

气候变暖对春小麦籽粒痕量元素利用率的影响

李裕^{1,2}, 张强^{1*}, 王润元¹, 刘宁³, 王鹤龄¹,
肖国举⁴, 勾昕⁵, 马志英²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃省气象局, 兰州 730020;
2. 西北民族大学化工学院, 兰州 730030; 3. 中国科学院寒区与旱区工程研究所, 兰州 730000;
4. 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 银川 750021; 5. 中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 为了回答温度升高是否会改变痕量元素在土壤中的溶解性, 以及作物对痕量元素的生物利用率, 在人工气候室模拟未来气候变化温度升高背景下, 对种植在不同温度处理的 3 种春小麦, 测定了籽粒中 Cd, Cu, Fe 和 Zn 含量。结果发现温度升高引起了土壤中 Cd, Cu, Fe 和 Zn 溶解性的显著变化, 也显著地影响小麦籽粒中 Cd, Cu, Fe 和 Zn 的生物利用率。最高升温 3℃ 处理使西早 1 号、2 号和 3 号小麦籽粒中 Cd 浓度相比对照分别下降 43.4%、11.1% 和 13.4%, Cu 浓度相比对照处理分别下降了 30.4%、25.1% 和 10.8%。但 Fe 和 Zn 的情况却不同, 1℃ 和 2℃ 升温处理使西早 1 号籽粒中 Zn 浓度比对照处理分别增加了 28.9% 和 35.8%。根据未来气候变化西北地区温度升高 1.9℃, 估计到 2050 年, 小麦籽粒中的质量分数范围分别在 Cd(0.59-0.65)、Cu(5.91-7.64)、Zn(63.73-69.41) 和 Fe(185.23-202.70) mg/kg。

关键词: 温度, 痕量元素, 气候变化, 春小麦

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.12.019

中图分类号: S161.2+2, S154.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-12-0096-09

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 Yu, Zhang Qiang, Wang Runyuan, 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 with English abstract)

0 引言

21 世纪, 人类活动可能会较大幅度地提高全球温度^[1-2]。预估未来 30~50 a, 中国大陆年平均气温也将上升 1.7~2.2℃, 其中半干旱地区的年平均气温将上升 1.9~2.3℃^[3]。

温度是影响作物生长和发育最重要的气候因子。过去的几十年间, 科学探索已经找到了全球变暖影响作物生产的证据^[4-5], 许多文献报道了全球 CO₂ 浓度提高和温度升高直接影响到作物光合作用、生物量和产量生产, 预示气候变化对农业整体影响开始显现^[6]。然而, 在这些研究中, 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。由于许多自然和农业生态系统受到营养元素和非营养毒性元素的胁迫, 比如大多陆地植被受到土壤中 Ca 等营养元素缺乏胁迫, 以及 Al、Mn 等毒性的胁迫, 即使在农业领域, 虽然经过绿色革命

以来努力, 至今人类并未根本上解决营养元素胁迫问题。例如作物根的长度对营养胁迫的负反馈反应, 不仅影响根的生命^[7], 也减少了光合产物在茎和产品中的分配^[8]。在气候变化背景下, 更是增加了预测和解决这一问题的难度。但这一科学问题直接关系到生态环境、粮食和食品安全, 也是全球变化中既重要、又复杂, 并且目前认知最少的领域。解密农业生态系统中痕量元素富集或胁迫问题已成为应对气候变化的当务之急^[9]。

一些研究已经证明温度对植物生长速率具有深层次的影响, 并且温度升高将引起生物量增加和水中大型植物迅速繁殖^[10-11], 导致植物生长速率高于其对痕量元素的吸收速率^[12]。有研究也证实了几种植物对 Zn、Pb、Ag、Cr、Sb 和 Cd 的吸收速率随土壤温度升高而显著提高^[13-16]。温度升高将改变植物细胞离子隔膜脂类的组成^[17]和细胞膜的通透性^[10], 直接影响植物痕量元素的生物利用度, 从而影响植被的生态属性和作物生产。

在以上研究基础上, 一个合理的推测认为, 全球变暖背景下作物对痕量元素的吸收极有可能增加。因为土壤温度升高会提高生物酶活性, 增加光合产物, 促进作物生长, 同时增加了对包括痕量元素在内的资源需求。我们假设温度升高将通过土壤中痕量元素的含量、溶解性的改变, 影响作物对痕量元素的吸收和转移。根据 IPCC^[1-2]对未来气候变暖预测, 本文在人工气候室进行模拟试验, 考查温度对春小麦痕量元素生物利用度的影响并验证假设。

收稿日期: 2011-04-26 修订日期: 2011-10-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40830957); 公益性气象行业科研专项(GYHY201106029); 博士后科学基金项目(20100470892); 干旱基金项目(IAM201017)

作者简介: 李裕(1964—), 男, 汉族, 甘肃会宁人, 副教授, 博士, 主要研究方向为农业生态学。兰州 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃省气象局, 730020。

Email: lifumeng@yahoo.com.cn

*通信作者: 张强(1965—), 男, 汉族, 甘肃靖远人, 研究员, 博士生导师, 博士后合作导师, 主要从事大气边界层、陆面过程、干旱气候与环境等领域的研究。兰州 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃省气象局, 730020。Email: zhangqiang@cma.gov.cn

1 材料与方 法

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, 且年内分布差异很大, 超过 60% 的降雨集中在 7—9 月。年均温 7.7℃, 6—8 月的均温分别为 18.4, 20.2 和 17.9℃。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, 主要作物以春小麦、玉米马铃薯和豆类为主。土壤主要以黄绵土为主。基地土壤 pH 值和有机质质量分数分别约为 6.7、72 mg/kg, 有效氮、总氮氮分别为 33.6 和 82.4 mg/kg, 有效磷、总磷分别为 5.54 和 26.8 mg/kg。

1.2 试验设计

模拟试验在人工气候室进行。人工气候室如图 1, 长 28.8 m, 宽 20 m 高 4.85 m, 室内占地面积 594 m², 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, 实现温湿度、降雨和 CO₂ 等气候因子维持在试验设计的水平。



图 1 人工气候室

Fig.1 Artificial climate greenhouse

本研究升温处理主要有四大系统。一是智能控制系统, 由监控计算机、PLC 温室控制器、室外气象站, 以及温度传感器、湿度传感器、光照传感器和 CO₂ 传感器组成。计算机设计的试验气候因子参数, 由智能控制系统对所控制的各种设备的开启、关闭和启停远程控制操作实现; 二是自然通风系统, 由内、外遮阳系统组成, 在智能控制系统控制下自动开启和关闭, 既可以使室内气温比室外低 4~7℃, 又可以控制室内气温比室外提高 2~3.5℃; 三是强制降温系统, 由安装在每个室内的湿帘墙、水循环系统和 2 台 9FJ-1250 型大流量轴流风机组成。主要用于盛夏季节室外温度达 30℃ 以上的时期降温; 夜间和冬季升温的加温系统, 由 CL(W)DR0.12 整体式常压电热锅炉和直径为 75 mm 的园翼型散热器组成。

为了确保试验正常进行, 从 2007 年开始, 在计算机上设定的 1、2 和 3℃ 升温处理, 连续 3 a 运行人工气候室, 经测试各项运行指标达到试验要求。

正式试验从 2010 年开始, 各处理使用同样土壤, 试验开始前经对各处理土壤抽样分析, 理化指标 pH 值、有机质、CEC 和湿度差异不显著 ($P>0.05$)。试验设双因素等重复试验见表 1, 处理小区面积为 1.5 m×8.0 m=12 m², 行距 20 cm。春小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种选用西早 1 号、西早 2 号和西早 3 号, 各品种重复 2 次, 肥料在小麦生长季节施用 2 次。

表 1 人工气候室模拟温度升高试验处理
Table 1 Treatments of simulated warming manipulations in artificial climate greenhouses

| 处理 | 温度升高/℃ | 小麦品种 |
|----|--------|--------|
| A | 0 | 西早 1 号 |
| | | 西早 2 号 |
| | | 西早 3 号 |
| | | 西早 1 号 |
| T1 | 1 | 西早 2 号 |
| | | 西早 3 号 |
| | | 西早 1 号 |
| T2 | 2 | 西早 2 号 |
| | | 西早 3 号 |
| | | 西早 1 号 |
| T3 | 3 | 西早 2 号 |
| | | 西早 3 号 |

注: 根据当地小麦施肥水平足量施肥, 各小区施肥水平相同; 灌溉方式为滴灌与喷灌相结合, 在小麦全生育期各小区保持田间持水量 70%。

1.3 取样和样品处理

土壤样品在播种前取样 1 次。土壤样品按每个小区设 5 个亚样品点 (25 cm×25 cm) 取样, 这些亚样品点原则上选择在样品点的中心及对角线上。在播种前用塑料铲采集 0~20 cm 深度的耕作层土样, 然后将 5 份样品混合, 用四分法取约 1 kg 样品, 贮于聚乙烯袋中。将采集的土壤样品运回实验室, 在室内风干, 然后在 105℃ 烘干至恒质量, 研细过 100 目尼龙网筛在 4℃ 条件下储存。为防止采样过程中人为原因导致的样品污染, 在样品的混合、装袋、粉碎、研磨等处理过程中均使用木质、塑料或玛瑙等器具, 避免直接接触到金属工具。

小麦籽粒样品在收获时按处理和重复分类取样 1 次, 样品贮于聚乙烯袋中。为了消除籽粒表面尘土对结果的干扰, 在实验室先用去离子水洗籽粒, 参照 Li 等^[18]的方法, 在 60~70℃ 烘干, 用瓷研钵研细, 过 100 尼龙网筛在 4℃ 条件下储存。

1.4 土壤中元素有效态提取

每一个土壤样品中痕量元素的含量分为总浓度 (TOTAL) 和生物可利用浓度 (DTPA)。痕量元素的生物可利用部分用 DTPA 0.005 mol/L+CaCl₂ 0.01 mol/L+TEA 0.1 mol/L (pH 7.3) 溶液提取^[19]。提取过程如下: 5.00 g 土壤样品 (<2 mm) 加入 50 mL 的 DTPA-CaCl₂-TEA 溶液, 混合后放入转速为 210 r/mim 振荡器提取 120 min, 取出待沉淀分离后立刻取上层清液备分析用。

1.5 分析方法

Cd、Pb、Cu、Zn 和 Mn 浓度测定在兰州大学分析测

试中心完成。土壤样品用 $\text{HCl}+\text{HNO}_3+\text{HClO}_4+\text{HF}$ 置微波炉消化, 石墨炉-原子吸收光谱仪测定 Cd, 火焰原子吸收光谱仪测定 Pb、Cu、Zn 和 Mn。小麦样品处理方法参照 Hernandez 等^[20]进行。

分析过程所用试剂均为优级纯, 水为亚沸水。分析质量通过国家标准土壤样品 (GBW 07402) 和茶叶标准样品 (GBW 08505) 进行控制。分析样品的重复数为 10%~15%, Cd、Cu、Pb、Zn 和 Mn 的回收率分别为 88%~105%。

1.6 温度观测和数据分析

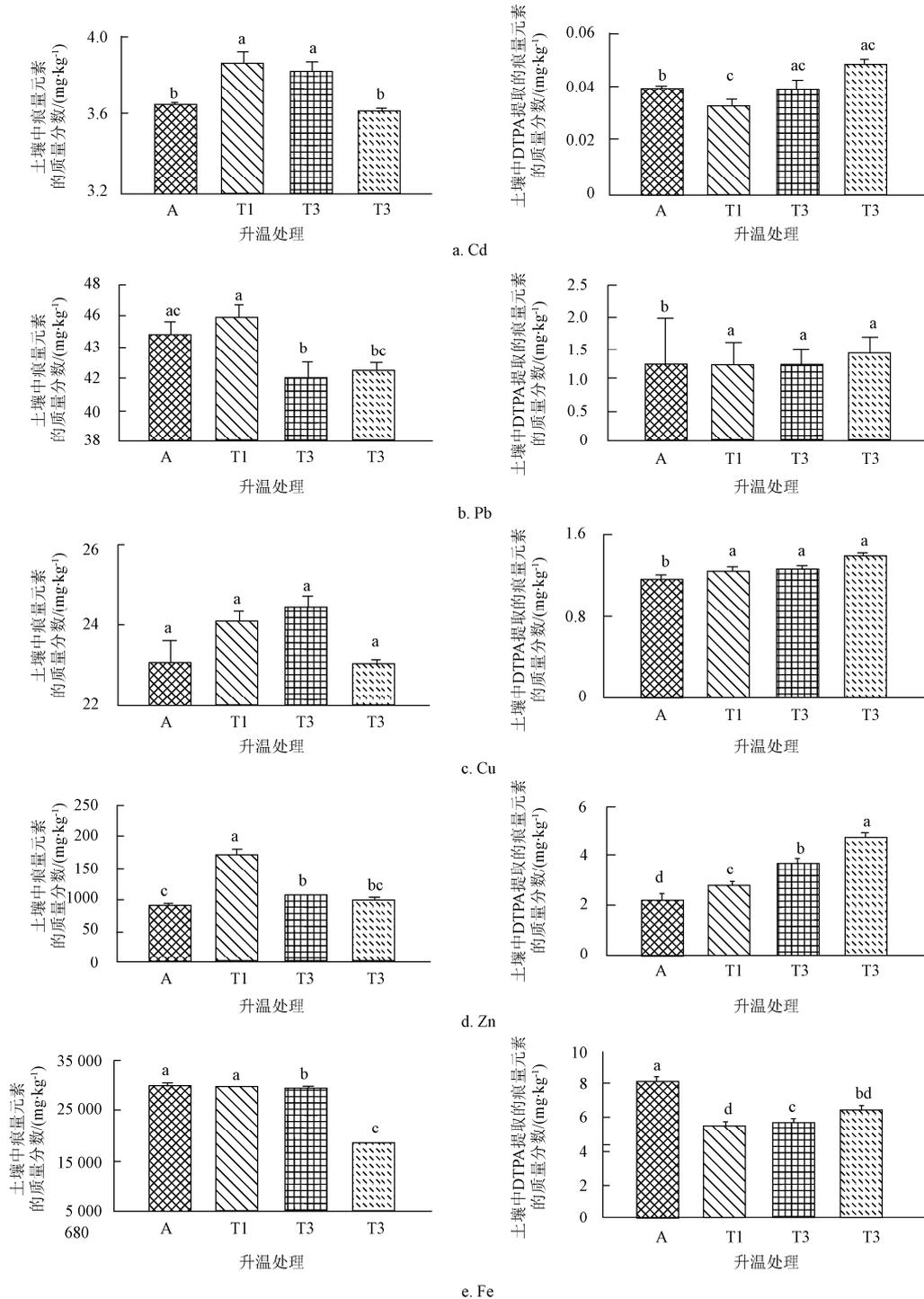
主要观测气温和深度为 5、10、15 和 20 cm 的土壤温度。从小麦种植到收获, 每隔 2 h 由气候室智能控制系统自

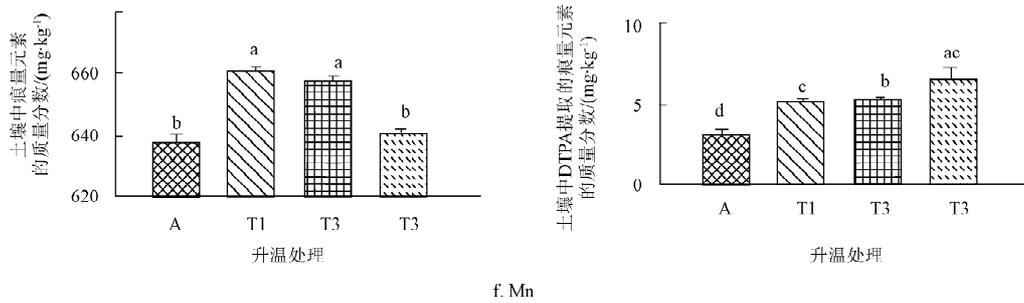
动记录。数据统计分析采用 SPSS15.0 for Windows 软件包。

2 结果

2.1 土壤中微量元素含量

通过 2007 年到 2009 年连续 3 年温度升高处理, 耕层土壤中 Cd、Pb、Zn 和 Mn 的浓度与对照处理相比差异显著 (图 2)。1℃升温使耕层土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Mn 浓度相比对照分别提高 5.8%、2.8%、4.4%、90.6% 和 3.6%, 但 3℃升温处理条件下, 耕层土壤所测微量元素浓度相比 1℃处理均有不同程度地下降, 即 Cd(-6.2%)、Pb(-7.5%)、Cu(-4.4%)、Zn(-42.1%)、Mn(-2.9%) 和 Fe(-36.7%)。





注：字母不同表明处理之间在统计上差异性显著 ($p < 0.05$, ANOVA)；各处理见表 1。

图 2 不同温度处理条件下土壤中微量元素和 DTPA 提取的元素的质量分数

Fig.2 Concentrations (Mean ± SE) of analyzed trace elements in soils and DTPA values under different warming treatments

DTPA 提取的微量元素浓度随温度升高而增加，3℃ 升温处理使 DTPA 提取的 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Mn 的浓度相比对照处理分别提高了 26.3%、14.7%、19.0%、120.6%和 112.2%。但与 1℃处理比较，3℃处理条件下，DTPA 提取的 Pb、Cd 和 Fe 的浓度没有显著变化。

相关分析发现，DTPA 提取的 Zn、Cu 和 Mn 浓度与温度 (X) 显著地正相关，它们的线性方程分别为

$$\text{DTPA-Zn} = 2.054 + 0.854X, R^2 = 0.995 (p < 0.01) \quad (1)$$

$$\text{DTPA-Mn} = 3.45 + 1.06X, R^2 = 0.948 (p < 0.05) \quad (2)$$

$$\text{DTPA-Cu} = 1.158 + 0.068X, R^2 = 0.966 (p < 0.01) \quad (3)$$

式中，DTPA-Zn、DTPA-Mn、DTPA-Cu 分别为 DTPA 提取的 Zn、Mn 和 Cu 质量分数，mg/kg， X 为温度，℃， R^2 为相关系数。

说明温度对耕层土壤中微量元素的生物利用率具有显著影响。

2.2 春小麦籽粒中微量元素的含量

小麦中微量元素浓度因品种差异和温度升高而不同 (图 3)。双因素方差分析发现，籽粒中 Cd、Fe、Zn 和 Cu 浓度与小麦品种和温度升高差异极显著 ($p < 0.01$)。温度升高 1、2 和 3℃ 的处理条件下种植的西早 1 号籽粒中 Cd 浓度，与对照处理相比分别下降了 20.5%、27.7% 和 43.4%，同时，西早 2 号籽粒中的 Cd 浓度与对照处理相比下降幅度较小，分别下降了 9.7%、11.1% 和 11.1%，而西早 3 号籽粒中 Cd 浓度与对照相比分别下降 6.0%、10.5% 和 13.4%。同样，温度升高 1、2 和 3℃ 的处理，使西早 1 号籽粒中 Cu 与对照处理相比分别下降了 11.2%、5.9% 和 30.4%，而西早 2 号籽粒中 Cu 浓度与对照相比分别下降 8.3%、18.0% 和 25.1%，西早 3 号籽粒中 Cu 浓度与对照相比分别下降 10.3%、15.6% 和 10.8%。

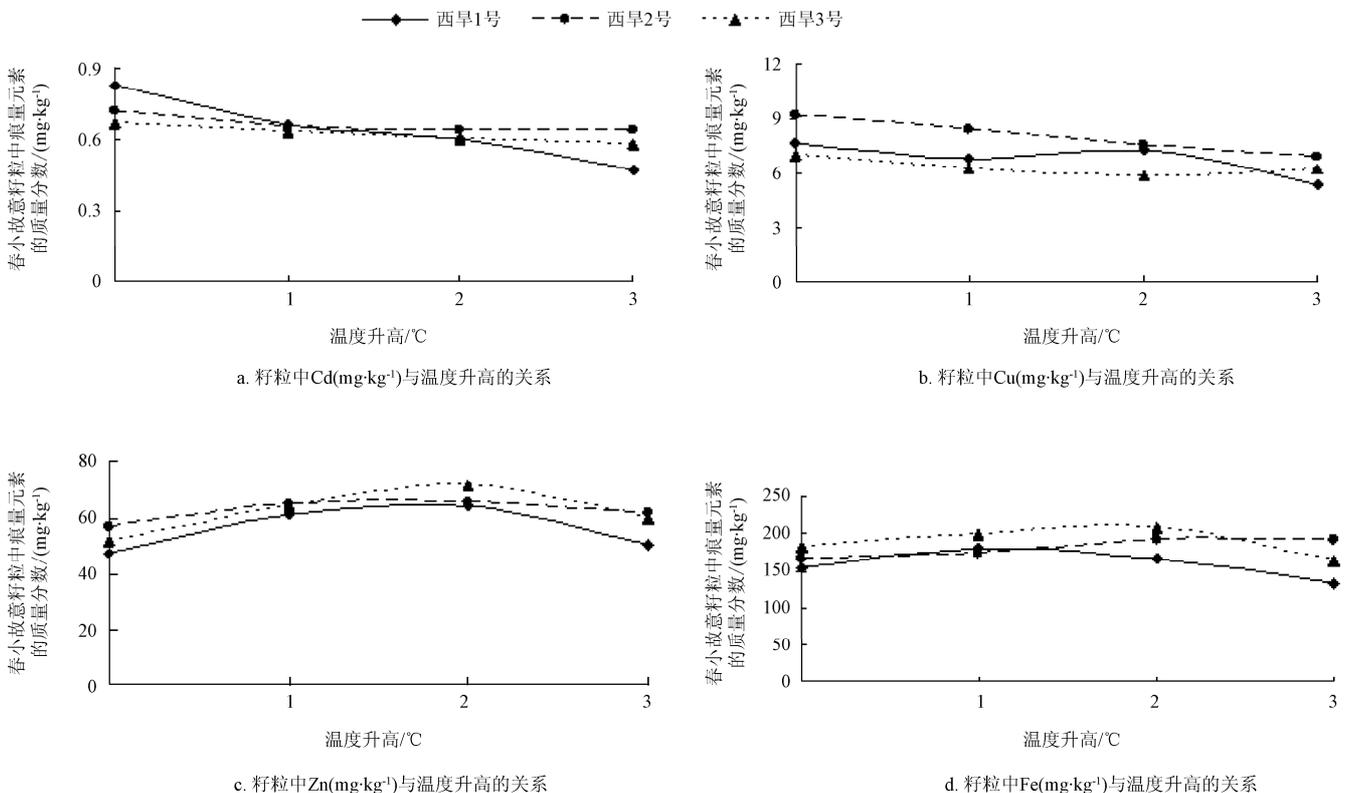


图 3 春小麦籽粒中微量元素与温度升高变化的关系

Fig.3 Relationship of trace elements in spring wheat with temperature raising

但 Fe 和 Zn 的情况却不同, 温度升高 1℃ 和 2℃ 处理条件下生长的 3 个小麦品种籽粒中 Fe 和 Zn 浓度随温度升高而增加 (图 3), 比如 Zn, 温度升高 1℃ 和 2℃ 的情况下, 西早 1 号籽粒中 Zn 浓度分别比对照处理增加 28.9% 和 35.8%, 而 3℃ 处理条件下, 3 种小麦籽粒中 Zn 浓度、西早 1 号和西早 3 号中 Fe 的浓度与 2℃ 处理相比均有不同程度下降。说明温度升高的情况下, 不同品种的小麦对 Cd、Fe、Zn 和 Cu 的吸收和转移能力具有显著差异性, 尽管转移潜力随温度升高的程度和品种差异而异。

为进一步分析温度升高对不同小麦品种吸收 Cd、Pb、Fe、Zn 和 Cu 的影响, 利用回归分析分析了温度 (X) 和不同品种小麦籽粒中 Cd、Pb、Fe、Zn 和 Cu 浓度的关系 (Y), 结果总结于表 2。

表 2 春小麦籽粒中 Cd、Fe、Zn 和 Cu 浓度和温度的关系
Table 2 Relationship of Cd, Fe, Zn and Cu concentrations in spring wheat grain with temperature

| 元素 | 春小麦 | 回归方程 | R^2 | 预估值 ^a |
|----|--------|-------------------------------------|-------|------------------|
| Cd | 西早 1 号 | $y = -0.114x + 0.811$ | 0.970 | 0.59 |
| | 西早 2 号 | $y = -0.025x + 0.7$ | 0.698 | 0.65 |
| | 西早 3 号 | $y = -0.03x + 0.665$ | 0.978 | 0.61 |
| Cu | 西早 1 号 | $y = -0.658x + 7.737$ | 0.708 | 6.29 |
| | 西早 2 号 | $y = -0.775x + 9.11$ | 0.997 | 7.64 |
| | 西早 3 号 | $y = 0.26x^2 - 1.042x + 6.948$ | 0.990 | 5.91 |
| Zn | 西早 1 号 | $y = -6.81x^2 + 21.764x + 46.959$ | 0.989 | 63.73 |
| | 西早 2 号 | $y = -2.9375x^2 + 10.366x + 56.655$ | 0.982 | 65.75 |
| | 西早 3 号 | $y = -6.01x^2 + 21.026x + 51.161$ | 0.952 | 69.41 |
| Fe | 西早 1 号 | $y = -14.858x^2 + 37.326x + 154.23$ | 0.988 | 171.51 |
| | 西早 2 号 | $y = -1.445x^2 + 14.087x + 163.68$ | 0.916 | 185.23 |
| | 西早 3 号 | $y = -14.95x^2 + 39.8x + 181.05$ | 0.913 | 202.70 |

注: 按照秦大河等^[3]预估 2050 温度升高 1.9℃ 计算; x 为温度, ℃, y 为春小麦籽粒中元素质量分数, mg kg⁻¹, DW。

根据秦大河^[3]对西北半干旱地区 2050 年年均温升高 1.9℃ 的预测估算, 如果春小麦生长期日均温也比现在平均升高 2.2℃, 依据现在观察到的小麦籽粒中元素含量的变化, 那么到 2050 年西北半干旱地区春小麦籽粒中 Cd、Cu、Zn 和 Fe 的质量分数范围将分别在 0.59~0.65、5.91~7.64、63.73~69.41 和 185.23~202.70 mg/kg, 与国家食品卫生标准粮食中 Cd (0.1 mg/kg)、Cu (10 mg/kg) 和 Zn (50 mg/kg) 最大许可限量比较^[21], 未来气候变化的情景下, 西北半干旱地区春小麦籽粒中 Cd、Zn 起码将分别超越限量标准值 490% 和 27%, 而 Cu 的含量将会安全要求的范围之内。

3 讨论

3.1 模拟升温对 3 种小麦元素利用度的影响

在全球气候变化背景下, 温度和 CO₂ 浓度对植物痕量元素富集的影响, 从宏观上将关系到生态系统对全球

气候变化的效应, 从农业耕地和牧场已经受到不同程度地多种矿质胁迫的影响的现实角度来看, 这种影响一定程度上还将影响到食品品质、人类营养, 甚至事关一些随气候变化而暴露出新的环境污染问题。比如 Fangmeier 等^[22]已经发现小麦籽粒中 Zn 等元素的浓度随 CO₂ 浓度升高而下降, 警示全球变化会导致人类营养不良以及食品安全问题。然而, 气候变化温度升高对作物痕量元素利用度的影响, 目前文献报道很少。

Sardans 等^[23]在地中海地区灌木地进行温度升高对石南科灌木 *Erica multiflora* 和 *Globularia alypum* 的痕量元素富集影响的试验研究, 发现温度升高情况下, *E. multiflora* 茎中 Cd 的浓度增加了 55%, 而 Cu、Pb 在 *G. alypum* 叶中浓度分别下降了 50% 和 32%。并且 1℃ 升温引起 *Erica multiflora* 叶片中 Cu 和 Zn 浓度比对照处理增加 57% 和 50%, 使 *Globularia alypum* 叶片中 Zn 浓度增加 100%, 但引起 *Erica multiflora* 叶 Cd 和 Pb 浓度比对照分别下降了 67% 和 43%。另有文献报道, 土壤温度升高对植物根生长、形态、呼吸及细胞膜的通透性都有不同程度地影响, 因此影响到植物对痕量元素的吸收^[9]。说明温度升高直接影响着植物对痕量及营养元素的吸收。

在本文的研究中, 3 种小麦籽粒中 Cd 和 Cu 的浓度, 一般随温度升高而下降, 可能是因为高温情况下, 小麦的生长速率超过了其对痕量元素吸收速率所致。按照 Marschner^[10]、Rooney 和 Kalff^[11]的研究, 温度对植物生长速率具有很大地影响, 高温会导致大量生物量生产以及植物群落分布范围的扩大。在变暖的森林和草地的调查也发现植物根生物量大幅提高^[24-25], 并因此增加了地下碳的捕获量。而且, 植物相对高的生物生产能力也意味着对金属元素吸收能力的提高, 之所以小麦籽粒中 Cd 和 Cu 的浓度随温度升高反而下降, 主要是由于小麦在高温条件下的生长速率超过了其对痕量元素的吸收速率^[12]。另一方面, Moreau 等^[26]在大豆作物, 以及 Chen 等^[27]和 Ramesh 等^[28]在水稻作物上的研究发现, 这 2 种作物从土壤中吸收 Cd²⁺、Zn²⁺过程具有明显的拮抗效应, 并且, 作物细胞中多数金属转运蛋白如 ZIP (zinc-regulated transporter, iron-regulated transporter protein) 对 Zn²⁺具有高度亲和性和选择性。由此推断, 温度升高的情况下, 小麦细胞中对 Zn²⁺亲和性强的蛋白功能的过度地表达, 抑制了小麦籽粒对 Cd²⁺积累, 导致了小麦籽粒中 Cd 浓度随温度升高而下降。

在温度升高 1℃ 和 2℃ 情况下, 3 种小麦籽粒中 Fe 和 Zn 的浓度一般随温度升高而增加, 并且, 西早 2 号 Fe 浓度随温度升高而线性增加 ($R^2=0.900$), 具有典型的温度依赖性。但 3℃ 处理使另两个品种小麦籽粒中的 Fe 和 Zn 浓度相比 2℃ 处理显著下降 ($p<0.05$)。一种可能的解释是从 0~2℃ 温度升高过程, 细胞中酶活性的提高, 增加了小麦籽粒对 Fe 和 Zn 的利用率和对资源的捕获能力, 但 3℃ 处理对于西早 1 号和 3 号小麦籽粒细胞中酶反而起到了抑制, 引起对这 2 种元素利用率的下降。以前的研究发现 Fe 和 Zn 是大多数酶组反映不可缺少的组成成分^[29-31],

Fe 是细胞中许多蛋白如铁蛋白的组成成分^[31]。作为作物的一种必需痕量元素，Zn 是众所周知 200 多种酶的组成或辅酶因子，在包括 DNA 合成、基因表达和生殖在内的许多生物生理和功能方面具有重要作用^[30]。温度的升高提高了细胞酶活性^[10]和蛋白的合成速度^[32]，引起膜对金属的额外吸收，以及其他促进金属吸收分子学机制共同导致对金属的过度吸收。因此，与非必需元素 Cd 相比，小麦籽粒中 Fe 和 Zn 的浓度呈现显著的温度依赖性。

3 种小麦籽粒 Cd、Fe、Zn 和 Cu 浓度与小麦品种和温度升高差异极显著 ($p < 0.01$)。3 种小麦品种对 4 种痕量元素积累的差异性属种内差异，这种差异性其他作物同样存在，比如曾翔等^[33]采用盆栽土培法种植 7 个类型共 46 种水稻糙米，在土壤 Cd 质量相同均为 2 mg/kg 条件下，46 种水稻糙米 Cd 质量分数变化范围为 0.428~2.558 mg/kg，差异显著。Stolt 等^[34]也发现硬质小麦籽粒对 Cd 的吸收能力高于普通小麦，因而硬质小麦籽粒中 Cd 的含量高于普通小麦籽粒的 Cd 含量。对于这种在同样环境条件下，植物所具有对痕量元素吸收的品种差异性，一些学者解释为植物根系的形态、生理活性及根系微生物等因素的影响^[35]。还有植物根系能分泌有机酸、糖类、氨基酸及其他次生代谢物质改变根际环境，分泌物通过对土壤中痕量元素络合、螯合、沉淀作用，直接影响土壤中痕量元素的有效性^[36]。一个典型的证据是 Cieslinski 等^[37]在 1998 年所做的高 Cd 积累小麦品种与低 Cd 积累品种的对比试验，研究发现由于高 Cd 积累小麦品种根际土壤中低分子量有机酸的含量显著地高于低 Cd 积累品种，因而造成高 Cd 积累小麦品种组织中 Cd 的积累量显著提高。后来，Liu 等^[38]通过对不同品种植物对 Cd 吸收的差异性的研究，发现根系分泌的低分子量有机酸含量与植物 Cd 吸收成正比关系，支持了这种观点。

然而，在不同升温处理条件下，3 种小麦籽粒中 4 种痕量元素的差异性并非同步变化，发现 1℃处理条件下 3 种小麦籽粒中 Cd、Fe 和 Zn 的浓度差异最小，而对照和 3℃的处理条件下，3 种小麦籽粒中 Cd、Fe、Zn 和 Cu 浓度的差异相对较大（图 3）。说明未来气候变化和温度升高的情景下，对于不同种小麦痕量元素的利用度构成了不对等影响，而这种影响会直接关系到人体健康、育种，以及农业化学品的投入，是今后应对气候变化值得考虑深入研究的课题。

3.2 温度升高情况下的 Cd、Zn 食品安全

模拟升温试验条件下，3 种小麦籽粒中 Cd 浓度随温度升高而降低，而 Zn 的浓度与对照处理相比提高，尽管不同升温处理条件下，3 种小麦籽粒中 Zn 富集水平不尽相同，如 2℃处理使 3 种小麦籽粒中 Zn 浓度分别比对照处理升高 15%~37%（图 3）。根据这一结果，在半干旱地区定西土壤中 Cd 和 Zn 水平短期内不可能有较大改变的前提下，按照秦大河对这一地区 2050 年气候变化预估的最低升温 1.9℃推算，即便是小麦籽粒中 Cd 下降，未来也至少还将超过现在的国家食品卫生标准粮食限量的 490%以上，Zn 浓度也将超过限量值 27%以上。以前的调

查研究发现德国、英国和美国生活在 Cd 污染地区的居民食用 Cd 含量高的食品并没有出现 Cd 暴露症状，一个典型的事例是英国的一个邻近锌矿废渣旁叫 Shiphamis 村庄，果园土壤 Cd 质量分数在 2~998 mg/kg，果园中生长的作物平均浓度为 0.25 mg/kg，其中蔬菜中的 Cd 浓度是其他地区的 15~16 倍。抽样调查 21 个村民肝中 Cd 的平均质量分数为 112 mg/kg，远远低于 260 mg/kg 的职业工人的 Cd 水平（其他地区居民肝中 Cd 质量分数为 2.2 mg/kg），而且这些村民也没有肾病等 Cd 中毒的症状^[39]。一个合理解释认为当地居民食用 Zn、Fe 和 Ca 含量较高的园艺产品后，人体内 Zn、Fe 和 Ca 浓度的提高，不仅抑制了人体肠胃对 Cd 的吸收，同时还有可能促使消化系统将 Cd 尽快地排泄。因此，未来气候变化对本区小麦的食品安全中 Cd 的问题还不能依此而定论。事实上，文献报道世界范围土壤中 Zn 营养缺乏，特别是大米中低 Zn 浓度导致的贫血，与维生素 A 和 Fe 营养缺乏引起 5 岁以下儿童死亡率提高的问题已经成为世界性的难题^[40]，中国已经于 2011 年 1 月 10 日废止了粮食锌、铁的限量标准。半干旱定西地区土壤中富含的 Fe、Zn 资源，以及研究中显示的小麦籽粒中 Fe、Zn 浓度随温度升高而增加的结果，说明未来气候变化温度升高 2℃的情况下，由于小麦籽粒对 Fe、Zn 富集水平的提高，在一定程度上不仅能够减轻小麦 Cd 污染水平，而且还能够增加 Zn 营养水平。

3.3 模拟升温对耕层土壤中痕量元素积累的影响

1℃和 2℃温度升高处理提高了耕层土壤中总的 Cd 浓度，并且，2℃和 3℃处理使耕层土壤中可溶性 Cd 的含量增加（图 2a），这种改变意味着将来的气候变化将提高中国半干旱地区土壤中 Cd 的毒性，因为可溶性 Cd 质量分数（0.03~0.05 mg/kg）高于抑制土壤微生物活性的 Cd 质量分数（0.01 mg/kg）^[41]。然而，耕层土壤中溶解性 Cd 的增加并未增加温度升高处理地生长的小麦籽粒中镉的含量，相反，试验结果是小麦籽粒中镉含量随温度升高反而下降，说明温度升高处理条件下，Cd 对土壤微生物的毒性影响引起了小麦籽粒对 Cd 的低富集，并且这种影响随温度升高而越发显现。

耕层土壤中总 Fe 质量分数（18 626~29 575 mg/kg）明显高于文献报道的土壤中的铁浓度数据^[42]，可能是本地土壤中矿质铁含量高所致。温度升高处理引起耕层土壤中总铁和溶解性铁浓度的显著下降，因此降低了与人体健康相关的小麦食品中铁来源。

Pb 的积累与 Cd 和 Fe 不同，其在耕层土壤中积累基本不受或很少受到温度升高处理的影响，并且温度升高处理对 3 种小麦籽粒中 Pb 的富集没有显著影响。文献报道也有相似发现，因为 Pb 和有机质具有很高的亲和力，极易被土壤有机质^[42]和植物表面吸附固定^[43]，所以土壤溶液中的 Pb 只是短暂保留。

温度升高处理对耕层土壤中 Cu 和 Zn 的浓度具有显著影响，DTPA 提取的 Cu 和 Zn 的浓度随温度升高而增加（图 2）。Avila 和 Rodrigo^[44]在西班牙蒙塞尼也观测到相似结果，发现 Zn 和 Cu 具有显著干湿沉降特性（450

和 32 g/(hm²·a))，因此比其他元素具有更高的外投入，温度诱导增加了 Zn 和 Cu 由非有效态向有效态转化的可能性，特别是沉降于耕层土壤中非有效态。而且，温度升高提高了土壤中生物酶活性^[23]，以及土壤微生物的活力^[45]，也增加了 Zn 和 Cu 在土壤中活动性，减小了土壤对 Zn 和 Cu 的吸附能力，这些作用共同提高了耕层土壤 Zn 和 Cu 的生物有效性。

4 结 论

模拟升温导致了土壤中所测定的 5 种痕量元素溶解性的显著变化，并且显著地影响到不同处理条件下种植的 3 种小麦中 Cd、Cu、Fe 和 Zn 富集水平。3 种小麦籽粒中 Cd 和 Cu 的富集水平随温度升高而下降，可能是温度升高的情况下，生长速度超过了小麦对 Cd、Cu 的吸收速率。而锌、铁作为组织细胞中酶和辅酶的主要组成，在温度升高 1 和 2℃处理条件下，由于细胞中酶活性的提高，3 种小麦籽粒中 Fe 和 Zn 浓度随温度升高而增加，但在温度继续升高的情况下，则籽粒中的 Fe 和 Zn 不再提高。因此，未来气候变化温度升高情况下，通过对土壤微生物活动，以及对植物生长速率、光合作用速率，以及细胞中酶活性等的影响，可能改变土壤中痕量元素的溶解性，并直接导致痕量元素生物利用度的改变。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. (Eds.), *Climate Change, 2001[M]. The Scientific Basis*, Cambridge, Cambridge University Press, 2001.
- [2] IPCC. Summary for Policymakers of *Climate Change: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 314—319.
Qin Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. Ecological and environmental change in west china and its response strategy [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2002, 17(3): 314—319. (in Chinese with English abstract).
- [4] Kattenberg A, Giorgi F, Grassl H, et al. Climate models projection of future climate. In: Houghton J T, et al. (Eds.), *Climate Change. The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 1995.
- [5] Morison J I L, Lawlor D W. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth[J]. *Plant Cell Environ* 1999, 22(6): 659—682.
- [6] 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.
- [7] Eissenstat D M. Trade-offs in root form and function[M]. In: L.E. Jackson (ed.) *Ecology in Agriculture*. San Diego, Academic Press, 1997, 173—199.
- [8] Poorter H, Remkes C, Lambers H. Carbon and nitrogen economy of 24 wild-species differing in relative growth-rate[J]. *Plant Physiol*, 1990, 94(2): 621—627.
- [9] Bassiri Rad H. Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change[J]. *New Phytol*, 2000, 147(1): 155—169.
- [10] Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants[M]*. London, Academic Press Limited, 1995.
- [11] Rooney N, Kalff J. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution: the influence of temperature and lake morphometry[J]. *Aquatic Botany*, 2000, 68(4): 321—335.
- [12] Ekvall L, Greger M. Effects of environmental biomassproducing factors on Cd uptake in two Swedish ecotypes of *Pinus sylvestris*[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 121(3): 401—411.
- [13] 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.
- [14] Macek T, Kotrba P, Suchova M, et al. Accumulation of cadmium by hairy-root cultures of *solanum nigrum*[J]. *Biotechnology Letters*, 1994, 16(6): 621—624.
- [15] 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.
- [16] Albrecht A, Schultze U, Liedgens 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.
- [17] Lynch D V, Steponkus P L. Plasma membrane lipid alterations associated with cold acclimation of winter rye seedlings[J]. *Plant Physiol* 1987, 83(4): 761—767.
- [18] Li Y, Gou X, Wang G. Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China[J]. *J Environ Sci* 2006, 18(6): 1126—1136.
- [19] 中国土壤学会. *土壤农业化学分析方法[M]*. 北京: 中国农业出版社, 1999: 146—226.
- [20] Hernandez L, Probst D, Probst J L. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination[J]. *Sci Total Environ* 2003, 312(3): 195—219.
- [21] 中华人民共和国卫生部. 食品中铜限量卫生标准 (GB 15201—1994)、食品中镉限量卫生标准 (GB14935—1994) 和食品中锌限量卫生标准 GB 13106—1991[M]. 北京: 中

国标准出版社.

- [22] Fangmeier A, Gruters U, Hogy P, et al. Effects of elevated CO₂ nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat. 2. Nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn) [J]. Environ. Pollut. 1997, 96(1): 43–59.
- [23] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Warming and drought change trace element bioaccumulation patterns in a Mediterranean shrubland[J]. Chemosphere, 2008, 70(5): 874–885.
- [24] Volder A, Gifford R M, Evans J R. Effects of elevated atmospheric CO₂, cutting frequency, and differential day/night atmospheric warming on root growth and turnover of *Phalaris swards*[J]. Global Change Biology, 2007, 13(5): 1040–1052.
- [25] Pregitzer K S, Burton A J, et al. Soil respiration, root biomass, and root turnover following long-term exposure of northern forests to elevated atmospheric CO₂ and tropospheric O₃[J]. New Phytologist, 2008, 180(1): 153–161.
- [26] Moreau S, Thomson R M, Kaiser B N, et al. GmZIP1 encodes a symbiosis-specific zinc transporter in soybean[J]. J. Biol. Chem. 2002, 277(7): 4738–4746.
- [27] Chen W R, Feng Y, Chao Y E. Genomic analysis and expression pattern of OsZIP1, OsZIP3, and OsZIP4 in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different zinc efficiency [J]. Russ. J. Plant Physiol. 2008, 55(3): 400–409.
- [28] Ramesh S A, Shin R, Eide D J, et al. Differential metal selectivity and gene expression of two zinc transporters from rice[J]. Plant Physiol. 2003, 133(1): 126–134.
- [29] Lehtonen K K, Leiniö S. Effects of exposure to copper and malathion on metallothionein levels and acetylcholinesterase activity of the mussel *Mytilus edulis* and the clam *Macoma balthica* from the Northern Baltic Sea[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 71(3): 489–496.
- [30] Vallee B L, Auld D S. Active-site zinc ligands and activated H₂O of zinc enzymes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1990, 87(1): 220–224.
- [31] Goralska M, Holley B, McGahan M C. The effects of tempol on ferritin synthesis and Fe metabolism in lens epithelial cells [J]. Biochimica et Biophysica Acta-Molecular Cell Research, 2000, 1497(1/2): 51–60.
- [32] Nilsen E T, Orcutt D M. Physiology of Plants under Stress Abiotic Factors[M]. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- [33] 曾翔, 张玉焯, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 67–69, 83.
- Zeng Xiang, Zhang Yuzhu, Wang Kairong, et al. Genotype difference of brown rices in Cd content[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(1): 67–69, 83. (in Chinese with English abstract).
- [34] Stolt J P, Sneller F E C, Bryngelsson T, et al. Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(1): 21–28.
- [35] Guoy G E, Marschner H. Contribution of an arbuscular mycorrhizal fungus to the uptake of cadmium and nickel in bean and maize plants[J]. Plant and Soil, 1996, 184(2): 195–205.
- [36] Jones D L, Darrah P R, Kochian L V. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in the rhizosphere and its potential role in root iron uptake[J]. Plant and Soil, 1996, 180(1): 57–66.
- [37] Cieslinski G, Van Rees K C J, Szmigielska A M, et al. Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation [J]. Plant and Soil, 1998, 203(1): 109–117.
- [38] Liu J G, Qian M, Cai G L, et al. Variations between rice cultivars in root secretion of organic acids and the relationship with plant cadmium uptake[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29(3): 189–195.
- [39] Reeves P G, Chaney R L. Bioavailability as an issue in risk assessment and management of food cadmium: A review[J]. Sci Total Environ, 2008, 398(1/3): 13–19.
- [40] Graham R D, Welch R M, Saunders S A, et al. Nutritious subsistence food systems[J]. Adv Agron 2007, 92(4): 1–74.
- [41] Vig K, Megharaj M, Sethunathan N, et al. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review[J]. Adv. Environ. Res 2003, 8(1): 121–135.
- [42] Surindra Suthar, Sushma Singh, Sachin Dhawan. Earthworms as bioindicator of metals (Zn, Fe, Mn, Cu, Pb and Cd) in soils: Is metal bioaccumulation affected by their ecological category[J]. Ecological Engineering, 2008, 32(2): 99–107.
- [43] Vásquez M D, López J, Carballeira A. Uptake of heavy metals to the extracellular and intracellular compartments in three species of aquatic bryophyte[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety 1999, 44(1): 12–24.
- [44] Avila A, Rodrigo A. Trace metal fluxes in bulk deposition, throughfall and stemflow at two evergreen oak stands in NE Spain subject to different exposure to the industrial environment[J]. Atmos. Environ 2004, 38(2): 171–180.
- [45] Asensio D, Peñuelas J, Ogaya R, et al. Seasonal soil and leaf CO₂ exchange rates in a Mediterranean holm oak forest and their responses to drought conditions[J]. Atmos. Environ 2007, 41(11): 2447–2455.

Influence of climatic warming on accumulation of trace elements in spring wheat (*Triticum aestivum* L.)

Li Yu^{1,2}, Zhang Qiang^{1*}, Wang Runyuan¹, Liu Ning³, Wang Heling¹, Xiao Guoju⁴, Gou Xin⁵, Ma Zhiyin²

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. School of Chemical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China;

3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy Science, Lanzhou 730000, China;

4. Bioengineering Institute of Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

5. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effect of temperature raising on solubility of trace elements in soil, and the bioavailability of trace elements in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) A simulated warming manipulation was conducted to evaluate the effect of temperature raising on Cd, Cu, Fe and Zn accumulation of spring wheat in Dingxi, Gansu province, the semiarid northwest of China. The results of the study revealed that temperature raising will lead to a significant change in trace element concentration in soil and spring wheat. Compared with control, the strongest effects of 3°C temperature raising were that the trace elements concentrations in grain of Xihan 1, Xihan 2 and Xihan 3 decreased by 43.4%, 11.1% and 13.4% on Cd, and 30.4%, 25.1% and 10.8% on Cu, respectively. But it was converse for the concentrations of Fe and Zn in grain of spring wheat, the concentration of Zn increased by 28.9% and 35.8% respectively in grain of Xihan under 1°C and 3°C temperature raising treatments. According to the change of temperature raising with 1.9°C by 2050 in semiarid northwestern of China, the elements concentrations in spring wheat will be in a range of Cd (0.59-0.65 mg/kg), Cu (5.91-7.64 mg/kg), Zn (63.73-69.41 mg/kg) and Fe (185.23-202.70 mg/kg), respectively.

Key words: temperature, trace elements, climatic change, spring wheat