<0.05$);根系吸收Cr(Ⅲ)的离子载体与离子的亲和力(K_m)为12.2 mg·L⁻¹,显著低于地上部分的180.8 mg·L⁻¹($P<0.05$)。ATP酶抑制剂Na₃VO₄显著抑制了玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收($P<0.05$)。Ca²⁺通道抑制剂LaCl₃和K⁺通道抑制剂C₈H₂₀CIN均不抑制玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收($P>0.05$)。与正常营养液相比,缺Fe(Ⅲ)处理下的玉米幼苗根系吸收Cr(Ⅲ)的 V_{max} 增加了20.0%, K_m 数值仅减少了5.0%,但Fe(Ⅲ)处理下的玉米幼苗根系吸收Cr(Ⅲ)的 V_{max} 减少了46.0%, K_m 数值减少了56.0%。研究表明,玉米幼苗吸收的Cr(Ⅲ)主要富集在玉米幼苗的根部,只有很少被转移到地上部分;玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收存在主动吸收的过程,进入细胞膜的途径与Ca²⁺和K⁺通道无关,Fe(Ⅲ)抑制了玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收。

关键词:玉米幼苗;铬;吸收;离子通道;铁

中图分类号:X173;X53;S513

文献标志码:A

文章编号:1672-2043(2023)04-0754-07

doi:10.11654/jaes.2022-0857

Kinetic characteristics and pathways of Cr(Ⅲ) uptake by maize seedling roots

JU Jing¹, WANG Xin¹, CHEN Yonglin², SHENG Haijun¹, WANG Xiaoli¹, ZHAO Haitao^{1*}

(1. Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Agricultural Technology Extension Center of Jurong City, Zhenjiang 212499, China)

Abstract: The aim of this study is to explore the absorption pathway of Cr(Ⅲ) in maize seedlings. The effects of different Cr(Ⅲ) treatment concentrations (0–20 mg·L⁻¹) on the Cr(Ⅲ) absorption kinetics of maize seedlings and the effects of an ATPase inhibitor, an ion channel inhibitor, and Fe(Ⅲ) on the absorption of Cr(Ⅲ) in maize seedling roots were determined using hydroponics culture. The results indicated that the maximum absorption rate (V_{max}) of Cr(Ⅲ) by maize seedling roots was 121.4 mg·kg⁻¹·d⁻¹, which was significantly higher than the V_{max} of the aboveground parts of the seedlings (16.3 mg·kg⁻¹·d⁻¹, $P<0.05$). The affinity between the ion and ionic carrier (K_m) of Cr(Ⅲ) absorbed by the roots was 12.2 mg·L⁻¹, which was significantly lower than the K_m of the shoots (180.8 mg·L⁻¹, $P<0.05$). The ATPase inhibitor, Na₃VO₄, significantly inhibited the uptake of Cr(Ⅲ) by maize seedling roots ($P<0.05$). Neither the Ca²⁺ channel inhibitor, LaCl₃, nor the K⁺ channel inhibitor, C₈H₂₀CIN, inhibited the uptake of Cr(Ⅲ) by maize seedling roots ($P>0.05$). Compared with the uptake of a normal nutrient solution, the V_{max} of Cr(Ⅲ) uptake by maize seedling roots with Fe(Ⅲ) deficiency increased by 20.0%, but the K_m only decreased by 5.0%. However, under Fe(Ⅲ) treatment, the V_{max} of Cr(Ⅲ) uptake decreased by 46.0% and the K_m decreased by 56.0%. These results indicate that Cr(Ⅲ) mainly accumulated in maize seedling roots, and the transfer ability to the aboveground parts of

收稿日期:2022-08-29 录用日期:2022-11-23

作者简介:居静(1976—),女,江苏靖江人,博士,副教授,主要研究方向为土壤修复与利用。E-mail:jujing@yzu.edu.cn

*通信作者:赵海涛 E-mail:htzhao@yzu.edu.cn

基金项目:江苏省现代农业发展项目(2020-SJ-003-YD04)

Project supported: Modern Agriculture Development Project of Jiangsu Province, China(2020-SJ-003-YD04)

the seedlings is relatively poor. The absorption of Cr(Ⅲ) by roots occurs via an active absorption process and is inhibited by Fe(Ⅲ). Cr(Ⅲ) uptake is not related to Ca^{2+} or K^{+} channels.

Keywords: maize seedling; chromium; absorption; ion channel; iron

土壤重金属污染涉及食品安全和人类健康,已成为全人类近年来共同关心和亟待解决的世界性重大环境问题。铬(Cr)位于元素周期表第四周期第六副族,是硬度最大的金属。Cr由于其广泛的工业应用,已成为地下水、土壤及沉积物中第二常见的重金属污染物^[1],也是我国实行重点防控的五种主要重金属污染物之一^[2]。据统计我国严重Cr污染的土壤已超过1 250万 t^[3]。在自然界中Cr拥有不同的价态(-2~+6),其中三价[Cr(Ⅲ)]和六价[Cr(Ⅵ)]是最稳定和最常见的形态。因土壤对Cr(Ⅵ)吸附力较弱,其具有较高的生物活性,无论对动物还是植物都具有毒性;而Cr(Ⅲ)进入土壤后一般会以沉淀形式存在,或被土壤黏粒吸附,在土壤中溶解度小、移动性差,所以能稳定存在,是一种对人类和动物健康至关重要的微量元素^[4],却不是植物必需营养元素^[5]。前人对Cr(Ⅵ)的研究较多^[6-7],而对Cr(Ⅲ)研究甚少。低浓度的Cr(Ⅲ)能促进植株的生长^[8],但高浓度时对植物有剧毒^[9-10],会抑制植物发芽、根系生长、幼苗生长和发育,诱导叶片失绿等。因此,为了采取针对性的措施减轻土壤中Cr(Ⅲ)污染对植物生长发育造成的危害,有必要充分研究Cr(Ⅲ)对植物的影响。吸收是重金属元素在植物体内富集的第一步骤,然而,目前关于植物吸收Cr(Ⅲ)的生理机制仍不清楚^[1]。Skeffington等^[11]认为,Cr(Ⅲ)只是在细胞壁阳离子交换位点被简单地被动吸收。Barros等^[12]发现植物对Cr(Ⅲ)的吸收是通过渗透进行的。Shahid等^[13]指出Cr(Ⅲ)的吸收是不消耗能量的,但张学洪等^[14]认为Cr超富集植株李氏禾对Cr(Ⅲ)的吸收可能存在需要能量的主动吸收过程。因此,目前对Cr(Ⅲ)进入植物根细胞内的方式还存在争议。根的细胞质膜是与重金属接触的第一个功能结构^[15],并在金属吸收中发挥着至关重要的作用^[16]。目前人们对金属通过何种通道进入细胞质膜内部有了一定的认识。一般认为,植物对非必需有毒元素的吸收是通过必需元素的吸收途径进行的。Lindberg等^[17]对 Cd^{2+} 进入小麦细胞质膜的机制进行研究后发现, Cd^{2+} 的吸收受到加入的氯化钙和氯化钾的抑制,也受到钙离子通道抑制剂和钾离子通道抑制剂的抑制,说明 Cd^{2+} 通过 Ca^{2+} 和 K^{+} 的通道被吸收。Ivashikina等^[18]利用从拟南芥根分离出的原生质体对

重金属阳离子是否影响向内钾通道的活性和电流及电压等进行研究,发现重金属阳离子可以阻止向内钾电流的20%~70%,其阻止能力排序为: $\text{Cu}^{2+}>\text{Zn}^{2+}>\text{Sr}^{2+}>\text{Cd}^{2+}$,由此推测,以上这些重金属离子至少是部分通过 K^{+} 通道进行吸收的。唐晓勇等^[19]验证了Fe元素对Cr元素的荧光有增强效应,并发现该增强效应还与Fe、Cr元素的相互作用有关。Bonet等^[20]研究发现,Fe的营养状况可影响Cr在植物根和地上部分的积累。Ramana等^[21]认为Cr(Ⅲ)和Fe(Ⅲ)竞争根细胞膜上的吸收位点,从而使两种离子的吸收存在拮抗效应。Liu等^[22]在Cr超富集植物李氏禾上观察到,Cr(Ⅲ)对Fe(Ⅲ)的吸收存在抑制作用。因此,对Cr(Ⅲ)进入细胞质膜的途径需要进一步论证。

鉴于此,本研究通过水培实验,探究不同Cr(Ⅲ)浓度对玉米幼苗Cr(Ⅲ)吸收的影响,以及ATP酶抑制剂、 Ca^{2+} 通道和 K^{+} 通道抑制剂、Fe(Ⅲ)是否抑制玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收,旨在探讨玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收动力学特征及途径。

1 材料与方法

1.1 材料与培养

试验在扬州大学环境科学与工程学院养苗室进行,供试材料为玉米苏玉20。玉米种子经浸泡、催芽、发芽、生长至一叶一心时,移栽至50% Hoagland营养液中培养7 d,保持间隙通气 $20 \text{ min} \cdot \text{h}^{-1}$,每3 d更新一次营养液。营养液组成: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KNO_3 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 H_3BO_3 $4.6 \times 10^{-2} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $3.0 \times 10^{-4} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $9.1 \times 10^{-3} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $7.7 \times 10^{-4} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $7.1 \times 10^{-5} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、EDTA-Fe $7.0 \times 10^{-2} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaOH或 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的HCl调节pH至5.5左右。

1.2 试验设计与测定内容

1.2.1 玉米幼苗对Cr(Ⅲ)的吸收

将在50% Hoagland营养液培养7 d后的玉米幼苗移栽到水培容器中,水培容器为直径20 cm、高48 cm的塑料圆桶,桶上有带7个孔的同质塑料圆盖,根据文献[14, 22]及前期试验结果^[23],本研究对玉米幼苗

进行5个浓度水平的Cr(Ⅲ)处理:0、2、5、10、20 mg·L⁻¹(以Cr计),Cr(Ⅲ)以CrCl₃形式添加,每处理7株,重复3次,每3 d换一次营养液,营养液pH值调节为5.0~5.5。处理10 d后取出玉米幼苗,用10 mmol·L⁻¹ EDTA浸洗3次,以去除玉米根系表面吸附的Cr离子,再将植株分为根系和地上部分,并对各部分的鲜质量进行称量,采用原子吸收分光光度法测定玉米根系和地上部鲜样中Cr的含量。

1.2.2 ATP酶抑制剂对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响

将在50% Hoagland营养液培养7 d后的玉米幼苗移栽到装有20% Hoagland营养液的容器中预培养12 h,根据文献[14,22]及前期试验对玉米幼苗进行如下处理:①15.6 mg·L⁻¹ CrCl₃(对照);②15.6 mg·L⁻¹ CrCl₃ + 25 μmol·L⁻¹ ATP酶抑制剂(Na₃VO₄);③15.6 mg·L⁻¹ CrCl₃ + 50 μmol·L⁻¹ ATP酶抑制剂(Na₃VO₄)。24 h后收获玉米幼苗的根,用10 mmol·L⁻¹ EDTA浸洗3次,以去除玉米根系表面吸附的Cr离子,采用原子吸收分光光度法测定根系Cr的含量。

1.2.3 离子通道抑制剂对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响

将在50% Hoagland营养液培养7 d后的玉米幼苗移栽到装有20% Hoagland营养液的容器中预培养12 h。根据文献[14,22]及前期试验对玉米幼苗进行如下处理:①15.6 mg·L⁻¹ CrCl₃(对照);②15.6 mg·L⁻¹ CrCl₃ + Ca²⁺通道抑制剂(1 mmol·L⁻¹ LaCl₃);③15.6 mg·L⁻¹ CrCl₃ + K⁺通道抑制剂(1 mmol·L⁻¹ CsH₂₀CIN)。分别与4 h和8 h收获玉米幼苗的根,用10 mmol·L⁻¹ EDTA浸洗3次,以去除玉米根系表面吸附的Cr离子,采用原子吸收分光光度法测定根系Cr、Ca的含量,采用火焰光度法测定K的含量。

1.2.4 Fe(Ⅲ)对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响

将在50% Hoagland营养液培养7 d的玉米幼苗分成3组放入不同营养液中进行处理:①完全缺Fe的20% Hoagland营养液(-Fe);②正常的20% Hoagland营养液(Normal);③在正常的20% Hoagland营养液中加入15 mg·L⁻¹的FeCl₃(+Fe),预培养48 h后,分别将0、10、20、40、80、160 mg·L⁻¹的CrCl₃加入这三组处理中,4 h后收获玉米幼苗的根,用10 mmol·L⁻¹ EDTA浸洗3次,以去除玉米幼苗根系表面吸附的Cr离子,采用原子吸收分光光度法测定根系中Cr的含量。

1.3 数据分析与统计方法

本文数据为3个独立重复的平均值±标准差(STDEV)。采用Excel 2016进行数据处理。用SPSS

23.0软件进行方差分析,处理间的多重比较采用Duncan法。玉米幼苗对Cr(Ⅲ)吸收的动力学曲线采用Origin Pro2021软件模拟Michaelis-Menten方程 $f=V_{max} \times \text{abs}(x) / [K_m + \text{abs}(x)]$, $\text{abs}(x)$ 为底物浓度, V_{max} 为玉米幼苗对Cr(Ⅲ)的最大吸收速率, K_m 为米氏常数。

2 结果与分析

2.1 玉米幼苗对Cr(Ⅲ)吸收的动力学特征

玉米幼苗各部位对Cr(Ⅲ)吸收的动力学曲线见图1。结果表明,玉米幼苗各部位对Cr的吸收动态均符合Michaelis-Menten模拟曲线方程 $f=V_{max} \times \text{abs}(x) / [K_m + \text{abs}(x)]$ 特征。玉米幼苗各部位对Cr(Ⅲ)的吸收速率均随着Cr(Ⅲ)处理浓度的增加而增加(图1),对Cr(Ⅲ)吸收速率表现为:根系>全株>地上部。

表1为玉米幼苗对Cr(Ⅲ)吸收的动力学方程参数。 K_m 表征离子载体与离子的亲和力, K_m 值越大,亲和力越小。结果表明,根系吸收Cr(Ⅲ)的 V_{max} 为121.4 mg·kg⁻¹·d⁻¹,明显高于地上部的16.3 mg·kg⁻¹·d⁻¹($P<0.05$),前者是后者的7.4倍;而根系吸收Cr(Ⅲ)的 K_m 为12.2 mg·L⁻¹,显著($P<0.05$)低于地上部的180.8 mg·L⁻¹,表明Cr(Ⅲ)与根系的亲和力大于地上部。此结果说明,玉米幼苗吸收的Cr(Ⅲ)绝大部分累积在根系,只有很少的Cr(Ⅲ)被转移到地上部。

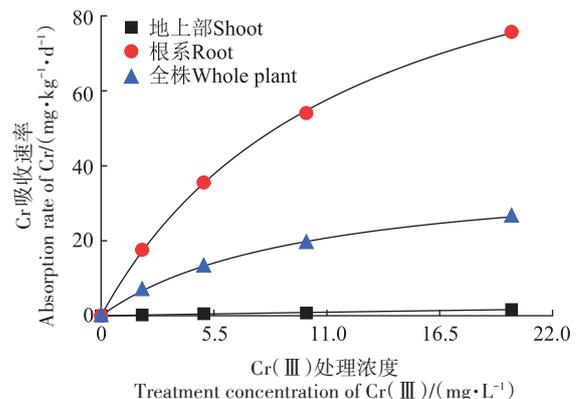


图1 玉米幼苗对Cr(Ⅲ)吸收的动力学曲线

Figure 1 Kinetic curves of Cr(Ⅲ) uptake by maize seedlings

表1 玉米幼苗对Cr(Ⅲ)吸收的动力学方程参数

Table 1 Kinetic parameters of Cr(Ⅲ) uptake by maize seedlings

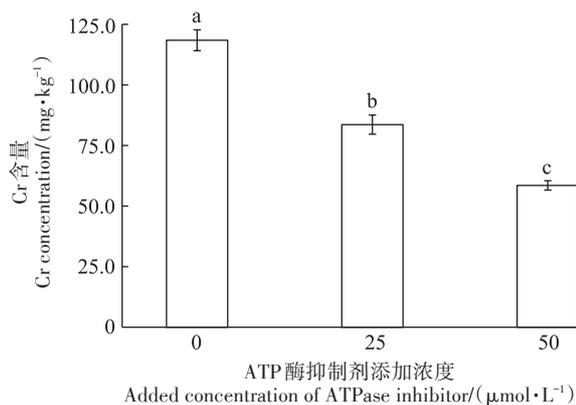
部位 Part	最大吸收速率 $V_{max}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	米氏常数 $K_m/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	R^2
根系	121.4	12.2	0.999 8
地上部	16.3	180.8	0.984 8
全株	39.5	10.0	0.999 5

2.2 ATP酶抑制剂对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响

由图2可知,与对照相比,添加不同浓度的ATP酶抑制剂处理均显著($P<0.05$)抑制了玉米幼苗根系对Cr的吸收。25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ATP酶抑制剂处理后,玉米根系中Cr的含量较对照分别降低了29.4%和50.6%。50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ATP酶抑制剂的对玉米根系吸收Cr的抑制作用大于25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ATP酶抑制剂。此结果说明,玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收存在主动吸收的过程。

2.3 离子通道抑制剂对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响

由图3可知,4 h和8 h抑制处理下, Ca^{2+} 通道抑制剂(LaCl_3)和 K^+ 通道抑制剂($\text{C}_8\text{H}_{20}\text{ClN}$)均没有显著($P>0.05$)抑制玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收。 Ca^{2+} 通道抑制剂显著($P<0.05$)抑制了玉米幼苗根系对 Ca^{2+} 的吸收,同样 K^+ 通道抑制剂显著($P<0.05$)抑制了玉米幼



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图2 不同ATP酶抑制剂添加浓度对玉米幼苗根系Cr吸收的影响

Figure 2 Effects of ATPase inhibitor on uptake of Cr(Ⅲ) by maize seedling root

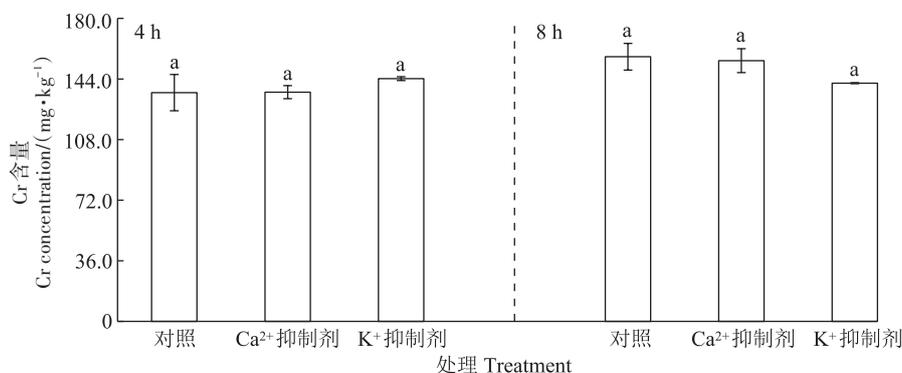


图3 离子通道抑制剂对玉米幼苗根系Cr(Ⅲ)吸收的影响

Figure 3 Effects of ion channel blockers on the uptake of Cr(Ⅲ) by maize seedling root

苗根系对 K^+ 的吸收(表2)。此结果表明,玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收与 Ca^{2+} 、 K^+ 通道无关。

2.4 Fe(Ⅲ)对玉米幼苗根系吸收Cr(Ⅲ)的影响

图4结果表明,在 $-\text{Fe}$ 、Normal、 $+\text{Fe}$ 各处理下,玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收速率均随着Cr(Ⅲ)处理浓度的增加而增加,其吸收动态均符合Michaelis-Menten方程。Cr(Ⅲ)处理浓度为40~160 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与Normal处理相比, $-\text{Fe}$ 处理下Cr(Ⅲ)吸收速率增加了4.0%~26.3%,但 $+\text{Fe}$ 处理下Cr(Ⅲ)吸收速率降低了15.6%~33.7%。

表3结果表明,与Normal处理相比, $-\text{Fe}$ 处理下,玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的 V_{max} 增加了20.0%, K_m 数值仅减少了5%, $-\text{Fe}$ 处理促进了玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收速率,略微增加了Cr(Ⅲ)与玉米幼苗根系吸收位点的亲和力,而 $+\text{Fe}$ 处理下的玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的 V_{max} 减少了46.0%, K_m 数值减少了

表2 离子通道抑制剂对玉米幼苗根系吸收 Ca^{2+} 和 K^+ 的影响

Table 2 Effects of ion channel blockers on the uptake of Ca^{2+} and K^+ by maize seedling root

时间 Time/h	处理 Treatment	根中离子含量 Ion concentration of roots/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	
		Ca^{2+}	K^+
4	对照	247.6±8.2a	
	Ca^{2+} 通道抑制剂	207.3±1.1b	
8	对照	229.8±5.6a	
	Ca^{2+} 通道抑制剂	185.6±1.4b	
4	对照		203.9±3.0a
	K^+ 通道抑制剂		160.3±6.8b
8	对照		196.5±7.3a
	K^+ 通道抑制剂		143.5±2.7b

注:不同小写字母表示处理组内差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

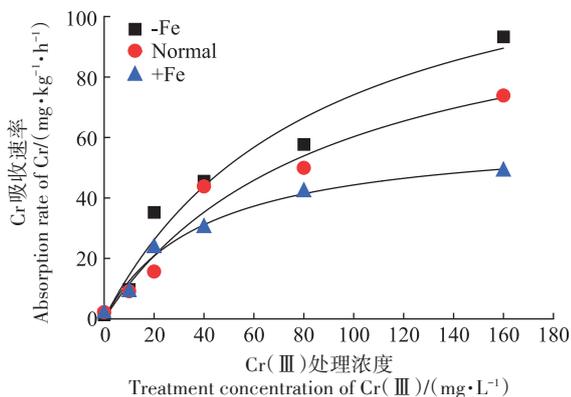


图4 不同Fe处理对玉米幼苗根系吸收Cr(Ⅲ)动力学曲线
Figure 4 Kinetic curves of Cr(Ⅲ) uptake by maize seedling root under different Fe treatments

56.0%, -Fe 和+Fe 处理下 V_{max}/K_m 数值基本不变。以上结果表明, Fe(Ⅲ) 抑制了玉米幼苗根系对 Cr(Ⅲ) 的吸收速率, Fe(Ⅲ) 与 Cr(Ⅲ) 之间存在反竞争性的抑制关系。

表3 不同Fe处理下玉米幼苗根系对Cr吸收的动力学方程参数
Table 3 Michaelis-Menten equation constants of Cr uptake by maize seedling roots under different Fe treatments

处理 Treatment	最大吸收速率 $V_{max}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	米氏常数 $K_m/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	R^2
Normal	114.2	89.5	0.967 5
-Fe	137.0	84.9	0.964 2
+Fe	61.7	39.4	0.985 0

3 讨论

3.1 玉米幼苗对Cr(Ⅲ)吸收的动力学特征

目前, 植株对 Cr(Ⅲ) 的吸收和分布机制仍未被完全了解^[16]。Wu 等^[24]研究了不同 CrCl_3 处理浓度 (0、2.5、5、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对白菜不同部位 Cr 含量的影响, 发现与白菜茎秆相比, 根系 Cr 含量增加了两倍。另有研究将一些大型植物 (水花生、空心莲子草、疏螺旋体、铁蓼和凤眼莲) 暴露于 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CrCl_3 中, 同样观察到根系中 Cr 含量远高于茎秆和叶片的现象, 且在叶片中发现的 Cr 含量几乎可以忽略不计^[25]。但张学洪等^[14]研究发现, 李氏禾中大约有一半的 Cr 被转移到地上部分, 表明 Cr 在李氏禾根部的移动性比较好, 这可能与李氏禾是 Cr 超富集植株有关。本研究发现, 经不同浓度 Cr(Ⅲ) (0、2、5、10、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 处理 10 d 后, 玉米幼苗对 Cr(Ⅲ) 的吸收速率随溶液中 Cr(Ⅲ) 浓度的变化趋势符合 Michaelis-

Menten 方程, 各部位对 Cr(Ⅲ) 的吸收速率均随着 Cr(Ⅲ) 处理浓度的增加而增加, 玉米幼苗根系对 Cr(Ⅲ) 的吸收速率显著高于地上部 (图 1), 且 Cr(Ⅲ) 与根系的亲和力显著高于地上部 (表 1), 表明玉米幼苗吸收的 Cr(Ⅲ) 绝大部分都分布在根系, 从根系转移到地上部的非常有限, 这可能是因为非 Cr 富集植物缺乏对 Cr 的转运机制。

3.2 玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收途径

本研究发现玉米幼苗吸收的 Cr(Ⅲ) 主要富集在根部, 很少往地上部运输, 因此重点研究玉米幼苗根系对 Cr(Ⅲ) 的吸收途径, 但目前植物对 Cr(Ⅲ) 的吸收是主动吸收还是被动吸收, 一直存在争议。ATP 酶包括 P 型和 V 型, 其中 P 型 ATP 酶易被 Na_3VO_3 抑制, 在植物体内广泛存在^[14], 本试验中, 在 15.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CrCl_3 处理下, 不同浓度 ATP 酶抑制剂均对玉米幼苗根系吸收 Cr(Ⅲ) 有明显的抑制作用, 表明玉米幼苗根系对 Cr(Ⅲ) 的吸收与能量有关, 存在着主动吸收的过程, 这与 Skeffington 等^[11]以大麦为研究对象开展的试验结果相反, 但与 Liu 等^[22]以李氏禾为研究对象开展的试验结果一致。玉米植株对 Cr(Ⅲ) 主动吸收的方式让其从土壤中吸收更多的 Cr(Ⅲ), 并在玉米根系中累积, 产生毒害作用, 从而影响玉米植株的生长发育。

由于 Cr(Ⅲ) 不是植物的必需营养元素, 因此, 植物对 Cr(Ⅲ) 的吸收可能是通过必需营养元素的途径 (如某些阳离子通道) 进入细胞质膜^[14]。前人研究发现, Ca^{2+} 和 K^+ 通道是细胞质膜上最重要的两个离子通道^[14, 26], 可以分别被 Ca^{2+} 通道抑制剂与 K^+ 通道抑制剂抑制。本研究发现, 两种抑制剂均没有抑制玉米幼苗根系对 Cr 的吸收, 但明显抑制了玉米幼苗根系对 Ca^{2+} 和 K^+ 的吸收, 说明玉米幼苗根系对 Cr(Ⅲ) 的吸收不是通过 Ca^{2+} 通道或者 K^+ 通道实现的。离子通道是细胞膜上的特殊蛋白质大分子, 在脂质双层膜上构成具有高度选择性的亲水孔道, 从而允许适当大小和适当电荷的离子通过, 其对通过的离子具有一定的选择性。玉米对 Cr(Ⅲ) 的吸收没有通过 Ca^{2+} 和 K^+ 通道实现, 表明其可能是通过其他的离子通道实现的。Cr(Ⅲ) 和 Fe(Ⅲ) 有着相同的价态和相似的离子半径 (分别为 64 Å 和 69 Å)。Bonet 等^[20]研究发现, Fe 的营养状况可影响 Cr 在植物根和地上部分的积累; Pandey 等^[27]研究发现 Cr 胁迫下植株叶片的 Fe 含量减少约 50%。Liu 等^[28]发现, 在不同浓度 Cr 处理中, Fe、Cu、Mg 和 Zn 含量均有所下降。Park^[29]发现, Cr(Ⅲ)

处理降低了生菜对Fe的吸收。本课题组前期研究发现,当Cr(Ⅲ)浓度 $>5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,玉米幼苗叶绿素含量随着处理浓度的升高而降低,叶片表现出“失绿”症状^[23],且随着Cr(Ⅲ)处理浓度的增加,玉米幼苗根系、叶片和全株的Fe含量和累积量呈现下降的趋势,这个结果说明Cr(Ⅲ)抑制了玉米幼苗对Fe的吸收,推测玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收途径可能与Fe(Ⅲ)有关。因此,本研究中采用 $-\text{Fe}$ 营养液、正常营养液、 $+\text{Fe}$ 营养液处理玉米植株,发现与正常营养液处理相比, $-\text{Fe}$ 处理下,玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的 V_{\max} 增加了20.0%, K_m 数值仅减少了5%, $-\text{Fe}$ 处理促进了玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收速率,略微增加了Cr(Ⅲ)与玉米幼苗根系吸收位点的亲和力,而Fe(Ⅲ)处理下的玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的 V_{\max} 减少了46.0%, K_m 数值减少了56.0%,这表明Fe(Ⅲ)抑制了玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收速率,两者之间存在反竞争性的抑制关系(图4、表3)。Fe(Ⅲ)究竟通过哪些关键因素影响了Cr(Ⅲ)的吸收速率尚不明确。因此,下一步的研究中,需明确Fe(Ⅲ)和Cr(Ⅲ)之间相互影响的深层次的生理机制,以期能为减轻Cr(Ⅲ)对植物危害的营养吸收的调节、对逆境环境的适应性等方面的改造提供科学参考。

4 结论

(1)玉米幼苗对Cr(Ⅲ)的吸收动态符合Michaelis-Menten方程。根系对Cr(Ⅲ)的吸收速率显著高于地上部,Cr(Ⅲ)与根系的亲合力大于地上部。

(2)玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收存在主动吸收的过程。

(3)玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收与 Ca^{2+} 和 K^+ 通道无关。

(4)Fe(Ⅲ)抑制了玉米幼苗根系对Cr(Ⅲ)的吸收,Fe(Ⅲ)与Cr(Ⅲ)之间存在反竞争性的抑制关系。

参考文献:

[1] SINGH H P, MAHAJAN P, KAUR S, et al. Chromium toxicity and tolerance in plants[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, 11: 229-254.

[2] 王兴润,李磊,颜湘华,等. 铬污染场地修复技术进展[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 1-8, 23. WANG X R, LI L, YAN X H, et al. Progress in remediation chromium contaminated sites[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 1-8, 23.

[3] 王爱云,黄姗姗,钟国锋,等. 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2028-2036. WANG A Y,

HUANG S S, ZHONG G F, et al. Effect of Cr(VI) stress on growth of three herbaceous plants and their Cr uptake[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 2028-2036.

[4] ZAYED A M, TERRY N. Chromium in the environment: Factors affecting biological remediation[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 139-156.

[5] HUFFMAN JR E W, ALLAWAY W H. Chromium in plants: Distribution in tissues, organelles and extracts, and availability of bean leaf chromium to animals[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1973, 21(6): 982-986.

[6] 彭叶棉,杨阳,侯素霞,等. 外源六价铬在土壤中的有效性及其小麦毒性效应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 369-377. PENG Y M, YANG Y, HOU S X, et al. The bioavailability of exogenous Cr(VI) in soils and its toxic effect on wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 369-377.

[7] CHRISTOU A, GEORGIADOU E C, ZISSIMOS A M, et al. Uptake of hexavalent chromium by tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants and mediated effects on their physiology and productivity, along with fruit quality and safety[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 189: 104564.

[8] 钟曼依,张新全,杨昕颖,等. 植物对重金属铬胁迫响应机制的研究进展[J]. 草业科学, 2019, 36(8): 1962-1975. ZHONG M Y, ZHANG X Q, YANG X Y, et al. Recent advances in plant response to chromium stress[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(8): 1962-1975.

[9] SHANKER A K, DJANAGUIRAMAN M, VENKATESWARLU B. Chromium interactions in plants: current status and future strategies[J]. *Metallomics*, 2009, 1: 375-383.

[10] SRIVASTAVA D, TIWARI M, DUTTA P, et al. Chromium stress in plants: toxicity, tolerance and phytoremediation[J]. *Sustainability*, 2021, 13: 4629.

[11] SKEFFINGTON R A, SHEWRY P R, PETERSON P J. Chromium uptake and transport in barley seedlings (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *Planta (Berl.)*, 1976, 132(3): 209-214.

[12] BARROS M A S D, ARROYO P A, SOUSA-AGUIAR E F, et al. Multicomponent ion exchange isotherms in NaX zeolite: evaluation of Cr/Ca/Mg, Cr/Ca/K and Cr/Mg/K systems[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2008, 83: 983-990.

[13] SHAHID M, SHAMSHAD S, RAFIQ M, et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soilplant system: a review[J]. *Chemosphere*, 2017, 178: 513-533.

[14] 张学洪,刘杰,朱义年. 重金属污染土壤的植物修复技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 15-24. ZHANG X H, LIU J, ZHU Y N. The research on phytoremediation technology for heavy metal contaminated soils[M]. Beijing: China Science Press, 2011: 15-24.

[15] GOMESA M A DA C G, HAUSER-DAVIS B R A, SUZUKIA M S, et al. Plant chromium uptake and transport, physiological effects and recent advances in molecular investigations[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 140: 55-64.

[16] HAYAT S, KHALIQUE G, IRFAN M, et al. Physiological changes induced by chromium stress in plants: An overview[J]. *Protoplasma*, 2012, 249: 599-611.

[17] LINDBERG S, LANDBERG T, GREGER M. A new method to detect

- cadmium uptake in protoplasts[J]. *Planta*, 2004, 219(3):526-532.
- [18] IVASHIKINA G A, SOKOLOV O A. Blocking of potassium channels in root cells by heavy metals and strontium[J]. *Agrokhimiya*, 2006, 12: 47-53.
- [19] 唐晓勇, 倪晓芳, 商照聪. 土壤中铁元素对铬元素 p-XRF 测定准确度的影响与校正[J]. 岩矿测试, 2020, 39:467-474. TANG X Y, NI X F, SHANG Z C. Effect and correction of iron in soil on accuracy of chromium determination by portable X-ray fluorescence spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(3):467-474.
- [20] BONET A, POSCHENRIEDER C, BARCELO J. Chromium III-iron interaction in Fe-deficient and Fe-sufficient bean plants. I. Growth and nutrient content[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14: 403-414.
- [21] RAMANA V V, SASTRY K S. Chromium toxicity in *Neurospora crassa*[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 1994, 56:87-95.
- [22] LIU J, DUAN C Q, ZHANG X H, et al. Characteristics of chromium(III) uptake in hyperaccumulator *Leersia hexandra* Swartz[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 74:122-126.
- [23] 陈永林, 陈小锦, 丛玮玮, 等. 不同价态铬对玉米幼苗铬吸收动力学特征及生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3):46-50. CHEN Y L, CHEN X J, CONG W W, et al. Effects of different valence chromium on chromium absorption kinetics and growth of maize seedlings[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(3):46-50.
- [24] WU Z P, MCGROUTHER K, CHEN D L, et al. Subcellular distribution of metals within *Brassica chinensis* L. in response to elevated lead and chromium stress[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61:4715-4722.
- [25] MANGABEIRA P A, FERREIRA A S, DE ALMEIDA A A F, et al. Compartmentalization and ultrastructural alterations induced by chromium in aquatic macrophytes[J]. *Biomaterials*, 2011, 24:1017-1026.
- [26] TESTER M. Plant ion channels: Whole cell and single-channel studies[J]. *The New Phytologist*, 1990, 114:305-340.
- [27] PANDEY N, SHARMA C P. Chromium interference in iron nutrition and water relations of cabbage[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(3):195-200.
- [28] LIU D H, ZOU J H, WANG M, et al. Hexavalent chromium uptake and its effects on mineral uptake, antioxidant defence system and photosynthesis in *Amaranthus viridis* L.[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:2628-2636.
- [29] PARK J H. Contrasting effects of Cr(III) and Cr(VI) on lettuce grown in hydroponics and soil: Chromium and manganese speciation[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266:115073.

(责任编辑:叶飞)