

小麦及大麦幼苗对供锌及添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 的反应

陆欣春¹, 陈玲^{1,2}, 田霄鸿¹, 杨习文¹, 买文选¹, 赵爱青¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100 2. 胶南市林业局, 山东 青岛 266400)

摘要: 石灰性土壤含有大量 CaCO_3 所产生的高含量 HCO_3^- 及 CaCO_3 对 Zn 的吸附作用被认为是造成作物缺锌的重要原因。该研究在营养液中添加 CaCO_3 或 HCO_3^- , 探讨了两者在不同供 Zn 条件下对 2 种小麦(小偃 22、郑麦 9023)与 1 种大麦(西引 2 号)幼苗生长及 Zn 吸收的影响。结果表明, 不供 Zn 条件下, 添加 HCO_3^- 时 3 种供试作物均出现明显失绿症状, 供 Zn 时症状减轻; 同时 HCO_3^- 明显抑制小麦和大麦生长, 供 Zn 抑制作用减轻。供 Zn 显著增加幼苗的 Zn 吸收, 且地上部增加幅度高于根系; 3 种供试作物均对缺锌较为敏感; HCO_3^- 通过抑制幼苗生长及 Zn 从根系向地上部转运而影响 Zn 吸收, 大麦的锌转运率高于小麦。 HCO_3^- 还显著提高了营养液 pH, 但介质中有作物时 pH 值增加幅度较小; 与 HCO_3^- 相比, 高量 CaCO_3 对作物生长及 Zn 吸收影响较小, 但能明显提高营养液 pH 值。

关键词: CaCO_3 ; HCO_3^- ; 小麦品种; Zn; pH

中图分类号: S143.72; Q945.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2009)04-0134-08

Response of Wheat and Barley Seedlings to $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ with Deficient or Sufficient Zn Supply

LIU Xin-chun¹, CHEN Ling^{1,2}, TIAN Xiao-hong¹, YANG Xi-wen¹,
MAI Wen-xuan¹, ZHAO Ai-qing¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University,
Yangling 712100, China; 2. Forestry Bureau of Jiaonan, Qingdao 266400, China)

Abstract: The adsorption of high concentration of bicarbonate (HCO_3^-) originated from calcareous soils which are rich in CaCO_3 and CaCO_3 itself are considered the main factors to cause zinc deficiency in crops. A solution culture experiment was conducted to investigate that, under deficient and sufficient Zn supply, the effects of CaCO_3 and HCO_3^- (addition as NaHCO_3) addition on the growth and Zn absorption of two wheat cultivars (Xiaoyan22 and Zhengmai9023) and a barley cultivar (Xiyan2). The results showed that under deficient Zn supply condition, addition of bicarbonate caused the obvious chlorosis symptoms of the three crops tested, and with Zn supply, the symptoms were slighter; meanwhile, bicarbonate obviously inhibited growth of barley and wheat plants, and Zn sufficient supply could alleviate the inhibition. Zn supply significantly increased Zn uptake of plants, and also the increase range in the shoots was higher than that in the roots; the three test crops were all sensitive to Zn deficiency; Zn uptake affected by bicarbonate was mainly through inhibiting seedling growth and Zn translocation from roots to shoots, and with HCO_3^- addition barley had higher zinc translocation rate than wheat, and more Zn was accumulated in roots comparing to no HCO_3^- addition in the nutrient solution. With HCO_3^- addition, the Zn translocation rates of Xiaoyan22 and Zhengmai9023 decreased by 24.0% and 23.4%, respectively; while barely increased by 31.1%. The bicarbonate also greatly increased the pH of solution, but the extent of pH increase was relatively small when growing plants in the nutrient solution. Compared with HCO_3^- , high content of CaCO_3 had little influence on plant growth and zinc uptake, but showed obvious influence on the pH increase of nutrient solution.

收稿日期: 2009-05-10

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0866); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划(2007)

作者简介: 陆欣春(1982-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 主要从事旱地养分调控方面的研究。

通讯作者: 田霄鸿(1967-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事植物营养与调控方面的研究。

Key words: CaCO_3 ; Bicarbonate; Wheat cultivar; Zn; pH

锌是动植物正常生长所必需的微量元素, 锌通过植物进入食物链, 直接或通过动物间接进入人类的膳食中。土壤供锌不足时, 农作物及畜产品的产量和品质都会受到影响, 已经证明 Zn 的缺乏和过量均会导致植物生长受阻^[1], 土壤有效锌含量低或极低不仅会降低谷类作物产量, 而且严重影响产品营养品质^[2], 进而影响人体的营养平衡及身体健康。研究表明, 缺锌人群主要分布在食物结构以谷类粮食为主、其他种类食物摄入量较低的地区^[2]。

土壤和植物缺锌是全世界最为普遍的微量元素缺乏现象之一, 在干旱和半干旱地区的石灰性土壤地带尤为严重^[3]。在我国西北和华北的广大地区, 土壤缺锌也相当普遍^[4]。刘合满等^[5]测定了黄土高原不同区域、不同类型土壤全锌和有效锌含量, 结果表明, 土壤全锌含量分布在 50 ~ 100 mg/kg, 有效锌含量较低, 其中所测土样中 20.69% 在缺锌临界值 (0.5 mg/kg)^[6] 之下, 37.93% 为低 ($0.5 \sim 1.0 \text{ mg/kg}$) 水平。一般认为石灰性土壤缺锌是由于存在高含量 CaCO_3 , CaCO_3 对 Zn 的吸附和解吸会产生直接影响^[7], 土壤中的碳酸钙对锌的吸附主要是形成溶解度较小的氢氧化物或碳酸盐^[8]。但更为重要的是, 高量 CaCO_3 使土壤 pH 值维持在较高的水平上 ($7.5 \sim 8.5$)。有研究表明, 石灰性土壤中, 当 CaCO_3 含量在一定浓度范围内时, 生长介质中 pH 值和 CaCO_3 含量呈正相关关系^[9]。因此, CaCO_3 在一定程度上决定着土壤 pH 值的高低。但是, 土壤中的 CaCO_3 本身并不表现碱性, 它只是一种碱源, 必须在 CO_2 和 H_2O 形成 H_2CO_3 后, 再与 CaCO_3 作用生成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 时才表现出碱性^[10]。由此可见, 真正使 pH 值升高从而降低土壤中锌有效性的因子应该是 HCO_3^- 。

近年来, 关于 HCO_3^- 对作物吸收利用锌、铁、锰等营养元素的影响做了大量研究^[11-15]。尤其 HCO_3^- 对水稻锌吸收及运输的影响进行了较为深入的研究^[16], 一般认为 HCO_3^- 通过阻碍根系生长来抑制对锌的吸收, HCO_3^- 对地上部生长影响很小, 而对根系生长具有显著抑制作用^[15], 其原因可能是高量 HCO_3^- 使得根系细胞中累积了大量的有机酸, 从而抑制了作物新生根正常的生长发育^[17]。但是关于小麦的相关报道却较少。作为我国最重要的粮食作物和北方众多人口的主食^[18], 小麦主要种植在石灰性土壤上, 而这种土壤的平均有效锌含量仅为 0.37

mg/kg ^[19], 低于作物缺锌的临界值, 而即使土壤有效 Zn 含量处于 $0.6 \sim 1.0 \text{ mg/kg}$ 的范围, 也会造成小麦的潜在性缺 Zn, 严重影响小麦品质, 并通过食物链最终对人体健康造成不利的影响^[20]。因此, 北方石灰性土壤上小麦锌缺乏问题需要得到迫切的解决。本试验采用模拟研究方法, 把 CaCO_3 添加到营养液中, 模拟石灰性土壤的环境条件, 以弄清石灰性土壤中 CaCO_3 对作物幼苗 Zn 吸收的影响, 同时设直接添加 HCO_3^- 处理作比较, 探讨 HCO_3^- 对 Zn 吸收的直接影响, 尤其是 CaCO_3 产生的 HCO_3^- 对作物幼苗 Zn 吸收的影响, 以期为提高石灰性土壤上 Zn 的有效性提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2005 年 11—12 月在西北农林科技大学温室中进行。试验因子为供 Zn 量、 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 添加量, 其中供 Zn 量设 2 个水平: 0, 0.1 mg/L ; $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 添加量设 3 个水平: 不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ (用“—”表示)、添加 CaCO_3 (用量 2 g/L)、添加 HCO_3^- (由 NaHCO_3 提供, 用量 15 mmol/L); 供试作物: 大麦 (西引 2 号)、小麦 (小偃 22、郑麦 9023), 组成 18 个处理, 重复 3 次, 在温室采用随机排列摆放。

1.2 培养过程

首先在室内进行育苗: 经精选大小一致饱满的种子用 55°C 热水浸泡 15 min, 3% 的 H_2O_2 溶液浸泡 10 min, 在室温下用蒸馏水浸泡 3 h, 再将种子在湿润的滤纸上催芽 2 d。挑选发芽较好的种子播种于沙盘上。小麦发芽 7 d 后挑选长势大小均一的植株移栽到盛有 2.2 L 营养液的不透明塑料小桶中。桶盖上有 4 个孔, 每孔用棉花固定 1 株幼苗。试验重复 3 次共需 54 个不透明塑料小桶。试验中另设不培养作物的对照 (在盛有含锌的全营养液的 3 个小桶中设 3 种添加方式, 即不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 、添加 CaCO_3 与添加 HCO_3^-), 与培养试验一起更换营养液。

幼苗先在由 Hoagland 营养液配方 (一) 与 Arnon 微量元素营养液配方^[21] 组成的无 Zn 的 $1/4$ 浓度的营养液中进行预培养 7 d, 然后转入 $1/2$ 浓度的营养液中进行正式培养, Zn 与 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 按处理要求的用量加入。大量元素采用 $1/2$ 浓度的 Hoagland 营养液配方 (一) 供应: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1180 mg/L , KNO_3 510 mg/L , KH_2PO_4 140 mg/L , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 490

mg/L, 柠檬酸铁 33.5 mg/L(原配方中为酒石酸铁); 微量元素采用 Amon 配方(Zn 除外); H₃BO₃ 2.86 mg/L, MnCl₂ · 4H₂O 1.81 mg/L, CuSO₄ · 5H₂O 0.08 mg/L, H₂MoO₄ · 4H₂O 0.09 mg/L。营养液均用蒸馏水配制, 采用自动通气装置每天通气 15 min, 更换营养前测定溶液的 pH 值, 7 d 更换一次营养液。试验在一面通风的温室大棚内进行, 温室内温度保持在 5~18℃, 光照时间每日约 10 h, 共培养 42 d 后结束。

1.3 测定项目与方法

收获后的小麦植株, 洗净后分为根系和地上部两部分, 先在 90℃下杀青 20 min, 在 70℃下烘 48 h, 然后分别称取根系和地上部干质量。

培养 35 d 后用 SPAD-502 便携式叶绿素仪测定植株叶片叶绿素 SPAD 值; 营养液 pH 值采用 DELTA320pH 计测定; CO₃²⁻ 与 HCO₃⁻ 浓度采用双指示剂滴定法测定^[22]; 小麦幼苗植株的叶面积采用系数法测定^[23]。

植物样品中 Zn 含量的测定采用湿灰化法(浓 HNO₃-HClO₄)消解样品后, 用 AA320CRT 型原子吸收分光光度法测定^[22]。

对所获得的数据进行方差分析后, 用 SSR 法进行多重比较(采用 SAS8.1 统计软件)。

2 结果与分析

2.1 添加 CaCO₃/HCO₃⁻对植株幼苗生长的影响

2.1.1 幼苗生长状况 试验结束前, 不同供 Zn 量和 CaCO₃/HCO₃⁻添加量处理下的供试作物的地上

部已表现出不同的症状。不供 Zn 条件下, 添加 HCO₃⁻处理作物长势最差, 大麦叶片发黄并有褐色坏死斑点, 而小麦叶片条带状失绿, 其中小偃 22 叶片呈现明显的黄绿色, 郑麦 9023 茎部发红; 添加 CaCO₃ 处理, 大麦叶片发黄并略有锈状斑点, 而两个品种的小麦失绿症状不明显。与不供 Zn 相比, 供 Zn 后作物叶片绿色较浓, 供试作物的失绿症状明显减轻甚至无明显现象, 但仍有长势顺序为不添加 CaCO₃/HCO₃⁻ > 添加 CaCO₃ > 添加 HCO₃⁻, 添加 HCO₃⁻ 后大麦仅最下部老叶发黄。

试验结束前对作物植株的分蘖数、根长、株高、黄绿叶数、叶绿素 SPAD 值及叶面积等进行测量与统计分析(表 1)。与不供 Zn 相比, 供 Zn 有利于作物的分蘖, 增加绿叶数, 减少黄叶数, 增大叶面积, 提高叶绿素 SPAD 值, 对作物根长与株高的影响不大。

CaCO₃/HCO₃⁻ 的添加对作物生长的影响显著。与不添加 CaCO₃/HCO₃⁻ 处理相比, 添加 CaCO₃ 后根系增长, 黄叶数增多绿叶数减少, 明显降低了叶片的叶绿素 SPAD 值; 虽对株高与叶面积的影响未达显著水平, 但仍略微降低株高使叶面积增加。添加 HCO₃⁻ 处理各观测参数值均显著降低。可见, HCO₃⁻ 较 CaCO₃ 对作物生长的抑制作用较大。

供试作物中, 小偃 22 的分蘖数、根长与株高均最高, 而大麦最低; 绿叶数两种小麦相等, 且明显多于大麦, 但黄叶数 3 种供试作物相当; 而大麦的叶面积较 2 种小麦大。

表 1 不同供 Zn 量与 CaCO₃/HCO₃⁻ 添加量对供试作物幼苗生长的影响

Tab. 1 Effect of different zinc supply and CaCO ₃ /HCO ₃ ⁻ addition on growht of different genotype crop seedling								
因素 Factor	水平 Level	分蘖数 Tillering number	根长/cm Root length	株高/cm Plant height	黄叶数 /(个/株) Yellow leaf number	绿叶数 /(个/株) Green leaf number	叶绿素 SPAD 值 SPAD value	叶面积 /(cm ² /株) Leaf area
Zn 供应	—	2.6 b	21.3 a	14.3 a	3	4	33.2 b	34.8 a
Zn supply	+	3.3 a	21.1 a	14.3 a	1	7	42.7 a	42.2 a
CaCO ₃ /HCO ₃ ⁻	—	3.4 a	22.7 b	15.1 a	1	7	46.9 a	42.0 a
添加 CaCO ₃ /	CaCO ₃	3.2 a	25.2 a	14.0 a	2	6	36.0 b	48.7 a
HCO ₃ ⁻ addition	HCO ₃ ⁻	2.4 b	15.8 c	13.7 b	3	3	31.0 c	25.0 b
供试作物	小偃 22	3.3 a	25.5 a	16.4 a	2	6	38.2 ab	30.6 b
Test crops	郑麦 9023	2.9 ab	22.6 b	13.3 b	2	6	39.5 a	39.1 ab
	西引 2 号	2.7 b	15.6 c	13.1 b	2	4	36.2 b	45.9 a

注: 同一列中每一因子不同水平间进行多重比较; 下同。小偃 22、郑麦 9023 与大麦的叶面积系数分别为 0.61、0.70、0.81。
Note: The multiple comparisons were conducted between different levels of a given factor within the same column. The same below. Leaf area index of Xiaoyan 22, Zhengmai 9023 and Xiyin2 (harley) were 0.61, 0.70, 0.81, respectively.

2.1.2 幼苗植株干质量 供 Zn 显著增加了地上部及整株的生长量(表 2, 图 1), 而根冠比显著降低; 与对照相比, 添加 HCO₃⁻ 明显抑制供试作物幼苗的生长, 根系、地上部的降幅分别为 37.9%、36.5%, 根冠比未有变化; 添加 CaCO₃ 处理植株幼苗的根部生长

量显著增加了, 增幅为 15.5%, 而地上部生长量下降了 11.0%, 从而根冠比显著增加了; 3 种供试作物生长量比较: 小偃 22 > 郑麦 9023 > 大麦, 小偃 22 的生长量显著高于大麦, 而郑麦 9023 地上部生长量显著高于大麦, 从而小麦的根冠比都显著低于大麦。

表 2 不同处理对供试作物幼苗根系和地上部干质量的影响
Tab. 2 Effects of different treatments on biomass of wheat seedlings

因素 Factor	水平 Level	生长量/(g/株) Seedling yield			冠比 Root/shoot ratio
		根系 Root	地上部 Shoot	整株 Total	
供 Zn Zn supply	—	0.51 a	1.01 b	1.52 b	0.52 a
	+	0.56 a	1.30 a	1.86 a	0.44 b
$\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ addition	—	0.58 b	1.37 a	1.95 a	0.43 b
	CaCO_3	0.67 a	1.22 a	1.89 a	0.58 a
	HCO_3^-	0.36 c	0.87 b	1.23 b	0.43 b
供试作物 Test crops	小偃 22	0.63 a	1.38 a	2.01 a	0.46 b
	郑麦 9023	0.52 b	1.14 b	1.66 b	0.46 b
	西引 2 号	0.46 b	0.94 c	1.40 b	0.51 a

由图 1 可以看出, 不供锌条件下, 添加 CaCO_3 对供试作物地上部生长有抑制作用, 而在供锌条件下, 添加 CaCO_3 对作物生长有轻微的促进作用; 不供锌条件下, 与不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 处理相比, 添加 HCO_3^- 处理供试作物根、地上部、整株生长量分别降低了 45.3%, 46.5%, 46.1%; 而供锌条件下, 添加 HCO_3^- 各部分生长量分别降低了 30.2%, 27.0%,

27.9%。可见, 无论是否供锌, 添加 HCO_3^- 对供试作物生长有明显的抑制作用, 供锌可以减缓其抑制作用。徐晓燕等^[24] 在水稻上结果也表明, 在低锌浓度下, HCO_3^- 对缺锌敏感品种抑制作用严重, 随着 HCO_3^- 处理天数的增加, 抑制作用加重, 而提高供锌浓度, 其抑制作用减轻, 而 HCO_3^- 对耐锌水稻品种根生长有轻微的促进作用。可见本试验所选的 3 种供试作物对缺锌比较敏感。

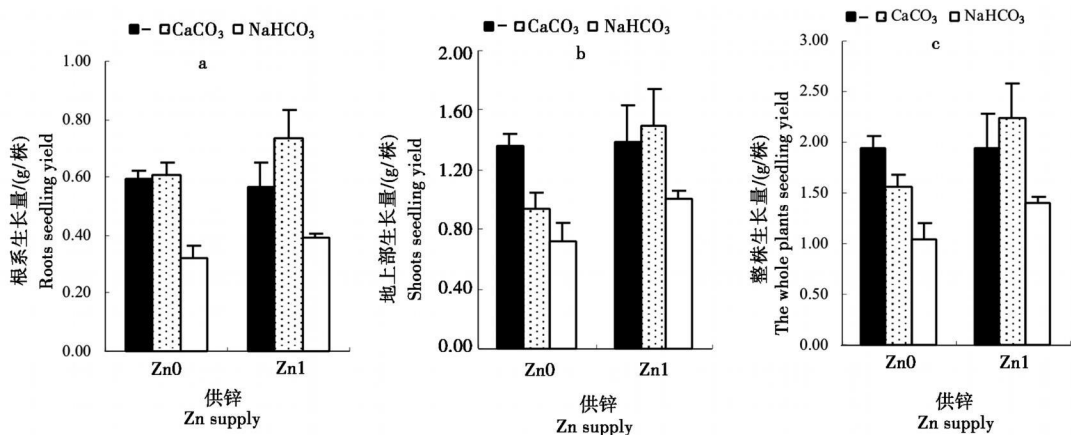


图 1 不同供锌条件下 CaCO_3 与 HCO_3^- 对供试作物幼苗根系 (a)、地上部 (b) 及整株干质量 (c) 的影响

Fig. 1 Effects of CaCO_3 or HCO_3^- addition on the biomass of roots (a), shoots (b) and the whole plants (c) of three test crops under deficient and sufficient zinc supply

2.2 添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 对供试作物 Zn 吸收的影响

由图 2 可以看出, 供试作物根系与地上部的 Zn 含量和吸收量均为添加 HCO_3^- 处理最低, 大麦 Zn 含量和吸收量均比小麦稍低。供 Zn 可极大程度提高作物根系与地上部的 Zn 含量和吸收量, 且供 Zn 对地上部影响较大。与不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 处理相比, 添加 CaCO_3 对供试作物的 Zn 含量和吸收量影响较小, 仅在供 Zn 条件下作物根部 Zn 含量和吸收量由于添加 CaCO_3 而有所降低, 这可能是由于 CaCO_3 溶解度小, 仅为 0.001 4 g (25 °C), 大量未溶解的 CaCO_3 吸附锌抑制了供试作物吸收锌, 从而刺激了作物根系生长。而添加 HCO_3^- 处理显著降低了

各部位 Zn 含量和吸收量, 大麦根部比地上部降低幅度大, 而小麦地上部降低幅度较大, 说明添加 HCO_3^- 对大麦根部吸收 Zn 抑制作用较大, 而对小麦的 Zn 转运抑制作用较大。

供 Zn 显著增加了 Zn 转运率 (图 3), 在不供锌条件下, 添加 CaCO_3 或 HCO_3^- 均能抑制供试作物锌的转运, 与不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 处理相比, 添加 CaCO_3 、 HCO_3^- 处理使锌的转运率分别下降 37.6%, 20.9%。可见 CaCO_3 的抑制作用要强于 HCO_3^- ; 而在供 Zn 条件下, 添加 HCO_3^- 处理锌转运率下降了 12.1%, 而添加 CaCO_3 锌转运率增加了 28.0%。3 种供试作物中, 郑麦 9023 的转运率最低, 而大麦转运率比小麦稍高。

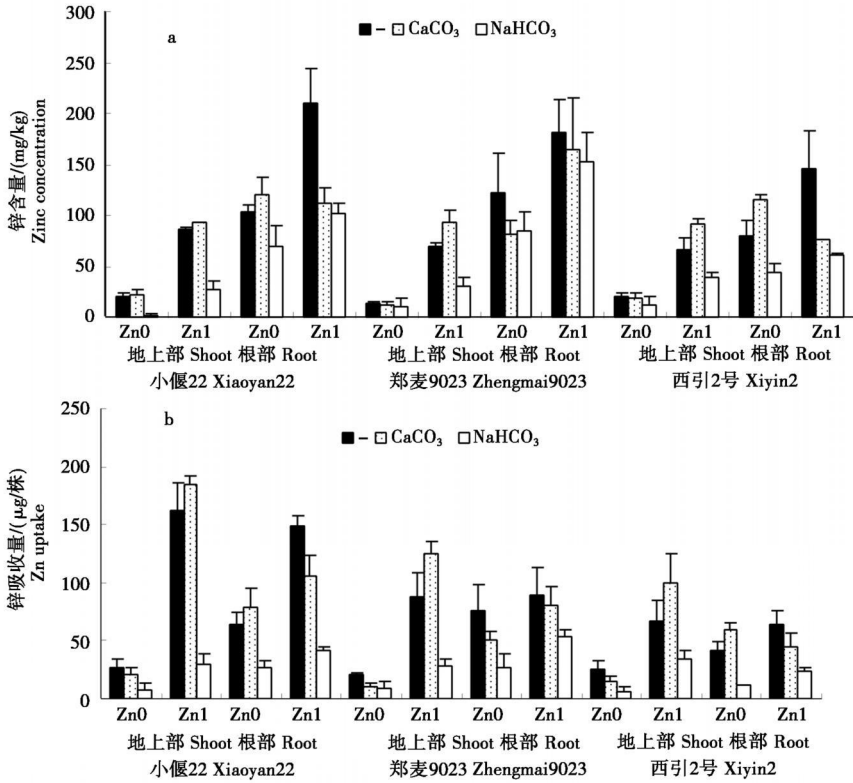
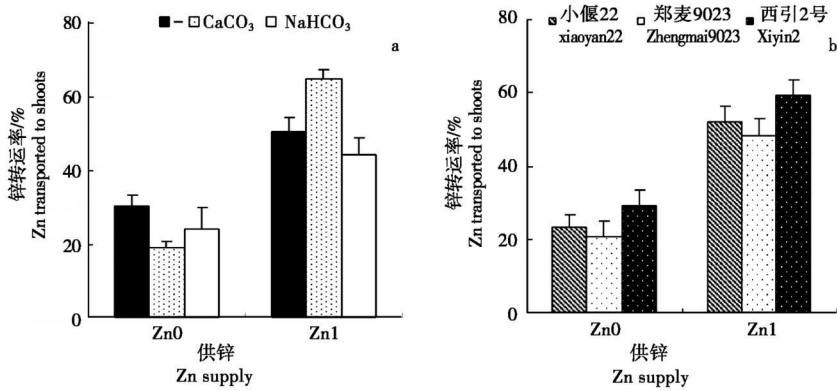


图 2 供锌条件下添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 对供试作物 Zn 含量(a)与 Zn 吸收量(b)的影响

Fig. 2 Effect of $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ addition on the Zn concentration (a) and uptake (b) in crops under different zinc supplying condition



从根系向上部转运率被定义为地上部锌吸收量与整株锌吸收量的比值。
The zinc translocation rate from roots to shoots is defined as the percentage of the zinc uptake in shoots to that in the whole plants

图 3 添加 CaCO_3 或 HCO_3^- 对供试作物 Zn 转运率的影响(a), 供试作物 Zn 转运率比较(b)

Fig. 3 Effects of $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ addition on the zinc translocation rate in crops (a), and the comparisons of zinc translocation rate among three test crops (b)

2.3 添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 对营养液化学性质的影响

试验过程中在每次更换营养液前, 先分别收集培养作物的 54 个小桶与无作物生长的 3 个对照中的营养液(测定 pH 值、 CO_3^{2-} 与 HCO_3^- 产生量), 再更换营养液。

2.3.1 营养液 pH 值 供 Zn 对营养液 pH 值无影响, 添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 对营养液的 pH 值影响较大, 在正式培养的 5 个阶段中(35 d) pH 值的大小顺序

均为 $\text{pH}(\text{HCO}_3^-) > \text{pH}(\text{CaCO}_3) > \text{pH}(-)$, 且差异显著(表 3)。正式培养阶段中, 添加 HCO_3^- 营养液中最高 pH 值可达 9.31, 添加 CaCO_3 与不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 处理营养液的 pH 值最高分别为 7.93, 7.13; 与无作物生长的对照进行对比, 正式培养的 5 个阶段添加 HCO_3^- 的处理中营养液的 pH 值低于有 HCO_3^- 的对照, 而添加 CaCO_3 与不添加的处理营养液的 pH 值高于对应的对照。

表3 更换营养液前 5 个培养阶段营养液中的 pH 值

Tab. 3 Nutrient solution's pH value during the five culture periods before replacement of the solution

因素 Factor	预处理 Pretreatment	阶段 1 Stage 1	阶段 2 Stage 2	阶段 3 Stage 3	阶段 4 Stage 4	阶段 5 Stage 5
- Zn	—	7.33 a	7.13 f	6.69 ef	6.70 d	6.88 d
	CaCO_3	7.43 a	7.93 d	7.49 c	7.17 c	7.43 c
	HCO_3^-	7.37 a	9.31 a	8.73 b	8.39 b	8.44 b
+ Zn	—	7.43 a	7.12 f	6.74 e	6.71 d	6.81 d
	CaCO_3	7.38 a	7.89 d	7.46 cd	7.13 c	7.27 c
	HCO_3^-	7.38 a	9.12 b	8.87 ab	8.34 b	8.38 b
对照 CK	—	—	6.84 g	6.51 f	6.19 f	6.37 e
	CaCO_3	—	7.51 e	7.29 d	6.34 e	6.86 d
	HCO_3^-	—	9.03 c	8.97 a	8.60 a	8.75 a

注: 同一列内进行多重比较
Note: The multiple comparisons were conducted within the same column.

2.3.2 营养液中 CO_3^{2-} 与 HCO_3^- 浓度 对 5 个培养阶段更换营养液前塑料桶中的 HCO_3^- 产生量分析(表 4)可以看出: 供 Zn 对营养液中 HCO_3^- 产生没有影响, 添加高量的 CaCO_3 产生的 HCO_3^- 为不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 的 1.5 ~ 2.5 倍, 但仍远小于添加 15

mmol/L HCO_3^- 。与对照相比, 种植作物后营养液中的 HCO_3^- 均有所增加, 添加 HCO_3^- 处理增加幅度相对小一些。这是由于作物根系呼吸产生的 CO_2 , 通过反应: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$, $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ 而增加了 HCO_3^- 的量。

表 4 更换营养前 5 个培养阶段营养液中的 HCO_3^- 产生量

Tab. 4 Nutrient solution's HCO_3^- concentration of the five culture period before the replacement of the solution

		mmol/L				
因素 Factor		阶段 1 Stage 1	阶段 2 Stage 2	阶段 3 Stage 3	阶段 4 Stage 4	阶段 5 Stage 5
—	- Zn	0.64	0.80	1.04	0.95	0.98
	+ Zn	0.66	0.78	1.04	0.95	0.98
	CK	0.65	0.75	0.55	0.60	0.90
CaCO_3	- Zn	1.59	1.51	1.89	1.71	1.86
	+ Zn	1.49	1.68	2.12	1.78	1.78
	CK	1.30	1.15	0.90	0.95	1.65
HCO_3^-	- Zn	13.08	14.75	14.40	13.58	12.00
	+ Zn	13.93	14.12	14.24	13.63	12.06
	CK	14.00	13.65	12.60	13.00	10.90

从 CO_3^{2-} 产生的量来看(表 5), 仅有营养液中添加 HCO_3^- 时有 CO_3^{2-} 的产生。与无作物栽培的对照相比, 各培养阶段除阶段 1 外营养液中产生的 CO_3^{2-} 浓度均较对照低, 随培养时间的延长, 营养液中 CO_3^{2-} 的浓度降低。在各个培养阶段施锌时营养

液中 CO_3^{2-} 的浓度低于不施锌。从阶段 1 至阶段 5, 不施锌时营养液中 CO_3^{2-} 的浓度的变幅为 0.97 mmol/L, 施锌时营养液中 CO_3^{2-} 的浓度 0.73 mmol/L, 而对照中的 CO_3^{2-} 的浓度相对稳定。

表 5 不同处理下营养液的 CO_3^{2-} 的产生量

Tab. 5 The carbonate (CO_3^{2-}) concentration in the nutrient solution under different treatments

		mmol/L				
因素 Factor		阶段 1 Stage 1	阶段 2 Stage 2	阶段 3 Stage 3	阶段 4 Stage 4	阶段 5 Stage 5
- Zn	—	0	0	0	0	0
	CaCO_3	0	0	0	0	0
	HCO_3^-	1.40	0.77	0.51	0.46	0.43
+ Zn	—	0	0	0	0	0
	CaCO_3	0	0	0	0	0
	HCO_3^-	1.03	1.18	0.30	0.38	0.43
对照 CK	—	0	0	0	0	0
	CaCO_3	0	0	0	0	0
	HCO_3^-	0.75	1.30	1.15	1.15	0.90

3 讨论

其有效性的最主要因素。土壤 $\text{pH} > 7$ 时, 锌有效性降低, 严重缺锌主要由土壤高 pH 值引起^[29]。石灰

一般认为, 土壤 pH 值是决定土壤中锌形态及

性土壤中高量 CaCO_3 使土壤 pH 值维持在较高的水平上(7.5~8.5)。 CaCO_3 在土壤中会发生化学反应而产生 HCO_3^- , 因此, CaCO_3 在一定程度上决定着土壤 pH 值的高低及 HCO_3^- 产生量。本试验中, 与不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 处理相比, 添加 CaCO_3 显著增加了营养液的 pH 值及 HCO_3^- 量, 营养液中添加大量的 CaCO_3 却仅有一部分溶解, 从而产生的 HCO_3^- 有限, 本试验添加了 2 g/L 的 CaCO_3 与我们前面的试验^[26] 添加 60 mg/L 的 CaCO_3 产生的 HCO_3^- 量相当, 而远小于添加 15 mmol/L HCO_3^- 处理所产生的 HCO_3^- 量, 从而对供试作物的生长影响小于直接添加 HCO_3^- , 营养液中直接加入 HCO_3^- 可以极显著增加营养液 pH 值和 HCO_3^- 量, 这可能是 HCO_3^- 水解产生 OH^- 而导致 pH 值增加。但在此条件下, 与无作物生长的对照进行对比, 作物生长降低了营养液的 pH 值, 这可能与作物根系分泌物有关。根分泌物对植物根际的微域产生重要影响^[27], 根系可能会分泌一种物质使根系生长环境的 pH 值范围适应自己的生长, 降低生长环境对根系的破坏, 从而保证作物的正常生长, 李廷强等^[28] 研究认为, 根系和根际微生物能分泌特殊有机物(特别是有机酸), 酸化根际、同时根际微生物的呼吸作用明显大于非根际, 从而降低根际 pH 值。然而分泌物的种类以及在缺锌胁迫下的适应机理尚待进一步研究。

高浓度 HCO_3^- 对某些植物根系的生长是一种胁迫条件^[17, 29]。徐晓燕等^[24] 研究认为, HCO_3^- 抑制作物根系生长可能是其诱发缺锌的最初作用。本试验的结果显示, 与不添加 $\text{CaCO}_3/\text{HCO}_3^-$ 处理相比, 添加 HCO_3^- 处理显著降低了作物分蘖数、根长、株高、叶绿素 SPAD 值、叶面积、生长量, 添加 HCO_3^- 可显著抑制供试作物生长, 而供锌可以减轻其抑制作用; 添加了高量的 CaCO_3 仅显著降低了作物的叶绿素 SPAD 值, 我们以前的水培试验^[30], 添加 100 mg/L CaCO_3 可显著降低小麦幼苗叶绿素 SPAD 值, 本试验添加 CaCO_3 增大到 2 g/L 其对幼苗叶绿素影响程度并没加大。可见营养液中添加大量 CaCO_3 , 由于其大部分不溶解而产生的 HCO_3^- 量较小, 从而对作物生长的抑制作用较小, 但对作物根系锌的吸收仍有一定的抑制作用。但我们应该注意到在目前研究中 HCO_3^- 的添加载体一般选用 NaHCO_3 ^[15, 16], 本试验中也用了 NaHCO_3 , 但 NaHCO_3 提供了高浓度的 HCO_3^- 的同时, 带入了大量的 Na^+ , 而 Na^+ 对供试作物生长有一定影响, 这对作物吸收锌是否也有一定影响还有待进一步研究。

我们的土培试验^[31] 表明, HCO_3^- 对小麦锌营养的影响可能主要是通过以下途径实现的: 对土壤中有效锌的钝化; 对小麦根系生长的抑制; 抑制锌从小麦根系向地上部的转运。本试验中添加的 HCO_3^- 显著抑制了供试作物的生长, 同时也降低了 Zn 转运率, 从而影响作物对锌的吸收。添加 CaCO_3 处理, 其产生的 HCO_3^- 量较低, 对生长影响小, 同时大量未溶解的 CaCO_3 对营养液中的锌有一定的吸附作用, 因此, 在供锌条件下 CaCO_3 对供试作物根系锌的吸收有一定的抑制, 刺激了作物根系的生长, 对锌的转运也有轻微促进作用。有研究表明^[32], 外源 Ca^{2+} 对超积累生态型东南景天锌吸收及积累有促进作用, 而 Ca^{2+} 浓度的升高抑制了非超积累生态型东南景天对锌的吸收。本试验中 Ca^{2+} 是否对作物吸收锌也有一定影响, 此外, 本试验添加 HCO_3^- 同时带入了大量的 Na^+ , 其是否对供试作物锌吸收也会产生一定的影响还有待进一步研究。

锌是微量元素缺乏症中最常见的, 有关植物锌营养研究, 特别是植物锌营养效率的基因型差异研究已成为一个热点^[33]。不同作物与同一作物的不同基因型对缺素的敏感程度有所差异^[34]。本试验中不供锌条件下, 添加 HCO_3^- 时 3 种供试作物均出现明显失绿症状, 明显抑制了作物生长; 供 Zn 后症状减轻, 其抑制生长作用也减轻, 这与缺锌敏感性水稻对 HCO_3^- 的反应相似, 由此我们推断本试验的 3 种供试作物对缺锌较敏感, 从生长量上可以判断所选的大麦缺锌敏感性更高, 其锌含量及锌吸收量比小麦稍低, 但其锌转运率要稍高于小麦。可见, HCO_3^- 通过抑制缺锌敏感型作物生长而抑制其锌吸收, 大麦缺锌敏感性更高, 因此 HCO_3^- 对其抑制作用更强, 但大麦比小麦锌转运能力稍强。

参考文献:

- [1] 冯 致, 郁继华, 颜建明, 等. 锌对青菜幼苗生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(4): 471—474.
- [2] Cakmak I, Kalayci M, Braun H J, *et al.* Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-Science for stability project[J]. Field Crops Research, 1999, 60: 175—188.
- [3] Hajiboland R, Yang X E, Römheld V. Effects of bicarbonate and high pH on growth of Zn-efficiency and Zn-inefficient genotypes of rice, wheat and rye[J]. Plant and Soil, 2003, 250: 349—357.
- [4] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 377—380.

- [5] 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 黄土高原主要土壤 锌有效性及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 898—902.
- [6] Cakmak I, Yilmaz A, Kalayci M, *et al.* Zinc deficiency as a critical problem in wheat production in Central Anatolia[J]. Plant and Soil, 1996, 180: 165—172.
- [7] 钱金红, 谢振翅. 碳酸盐对土壤锌解吸影响的研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 105—108.
- [8] 谢佰承, 张春霞, 薛绪掌. 土壤中微量元素的环境化学特性[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 132—135.
- [9] 刘世全, 张世熔, 伍 钧, 等. 土壤 pH 与碳酸钙含量的关系[J]. 土壤, 2002, 34(5): 279—282.
- [10] 李燕婷, 白灯莎, 买买提艾力, 张福锁, 等. 酸性根际肥对石灰性土壤 pH 和铁有效性的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 312—316.
- [11] He Y, Liao H, Yan X L. Localized supply of phosphorus induces root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures[J]. Plant and Soil, 2003, 248: 247—256.
- [12] 李春花, 褚天铎, 杨 清, 等. 灌溉水中 HCO_3^- 对菜豆吸收利用土壤有效养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 329—333.
- [13] 廖 红, 严小龙. 高级植物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 252—257.
- [14] 田霄鸿, 胡志桥, 李生秀, 等. 碳酸氢根与水肥同层对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 757—763.
- [15] Yang X E, Römheld V, Marschner H. Effect of bicarbonate and root zone temperature on the uptake of Zn, Fe, Mn and Cu by different rice cultivars (*Oryza sativa* L.) grown in calcareous soil[J]. Plant and Soil, 1993, 155/156: 441—445.
- [16] 徐晓燕, 杨肖娥, 杨玉爱. HCO_3^- 对不同水稻品种 Zn 吸收运输的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(6): 532—535.
- [17] Yang X E, Römheld V, Marschner H. Effect of bicarbonate on root growth and accumulation of organic acids in Zn-inefficient and Zn-efficient rice cultivars (*Oryza sativa* L.)[J]. Plant and Soil, 1994, 164: 1—7.
- [18] 裴雪霞, 党建友, 吴俊兰. 冬小麦锰、锌、铜营养研究现状[J]. 小麦研究, 2000, 21(2): 28—29.
- [19] 刘 铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30—37.
- [20] Cakmak I, Tonun B, Erenoglu B, *et al.* Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency[J]. Euphytica, 1998, 100: 349—357.
- [21] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1998: 46—47.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 中国农业出版社, 1999: 193—195.
- [23] 高俊风. 植物生理学试验指导[M], 西安: 世界图书出版公司, 2000: 116—117.
- [24] 徐晓燕, 杨肖娥, 杨玉爱. HCO_3^- 对不同基因型水稻根生长及养分吸收分配的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 557—560.
- [25] 徐晓燕, 杨肖娥, 杨玉爱. 锌从土壤向食物链的迁移[J]. 广东微量元素科学, 1996, 3(7): 21—29.
- [26] 陈 玲, 田霄鸿, 李 峰, 等. 碳酸钙和锌对五种基因型小麦生长、锌吸收及营养液中 HCO_3^- 含量和 pH 的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 523—529.
- [27] 赵同科. 植物锌营养研究综述与展望[J]. 河北农业大学学报, 1996, 19(1): 102—107.
- [28] 李廷强, 朱 恩, 杨肖娥, 等. 超积累植物东南景天根际可溶性有机质对土壤锌吸附解吸的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 838—844.
- [29] Romera F J, Alcantara E, Guardia M D. Effect of bicarbonate phosphate and high pH on the reducing capacity of Fe deficient sunflower and cucumber plant[J]. Plant Nutri, 1992, 15: 1519—1530.
- [30] 买文选, 陈 玲, 田霄鸿, 等. 高碳酸钙条件下供锌对不同基因型小麦生长和养分吸收的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(6): 83—88.
- [31] 田霄鸿, 买文选, 陆欣春, 等. 重碳酸根对不同小麦基因型生长及锌营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 9—16.
- [32] 黄化刚, 李廷轩, 张锡洲, 等. 外源钙离子对东南景天生长及锌积累的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 831—837.
- [33] Graham R D, Rengel Z. Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plants[M]//Robson A D. Zinc in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, 1993: 107—118.
- [34] Brown J C, Jones W E. A technique to determine iron efficiency in plants[J]. Soil Sci Am J, 1976, 40: 398—405.