

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.015

吴洪生, 陈小青, 马文舟, 等. 水分胁迫下施用磷石膏改良滨海盐碱土对小麦生长影响与环境风险评估初探. 土壤, 2024, 56(5): 1042–1050.

# 水分胁迫下施用磷石膏改良滨海盐碱土对小麦生长影响与环境风险评估初探<sup>①</sup>

吴洪生<sup>1</sup>, 陈小青<sup>1</sup>, 马文舟<sup>2</sup>, 王晓云<sup>3</sup>, 周国华<sup>2</sup>, 丁 军<sup>1</sup>, 程 诚<sup>1</sup>, 李妍慧<sup>1</sup>, 迟金和<sup>4</sup>, 石陶然<sup>1</sup>, 段亚军<sup>1</sup>, 邸明春<sup>5</sup>, 李贞伟<sup>1</sup>, 石佑华<sup>6</sup>

(1 南京信息工程大学农业资源与环境系, 南京 210044; 2 盱眙县耕地质量保护站, 江苏盱眙 211700; 3 兴化市耕地质量保护站, 江苏兴化 225700; 4 滨海县农业干部学校, 江苏滨海 224500; 5 南京怡可帮生态环境科技有限公司, 南京 210042; 6 如东县耕地质量保护站, 江苏如东 226404)

**摘 要:** 在前期磷石膏改良效果试验的基础上, 通过室内盆栽试验, 采用滨海盐土种植小麦, 磷石膏施用量 45 000 kg/hm<sup>2</sup>, 进行不同土壤持水量下水分与磷石膏的交互作用对小麦生长影响及环境风险试验, 分别设置土壤饱和和持水量的 90%、80%、70%、60%、50%、40%、30% 共 7 个处理。结果表明, 含水量为土壤田间持水量的 30% 处理比持水量 80% 处理的小麦株高减少 32.06%, 总鲜生物量减少 44.17%, 根生物量增加 106.06%, 根冠比提高, 小麦叶片抗氧化酶活性提高, 丙二醛含量增加 98.37%; 土壤 Cd 增加 3.2%, Pb 增加 7.2%, Cu 增加 50.9%, 水溶性 F 增加 150%; 小麦叶片 Cd 增加 50%, Pb 增加 33.3%, F 增加 275%。虽然尚未达到土壤和地下水重金属污染环境质量标准, 但是如果长期连续高量施用磷石膏, 会导致土壤和地下水相应有害物质积累; 小麦叶片中的重金属在灌浆时会逐渐向籽粒转移积累, 有一定风险。水分胁迫影响小麦生长发育, 导致土壤及小麦叶片中 Cd 和水溶性 F 含量提高, 会带来小麦籽粒残留 Cd 和 F 增加的风险。在气象干旱及盐碱地盐胁迫引起的生理干旱条件下施用磷石膏改良盐碱土可能会引起土壤及地下水环境风险和农产品安全风险, 需要加强专项研究和应用监测。

**关键词:** 滨海盐碱土; 磷石膏; 水分胁迫; 小麦; 抗性酶; 环境风险评估

**中图分类号:** S156.4 **文献标志码:** A

## Primary Study of Effects of Phosphogypsum on Growth of Winter Wheat and Environmental Risk Assessment in Costal Saline-sodic Soil Under Different Soil Moistures

WU Hongsheng<sup>1</sup>, CHEN Xiaoqing<sup>1</sup>, MA Wenzhou<sup>2</sup>, WANG Xiaoyun<sup>3</sup>, ZHOU Guohua<sup>2</sup>, DING Jun<sup>1</sup>, CHENG Cheng<sup>1</sup>, LI Yanhui<sup>1</sup>, CHI Jinhe<sup>4</sup>, SHI Taoran<sup>1</sup>, DUAN Yajun<sup>1</sup>, DI Mingchun<sup>5</sup>, LI Zhenwei<sup>1</sup>, SHI Youhua<sup>6</sup>

(1 Department of Agricultural Resources and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2 Xuyi County Arable Land Quality Protection Station, Xuyi, Jiangsu 211700, China; 3 Xinghua City Arable Land Quality Protection Station, Xinghua, Jiangsu 225700, China; 4 Binhai Agricultural Cadre Training School, Binhai, Jiangsu 224500, China; 5 Nanjing Eco-bump Ecology and Environmental Science and Technology Co., Ltd., Nanjing 210042, China; 6 Rudong County Arable Land Quality Protection Station, Rudong, Jiangsu 226404, China)

**Abstract:** Based on previous experiments of effective phosphogypsum (PG) application, a pot experiment of costal saline-sodic soil osmosis-based physiological drought was simulated in lab with 45 000 kg/hm<sup>2</sup> of PG was added to test the effects of different soil moistures on wheat growth and possible environmental risk, in which, seven treatments of 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40% and 30% soil water-holding capacity (SHWC) were designed. Results showed that wheat height and biomass under 30% SHWC were decreased by 32.06% and 44.17% than those under 80% SHWC respectively, while wheat root weight and malondialdehyde (MDA) were increased by 106.06% and 98.37% respectively, root/shoot ratio and leaf anti-oxidase activities were also increased; The concentrations of Cd, Pb, Cu and soluble F in soil were increased by 3.2%, 7.2%, 50.9% and 150% respectively, and the contents of Cd, Pb, soluble F in wheat leaves were increased by 50%, 33.3% and 275% respectively. Applying PG to amend

<sup>①</sup>基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42177020)资助。

作者简介: 吴洪生(1964—), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 主要研究方向为土壤污染生态修复与改良、土壤微生物生态。E-mail: wuhsluck@163.com

saline-sodic soil affected wheat growth under water stress resulting in the increase of Cd and soluble F in soil and wheat leaves. The contents of toxic elements increased in soil and wheat leaves were far from the national limits of heavy metals in soil and grains, however toxic elements in soil and groundwater will be accumulated with the continued application of PG. Meantime toxic elements in wheat leaves transported to grain may cause grain safety risk. The use of PG in saline-sodic soil in drought region and physiological drought caused by soil high-salt osmosis may lead to the ecological and environmental risks of soil, ground water and food safety, thus, special study and monitor are suggested in order to minimize the ecological and environmental and food safety risks.

**Key words:** Coastal saline-sodic soil; Phosphogypsum (PG); Water stress; Wheat; Anti-oxidase; Environmental risk assessment

盐渍化农田土壤具有盐碱程度高、养分含量低、土壤板结等原生和次生障碍,影响作物的水气热供给条件、土壤养分的有效性、土壤的耕作性能,从而影响作物生长<sup>[1-2]</sup>。我国盐碱地面积约为  $9.913 \times 10^7$  hm<sup>2</sup> (约占国土面积的 1.03%),是重要的后备土地资源<sup>[3]</sup>。

土壤盐碱化和次生盐碱化问题在世界范围内广泛存在,特别是干旱、半干旱地区,问题更为严重。我国盐碱地面广大,西北、华北、东北西部和滨海地区都有分布,类型多样,改造治理及合理开发利用这些资源,是我国农业可持续发展的重要途径之一,对改善生态环境,推动区域经济、社会和生态可持续发展具有特别重要意义<sup>[4]</sup>。

磷肥工业的副产品磷石膏含有大量的 Ca、P 元素,同时呈酸性,可以用于改良盐碱土,能降低滨海盐土 Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH 等,促进小麦生长,增加小麦和玉米千粒重和产量<sup>[5-7]</sup>,已被少量应用于盐碱土的改良。但是磷石膏同时还含有很多有害物质,在用于盐碱土改良时,也随着磷石膏进入盐碱土,可能会带来生态环境风险。比如放射性元素 U、Cd、Pb、Cu 等,可能会影响土壤肥力和旱地微生物转化<sup>[8]</sup>,影响老成土中氧化铁的形态和转化<sup>[9]</sup>,磷石膏中有害重金属 Cd、Pb 可能带来环境风险。

本课题组早期的室内盆栽和田间试验表明,滨海盐土施用适量的磷石膏可以改良盐土理化性状,促进小麦和玉米的生长<sup>[6-7]</sup>。磷石膏作为一种磷肥工业的副产物,应用成本低,能很好地改良盐碱土,但应充分考虑潜在的环境风险。由于盐碱地土壤含盐量较高,导致土壤渗透压大,阻碍植物根系吸收土壤水分。即使东部沿海地区降水充足,土壤地下水丰富,但是由于滨海盐土土壤渗透压大于植物根系,使得生长在盐土上的植物很难吸收利用水分,造成植物生理性干旱。而盐碱土在施用磷石膏后,不同水分条件对植物生长和环境的影响尚不明确。本文在前期室内盆栽试验和野外田间小区试验研究磷石膏改良效果的基础上,探讨盐碱土施用磷石膏后水分条件对小麦生长的影响,同时考察施用磷石膏工业固废可能带来的重金

属污染等潜在环境风险,为开发利用磷石膏改良盐碱土提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验土壤基本理化性状

试验盐碱土取自江苏省如东县海边滩涂表层 0~30 cm 土壤,风干后粉碎,过 5 mm 筛。土壤含盐量 3.1 g/kg, pH 8.78,有机质 2.26 g/kg,全氮 117.4 mg/kg,速效氮 15.6 mg/kg,有效磷 18.7 mg/kg,速效钾 29.8 mg/kg;土壤 Cd 0.16 mg/kg, Pb 48.5 mg/kg, Cu 52.4 mg/kg, Zn 3.8 mg/kg,总 F 246.5 mg/kg,水溶性 F 1.2 mg/kg;土壤饱和持水量 38.5%。

### 1.2 试验材料

田间试验所用磷石膏废弃物由中石化集团南化公司磷肥厂提供,磷石膏的化学性状为 pH 2.15, CaO 296.8 g/kg, MgO 3.7 g/kg, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.38 g/kg, SO<sub>3</sub> 415.9 g/kg, SiO<sub>2</sub> 60.6 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 28.5 g/kg, F 7.4 g/kg, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.7 g/kg, Cd 0.016 g/kg, Pb 0.18 g/kg, Cu 1.5 g/kg, Zn 0.24 g/kg。根据相关标准 HG/T 4219—2011《磷石膏土壤调理剂》<sup>[10]</sup>、NY/T 3034—2016《土壤调理剂 通用要求》<sup>[11]</sup>和 GB 15618—2018《土壤环境 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》<sup>[12]</sup>,磷石膏作为农田土壤调理剂施用,其有害元素含量应控制在 As ≤ 40 mg/kg, Cd ≤ 8 mg/kg, Cr ≤ 150 mg/kg, Pb ≤ 200 mg/kg, Hg ≤ 4 mg/kg, 水溶性 F ≤ 0.2%。本试验中磷石膏中残留的有害元素 Cd 超出标准 2 倍,水溶性 F 超出标准 3.7 倍。

供试小麦品种为宁麦 13 号。

### 1.3 试验设计

根据前期试验结果,采用改良效果最好的磷石膏用量进行本次室内盆栽试验,试验设 7 个处理(土壤含水量分别为饱和持水量的 90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%),3 次重复,采用单因子完全随机设计,盆钵规格为 64 cm × 42 cm × 43 cm,每盆装入 2.5 kg 的滨海盐碱土,磷石膏和复合肥(N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O

为 12 : 8 : 10) 在种植小麦前一次性全部施入, 与土壤拌匀, 复合肥用量为  $900 \text{ kg/hm}^2$ , 磷石膏用量为  $45\ 000 \text{ kg/hm}^2$  (合  $50 \text{ g/pot}$ )。试验前将小麦种子放在培养箱里催芽, 待其长到  $1 \sim 2 \text{ cm}$ , 选取长势基本一致的小麦幼苗移栽到花盆中, 每盆移栽 30 株, 栽种成活开始正常生长后控制土壤水分。试验开始于 2 月 9 日, 结束于 4 月 15 日, 在南京信息工程大学农业资源与环境实验室的玻璃房内进行。每隔两天定量浇水一次, 土壤含水量通过称重法控制。试验期间白天温度平均  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , 夜晚平均  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , 空气湿度平均 82%, 自然光照。

#### 1.4 测定项目和方法

土壤重金属含量采用浓硫酸-硝酸消煮-ICP-AES 测定, 土壤水溶性 F 采用  $0.1 \text{ mmol/L}$  中性碳酸氢钠溶液浸提后 ICP-AES 测定<sup>[13]</sup>。小麦叶片重金属含量采用浓硫酸-双氧水消煮-ICP-AES 测定<sup>[14]</sup>。

小麦株高采用尺子测量地上茎基部到生长点的距离, 植株生物量采用天平测定, 小麦根冠比采用 FGX-A 根系分析仪测定。

小麦叶片可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝

G-250 染色法测定; 可溶性糖(SS)采用蒽酮比色法测定; 丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定; 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定, 以每一分钟内 OD240 减少 0.01 为一个酶活力单位; 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚显色法测定, 以每一分钟内 OD470 减少 0.01 为一个酶活力单位; 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)还原法测定, 以抑制 NBT 光化还原 50% 所需的酶量为 1 个酶活力单位<sup>[15]</sup>。

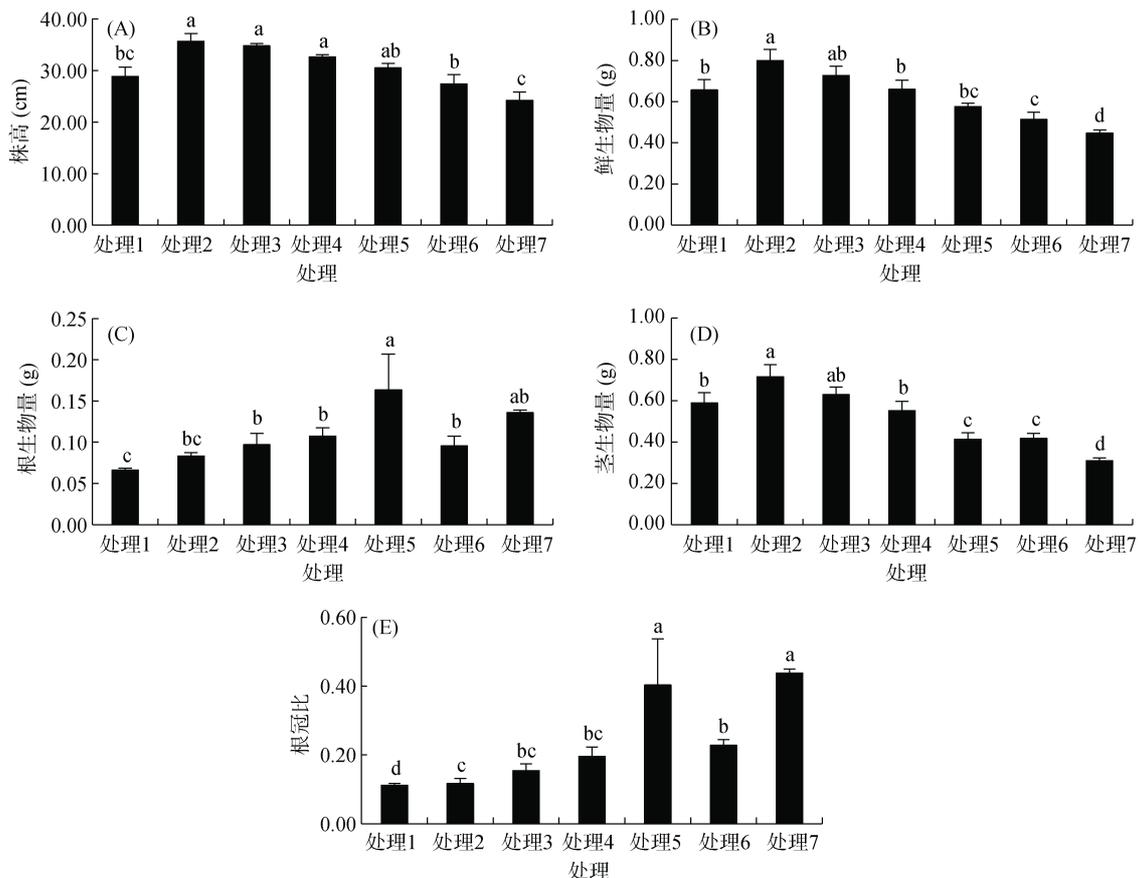
#### 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2003 软件计算数据并作图, 每个处理的最后数值为 3 次重复的平均值±标准误(SD)。利用 SPSS17.0 软件, 在 95% 概率水平下, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行处理间差异显著性分析, 采用最小显著差异法(LSD)进行处理间的多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分胁迫下施用磷石膏对小麦生长的影响

图 1 是各处理不同水分条件下小麦幼苗生长参数特点的变化。从图 1A 可以看出处理 2 的小麦株高



(处理 1 ~ 处理 7 土壤含水量分别为饱和持水量的 90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%; 图中小写字母不同表示处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平; 下同)

图 1 不同土壤水分条件下施用磷石膏对小麦生长的影响

Fig. 1 Effects of phosphogypsum on growth traits of winter wheat under different soil moistures

高于其他处理,以处理 2 为对照,其余处理顺次株高降低幅度分别为 19.07%、2.43%、8.5%、14.39%、23.08%、32.06%,从处理 2 到处理 7,随着水分胁迫程度加剧,小麦株高越来越小。处理 1 的水分处理是土壤饱和持水量的 90%,小麦株高与处理 2 相比下降了 19.07%,差异显著( $P<0.05$ ),说明土壤水分过多对植物来说也是逆境生长。由此可见,在采用磷石膏改良盐碱土时,麦田土壤干旱胁迫会抑制小麦生长,胁迫越严重,小麦生长越受阻;同时,当土壤水分超过土壤饱和持水量的 80% 时,土壤中空气不足,小麦的生长也会受到抑制。

当土壤含水量低于 80% 饱和持水量时,随着干旱胁迫的加剧,小麦生物量逐渐减少。其中,处理 3 ~ 处理 7 小麦鲜生物量与处理 2 相比分别显著下降 9.17%、17.50%、27.92%、35.83%、44.17%(图 1B)。处理 1 的生物量比处理 2 下降 17.92%,差异显著( $P<0.05$ ),说明土壤水分过多也能抑制小麦的生长。

从图 1C 可以看出,随着灌溉量的降低,小麦根生物量呈上升趋势。与处理 1 相比,处理 3、4、5、6、7 根生物量显著增加( $P<0.05$ ),增幅分别为 47.02%、62.78%、147.88%、44.75%、106.06%。说明随着水分胁迫程度的加剧,刺激了小麦地下部的生长;但是当土壤含水量降低到一定程度,如降低到饱和持水量的 40% 和 30% 后,这种对小麦根系生长的刺激作用又迅速减弱,这可能是因为土壤缺水已经严重影响到小麦整体生长和物质的合成。

从图 1D 可以看到各处理茎秆生物量变化趋势与小麦总生物量变化趋势基本一致,与处理 2 相比,处理 3 ~ 处理 7 降低幅度分别为 12.17%、22.92%、42.38%、41.72%、56.66%。其中,处理 5 较处理 6 茎秆生物量增加,但差异不显著。总体而言,随着水分胁迫程度的加剧,小麦的地上生物量逐渐减少;但当土壤水分超过 80% 饱和持水量时,也会抑制小麦地上生物量的积累,处理 1 的茎秆生物量显著低于处理 2。

处理 2 ~ 处理 7 与处理 1 相比,小麦根冠比显著提高(图 1E)。说明在一定程度上,水分胁迫能抑制小麦地上部分的生长、促进地下部分的生长,使光合产物分配到根的比例增加,并通过提高根冠比来适应土壤干旱胁迫。

## 2.2 水分胁迫下施用磷石膏对小麦渗透调节物质含量的影响

### 2.2.1 对小麦可溶性糖含量的影响

植物为了适

应逆境,比如干旱、低温等,会主动合成积累一些可溶性糖来降低渗透势和冰点,以适应外界环境条件的变化。叶片可溶性糖是研究植物在逆境中积累的最多的渗透调节物质,它能从本质上揭示植物内在的抗旱生理机制<sup>[16]</sup>。

图 2 表明,不同土壤水分处理下小麦叶片可溶性糖含量分别为 0.062、0.068、0.078、0.109、0.098、0.125、0.197 g/g,处理 2 ~ 处理 7 的可溶性糖含量与处理 1 相比都不同程度增加,增加幅度分别为 10.03%、25.54%、76.94%、58.49%、102.04%、218.72%,其中处理 1、2、3 之间的差异不显著,处理 4、5、6、7 与处理 1 之间差异显著( $P<0.05$ ),特别是处理 7,可溶性糖含量比处理 1 增加了 2 倍多。总体来说,随着水分胁迫的加剧,可溶性糖含量呈上升的趋势,小麦叶片可溶性糖含量增高能增强渗透调节能力,从而提高抗旱性。

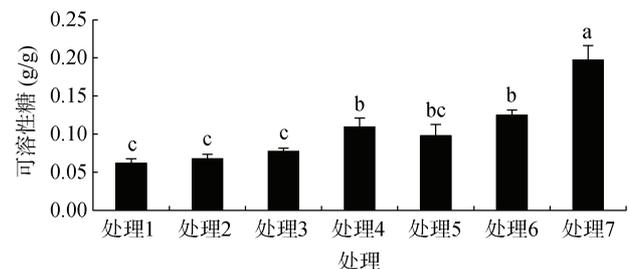


图 2 不同土壤水分条件下施用磷石膏对小麦叶片可溶性糖含量的影响

Fig. 2 Effects of phosphogypsum on soluble sugar contents in winter wheat leaves under different soil moistures

### 2.2.2 对小麦可溶性蛋白质含量的影响

可溶性蛋白质是植物体内一种重要的渗透调节物质,它具有亲水胶体的性质,植物可以通过主动积累可溶性蛋白来降低渗透势。

图 3 表明,土壤不同水分处理能显著影响小麦叶片中可溶性蛋白含量。顺次各处理小麦叶片可溶性蛋白的含量分别是 3.35、5.34、5.21、7.01、11.20、8.08、12.17 mg/g,其中处理 2 ~ 处理 7 的可溶性蛋白含量分别比处理 1 显著( $P<0.05$ )增加 59.55%、55.60%、109.14%、234.48%、141.26%、263.30%,处理 2 和处理 3 之间差异不显著,其余处理之间大多差异显著。总体而言,随着土壤水分胁迫程度加剧,小麦叶片中可溶性蛋白含量呈上升趋势。说明土壤干旱胁迫程度越高,小麦叶片中可溶性蛋白增加,可能是在逆境条件下,小麦幼苗内正常的蛋白质合成受到抑制,从而启动了一些与适应逆境胁迫有关的基因表达<sup>[17]</sup>。

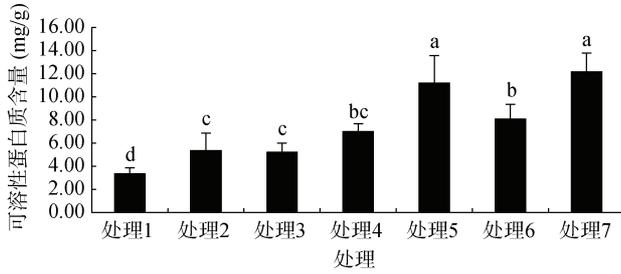


图 3 不同土壤水分条件下施用磷石膏对小麦叶片可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 3 Effects of phosphogypsum on soluble protein contents in winter wheat leaves under different soil moistures

### 2.3 水分胁迫下施用磷石膏对小麦丙二醛含量的影响

丙二醛是植物细胞膜内不饱和脂肪酸发生过氧化作用的中间产物,其含量的变化能反映在逆境条件下植物细胞膜脂过氧化作用的强弱程度,丙二醛含量越高,说明膜脂过氧化越严重,细胞膜相对透性就越大<sup>[18]</sup>。

图 4 表明,处理 1、3、4、5、6、7 的丙二醛含量都高于处理 2,说明处理 2 小麦叶片的膜脂过氧化伤害最小。处理 1 的土壤含水量控制在 90% 饱和持水量,对于小麦来说,水分过多也是一种逆境生长,该处理的丙二醛含量大于处理 2。处理 3~ 处理 7 的丙二醛含量与处理 2 相比,增加的幅度分别为 27.08%、16.10%、45.89%、82.86%、98.37%,差异均显著( $P<0.05$ ),且随着干旱胁迫的加剧,丙二醛含量逐渐升高(处理 4 除外),对小麦叶片细胞膜造成伤害增强。

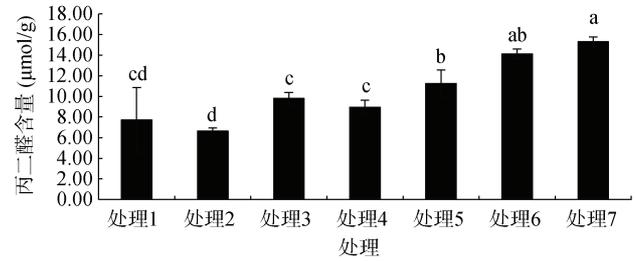


图 4 不同土壤水分条件下施用磷石膏对小麦叶片丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effects of phosphogypsum on malondialdehyde contents in winter wheat leaves under different soil moistures

### 2.4 水分胁迫下施用磷石膏对小麦抗氧化酶活性的影响

#### 2.4.1 对过氧化物酶(POD)活性的影响

逆境条件下,植物体内线粒体呼吸链和光合作用电子传递链发生故障,高能电子发生泄露,产生过氧化物和超氧化物以及自由基等多种活性氧,同时植物体内的黄素氧化酶类的代谢产物常包含  $H_2O_2$ ,而  $H_2O_2$  的积累可导致破坏性的氧化作用。过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是清除  $H_2O_2$  的重要保护酶,能将  $H_2O_2$  分解为  $O_2$  和  $H_2O$ ,从而使机体免受  $H_2O_2$  的毒害作用<sup>[19]</sup>。

图 5A 表明,重度干旱胁迫处理 7 的 POD 活性显著高于其他处理( $P<0.05$ )。随着不同处理水分胁迫程度的加剧,POD 的活性总体呈上升趋势(处理 4 除外)。处理 2~ 处理 7 的 POD 活性与处理 1 相比,增加的幅度分别为 8.16%、20.41%、10.20%、22.45%、40.82%、55.10%,可见小麦叶片保护酶 POD 的活性随着水分胁迫程度的加强而增加,增强 POD 的活性

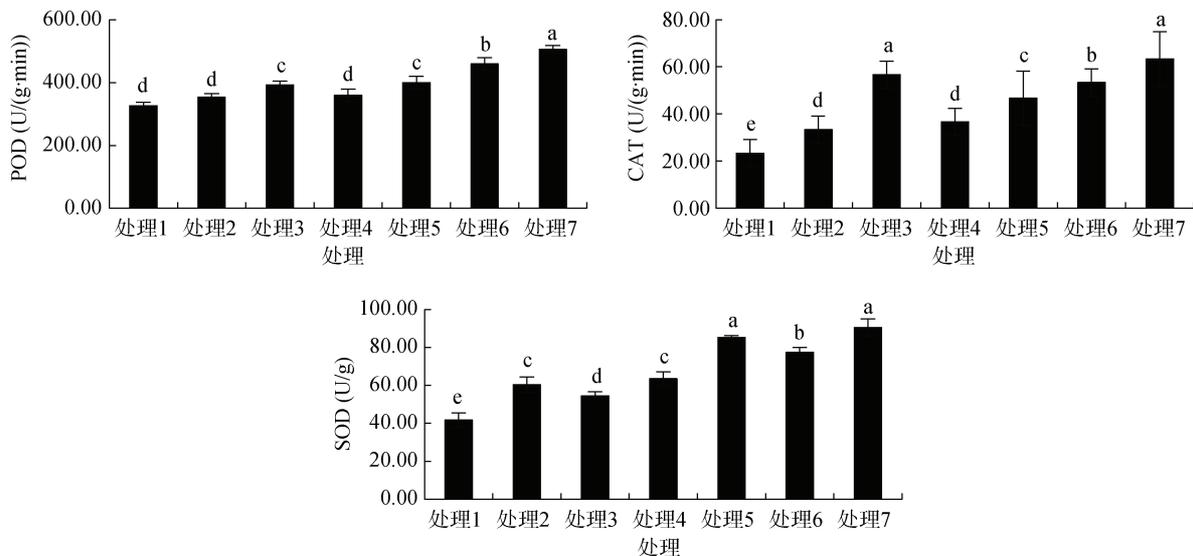


图 5 不同土壤水分条件下施用磷石膏对小麦叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 5 Effects of phosphogypsum on antioxidant enzymes activities in winter wheat leaves under different soil moistures

来抵御干旱对其所造成的伤害是小麦对水分胁迫的适应策略。

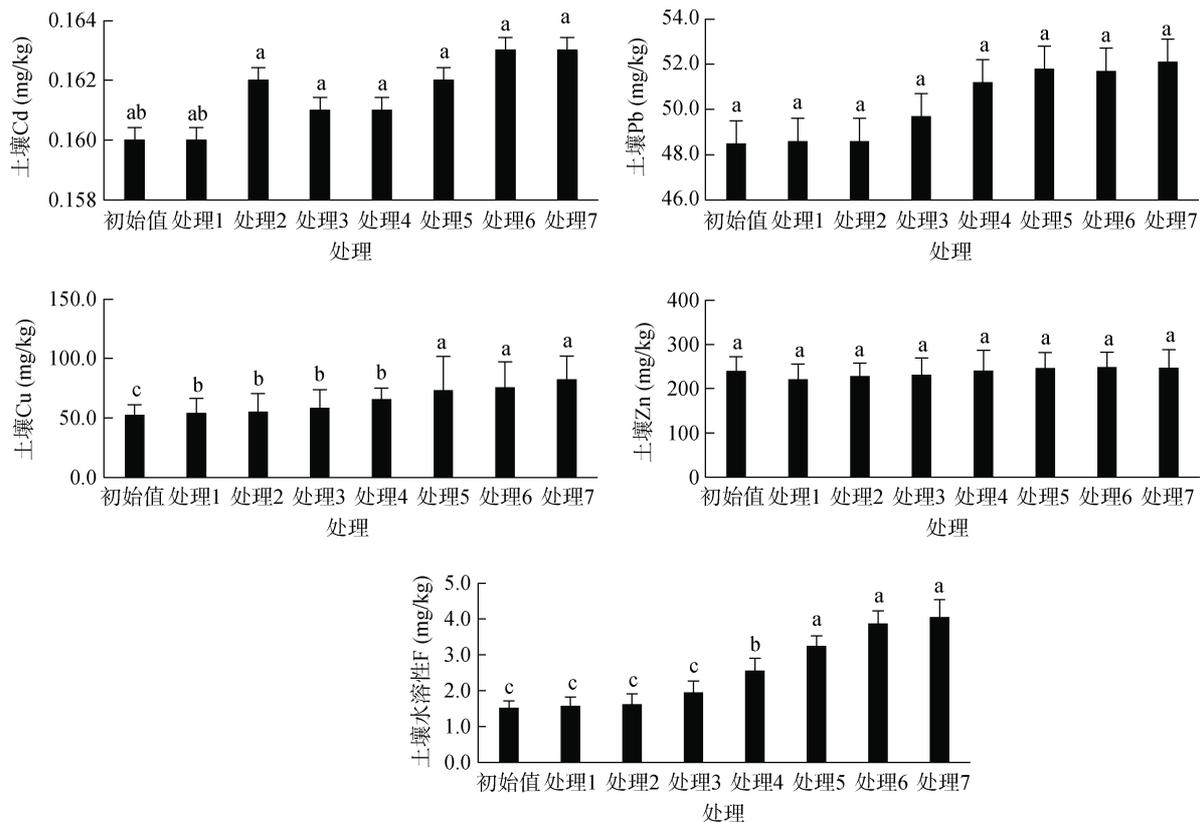
**2.4.2 对过氧化氢酶(CAT)活性的影响** 图 5B 表明,各处理的 CAT 活性分别为 23.33、33.33、56.67、36.67、46.67、53.33、63.33 U/(g·min),处理 2~处理 7 的 CAT 活性与处理 1 相比均显著升高( $P<0.05$ ),升高幅度分别为 42.86%、142.86%、57.14%、100.00%、128.57%、171.43%。随着土壤含水量的下降,小麦叶片 CAT 活性总体呈上升趋势(处理 3 除外)。可见,小麦在干旱胁迫的逆境下,会通过增强 CAT 的活性来缓解水分胁迫的伤害。

**2.4.3 对超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响** 如图 5C 所示,土壤不同水分胁迫处理,小麦植株叶片 SOD 活性显著升高( $P<0.05$ )。不同处理的小麦叶片 SOD 活性分别为 41.76、60.38、54.49、63.56、85.26、77.45、90.57 U/g,与处理 1 相比,其余各处理 SOD 活性升幅分别为 44.57%、30.48%、52.19%、104.16%、85.45%、116.86%( $P<0.05$ )。说明在干旱条件下,小麦叶片的 SOD 酶活性有大幅度上升,在短时间内会减少干旱逆境对小麦的伤害。

## 2.5 土壤及小麦叶片中重金属和氟含量变化及环境安全风险评价

滨海盐碱土中施用大量磷石膏在改良盐碱土的同时,也带来土壤中重金属含量的变化,导致重金属环境安全和食品安全风险增加。图 6 表明,在施用磷石膏改良剂改良滨海盐碱土的情况下,随着含水量的变化,土壤中重金属含量也在变化,处理 7 与处理 2 相比,土壤 Cd 增加 3.2%,Pb 增加 7.2%,Zn 变化不大,差异均不显著( $P>0.05$ );但是 Cu 增加 50.9%,水溶性 F 增加 150%,差异显著( $P<0.05$ )。说明盐碱土施用磷石膏改良,导致土壤中重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 和非金属 F 的积累和增加,但是增加幅度不同,主要是 Cu 和水溶性 F 显著增加。

但是小麦叶片中的重金属 Cd、Pb、Zn 及 F 含量相互之间差异显著,尤其是土壤水分胁迫严重的处理(图 7)。从图 7 可以看出,土壤水分严重胁迫下,施用磷石膏处理的小麦叶片中 Cd、Pb、Zn、F 含量与水分充足的处理有显著差异( $P<0.05$ ),处理 7 与处理 1 相比,小麦叶片 Cd 含量增加 50%,Pb 含量增加 33.3%,Zn 含量增加 68.4%,F 含量增加 275%( $P<0.05$ ),但



(初始值是施用磷石膏前的土壤初始值,下同)

图 6 不同土壤水分条件下施用磷石膏对土壤重金属和 F 含量的影响

Fig. 6 Effects of phosphogypsum on heavy metals and F contents in soils under different soil moistures

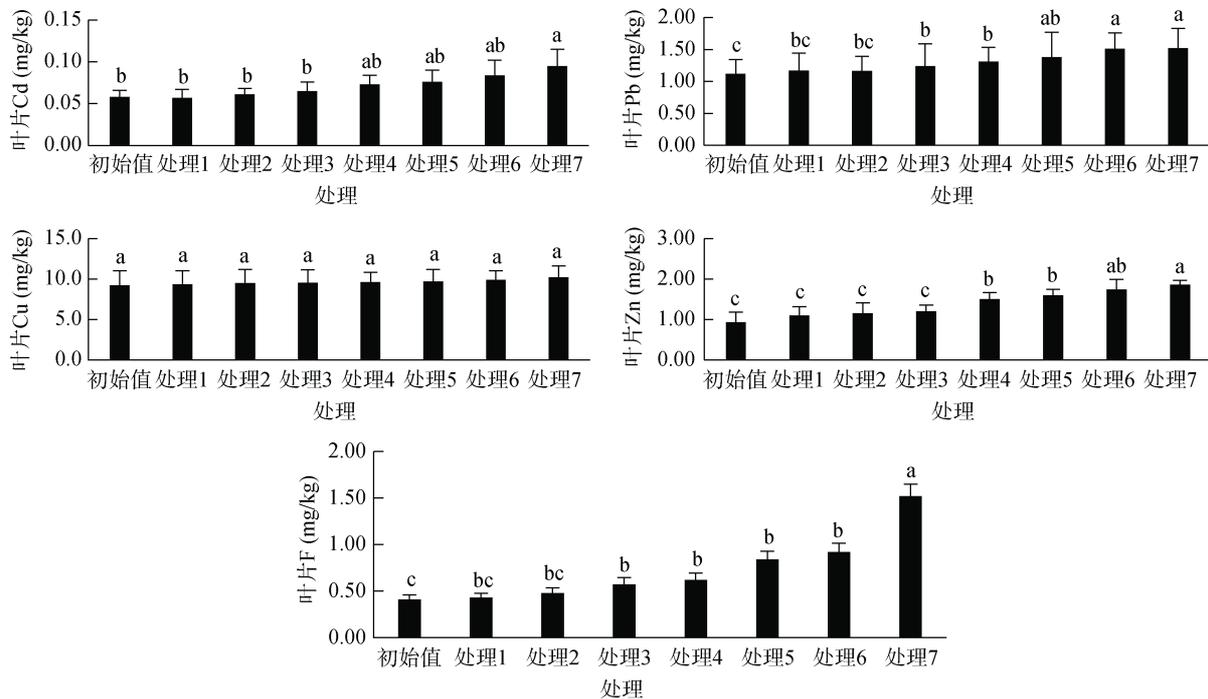


图 7 不同水分条件下施用磷石膏对小麦叶片重金属含量的影响

Fig. 7 Effects of phosphogypsum on heavy metals contents in winter wheat leaves under different soil moistures

是叶片 Cu 变化不大。说明盐碱土施用磷石膏改良后, 气象干旱或者生理干旱造成的严重水分胁迫会影响小麦对土壤重金属的吸收、转移和积累, 多数情况下, 小麦叶片中重金属含量增加。在小麦灌浆期, 叶片中的重金属会逐渐向籽粒转移并积累, 造成潜在的食品安全问题, 影响消费者健康。

### 3 讨论

我国有近 15 亿亩盐碱地, 其中近 1.5 亿亩具有开发利用潜力, 急需改良。磷石膏作为磷肥工业的副产品, 可以用于盐碱地的改良<sup>[20]</sup>, 具有较好的改良效果<sup>[6, 21-22]</sup>。但是磷肥生产过程中磷矿石中含有的其他杂质尤其是重金属和 F 也随之进入磷石膏中, 如果用磷石膏改良, 重金属和 F 同时进入盐碱地土壤中, 在土壤及地下水中迁移、吸附、沉淀、吸收等, 改变土壤理化性状和生态环境状况。如果长期、过量施用, 可能会引起土壤重金属及 F 超标, 污染土壤和地下水环境, 破坏生态系统<sup>[9, 21]</sup>, 并通过食物链危害人体健康, 因此需要对磷石膏改良盐碱土进行环境安全和食品安全评估试验和监测。

由于本试验所用土壤为滨海盐碱土, 且很多处理土壤含水量低于饱和持水量的 50%, 小麦植株因为持续水分供应不足而萎蔫枯死, 无法完成全生育期, 所以本试验作为初步探索为后续的各种试验提供经验。从小麦幼苗株高、鲜生物量等生长指标来看, 在施用

45 000 kg/hm<sup>2</sup> 磷石膏(前期试验有显著改良效果的最高用量<sup>[6]</sup>)改良盐碱土时, 土壤含水量为 80% 的土壤饱和和持水量是最适宜的, 小麦生长良好; 当土壤含水量为饱和持水量的 50% 及以下时, 小麦植株生长受到抑制, 土壤含水量越低, 小麦生长影响越大; 当土壤含水量只有饱和持水量的 30% 时, 小麦植株从发芽到完全停止生长直至死亡, 只有 66 d。土壤含水量低于 80% 饱和持水量会对小麦的生长产生明显的抑制作用, 株高、总鲜生物量和茎生物量明显降低, 这是由于当小麦缺水时, 会抑制细胞的生长和分化, 顶端的分生组织和侧生分生组织发育迟缓<sup>[23]</sup>。土壤水分低于 80% 饱和持水量时, 随着土壤水分含量减少, 小麦植株根生物量增加, 这是由于水分胁迫促进了小麦根系的生长, 从而通过提高根冠比来适应土壤干旱胁迫。这与桑子阳等<sup>[17]</sup>的研究是一致的。水分胁迫抑制小麦种子的发芽率、胚芽鞘和主胚根的生长。适度水分胁迫, 对苗期小麦根系生长有一定促进作用, 增加根冠比, 但是重度水分胁迫抑制小麦根系的生长<sup>[23]</sup>。水分胁迫下, 小麦植株叶绿素含量、光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率逐渐降低<sup>[23-24]</sup>, 小麦农艺性状负面效应显著<sup>[25]</sup>。当然土壤含水量也不是越高越好, 当土壤含水量超过 80% 饱和持水量时也会对小麦的生长产生明显的抑制作用。

前人研究表明, 随着土壤水分的减少, 小麦植株叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均呈下降趋势; 而

叶片脯氨酸含量、MDA 含量以及叶片 SOD、POD 活性均呈增加趋势；表明在干旱胁迫下，小麦幼苗叶片通过改变内部的生理特性以提高自身的抗旱性<sup>[26]</sup>。水分胁迫能加剧小麦幼苗膜脂过氧化而引起膜的损伤，且膜脂过氧化的程度随水分胁迫增强而加重<sup>[23]</sup>。研究表明，水分胁迫下，小麦可溶性糖和酸性转化酶活性呈先增后减趋势，脯氨酸和丙二醛含量及过氧化物酶活性逐渐增强。随土壤水分胁迫程度的加剧，红砂幼苗茎叶总生物量呈明显的减少趋势，其株高呈逐渐降低的变化趋势，而根冠比、根长和根表面积均呈逐步增大的变化趋势，根系生物量呈先增加后减少的变化趋势<sup>[27]</sup>。研究发现，土壤 60% 饱和持水量下小麦的可溶性糖含量和酸性转化酶活性显著高于 80% 与 40% 饱和持水量下，而可溶性蛋白含量则显著减少；40% 饱和持水量下的脯氨酸和丙二醛含量及过氧化物酶活性显著高于 60% 和 80% 饱和持水量下<sup>[24]</sup>。

本试验结果表明随着土壤干旱胁迫(气象干旱和生理干旱)的加剧，小麦叶片中的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量基本上都表现出上升的趋势，这与安玉艳等<sup>[28]</sup>以及张国盛和张仁陟的<sup>[29]</sup>研究一致；常燕虹等<sup>[30]</sup>对轻度和中度水分胁迫下，文冠果叶片的可溶性糖观测也得到了类似结论。因此，干旱胁迫条件下，小麦叶片的可溶性糖和可溶性蛋白的较高积累能够提高小麦叶片细胞液的浓度，降低小麦叶片的细胞水势，提高小麦的抗旱性。水分胁迫下， $\text{Ca}^{2+}/\text{CaM}$  作为第二信使参与了小麦体内干旱信号的传导，同时提高了小麦体内了 POD 同工酶活性，增强了小麦幼苗适应干旱胁迫的能力<sup>[30-32]</sup>。本试验中，施用的磷石膏中含有大量的  $\text{Ca}^{2+}$ ，因此可以很好地参与小麦体内 POD 酶活性的调控，提高小麦植株的抗逆性。

丙二醛是植物受到干旱胁迫时膜脂过氧化的产物，丙二醛含量的高低直接反映植物的细胞膜受伤害的程度<sup>[33]</sup>。本试验结果表明，随着干旱胁迫的加剧，小麦叶片的丙二醛含量总体上表现为上升趋势，随着土壤含水量减少，相应处理的小麦叶片丙二醛含量提高。这与常燕虹等<sup>[30]</sup>、陈歆等<sup>[34]</sup>和童雅赟等<sup>[35]</sup>的研究结果相似。小麦叶片丙二醛含量增加，预示着叶片存在膜脂质过氧化的现象，这是由于水分胁迫下小麦叶片的细胞膜结构遭到严重的破坏。

POD、CAT、SOD 是植物体清除活性氧的重要保护酶。一般情况下，当生物体处在逆境条件下时，3 种保护酶会发挥协同作用，抑制活性氧对植物细胞膜的伤害<sup>[36]</sup>。本试验结果表明随着水分胁迫程度的加剧，小麦叶片中的 POD、CAT、SOD 的活性基本表现为上升的趋势，说明在干旱逆境条件下，小

麦幼苗会通过增强 3 种保护酶的活性来抵御干旱对其造成的伤害，增强其抗旱性，此结果与费明慧<sup>[26]</sup>的研究结果一致。但有些研究结果与之不同，孙彩霞等<sup>[36]</sup>认为，在水分胁迫下，植物 SOD、POD 活性是增加的，但 CAT 活性是下降的；周虹等<sup>[37]</sup>研究结果表明川芎叶片中 SOD、CAT 活性在水分胁迫下表现为先升后降的趋势，POD 活性是呈上升趋势。这可能是由于不同的研究采取的研究体系不同，胁迫处理方法、选取的植物材料、考察的生育期等因素不同。

近年来也有研究发现磷石膏中还含有少量有害物质，比如放射性元素 U 和重金属 Cd、Pb、Cu 等，可能会影响土壤肥力和旱地微生物转化<sup>[8]</sup>，影响老成土中氧化铁的形态和转化<sup>[9]</sup>。这些有害物质随着磷石膏施用于盐碱土而进入土壤和地下水，并在土壤中移动、吸附、积累，造成土壤及地下水潜在的生态环境污染，且被作物吸收而在农产品内残留和积累，通过食物链的传播、富集，威胁人体健康。同时，遇到降雨量比较多的地区，磷石膏中有害重金属会随着地表径流和侧渗进入河流，有可能引起水体中重金属积累增加，影响地表水环境的安全。

本试验结果表明，在磷石膏施用量为  $45\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$  的情况下，干旱条件会造成土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 和 F 的积累，虽然含量没有超过国家环境质量标准，但是如果长期连续大量施用，可能会持续在土壤中积累，并被作物累积，尤其是 Cd 和 F 的含量距离国家环境质量标准<sup>[12]</sup>和食品安全标准<sup>[14]</sup>比较近，有一定的土壤环境风险和食品安全风险，建议适量施用磷石膏改良盐碱土，或在施用前对磷石膏中的有害物质进行适当处理和控制在，同时配合其他措施进行改良，选择耐盐碱和重金属低积累作物品种，注意灌溉，最大限度保障土壤及地下水生态环境安全和食品安全。

## 4 结论

施用磷石膏改良盐碱土，在水分胁迫条件下，影响小麦生长发育，尤其是抑制地上部生长，30% 土壤饱和持水量下小麦株高比 80% 土壤饱和持水量下减少 32.06%，总鲜生物量减少 44.17%，根生物量增加 106.06%，根冠比增加，小麦叶片抗氧化酶活性提高，丙二醛含量增加 98.37%。土壤及小麦叶片中 Cd 和 F 含量提高，不过土壤中 Cu 增加而小麦叶片中 Cu 没有显著增加，因此土壤和小麦叶片中 Cd 和 F 的增加在干旱地区施用磷石膏改良盐碱土可能会带来土壤及地下水环境风险以及农产品安全风险。

## 参考文献:

- [1] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学(上海), 2021, 73(6): 30–34.
- [2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27.
- [3] 葛瑶, 栾明鉴, 张雪楠, 等. 中国盐生植物分布与盐碱地类型的关系[J]. 齐鲁工业大学学报, 2021, 35(2): 14–20.
- [4] 李彬, 王志春, 孙志高, 等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 154–158.
- [5] 吴洪生, 陈小青, 周晓冬, 等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1262–1266.
- [6] 张富存, 吴洪生, 周晓冬, 等. 磷石膏资源化利用对玉米生长影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(2): 566–570.
- [7] 周晓冬, 吴洪生, 张富存, 等. 磷石膏资源化利用对小麦生长的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 940–944.
- [8] Sengupta I, Dhal P K. Impact of elevated phosphogypsum on soil fertility and its aerobic biotransformation through indigenous microorganisms (IMO's) based technology[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 297: 113195.
- [9] Firmano R F, Alleoni L R F. Properties of Fe-oxides and Fe fractionation in an Oxisol amended over long term with lime and phosphogypsum[J]. Applied Geochemistry, 2021, 135: 105116.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. 磷石膏土壤调理剂: HG/T 4219—2011[S]. 北京: 化工出版社, 2012.
- [11] 中华人民共和国农业部. 土壤调理剂 通用要求: NY/T 3034—2016[S]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [12] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [13] 中华人民共和国环境保护部. 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法: HJ 803—2016[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 张显强, 罗在荣, 唐金刚, 等. 高温和干旱胁迫对鳞叶藓游离脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 广西植物, 2004, 24(6): 570–573.
- [17] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 109–115.
- [18] 齐建波, 荣新民, 陈虎, 等. 不同水分胁迫水平对葡萄叶水势及生理指标的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(4): 437–441.
- [19] 徐松华. 逆境条件下植物体内活性氧代谢研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(21): 29–32.
- [20] 童辉, 石明吉, 张君平. 盐碱地综合治理与利用技术研究[J]. 工程技术研究, 2022, 7(23): 194–196.
- [21] Carmeis Filho A C A, Penn C J, Crusciol C A C, et al. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 241: 11–23.
- [22] Huang L H, Liu Y, Ferreira J F S, et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105222.
- [23] 孙存华, 白嵩, 白宝璋, 等. 水分胁迫对小麦幼苗根系生长和生理状态的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(5): 485–489.
- [24] 姜小凤, 王淑英, 李倩, 等. 水分胁迫对春小麦陇春 27 号光合参数和渗透调节物质的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(5): 698–702.
- [25] 张世乔. 水分胁迫对中国水稻小麦农艺性状影响的 Meta 分析研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [26] 费明慧. 水分胁迫对小麦幼苗生长及抗氧化能力影响[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 43–44, 61.
- [27] 单立山, 李毅, 石万里, 等. 土壤水分胁迫对红砂幼苗生长和渗透调节物质的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 106–109.
- [28] 安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳. 杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 716–725.
- [29] 张国盛, 张仁陟. 水分胁迫下氮磷营养对小麦幼苗渗透物质累积影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2001, 36(1): 95–99.
- [30] 常燕虹, 武威, 刘建朝, 等. 干旱胁迫对文冠果树苗某些生理特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 170–174, 203.
- [31] 谷俊涛, 郭秀林, 李广敏, 等. 水分胁迫下钙、钙调素对小麦幼苗生长及过氧化物酶同工酶的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(3): 62–67.
- [32] 李春香, 王玮, 李德全. 长期水分胁迫对小麦生育中后期根叶渗透调节能力、渗透调节物质的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(5): 924–930.
- [33] 焦志丽, 李勇, 吕典秋, 等. 不同程度干旱胁迫对马铃薯幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国马铃薯, 2011, 25(6): 329–333.
- [34] 陈歆, 杨福孙, 周兆德. 土壤水分胁迫对槟榔幼苗叶片生理的影响[J]. 热带作物学报, 2010, 31(3): 387–392.
- [35] 童雅赟, 黎云祥, 权秋梅, 等. 土壤干旱胁迫对柔毛淫羊藿膜脂过氧化作用和保护酶活性的影响[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 229–234.
- [36] 孙彩霞, 刘志刚, 荆艳东. 水分胁迫对玉米叶片关键防御酶系活性及其同工酶的影响[J]. 玉米科学, 2003, 11(1): 63–66.
- [37] 周虹, 范巧佳, 郑顺林, 等. 春季水分胁迫对川芎叶片相对含水量及保护酶活性的影响[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(2): 132–137.