

邓敏, 赵玲, 滕应, 等. 冷等离子体种子处理对铜胁迫下小麦种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2669–2677.
DENG Min, ZHAO Ling, TENG Ying, et al. The effects of cold plasma treatment on wheat seed germination and seedling growth under copper stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2669–2677.

冷等离子体种子处理对铜胁迫下小麦种子萌发与幼苗生长的影响

邓敏^{1,2}, 赵玲², 滕应^{2*}, 刘方^{1*}, 徐勇峰^{2,3}, 任文杰², 孟珂^{2,3}, 马文亭²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了评价冷等离子体种子处理对小麦种子萌发和生长抗重金属胁迫能力的影响,以4种不同功率的冷等离子体处理的3种小麦种子为研究对象,在3个不同浓度的硫酸铜胁迫下进行萌发成苗试验。通过测定种子的发芽率、根长、苗长以及根、苗中的Cu含量,计算发芽指数、种子活力指数,研究了冷等离子体种子处理对铜胁迫作用下小麦种子萌发与幼苗生长的影响。结果表明:冷等离子体种子处理对小麦在铜胁迫下的发芽率、发芽指数影响不显著,但提高了种子的萌发活力,根长和苗长最多分别提高了46.2%和145.4%,活力指数最多提高了82.1%。在低浓度Cu胁迫时,冷等离子体处理能够促进根、苗对Cu的吸收;而高浓度Cu胁迫时,冷等离子体在一定程度上能够提高Cu的转运能力,缓解了Cu对种子萌发活力、苗长和根长的抑制作用与毒害作用。研究表明,适宜功率的冷等离子体种子处理能够增强种子萌发和幼苗生长对重金属胁迫的抗性。

关键词:冷等离子体;铜胁迫;小麦;萌发;生长

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)12-2669-09 doi:10.11654/jaes.2018-0651

The effects of cold plasma treatment on wheat seed germination and seedling growth under copper stress

DENG Min^{1,2}, ZHAO Ling², TENG Ying^{2*}, LIU Fang^{1*}, XU Yong-feng^{2,3}, REN Wen-jie², MENG Ke^{2,3}, MA Wen-ting²

(1. Resource and Environmental Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Several studies have reported that cold plasma treatment technology can not only enhance the resistance of crop seeds to salinity, drought, and cold, but can also improve the yield and quality of agricultural products. However, little information has been obtained on increasing the heavy metal resistance of crops germinated from seeds treated with cold plasma technology. To assess the effect of cold plasma treatment on the heavy metal resistance of seeds germinated, the germination and seedling growth of three varieties of wheat were investigated at three copper stress levels and four cold plasma power treatments. Seed germination rate, root length, sprout length, and copper concentration in the wheat seedlings were measured, and the germination and vigor indices, absorption coefficient, and transfer factors were calculated. The results showed that cold plasma treatments did not significantly affect the germination rates and indices under copper stress, but vigor index was improved markedly. The root length, sprout length, and vigor index increased by 46.2%, 145.4%, and 82.1%, respectively, under the optimal cold plasma power treatment compared to those with no cold plasma treatments. At low copper concentrations, the amount

收稿日期:2018-05-17 录用日期:2018-10-10

作者简介:邓敏(1992—),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复与安全利用。E-mail:Fujiendeng@163.com

*通信作者:滕应 E-mail:yteng@issas.ac.cn;刘方 E-mail:lfang6435@163.com

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD05B04)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD05B04)

of copper absorbed by the roots and sprouts increased under the cold plasma power treatment. However, at the high copper concentrations, cold plasma treatments improved the transport capacity of copper from roots to sprouts, which could alleviate the toxic effects of copper stresses on seed germination and root growth. These results suggest that cold plasma could effectively alleviate the toxic effects of copper on wheat.

Keywords: cold plasma treatment; copper stress; wheat; germination; growth

目前,我国农田土壤重金属污染严重^[1],其中铜(Cu)是我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[2]列出的8个重金属污染元素之一。Cu离子具有易迁移性、高蓄积性、持久性等特点^[3],易于通过食物链的生物放大给人类及其他动物健康带来潜在危害^[4-5]。2014年《全国土壤污染调查公报》公布了我国土壤中Cu的点位超标率达到2.1%^[6]。Cu在土壤中的正常含量一般在20~30 mg·kg⁻¹之间,但是在污染严重的地区,如铜矿区附近^[7],Cu浓度超过了5000 mg·kg⁻¹,远远超过土壤环境质量标准^[2]。Cu虽然是植物体内许多关键酶的辅基,也是植物生长发育所必需的营养元素之一^[8-10],但是过量的Cu会抑制根系生长,对植物萌发和幼苗生长造成影响^[11]。研究发现,低浓度Cu(≤50 mg·L⁻¹)可促进小麦种子萌发和幼苗生长^[12],而高于50 mg·L⁻¹时^[13],根的生长会受到明显的抑制,更高浓度(300~500 mg·L⁻¹)时,根的生长只停留在瘤状物阶段,呈黑色或焦黄。通常,Cu离子主要积累在植物的根系,不易向地上部分转移。因此,Cu含量过高时,植物首先受损的是根系,最严重的也是根系^[8]。

小麦作为我国重要粮食作物,种子萌发时期幼苗的生长状况对作物生长及产量有重要的影响^[14],因而提高小麦种子在萌发时期对重金属的耐受性,缓解重金属对小麦种子萌发时期的毒害作用就显得尤为重要。传统的种子处理技术有 γ 射线、激光、电场、磁场等^[15-21],但上述物理源在实际应用过程中,还存在一定的局限性,如设备要求高或对环境造成一定的污染等。因此有必要探索一种新的种子处理技术,以适应实际生产需求。

冷等离子体种子处理技术是近年来国际上发展的一种新型种子处理技术^[22]。与传统种子处理技术相比,该技术操作简单、省时省力、处理成本低,且对环境无污染,具有非常高的农业应用价值^[23-24]。经冷等离子体种子处理后的作物种子,其发芽率、幼苗生长都有显著提高^[25],能够达到增产的目的^[26-27],并且能增强作物在抗旱、抗冻及耐盐等方面的抗逆性^[28]。但迄今为止,冷等离子体种子处理技术应用于提高作物

抗重金属胁迫下种子萌发与幼苗生长的研究还未见报道。因此,本文以3个品种的小麦种子为研究对象,研究不同功率的冷等离子种子处理对小麦种子萌发与幼苗生长抗重金属Cu胁迫能力的影响,以期冷等离子体种子处理技术用于提高重金属污染农田的安全生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试小麦品种苏麦188、宁麦15、苏麦128均购自江苏省农业科学研究院。CuSO₄·5H₂O(分析纯)购于上海金山亭新化工试剂厂。一次性塑料发芽盒规格为12 cm×12 cm×5 cm。

1.2 冷等离子体处理装置

本研究采用次大气辉光放电处理机(HPD-2400)对3种小麦种子进行处理,其放电原理如图1所示。

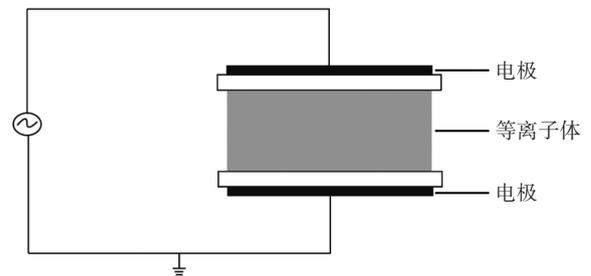


图1 冷等离子体放电原理

Figure 1 The principle of cold plasma discharge

1.3 冷等离子体处理方法

冷等离子体种子处理功率分别为:250、500、750、990 W,处理时长为180 s^[29-30],以未经过冷等离子体处理的种子作为对照(CK)。参照鲁先文等^[12]的报道,Cu胁迫浓度设为10、50、200 mg·L⁻¹,分别代表低、中、高3个浓度。

1.4 萌发实验

种子萌发实验参照国家农作物种子检验规程发芽试验(GB/T 3543.4—1995)^[31]进行,每个实验设置3个重复。具体操作:每个发芽盒铺设两层滤纸,加入不同浓度的CuSO₄溶液,每个培养皿均匀摆放50粒种

子,置于(25±1)℃恒温培养箱中发苗,每天观测并统计种子的发苗数(以胚苗长度达到种子长度一半为种子萌发的判断标准)。每天加蒸馏水1 mL,保证水分充分供应,培养到第7 d,测定其根长、苗长等数值。

1.5 观测项目及测定指标

1.5.1 发苗特性^[32]

(1)发芽率 $G=7$ d发苗种子数/供实验种子数×100%。

(2)发芽指数 $G_i=\sum(G_t/D_t)$

式中: G_t 为 t 日的发苗数, D_t 为相应的发苗天数。

(3)活力指数 VI =发芽指数×总长。

(4)根长、苗长。

1.5.2 幼苗根、苗Cu含量测定^[33]

本次实验采用湿式消解法消解:将小麦连根取出,先用自来水冲洗干净,然后用蒸馏水冲掉表面的自来水,用剪刀将根部与苗部分开,用滤纸吸干水分,在75℃条件下烘干至恒重。在研钵中分别将根、苗磨碎,用分析天平准确称取0.2000 g上述处理后的样品,分别装入消解管中,然后向每个消解管中加入浓硝酸2.4 mL、过氧化氢0.8 mL,放入105℃烘箱中消解6 h。消解完成后,转移并定容到15 mL,然后用一次性注射器和0.45 μm滤膜过滤,将过滤后的溶液用ICP-MS测定其中Cu的含量。每组样品均进行3次平行实验。

重金属Cu转移系数和富集系数的计算公式^[34]为:

转移系数=根部含量(mg·kg⁻¹)/苗部含量(mg·kg⁻¹)

富集系数=植物体含量(mg·kg⁻¹)/溶液中含量(mg·kg⁻¹)

1.6 统计分析

数据采用IBM SPSS Statistics 19软件进行ANOVA统计分析,采用LSD(L)和Duncan(D)法进行方差和差异显著性检验。

2 结果分析

2.1 冷等离子体处理对Cu胁迫下小麦种子发芽率和发芽指数的影响

图2反映了冷等离子体处理对不同Cu浓度作用下苏麦188、宁麦15、苏麦128种子发芽率的影响。在相同冷等离子体处理条件下,Cu浓度从10 mg·L⁻¹增加到200 mg·L⁻¹时,苏麦188、苏麦128种子发芽率变化不显著,而宁麦15种子的发芽率整体上受到了一定的抑制,最大降幅为8.5%。冷等离子体种子处理对

Cu胁迫下小麦种子发芽有一定的促进作用,但整体促进作用不大。

当Cu浓度为10、50 mg·L⁻¹时,种子经250 W冷等离子体处理后,相比对照处理,苏麦188的发芽率有一定提高,增幅分别为3.0%和5.6%,达到了显著差异

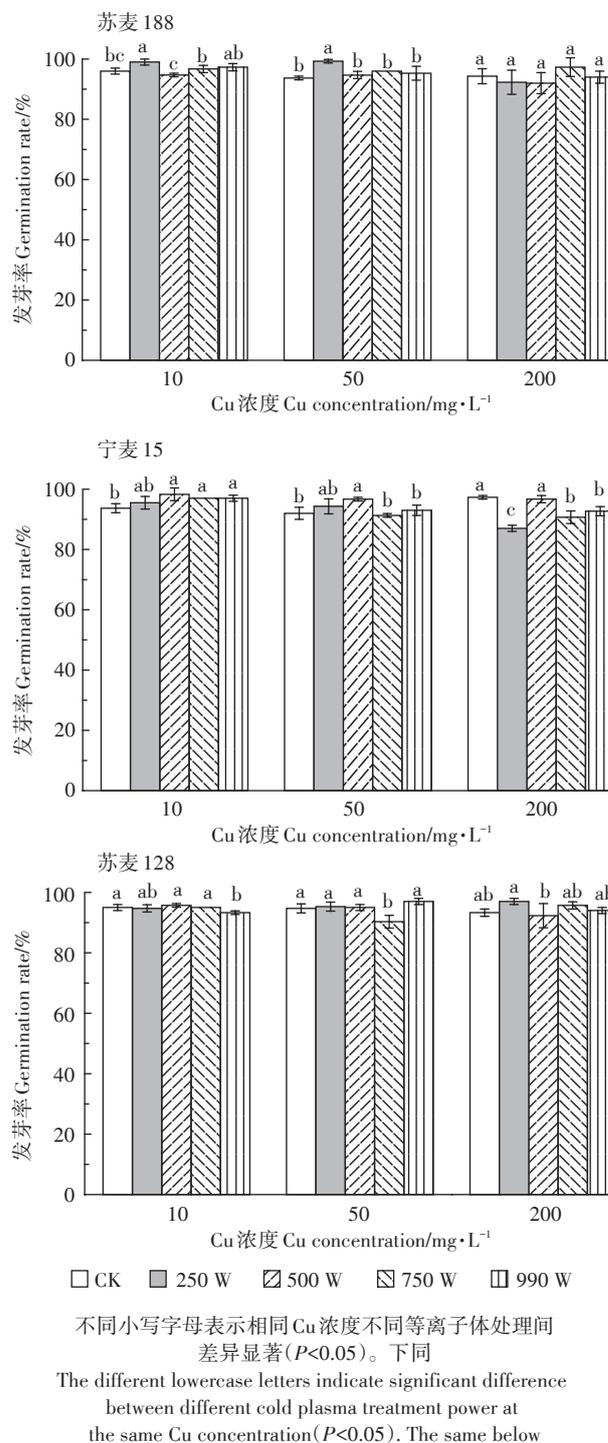


图2 冷等离子体处理对Cu胁迫下3种小麦种子发芽率的影响
Figure 2 Effects of cold plasma treatment on the germination rate of three wheat seeds under Cu stresses

水平;经 500 W 冷等离子体处理后,宁麦 15 的发芽率相比对照提高了 4.6% 和 4.7%,且呈现出显著性差异。

在相同处理功率下,不同品种的小麦在 Cu 胁迫下的发芽率存在一定的差异。250 W 的冷等离子体处理整体上对苏麦 188 的发芽率有一定提高,但对宁麦 15、苏麦 128 的发芽率影响不大,甚至产生负效应。同样,500 W 的冷等离子体处理对宁麦 15 的发芽率有一定提高,但对其他两个品种小麦的发芽无影响。

冷等离子体处理对不同 Cu 浓度作用下苏麦 188、

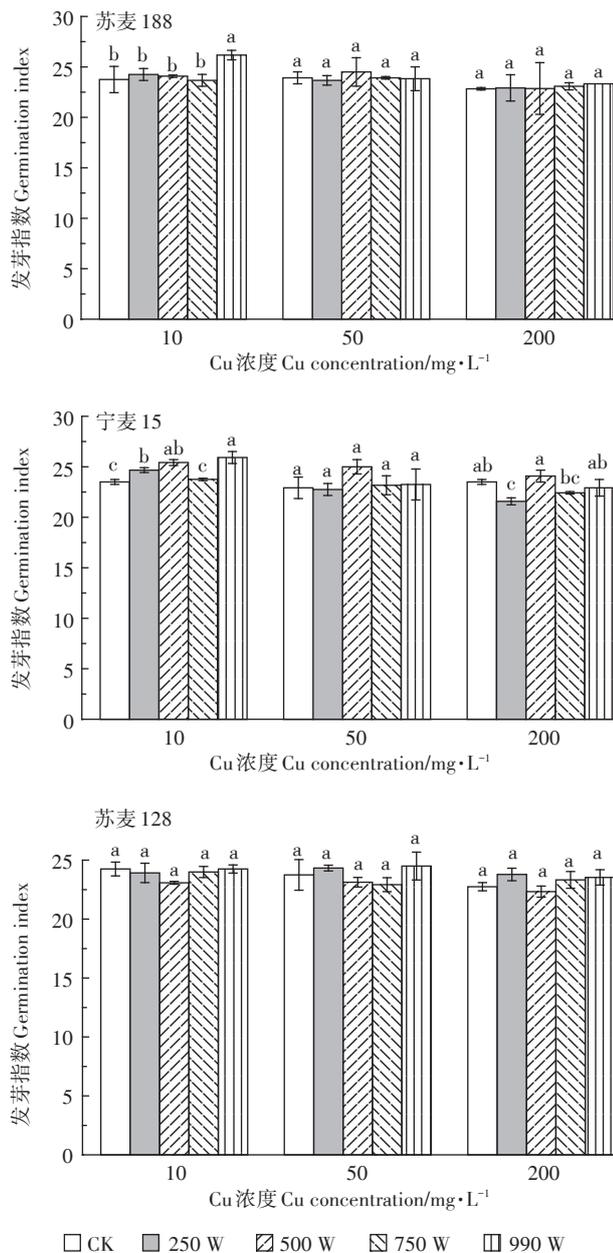


图3 冷等离子处理对 Cu 胁迫下 3 种小麦种子发芽指数的影响

Figure 3 Effects of cold plasma treatment on the germination index of three wheat seeds under Cu stresses

宁麦 15、苏麦 128 种子发芽指数的影响见图 3。在相同等离子体处理条件下,随着 Cu 胁迫浓度的增加,小麦种子的发芽指数呈下降的趋势,在 200 mg·L⁻¹ Cu 胁迫下的宁麦 15 发芽指数较 10 mg·L⁻¹ 时 Cu 胁迫下降幅最大为 12.5%。

种子经 990 W 冷等离子体处理后,相比对照处理,10 mg·L⁻¹ Cu 处理下苏麦 188 和宁麦 15 的发芽指数有一定的提高,增幅分别为 10.2% 和 10.3%;但是对中高浓度 Cu 胁迫下的小麦发芽指数几乎无影响。其他冷等离子体处理功率对不同 Cu 胁迫下 3 种小麦发芽指数的影响也不显著。整体而言,冷等离子体种子处理对 Cu 胁迫下的小麦发芽指数影响不显著。

2.2 冷等离子体处理对 Cu 胁迫下小麦根长、苗长的影响

冷等离子体处理对 Cu 胁迫下苏麦 188、宁麦 15 和苏麦 128 根长、苗长的影响如图 4 所示。在对照处理中,Cu 胁迫浓度越高,小麦根、苗生长受到的限制作用越明显,与 10 mg·L⁻¹ Cu 胁迫浓度的结果相比,高浓度 200 mg·L⁻¹ Cu 作用下小麦根长和苗长的降幅最大,分别为 37.4% 和 54.8%。

冷等离子体处理对 Cu 胁迫下小麦的根长、苗长有显著的促进作用:当 Cu 胁迫浓度为 10 mg·L⁻¹ 时,与对照相比,500 W 处理下宁麦 15 根长和苗长分别提高了 46.2% 和 37.1%。当 Cu 胁迫浓度为 50 mg·L⁻¹ 时,同样,500 W 的处理对苏麦 188、宁麦 15 的根长和苗长都有明显的促进作用,其中苏麦 188 的根长和苗长分别增加了 18.5% 和 4.7%,而宁麦 15 的根长和苗长分别增加了 15.1% 和 75.5%;250 W 处理下苏麦 128 的根长和苗长分别提高了 19.3% 和 145.4%。当 Cu 胁迫浓度达 200 mg·L⁻¹ 时,不同功率的冷等离子体处理对 3 种小麦的根长和苗长的促进效果都很显著,其中 250 W 的处理对苏麦 128 的根长和苗长分别提高了 15.1% 和 29.1%;500 W 处理下苏麦 188 根长和苗长分别提高了 20.0% 和 99.0%,宁麦 15 的根长和苗长也有 19.2% 和 19.4% 的提高。这表明适宜功率的冷等离子体处理对不同 Cu 胁迫浓度下的小麦幼苗生长均起到了明显的促进作用。

在相同的处理功率下,不同品种的小麦在 Cu 胁迫下的根长、苗长存在一定的差异。500 W 的冷等离子体处理下苏麦 188、宁麦 15 的根长和苗长均有显著提高,但对苏麦 128 的影响不显著。同样,250 W 的冷等离子体处理下苏麦 128 的根长和苗长有明显提高,但对其他两个品种根长和苗长的影响不明显。说明

不同品种的小麦适宜的冷等离子体功率不同。

2.3 冷等离子体处理对Cu胁迫下小麦活力指数的影响

图5为冷等离子体处理对Cu胁迫下苏麦188、宁麦15、苏麦128活力指数的影响。在对照处理下,Cu胁迫浓度越高,小麦的活力指数下降得越明显:50 mg·L⁻¹ Cu胁迫与10 mg·L⁻¹ Cu胁迫相比,苏麦188、宁麦15和苏麦128的活力指数分别下降了47.9%、46.4%和53.9%;而在200 mg·L⁻¹ Cu胁迫下,活力指数下降幅度更加明显,分别为69.5%、59.3%和66.6%。

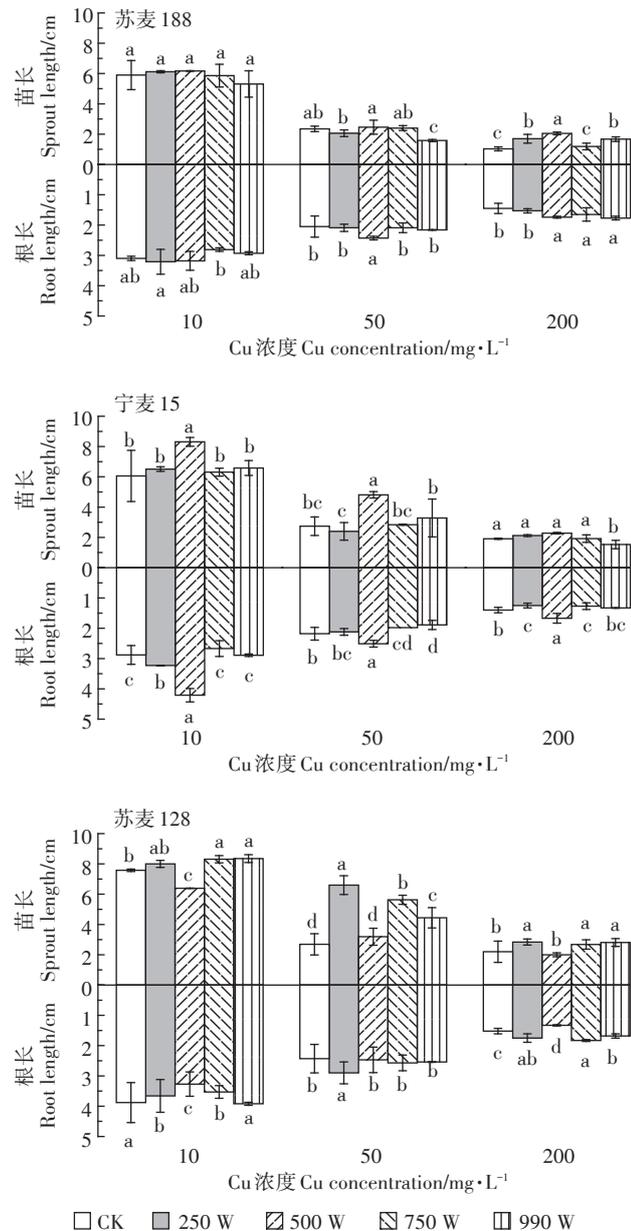


图4 冷等离子体处理对Cu胁迫下小麦种子根长、苗长的影响
Figure 4 Effects of cold plasma treatment on roots and sprouts of wheat under Cu stresses

冷等离子体处理提高了不同Cu胁迫浓度下3种小麦种子的活力指数:当Cu浓度为10 mg·L⁻¹时,与对照处理相比,500 W处理下宁麦15的活力指数提高了49.0%;当Cu胁迫浓度为50 mg·L⁻¹时,500 W的处理使苏麦188、宁麦15的活力指数分别增加了12.4%和64.6%,而250 W处理下苏麦128的活力指数提高了82.1%;当Cu胁迫浓度达200 mg·L⁻¹时,相比于对照处理,500 W的处理使苏麦188、宁麦15的活力指数分别增加了42.7%、19.4%,而250 W的处理使苏麦

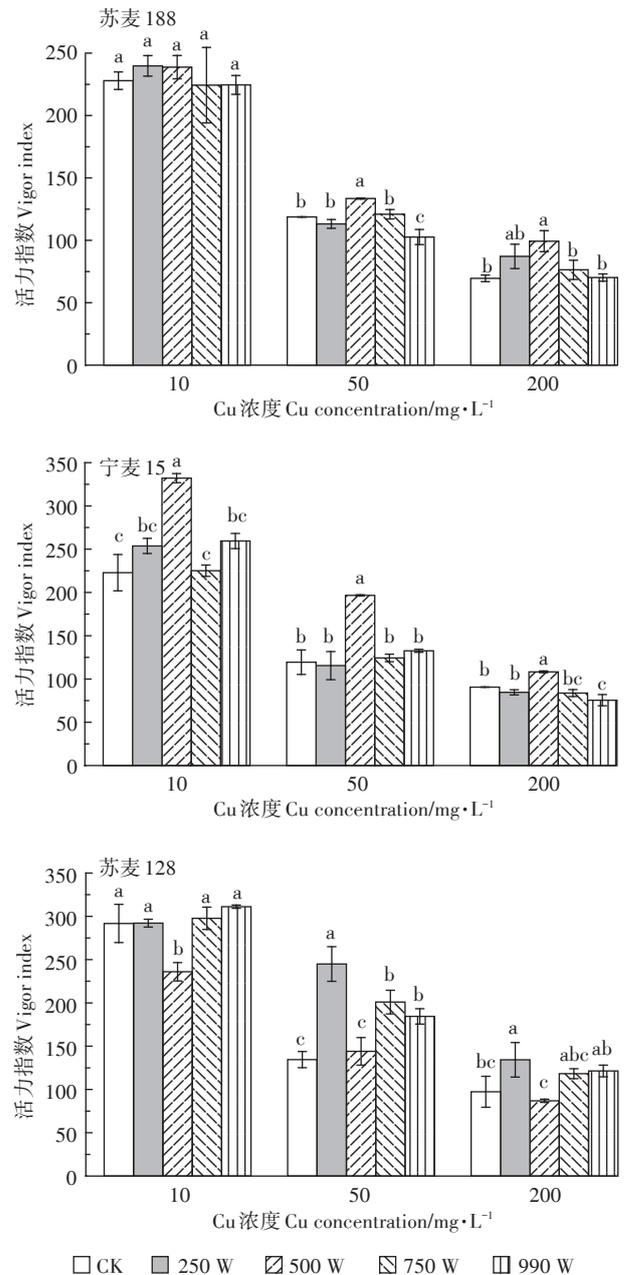


图5 冷等离子体处理对Cu胁迫下小麦种子活力指数的影响
Figure 5 Effects of cold plasma treatment on vigor index of wheat under Cu stresses

128的活力指数增加了38.0%。由此可见,适宜功率的冷等离子体处理能增强不同Cu胁迫浓度下小麦种子的活力指数。

在相同的处理功率下,不同品种的小麦在Cu胁迫下的活力指数存在一定的差异。500 W的冷等离子体处理对苏麦188、宁麦15的活力指数均有显著提高,但对苏麦128的影响不明显,甚至产生负作用。同样,250 W的冷等离子体处理对苏麦128的活力指数有显著提高,但对其他两个品种影响不明显。

2.4 冷等离子体处理对小麦幼苗根、苗Cu富集的影响

表1为冷等离子体处理对小麦幼苗根、苗中Cu富集特征的影响。从表1可以看出:无论是对照处理

还是冷等离子体处理,随着Cu胁迫浓度增加,3种小麦幼苗根、苗中的Cu含量均有不同程度地升高,且Cu的富集系数均表现为根>苗。同时,与对照处理相比,在Cu胁迫浓度为10 mg·L⁻¹和50 mg·L⁻¹时,冷等离子体处理整体上促进了根、苗对Cu的吸收,最高增幅分别达到了111.1%和26.3%;在Cu胁迫浓度为200 mg·L⁻¹时,冷等离子体处理对Cu的吸收既有促进也有抑制,表现出不确定性;但是不同品种的小麦幼苗对Cu的转移系数却都呈现出升高的趋势,其中苏麦188和宁麦15的升幅较明显,而苏麦128的升幅不显著。由此可见,在低浓度Cu胁迫时,冷等离子体处理能够促进根和苗对Cu的吸收;在高浓度Cu

表1 冷等离子体处理对小麦幼苗根、苗中Cu富集的影响

Table 1 The effect of cold plasma treatment on the accumulation of copper in the root and seedling of wheat seeds

Cu浓度 Cu concentration/ mg·L ⁻¹	品种 Cultivar	功率 Power/W	根部Cu含量 Cu concentration in roots/mg·kg ⁻¹	苗部Cu含量 Cu concentration in sprouts/mg·kg ⁻¹	根富集系数 Bioconcentration factor in roots	苗富集系数 Bioconcentration factor in sprouts	转移系数 Transfer coefficient
10	苏麦188	0	28.36±5.11b	13.52±1.33a	2.84	1.35	0.48
		500	31.55±0.43b	14.61±0.29a	3.16	1.46	0.46
		990	59.87±14.53a	13.27±0.24a	5.99	1.33	0.22
	宁麦15	0	39.24±4.40a	21.14±0.19a	3.92	2.11	0.54
		500	41.37±0.60a	23.03±0.60a	4.14	2.30	0.56
		990	44.98±0.35a	20.62±0.86a	4.50	2.06	0.46
	苏麦128	0	36.11±0.44b	19.05±0.45b	3.61	1.91	0.53
		500	48.28±2.31a	17.01±0.16c	4.83	1.70	0.35
		990	36.59±0.71b	21.30±0.06a	3.66	2.13	0.58
50	苏麦188	0	57.94±1.72b	19.70±0.60b	1.16	0.39	0.34
		500	61.50±0.24b	24.89±0.79a	1.23	0.50	0.40
		990	83.10±10.35a	26.17±0.39a	1.66	0.52	0.31
	宁麦15	0	60.50±3.68c	27.86±3.36a	1.21	0.56	0.46
		500	73.91±0.18b	31.09±0.64a	1.48	0.62	0.42
		990	88.85±2.84a	28.32±0.21a	1.78	0.57	0.32
	苏麦128	0	62.66±24.83b	21.65±1.31b	1.25	0.43	0.35
		250	64.77±0.53b	24.87±1.71a	1.30	0.50	0.38
		750	104.62±1.04a	24.95±0.07a	2.09	0.50	0.24
200	苏麦188	0	66.95±1.89b	23.75±0.53ab	0.33	0.12	0.35
		500	359.06±0.68a	99.58±1.45c	1.80	0.50	0.27
		990	438.08±68.04a	172.06±16.88a	2.19	0.86	0.39
	宁麦15	0	395.79±66.16a	134.87±6.11b	1.98	0.67	0.34
		500	434.52±10.03b	84.43±1.88b	2.17	0.42	0.19
		990	301.52±4.49c	69.11±3.49b	1.51	0.35	0.23
	苏麦128	0	810.83±34.08a	261.23±64.00a	4.05	1.31	0.32
		250	307.85±6.64c	46.80±5.32bc	1.54	0.23	0.15
		500	255.05±2.30d	41.89±2.78c	1.28	0.21	0.16
	苏麦128	500	581.04±1.20a	111.80±0.93a	2.91	0.56	0.19
		990	305.95±1.93b	52.68±1.15b	1.53	0.26	0.17

注:不同小写字母表示同一Cu浓度不同冷等离子体处理间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The different lowercase letters within a Cu treatment mean indicate significant differences among different power of cold plasma ($P<0.05$).

胁迫时,冷等离子体处理在一定程度上提高了幼苗将根部的Cu转运到苗部的能力,从而减轻了Cu对根部的毒害作用。

3 讨论

由于Cu是植物体内许多关键酶的辅基,是植物生长发育所必需的营养元素,因此,低剂量的Cu胁迫能够促进植物体内酶的合成,维持植物的正常新陈代谢^[35]。但是,高浓度Cu胁迫对植物的生长发育有明显的抑制及毒害作用,例如抑制小麦的萌发、生长、细胞分裂与酶活性,进而影响小麦的光合作用和呼吸作用^[36]。本研究也发现了类似的结果,即高浓度Cu存在时可明显抑制小麦种子的萌发与幼苗生长。而采用适宜功率冷等离子体处理虽然不能明显提高Cu胁迫作用下不同小麦种子的发芽率和发芽指数,但在一定程度上提高了小麦种子的活力指数,促进了小麦幼苗的生长,例如本研究结果呈现的小麦根长、苗长和活力指数较对照处理组的最大增幅分别为46.2%、145.4%和82.1%(图4和图5),这与报道的等离子体促进常规萌发条件下小麦种子萌发生长的结果类似^[37-38]。据报道,冷等离子体处理可以提高种子中过氧化物酶、 α -淀粉酶、琥珀酸脱氢酶等酶的活性,使种子呼吸作用增强,生物氧化过程加快,物质的合成与运输能力加速进行^[39],这可能也是本研究中冷等离子体处理增强小麦种子抗Cu胁迫作用的原因。

冷等离子体处理对种子萌发与作物生长影响的机制尚未完全清晰,Li等^[40]从水分的吸收和酶活性等角度进行了探索。本研究从重金属吸收的角度对冷等离子体的作用机理进行了初步探索,在低浓度Cu作用时,冷等离子体在一定程度上能够促进根、苗对Cu的吸收,提高种子活力,Cu可参与到幼苗的生理生长过程中,对幼苗早期的生长发育起到了积极作用^[41];在高浓度Cu作用时,冷等离子体能够提高幼苗对Cu的转运能力,在一定程度上减轻了Cu对幼苗根部的毒害作用,从而促进了幼苗生长。

从不同功率冷等离子体处理的结果可以看出,不同小麦品种对冷等离子体的敏感性及耐受性存在明显差异。因此,该技术在今后实际应用时,需要根据作物品种确定适宜的冷等离子体功率。

4 结论

(1)随着Cu胁迫浓度的增加,未作冷等离子体处理的3种小麦种子的萌发和幼苗生长均表现出明显

的抑制作用,冷等离子体种子处理可以有效缓解这种抑制作用。

(2)冷等离子体处理对小麦在Cu胁迫作用下的发芽率、发芽指数影响不大,但是对根、苗的生长以及种子活力指数均有一定的提高。

(3)低浓度Cu胁迫下,冷等离子体能够促进幼苗对Cu的吸收,提高种子的活力;高浓度Cu胁迫时,冷等离子体处理能在一定程度上提高幼苗将根部的Cu转运到苗部的能力,减轻Cu对幼苗根部的毒害作用,从而促进幼苗的生长。

参考文献:

- [1] 王学峰,苏霄雨,尚菲,等.新乡孟庄工业区周边土壤重金属生态风险评价[J].科学技术与工程,2014,14(15):105-113.
WANG Xue-feng, SU Xiao-yu, SHANG Fei, et al. Ecological risk assessment of heavy metal element in soil around Mengzhuang industrial zone of Xinxiang City[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(15):105-113.
- [2] 中华人民共和国生态环境部,GB 15618—2018农用地土壤环境质量标准(试行)[S].北京:中国标准出版社.
Ministry of Ecology and Environmental of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil environmental quality risk control standard contamination of agricultural land[S]. Beijing: Chinese Standards Press.
- [3] 吴书凤.铜和镉在黄土和小麦中的运移和富集规律研究[D].西安:长安大学,2013.
WU Shu-feng. Studies on the transport and enrichment of copper and cadmium in loess and wheat[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [4] Cao Z H, Hu Z Y. Copper contamination in paddy soils irrigated with wastewater[J]. *Chemosphere*, 2000, 41:3-6.
- [5] 康立娟,赵明宪,赵成爱.铜对水稻的影响及迁移积累规律的研究[J].广东微量元素科学,1999,6:43-44.
KANG Li-juan, ZHAO Ming-xian, ZHAO Cheng-ai. Study on effect of Cu on rice and its migration accumulation behaviour[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1999, 6:43-44.
- [6] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National soil pollution survey bulletin[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5):10-11.
- [7] 唐伟.铜污染对土壤呼吸和酶活性的影响[D].武汉:湖北大学,2014.
TANG Wei. Effects of cooper pollution on soil respiration and enzyme activities[D]. Wuhan: Hubei University, 2014.
- [8] 严玉萍.铜对不同水稻品种种子萌发和生长的影响及其在籽粒中积累的差异[D].杭州:浙江大学,2006.
YAN Yu-ping. Effects of cooper on rice germination and growth and accumulation of cooper in brown rice in different rice cultivars[D].

- Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [9] Clijsters H, Van A F. Inhibition of photosynthesis by heavy metals[J]. *Photosynthesis Research*, 1985, 7(1):31-40.
- [10] Reboredo F, Henriques F. Some observations on the leaf ultrastructure of *Halimione Portulacoides* (L.) aellen grown in a medium containing copper[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1991, 137(6):717-722.
- [11] 马孟莉, 卢丙越, 苏一兰, 等. 铜、铅、镉对不同水稻品种种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4):79-81.
MA Meng-li, LU Bing-yue, SU Yi-lan, et al. Effects of copper, lead and cadmium on seed germination of different rice varieties[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(4):79-81.
- [12] 鲁先文, 何俊. 重金属Cu和Zn对小麦种子萌发和生物量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35):15346-15348.
LU Xian-wen, HE Jun. Effects of heavy metals Cu and Zn on seed germination and biomass of wheat[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(35):15346-15348.
- [13] 郑曦, 肖炜. Cu对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2003, 21(3):64-67.
ZHENG Xi, XIAO Wei. Effects of Cu on seed germination and seedling growth of wheat[J]. *Journal of Xuzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2003, 21(3):64-67.
- [14] 吕笃康, 巴音山, 赵玉. 铜、镉污染对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2012, 31(9):108-111.
LÜ Du-kang, BA Yin-shan, ZHAO Yu. Effects of copper and cadmium on wheat seed germination and seedling growth[J]. *Seed*, 2012, 31(9):108-111.
- [15] 黄桂丹. ^{60}Co - γ 射线辐射育种研究进展[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(2):107-111.
HUANG Gui-dan. Research progress for ^{60}Co - γ ray radiation breeding[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2016, 32(2):107-111.
- [16] 朱家键. 激光技术在农业上的应用及其展望[J]. 农机化研究, 2009, 31(4):222-225.
ZHU Jia-jian. The prospect and application of laser technology in agriculture[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(4):222-225.
- [17] 王昆林, 张金良, 王莹. 激光和高压均强电场诱变育种研究—激光和高压均强电场辐射对水稻种子发芽率的影响[J]. 应用激光, 2006, 26(3):198-200.
WANG Kun-lin, ZHANG Jin-liang, WANG Ying. Research on mutation breeding of laser and the high voltage even electric field: The laser and high voltage even electric field radiation the paddy seed influence of the germination percentage[J]. *Applied Laser*, 2006, 26(3):198-200.
- [18] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 等. 中国小麦育种进展与展望[J]. 作物学报, 2011, 37(2):202-215.
HE Zhong-hu, XIA Xian-chun, CHEN Xin-min, et al. Progress of wheat breeding in China and the future perspective[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2):202-215.
- [19] Wang Y, Xue Y, Li J. Towards molecular breeding and improvement of rice in China[J]. *Trends Plant Sci*, 2005, 10(12):610-614.
- [20] Gupta P K, Langridge P, Mir R R. Marker-assisted wheat breeding: Present status and future possibilities[J]. *Mol Breed*, 2010, 26(2):145-161.
- [21] 陈欢, 张文英, 樊龙江. 作物育种方法研究进展与展望[J]. 科技通报, 2011, 27(1):61-65.
CHEN Huan, ZHANG Wen-ying, FAN Long-jiang. Methodology of crop breeding: Progress and prospect[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2011, 27(1):61-65.
- [22] 冯金奎, 王德成, 邵长勇. 低温等离子体处理功率与时间对玉米发芽特性的影响[J]. 农业工程, 2017, 7(5):134-139.
FENG Jin-kui, WANG De-cheng, SHAO Chang-yong. Effect of different power and time of low-temperature helium plasma on germination characteristics of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Agricultural Engineering*, 2017, 7(5):134-139.
- [23] Dhayal M, Lee S Y, Park S U. Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium* L. seed surface modification[J]. *Vacuum*, 2006, 80(5):499-506.
- [24] 赵会超. 低温等离子体技术应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
ZHAO Hui-chao. Research on application of low temperature plasma technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [25] Sadhu S, Thirumdas R, Deshmukh R R, et al. Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate*)[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 78:97-104.
- [26] 尹美强, 郭平毅, 温银元, 等. 磁化等离子体处理大豆种子的生物学效应[J]. 核农学报, 2010, 24(3):470-475.
YIN Mei-qiang, GUO Ping-yi, WEN Yin-yuan, et al. Biological effects of magnetized plasma on soybean seeds[J]. *Chinese Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(3):470-475.
- [27] 黄凰, 叶春, 杨敏丽, 等. 等离子体水稻种子处理技术田间试验效果分析[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6):81-83, 94.
HUANG Huang, YE Chun, YANG Min-li, et al. Field trials effectiveness analysis of rice plasma seed treatment technology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(6):81-83, 94.
- [28] 迟丽华. 等离子体对作物种子生物学效应的研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2004.
CHI Li-hua. Study of biological effect of plasma to crop's seeds[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004.
- [29] 张波, 邵汉良. 冷等离子体技术装备在作物种子改良中的应用研究[J]. 农机化研究, 2014(7):211-215.
ZHANG Bo, SHAO Han-liang. Application research on improvement of crop seeds by cold plasma technical equipment[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014(7):211-215.
- [30] 骆美洁, 赵衍鑫, 宋伟, 等. 常压室温等离子体对玉米种子及花粉萌发的影响[J]. 分子植物育种, 2016, 14(5):1262-1267.
LUO Mei-jie, ZHAO Yan-xin, SONG Wei, et al. Effects on maize seed and pollen germination by atmospheric and room temperature plasma[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2016, 14(5):1262-1267.
- [31] 全国农作物种子标准化技术委员会. GB/T3543.4—1995农作物种子检验规程:发芽试验[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.

- Crop seeds Standardization Technical Committees of P. R. China. GB/T3543.4—1995 Rules for agricultural seed testing: Germination test [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1995.
- [32] 汤小婷. 等离子体预处理对穿心莲种子萌发过程基因表达及后期生长的影响[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017.
- TANG Xiao-ting. Effects of plasma pretreatment on gene expression in *Andrographis paniculata* seed germination stage and on its late growth[D]. Beijing: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2017.
- [33] 居述云, 汪洁, 宓彦彦, 等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2181-2186.
- JU Shu-yun, WANG Jie, MI Yan-yan, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2181-2186.
- [34] 余跑兰, 赖发英, 肖小军, 等. 丁香蓼对Cu富集效应的研究[J]. 环境科技, 2014, 27(6): 1-4.
- YU Pao-lan, LAI Fa-ying, XIAO Xiao-jun, et al. Research on the copper enrichment effect of *Ludwigia Prostrata Roxb*[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 27(6): 1-4.
- [35] 夏来坤. 铜、镉胁迫对冬小麦生长和产量的影响及其缓解措施的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- XIA Lai-kun. Effects of copper and cadmium stress on growth and grain yield of winter wheat and its alleviating measures[D]. Zhengzhou: Henan Agriculture University, 2006.
- [36] 薛盈文, 王玉凤, 赵长江, 等. 铜胁迫对小麦种子萌发及幼苗抗氧化系统的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(1): 54-59.
- XUE Ying-wen, WANG Yu-feng, ZHAO Chang-jiang, et al. Effects of copper stress on germination and antioxidant system in wheat seedlings[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, 38(1): 54-59.
- [37] Guo Q, Wang Y, Zhang H R, et al. Alleviation of adverse effects of drought stress on wheat seed germination using atmospheric dielectric barrier discharge plasma treatment[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16680.
- [38] Dobrin D, Magureanu M, Mandache N B, et al. The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 29(4): 255-260.
- [39] 吴亦楠, 邢新会, 张翀, 等. ARTP生物育种技术与装备研发及其产业化发展[J]. 生物产业技术, 2017, 1: 37-45.
- WU Yi-nan, XING Xin-hui, ZHANG Chong, et al. Recent progress on atmospheric and room temperature plasma (ARTP) biobreeding technology, instrumentation and its industrialization[J]. *Biotechnology & Business*, 2017, 1: 37-45.
- [40] Li L, Jiang J F, Li J G, et al. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5859.
- [41] 杨淑芳. 铜胁迫下小麦幼苗生长生理及幼根超微结构、转录组学研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2014.
- YANG Shu-fang. Research growth, physiological and ultrastructure transcriptome sequenced of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling under copper stress[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2014.