

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.07.2015121802

王小恒,李裕,王式功.模拟气候变暖对小麦幼苗亚细胞中 Cd 的动态累积的影响[J].环境化学,2016,35(7):1415-1421
WANG Xiaoheng, LI Yu, WANG Shigong. Influence of simulated climate warming on Cd accumulation dynamics in subcellular compartments of *Triticum aestivum* L.[J].Environmental Chemistry, 2016, 35(7):1415-1421

模拟气候变暖对小麦幼苗亚细胞中 Cd 的动态累积的影响*

王小恒^{1,2} 李 裕³ 王式功^{4**}

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000; 2. 西北民族大学医学院, 兰州, 730030;
3. 西北民族大学化工学院, 兰州, 730030; 4. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000)

摘 要 采用气候变暖模拟实验,在高浓度 Cd 胁迫下,研究模拟温度与 CO₂ 浓度联合升高对小麦幼苗亚细胞中 Cd 的动态累积的影响,该研究旨在探索全球气候变暖背景下,作物对毒性元素 Cd 胁迫的微观响应过程及其机制.研究显示,随处理温度和 CO₂ 浓度的增加,根、叶部的富集系数(BF)总体呈现显著的上升趋势,叶部相比对照增加了 1.98—3.37 倍,根部增加 1.90—2.48 倍.根、叶部各亚细胞组分中的 Cd 浓度也呈现显著的增加趋势,但各组分中的 Cd 相对比例维持稳定,细胞可溶性组分占比最高,是 Cd 在小麦幼苗细胞中的主要贮存位点.在最高处理温度和 CO₂ 浓度条件下, Cd 自根部向叶部的迁移相对对照增加 1.34 倍.结果表明,气候变暖将在一定程度上影响 Cd 在小麦幼苗中的动态富集,这很可能在多个层面上进一步强化气候变暖对生态系统、人类食品安全等方面的负性效应.

关键词 气候变暖, 小麦, Cd, 亚细胞.

Influence of simulated climate warming on Cd accumulation dynamics in subcellular compartments of *Triticum aestivum* L.

WANG Xiaoheng^{1,2} LI Yu³ WANG Shigong^{4**}

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China;
2. School of Medical Sciences, Northwest University for Nationalities, Lanzhou, 730030, China;
3. School of Chemical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou, 730030, China;
4. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: A simulated climate warming experiment was conducted to evaluate the combined effects of elevated temperature and CO₂ concentration on the bioaccumulation of Cd in wheat seedlings. The aim of this study was to explore the process and the mechanism of the crop responses to the stress of Cd in future climate scenarios. The results showed that compared to control, elevated temperature and CO₂ increased Cd bioaccumulation factor by 1.98—3.37 times in the shoots, by 1.90—2.48 times in the roots. Moreover, Cd concentration was also significantly increased with the increase of temperature and CO₂ concentration in subcellular compartments of roots and shoots of wheat seedlings. The largest proportion of Cd was found in the soluble fractions which were the main storage site for Cd in wheat seedling cells. The increase of temperature and CO₂ had no significant effect on the proportional distribution of Cd in the subcellular fractions. In addition, the root-to-shoot translocation of Cd increased significantly under the highest temperature and CO₂ treatment

2015 年 12 月 18 日收稿(Received: December 18, 2015).
* 国家自然科学基金(41261052)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(41261052).
** 通讯联系人, Tel: +86-931-8912702, E-mail: wsglight99@163.com
Corresponding author, Tel: +86-931-8912702, E-mail: wsglight99@163.com

conditions. It is likely to further strengthen the negative effects of climate warming on ecosystem, human food security and other aspects on multiple levels.

Keywords: climate warming, wheat seedlings, Cd, subcellular.

根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告,全球变暖趋势已毋庸置疑,报告指出,在全球变暖 2 °C 的情景下,中国大陆年均温度可能升高 2.7—2.9 °C,CO₂ 浓度可能增加 5%—7%^[1]. 温度与 CO₂ 浓度是作物生长和发育的两个最重要也最敏感的气候变量,研究显示,全球 CO₂ 和温度升高直接影响到作物光合作用、生物量和产量,预示气候变化对农业整体影响已逐步显现^[2]. 然而,这些研究中,对于全球变暖情况下农业生态系统中痕量元素的生物富集动态缺乏认知. 目前,全球大多数农业土地面临着营养元素和非营养毒性元素的胁迫问题,在全球气候变暖的背景下,这一问题将变得更加复杂和难解. 但这一科学问题是应对未来气候变化,预测未来农业投入、粮食和食品安全问题的理论依据,也是全球变化中既重要、又复杂,并且目前认知最少的领域^[3].

近年来,已有研究发现土壤温度升高可显著提高几种植物对 Zn、Pb、Ag、Cr、Sb 和 Cd 的吸收速率^[4-6],也有研究发现,温度升高可显著降低小麦籽粒中的 Cd 浓度,CO₂ 浓度升高显著降低小麦、水稻等作物对 Cu、Zn 等营养元素的吸收,而增加其对毒性元素 Cd 的吸收^[7-8]. 这些研究表明,温度与 CO₂ 浓度升高对于作物痕量元素吸收的影响呈现明显的不对等性,甚至截然相反的效应,且存在显著的种属间及元素种类间的差异. 现有的研究由于栽培基质的不同及作物生育期的不同等,所得的试验结果间也存在较大差异. 这一现象说明,无法从温度或 CO₂ 浓度的单一效应,去预知气候变暖对农业生态系统中痕量元素的生物富集动态的整体效应. 遗憾的是,目前在全球范围内,有关温度与 CO₂ 浓度升高对作物痕量元素的生物富集动态的联合效应研究并不多见,在亚细胞层面的探索则更为缺乏.

近几十年来,以 Cd 为代表的农业土壤有毒重金属污染已成为全球范围内普遍面临的一个严重问题和研究热点^[9]. Cd 作为人体及作物生长的非必须痕量元素,对人类及其他动植物具有极强的毒性,且具有化学活性强,迁移性大,毒性持久,易产生富集等特点. 事实上,目前为止人类并未完全认知和从根本上解决 Cd 对作物的毒性胁迫问题. 本课题组前期的研究结果显示^[10],在低浓度 Cd (10 μg·g⁻¹) 胁迫下,温度与 CO₂ 浓度联合升高可显著影响小麦幼苗对 Cd 的富集、迁移及亚细胞内的分布.

在此基础上,为进一步探索和解密全球气候变暖对农作物微量元素生物富集的动态响应过程及其相关的机理、机制,本文将 Cd 的胁迫浓度提高 5 倍至 50 μg·g⁻¹,采用无土栽培技术,在人工气候室进行了温度与 CO₂ 浓度联合升高的气候变暖模拟试验,考察在相对较高浓度 Cd 胁迫下,温度与 CO₂ 浓度联合升高对小麦幼苗中 Cd 的动态富集的影响. 以期进一步探明在全球气候变暖背景下,作物对毒性元素 Cd 胁迫的微观响应过程及其机制,为未来气候变暖条件下重金属生态风险评估、健康风险评价、食品安全等提供相关的理论依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究地点

模拟试验在中国气象局兰州干旱气象研究所定西试验基地 (35°35'N, 104°37'E) 进行. 该基地气候以冬季干冷,夏季暖湿为主要特征,年降雨量 380 mm,年均温 7.7 °C,由于半干旱的气候环境加之无灌溉水源,雨养农业是本区主要的农业生产方式,主要作物以小麦、玉米、马铃薯和豆类为主. 鉴于气候变化过程具有较强的空间及地域特征,因此,该研究结果仅适于我国西北地区半干旱的气候环境,以及以雨养农业为主的农业生产区域.

1.2 试验设计

模拟试验在人工气候室进行. 人工气候室总长 28.8 m、宽 20 m、高 4.85 m,室内占地面积 594 m²,整个气候室被分成 3 个相互独立的小气候室. 每个气候室均由智能控制系统、遮阳系统、自然通风系统、强制降温系统、滴灌系统、固定上喷系统、CO₂ 补充系统、补光系统和加温系统组成. 运行过程中智能控制系统通过对各子系统的远程调控操作,实现各气候室内温湿度、降雨和 CO₂ 等气候因子维持在试验设计的

水平.在智能控制系统的调控下,可使室内温度比室外增加 0—3.5 ℃,或者比室外降低 0—7 ℃,CO₂水平可比室外增加 0—1000 μmol·mol⁻¹.实验期间室外对照(自然状态)平均最高温度为 19.7 ℃,平均最低温度为 9.3 ℃,CO₂水平波动在 352—374 μmol·mol⁻¹.该系统自 2007 年开始运行,已有多项研究在该人工气候室完成并取得一定成果^[11-12].

研究设 3 个模拟处理条件(TC1、TC2 和 TC3)和 1 个室外自然对照(A),如表 1 所示.每个实验情景设 3 个重复.3 个模拟处理分别在上述 3 个独立的人工气候室进行,室外对照在距人工气候室外 20 m 处的自然田野进行.

表 1 模拟处理条件和对照设计详表

Table 1 Details about the three simulated climate treatments and the untreated control condition (A)

	A	TC1	TC2	TC3
温度升高/℃	+0	+1	+2	+3
CO ₂ 浓度升高/(μmol·mol ⁻¹)	+0	+50	+100	+150

1.3 小麦幼苗培养

选取优质的西汉 1 号小麦种子,用 30%的 H₂O₂消毒处理,在湿润的石英砂中发芽,5 d 后选取生长一致的小麦幼苗,移栽至盛有 2.5 L Hoagland 营养液的平底塑料盆中,每盆移栽 8 株幼苗,共设置 12 盆.3 d 后,将上述 12 盆幼苗随机分为 4 组,每组 3 盆,代表 3 次重复,分别置于室外(A)及 3 个不同模拟条件的气候室中(TC1、TC2、TC3),同时向培养液中加入 CdCl₂,使 Cd²⁺浓度达到 50 μg·g⁻¹,每 3 d 更换 1 次营养液(保持 Cd²⁺浓度不变).由于培养液中 EDTA 影响小麦幼苗的 Cd 吸收,因此,在加入 CdCl₂时,将培养液中 Fe-EDTA 用 FeSO₄ (FeSO₄·7H₂O) 替换.27 d 后,收获幼苗,用去离子水冲洗干净,置于 Na₂-EDTA 溶液中(pH 6.0, 10 mmol·L⁻¹)平衡 30 min,再次用去离子水冲洗干净,将根叶分离后置于 -70 ℃的冰箱中保存待测.

1.4 亚细胞分离及化学分析

称去 5 g 新鲜的根或叶,用瓷研钵在 -4 ℃的低温介质中研磨至匀浆化.研磨介质主要由 Tris-HCl (pH 7.5)、二硫赤藓糖醇(C₄H₁₀O₂S₂)等组成.采用低温差速离心技术将匀浆好的小麦幼苗根、叶分别分为 F1(细胞壁及细胞碎片)、F2(细胞器)和 F3(细胞可溶性组分)等 3 个亚细胞分级.首先将匀浆好的样品采用 80 μm 尼龙布过滤,300 g 离心 30 s,将滤出的残渣和初次离心的沉淀混合,此部分即为 F1 级,将滤液在 20000 g 离心 45 min,底层碎片为 F2 级,上层悬浮液 F3 级.各组分中 Cd 含量测定由兰州大学分析测试中心采用石墨炉-原子吸收光谱仪测定完成.

1.5 统计与计算

统计分析采用 SPSS 16.0 for Windows (SPSS Inc., USA) 统计软件包进行.绘图采用 Origin 9.0 (OriginLab USA) 统计软件包进行.富集系数(BF)计算式如下:

$$BF_{shoot} = C_{shoot} / C_{medium},$$
$$BF_{root} = C_{root} / C_{medium},$$

式中,C_{shoot}为叶部的 Cd 浓度,C_{root}为根部的 Cd 浓度,C_{medium}为培养液中的 Cd 浓度.

转移系数(TF)计算式如下:

$$TF = C_{shoot} / C_{root}$$

式中,C_{shoot}为叶部的 Cd 浓度,C_{root}为根部的 Cd 浓度.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 小麦幼苗根、叶部对 Cd 的富集

富集系数 BF 常被用来反映植物组织对重金属的富集情况.如图 1 所示(P < 0.05),小麦幼苗根、叶部 Cd 的富集系数 BF 值均小于 1,随处理温度和 CO₂浓度的增加,根、叶部的 BF 值总体呈现显著的上升趋势,叶部各处理组相比对照组分别增加了 1.98、2.64、3.37 倍,根部相比对照组分别增加 1.90、2.38、

2.48 倍,但在较高的温度和 CO₂浓度处理条件下上升趋势有所减缓.总体来看,温度和 CO₂浓度联合升高对叶部 Cd 的富集影响更为显著.在相同的处理条件下,根部的 BF 值分别是叶部的 4.15、4.00、3.75、3.06 倍,说明根部对 Cd 的富集显著高于叶部.

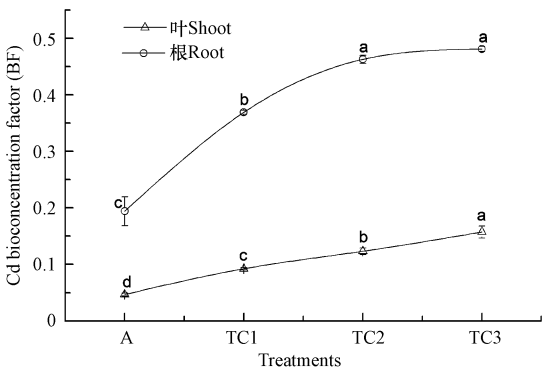


图 1 温度与 CO₂联合升高对小麦幼苗根、叶部 Cd 富集系数的影响

Fig.1 The combined effects of elevated temperature and CO₂ concentrations on the Cd BF values in wheat shoots and roots

上述研究结果与本课题组前期低浓度 Cd 胁迫下模拟气候变暖的研究结果^[10]相比,小麦幼苗根、叶部的富集系数相比对照增加幅度更为显著,进一步证实了气候变暖在一定程度上促进了作物的 Cd 富集.大量研究表明,在气候变化背景下,作物会产生一系列复杂的生理、生化响应,这将为解析气候变化对作物 Cd 富集的影响提供很好的科学启示.根部的 Cd 富集是整个富集过程中最为关键的一步.研究显示,温度和 CO₂浓度增加有助于作物光合作用和蒸腾作用的进行,提高作物根部的资源捕获能力^[13],同时也有利于酶活性的增加及转运蛋白的合成^[14-16],在一定程度上促进 Cd 的吸收和转运.上述因素共同作用最终使根部 Cd 吸收速率超过了其生长稀释作用,导致 Cd 在根部的富集增加.TC3 处理导致根部 Cd 富集减缓应该由于 Cd 向叶部的迁移增加所致,本文 2.4 节也将论证这一点.

叶部对 Cd 的富集,很大程度上决定于根部的 Cd 富集总量及 Cd 离子在根部空泡区隔化的程度及最终转移进入木质部和韧皮部的数量^[17].木质部装载是 Cd 离子自根部迁移至叶部的关键步骤,该过程是一个由 P-type ATPase AtHMA4 介导的能量依赖过程^[18],温度增加将有助于提高 Cd 离子的木质部装载效率,从而促进 Cd 离子自根部向叶部迁移.在相同条件下,根部 Cd 富集高于叶部,这与其他类似研究结果一致^[19],被认为是作物应对有毒金属胁迫的一种自我保护机制和耐受机制.

2.2 小麦幼苗根、叶部 Cd 的亚细胞浓度

在小麦幼苗根、叶部各亚细胞层 Cd 浓度随处理温度和 CO₂浓度的增加总体均呈现增加趋势(图 2, $P < 0.05$).叶部 F1 层(细胞壁及细胞碎片)各处理组(TC1、TC2 和 TC3)相比对照(A)分别增加了 115%、219.1%和 255.6%;F2 层(细胞器)相比对照分别增加了 68.1%、131.3%和 163.9%;F3 层(细胞可溶性组分)相比对照分别增加了 101.4%、148.4%和 258.9%.根部 F1 层各处理组(TC1、TC2 和 TC3)相比对照(A)分别增加了 39.9%、92.3%和 77.4%;F2 层相比对照分别增加了 59.3%、190.5%和 171.9%;F3 层相比对照分别增加了 117.7%、146.6%和 172.2%.总体来看,温度和 CO₂浓度的联合增加对叶部各亚细胞层的 Cd 浓度影响更为显著,这与前期的研究结果一致^[10].

上述结果表明,温度和 CO₂浓度的联合升高将增加小麦幼苗各亚细胞组分对 Cd 的物理富集及细胞内损伤从而增加小麦幼苗对 Cd 胁迫的毒性敏感性,并在更深层面上强化 Cd 胁迫的负性生态效应.从这一层面来看,气候变暖对小麦幼苗亚细胞内 Cd 富集的影响,有可能威胁到人类的食物安全,但尚不能依此而定论.事实上,李裕^[12]等对同品种的小麦研究发现,模拟温度增加可使小麦籽粒中 Cd 浓度相比对照降低 20.5%—43.4%,这说明小麦在不同生育期、不同组织中的 Cd 富集始终处在一个动态变化过程中.当然,现有研究大多只考察了温度或 CO₂浓度升高的单一效应,尚未见涉及全生育期的温度与 CO₂联合升高的研究报道.最后需要说明的是,由于本实验对照设置在室外自然条件下,为保证可比性,处理实验必须与对照同步开展,而实验基地可供同时开展实验的人工气候室数量有限,且维持气候室运行的费用高昂,因此本研究暂未进行更为复杂的正交实验,以分析 Cd 浓度在小麦幼苗及亚细胞中的增加到底

是由于温度还是二氧化碳浓度起主要作用,但这并不影响本研究结果的客观呈现.这一问题将在后续的研究中予以关注和深入探索.

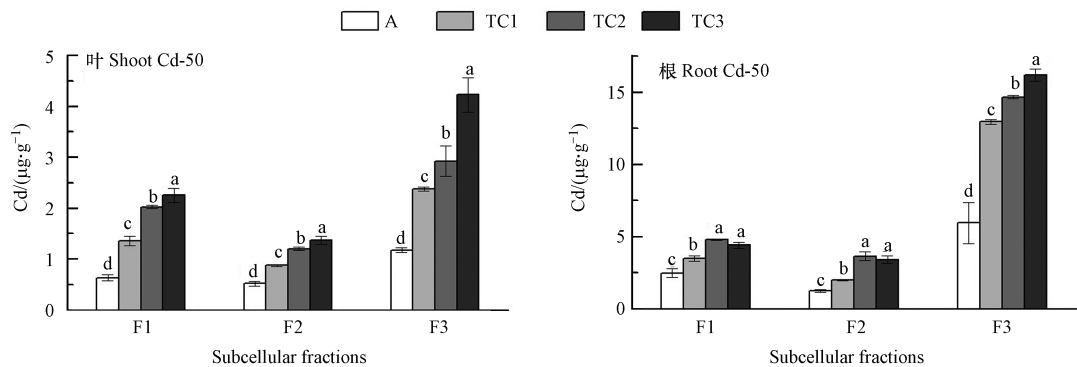


图2 温度与 CO₂联合升高对小麦幼苗根、叶部的 Cd 亚细胞浓度的影响
(F1:细胞壁及细胞碎片;F2:细胞器;F3:细胞可溶性组分)

Fig.2 The combined effects of elevated temperature and CO₂ concentrations on the subcellular Cd concentrations in wheat shoots and roots
(F1:Cell wall and debris;F2:Organelles;F3:Soluble fractions)

2.3 小麦幼苗根、叶部 Cd 的亚细胞比例分布

气候变暖对 Cd 在小麦幼苗根、叶部各亚细胞层的比例分布影响并不显著(仅个别组间存在统计学意义)(图 3, $P < 0.05$).叶部 F1 层 Cd 分布比例波动在 27.2%—32.9%;F2 层波动在 17.5%—22.3%;F3 层波动在 47.5%—53.8%.根部 F1 层 Cd 分布比例波动在 18.4%—26.2%; F2 层波动在 10.9%—15.8%; F3 层波动在 60.7%—70.2%. 根、叶部各亚细胞层比例分布排序均为 F3 > F1 > F2, 其中 F3 的分布比例显著高于 F1 和 F2 层,说明 Cd 在小麦幼苗根、叶部主要分布于细胞的可溶性组分中,这与文献报道的类似研究结果基本一致^[20-21].细胞可溶性组分的主要成分为空泡,而空泡正是重金属离子在植物组织中的主要储存位点^[22].

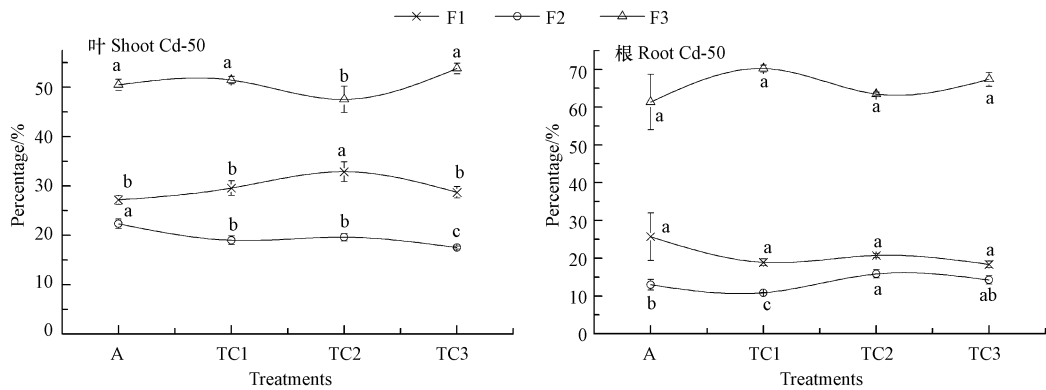


图3 温度与 CO₂联合升高对小麦幼苗根、叶部的 Cd 亚细胞比例分布的影响
(F1:细胞壁及细胞碎片;F2:细胞器;F3:细胞可溶性组分)

Fig.3 The combined effects of elevated temperature and CO₂ concentrations on the proportional distribution of Cd in the subcellular fractions of wheat roots and shoots
(F1:Cell wall and debris;F2:Organelles;F3:Soluble fractions)

自上述结果来看,温度与 CO₂联合升高对各亚细胞组分中 Cd 分布的影响存在一定的均衡性,Cd 在小麦幼苗根、叶部各亚细胞层的比例分布影响总体上并未出现显著的改变.然而据早期的文献报道^[23-24],温度增加可在一定程度上改变 Cd 在小麦幼苗亚细胞中的比例分布.有关 CO₂浓度升高对各小麦幼苗亚细胞中的 Cd 分布影响研究尚未见报道.据此分析,单一增温与单一升高 CO₂浓度对小麦幼苗亚细胞中的 Cd 分布的影响可能呈现完全相反的效应,当两者联合升高时,其各自的效应可能在很大程

度上被相互抵消,导致最终的综合效应并不显著.

2.4 小麦幼苗中 Cd 自根部向叶部的迁移

迁移系数(TF)能够直观地反映重金属元素在植物体内的迁移情况,如图 4 所示($P < 0.05$),Cd 在小麦幼苗中自根向叶部的 TF 随处理温度和 CO₂浓度的增加总体呈现增加趋势,各处理组 TF 值分别为对照组的 1.02、1.09 和 1.34 倍.显然,在 TC1 和 TC2 处理条件下,Cd 在小麦幼苗中自根向叶部的迁移系数(TF)增加并不显著,仅在 TC3 处理条件下显著增加.

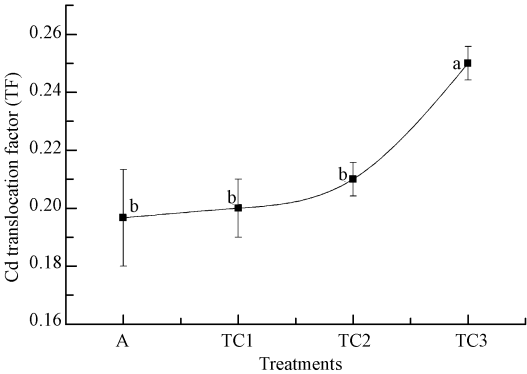


图 4 温度与 CO₂联合升高对小麦幼苗中 Cd 自根部向叶部迁移的影响

Fig.4 The combined effects of elevated temperature and CO₂ concentrations on the translocation factor (TF) values for Cd translocation from wheat roots to shoots

蒸腾作用在植物对矿质离子的吸收、运转方面发挥着至关重要的作用,在一定温度范围内,植物叶片的气孔开度会随着温度的升高逐渐增大,从而促进蒸腾作用,加速植物对水分和矿物质的吸收、转运.然而,CO₂浓度升高则会导致叶片气孔张开度缩小,部分气孔关闭,降低气孔导度^[25],蒸腾降低.当温度和 CO₂浓度同时升高时,两者的效应将在很大程度上被相互抵消,导致在 TC1、TC2 处理条件下,Cd 在小麦幼苗中自根向叶部的迁移变化并不显著.在 TC3 处理条件下,温度进一步增加对蒸腾作用的正向效应超过了 CO₂浓度增加所产生的负向效应,导致小麦幼苗的蒸腾作用显著增加,从而加速了 Cd 自根向叶部的迁移.本研究结果预示着未来气候变暖可能在一定程度上加速和促进 Cd 自作物根部向地上部其他组织的迁移,从长远来看,这一现象也可能从生态、食品安全等多个层面进一步强化气候变暖所引发的负性效应,应予以重视.

3 结论 (Conclusion)

- (1)模拟气候变暖可显著改变小麦幼苗中 Cd 的动态分布,随着模拟温度和 CO₂浓度的升高,小麦幼苗根、叶部对 Cd 的富集均呈现显著的增加趋势.
- (2)小麦幼苗根、叶部各亚细胞组分中的 Cd 浓度同样随模拟温度和 CO₂浓度的升高而增加,但各亚细胞组分中的 Cd 分布比例基本保持稳定.
- (3)绝大多数的 Cd 被富集在细胞的可溶性组分与细胞壁中,尤其是细胞的可溶性组分是 Cd 在小麦幼苗细胞中的主要富集位点,进入细胞器中的 Cd 则相对较少.
- (4)在中、低处理温度和 CO₂浓度模拟条件下(TC1、TC2), Cd 自根部向叶部的迁移维持相对稳态,但较高的温度和 CO₂浓度处理(TC3)则明显促进了 Cd 自根部向叶部的迁移.

参考文献 (References)

[1] IPCC. Summary for Policymakers//Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al.(eds.)) [M].Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

[2] TUBIELLO F N, AMTHOR J S, BOOTE K J. Crop response to elevated CO₂ and world food supply. A comment on “Food for Thought...” by Long et al., Science 2006, 312: 1918-1921[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(3) : 215-233.

- [3] 李垄清, 吴正云, 张强, 等. 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展[J]. 生态学报, 2014, 5 (5): 1053-1060.
LI L Q, WU Z Y, ZHANG Q, et al. State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 5 (5): 1053-1060 (in Chinese).
- [4] HOODA P S, MCNULTY D, ALLOWAY B J. Plant availability of heavy metals in soils previously amended with heavy applications of sewage sludge[J]. J Sci Food Agric, 1997, 73(4): 446-454.
- [5] BAGHOUR M, MORENO D A, HERNÁNDEZ J, et al. Influence of root temperature on phytoaccumulation of As, Ag, Cr and Sb in potato plants (*Solanum tuberosum* L. var. spunta)[J]. Journal of Environmental Science and Health. Part A. Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2001, 36(7): 1389-1401.
- [6] ALBRECHT A, SCHULTZE U, LIEDEGENS M, et al. Incorporating soil structure and root distribution into plant uptake models for radionuclides: Toward a more physically based transfer model[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 59(3): 329-350.
- [7] MANDERSCHIED R, BENDER J, JÄGER H J, et al. Effects of season long CO₂ enrichment on cereals. II. Nutrient concentrations and grain quality [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1995, 54: 175-185.
- [8] GUO H, ZHU J, ZHOU H, et al. Elevated CO₂ levels affects the concentrations of copper and cadmium in crops grown in soil contaminated with heavy metals under fully open-air field conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45: 6997-7003.
- [9] 甘国娟, 刘伟, 邱亚群, 等. 湘中某冶炼区农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2013, 32(1): 132-138.
GAN G J, LIU W, QIU Y Q, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils in a smelting area in Central Hunan [J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(1): 132-138 (in Chinese).
- [10] WANG X H, LI Y, LU H, et al. Combined effects of elevated temperature and CO₂ concentration on Cd and Zn accumulation dynamics in *Triticum aestivum* L [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2015.11.029>.
- [11] LI Y, ZHANG Q, WANG R, et al. Temperature changes the dynamics of trace element accumulation in *Solanum tuberosum* L. [J]. Climatic Change, 2012, 112(3-4): 655-672.
- [12] 李裕, 张强, 王润元, 等. 气候变暖对春小麦籽粒痕量元素利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 96-104.
LI Y, ZHANG Q, WANG R Y, et al. Influence of climatic warming on accumulation of trace elements in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 96-104 (in Chinese).
- [13] SARDANS J, PENUELAS J, ESTIARTE M. Warming and drought change trace element bioaccumulation patterns in a *Mediterranean shrubland* [J]. Chemosphere, 2008, 70: 874-885.
- [14] GONZALEZ-DAVILA M, SANTANA-CASIANO J M, PEREZ-PENA J, et al. Binding of Cu(II) to the surface and exudates of the Alga *Dunaliella tertiolecta* in seawater [J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29: 289-301.
- [15] NILSEN E T, ORCUTT D M. Physiology of plant under stress abiotic factors[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [16] HÖGY P, KECK M, NIEHAUS K, et al. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on biomass, yield and low molecular weight metabolites in wheat grain [J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52: 215-220.
- [17] LUX A, MARTINKA M, VACULIK M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review [J], Journal of Experimental Botany, 2011, 62: 21-37.
- [18] MORI S, URAGUCHI S, ISHIKAWA S, et al. Xylem loading process is a critical factor in determining Cd accumulation in the shoots of *Solanum melongena* and *Solanum torvum* [J], Environmental and Experimental Botany, 2009, 67: 127-132.
- [19] STRITSIS C, CLAASSEN N. Cadmium uptake kinetics and plants factors of shoot Cd concentration [J]. Plant and Soil, 2012, 367: 591-603.
- [20] WU F B, DONG J, QIAN Q Q, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes [J], Chemosphere, 2005, 60: 1437-1446.
- [21] LI T, YANG X E, YANG J, et al. Zn accumulation and subcellular distribution in the Zn hyperaccumulator *Sedum alfredii* hance [J]. Pedosphere, 2006, 16: 616-623.
- [22] YANG X, FENG Y, HE Z, et al. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation [J], Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements, 2005, 18: 339-353.
- [23] LI D D, ZHOU D M, WANG P, et al. Temperature affects cadmium-induced phytotoxicity involved in subcellular cadmium distribution and oxidative stress in wheat roots [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74: 2029-2035.
- [24] 翁南燕, 周东美, 武敬, 等. 铜镉复合胁迫下温度对小麦幼苗生长及其对铜、镉和矿质营养元素吸收与各元素在亚细胞分布的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(6): 607-616.
WENG N Y, ZHOU D M, WU J, et al. Uptake, subcellular distributions of Cu, Cd and mineral elements, and plant growth for wheat seedlings under stress of Cu and Cd as affected by temperature [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(6): 607-616 (in Chinese).
- [25] KANG S K, ZHANG F C, HU X T, et al. Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water status [J]. Plant and Soil, 2002, 238: 69-77.