

模拟酸雨对小麦种子萌发和幼苗生长的影响

王秀英

(内蒙古河套学院, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘 要:以中性溶液($\text{pH}=7.0$)为对照,研究了 pH 值为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 和 6.0 模拟酸雨对小麦种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明,小麦种子萌发和幼苗生长各指标随着 pH 值的降低而降低,弱酸($\text{pH}5.0\sim6.0$)条件下小麦种子能够正常萌发和生长,种子萌发和幼苗生长各指标与对照没有显著差异($P>0.05$);在 pH 低于 5.0 时,小麦种子萌发和幼苗生长严重受阻,种子萌发和幼苗生长各指标均显著低于对照($P<0.05$); pH 为 1.0 时,小麦种子则完全失去活性;不同 pH 值模拟酸雨胁迫对小麦幼苗生理指标影响较大,叶绿素含量、类胡萝卜素含量、保护酶(SOD, POD, CAT)和非保护酶(PPO, PAL)活性随酸性的增强呈降低趋势,而相对电导率和丙二醛(MDA)含量呈上升趋势。综合分析认为,小麦幼苗生长比种子萌发对模拟酸雨的响应更为敏感。

关键词:模拟酸雨;小麦;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:X173

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)06-0265-06

Effects of Simulated Acid Rain on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat

WANG Xiu-ying

(College of Hetao of Inner Mongolia, Bayannaoer, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: The effects of acid rain on seed germination and seedling growth of wheat which were treated with simulated acid rain at pH 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 and 7.0 were studied. The results showed that the indexes of seed germination and seedling growth of wheat reduced with the decrease of the pH value and were inhibited by the lower pH . The indexes of seed germination and seedling growth of wheat were not significant compared with CK with the pH value from 5.0 to 6.0 ($P>0.05$) and showed resistance to acid. When the pH value was less than 5.0, the seed germination and seedling growth of wheat were sharply inhibited and the indexes were significantly lower than CK ($P<0.05$), while the wheat didn't shoot up at pH 1.0 at all. The results also showed that simulated acid rain with different pH values had a larger effect on the seedling physiological indexes of wheat, the content of chlorophyll, carotenoid, protective enzyme (SOD, POD, CAT) and the protective enzyme (PPO, PAL) activity showed a decreasing trend with the increase of acid, but the relative conductivity and malondialdehyde (MDA) showed an increasing trend. Based on above results, we can conclude that the effect of simulated acid rain on wheat seedling growth was more sensitive than seed germination.

Key words: simulated acid rain; wheat; seed germination; seedling growth

酸雨又称作酸沉降,指 $\text{pH}<5.6$ 的雨水,是严重威胁世界环境的十大问题之一,备受世界各国科学家关注^[1-3]。近年来,随着现代工业化的迅速发展,我国酸雨问题日益严重,已成为继欧洲、北美之后的世界第三大酸雨区,其中华南是我国酸雨较为严重的地区之一^[4-5]。酸雨是影响我国华南地区生态环境以及农作物生长的主要限制因子^[4,6-7]。而植物在不同的生

长阶段对酸雨的适应能力不同^[4,6,8],种子萌发期是对外界环境最为敏感的时期,幼苗生长将直接决定种群能否繁殖成功^[9-14],因此研究酸雨对植物种子萌发和幼苗生长的影响显得尤为重要。

小麦(*Triticum sp.*)是一种优质种质资源,因其良好的丰产性、抗逆性、高品质和用途广而深受广大育种和生产工作者的喜爱^[15-17]。我国南方冬闲田面

积大,大量种植小麦能够显著提高社会效益、经济效益和生态效益^[15-16],就目前的研究结果来看,酸雨危害对小麦生长的影响研究甚少^[18-19]。鉴于此,笔者研究了模拟酸雨对小麦种子萌发和幼苗生长的影响,旨在为进一步开展酸化环境对小麦生长发育的胁迫机理和小麦的逆境生理研究奠定基础,同时也为正确评估酸雨所造成的农业生产损失提供一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以浓 H_2SO_4 和浓 HNO_3 体积比为 8:1 配制成酸雨母液,利用该母液添加适当蒸馏水配制各酸度溶液,用上海雷磁仪器厂生产的 pH S-25 型数显酸度计测定并配制出 pH 值分别为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 的模拟酸雨溶液,对照(CK)选择去离子蒸馏水,配制好的溶液 4℃ 保存备用。

供试的小麦品种为郑州 902 号,由中国科学院华南植物园提供,安全贮存 6 个月使种子度过休眠期,挑选籽粒饱满、无病虫害和机械损伤、大小均匀、色泽一致的种子,用 3% 的 H_2O_2 消毒 5 min,蒸馏水反复冲洗后备用。

1.2 试验设计和方法

2013 年 4 月选取上述预处理后的种子,整齐排列在铺有 3 层滤纸的培养皿中,每个培养皿 100 粒,分别加入不同酸度的溶液 15 ml,包括对照共 7 个处理,每个处理 3 次重复,每天定时向培养皿中补充相应处理溶液大约 5 ml,保持滤纸的相对湿润,每 3 d 更换 1 次滤纸。培养条件:光处理 12 h,黑暗处理 12 h,光强控制为 3 000 lux,相对湿度控制 75%~80%,恒温 28℃。

连续培养观察逐日记录种子发芽数,发芽以突破种皮的胚轴长度达到真种子自身的长度为标准,每天观察、统计并记录种子发芽数,按国家种子质量检验标准^[13,18],第 3 d 统计发芽率,第 7 d 天统计发芽势,第 12 d 随机挑选每个处理下的 15 粒发芽种子测量胚根和幼苗长度(mm)、鲜重(g)和干重(g),并计算各处理下小麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。

1.3 种子萌发和幼苗生长各生理指标测定

发芽率 = (发芽初期 3 d 的发芽粒数/100) × 100%; 发芽势 = (发芽初期 12 d 的发芽粒数/100) × 100%; 发芽指数 $G_i = \sum (G_i/D_i)$; 活力指数 $V_i = G_i \times S$; 平均发芽时间 $\text{MGT} = \sum T_i \cdot N_i / \sum N_i$;

其中: S ——平均胚根鲜重; G_i ——在 t 天的种子发芽

数; D_i ——相对应的种子发芽天数; N_i —— T_i 时期内的发芽种子数

取培养第 12 d 的小麦幼苗叶片(没有发芽的种子各项指标记为 0),混合液浸提法测定叶绿素含量;电导法测定相对电导率;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法;氮蓝四唑(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;过氧化氢分解法测定过氧化氢酶(CAT)活性;多酚氧化酶(PPO)活性测定采用分光光度计;液氮分离纯化测定苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性;硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量^[20]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据统计和单因素方差分析(One-way ANOVA),LSD 多重比较法检验各处理间差异显著($P < 0.05$),Origin 7.5 作图。

2 结果与分析

2.1 不同 pH 值模拟酸雨对小麦种子萌发的影响

由表 1 可知,不同 pH 值模拟酸雨处理对小麦种子萌发各项指标的影响基本保持一致,随 pH 值的降低小麦种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数和发芽速度均呈下降趋势,而小麦种子平均发芽时间随 pH 值的降低而增加,说明 pH 值模拟酸雨延长了种子平均发芽时间。当 pH 值为 7.0(中性)时,小麦种子萌发各指标达到最大;pH 值为 5.0~6.0 的处理下小麦种子萌发各项指标与对照组无明显的差异($P > 0.05$);当 pH 值低于 5.0 时,pH 值对小麦种子萌发的抑制作用极为显著,种子萌发过程中各项指标急剧降低,显著低于对照,并且各处理间均达显著差异水平($P < 0.05$);当 pH 值低于 2.0 时,小麦种子基本不再萌发,此时小麦种子萌发各项指标均达到最小,与对照相比,小麦种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数和发芽速度降低了 92.68%, 93.48%, 89.08%, 70.62% 和 75.73%,而平均发芽时间推迟了 3.54 d;pH 值为 1.0 时,小麦种子失去活性而完全没有萌发。由此可认为小麦种子萌发对 pH 值模拟酸雨胁迫下的临界值为 3.0~4.0,同时也说明了高 pH 值模拟酸雨对种子萌发抑制作用并不明显,只是在酸性增强时才表现出明显的抑制作用。

2.2 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗生长的影响

表 2 反映了不同 pH 值模拟酸雨处理对小麦幼苗生长各指标的影响,随着 pH 值的降低,小麦幼苗生长受到抑制,幼苗苗长、鲜重、干重和根长、鲜重、干重均表现为下降趋势,下降的幅度明显不同,局部有

所波动,而根冠比(R/S)则表现为增加趋势,且均大于 1,这是小麦种子对 pH 值模拟酸雨具有不同的生长特性与物质分配规律。LSD 多重比较显示,pH 值为 7.0(中性)时,小麦幼苗生长各指标达到最大;pH 值为 4.0~6.0 时,小麦幼苗生长各指标与对照相比,基本没有显著差异($P>0.05$);当 pH 值低于 4.0 时,

小麦幼苗生长各指标则表现为急剧下降;当 pH 值为 2.0 时,小麦幼苗苗长、鲜重、干重和根长、鲜重、干重均与对照达到显著差异水平,与对照相比分别下降了 80.91%,82.69%,84.06%,81.62%,89.10%,86.21%;当 pH 值为 1.0 时,小麦种子失活而不再萌发导致幼苗生长各项指标均为 0。

表 1 不同 pH 值模拟酸雨对小麦种子萌发的影响

pH	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	活力指数	发芽速度	平均发芽时间
7.0(CK)	98.3±6.3a	81.3±7.9a	5.31±1.02a	7.25±1.23a	1.03±0.54a	3.24±0.85c
6.0	96.2±7.2ab	79.3±6.8a	5.01±1.26a	7.10±1.56a	1.01±0.38a	3.45±0.59bc
5.0	83.7±4.3b	68.2±7.2b	4.58±0.98ab	6.58±1.02a	1.00±0.24a	3.36±0.78bc
4.0	65.2±3.9c	59.3±8.3c	3.84±0.79b	5.12±2.03ab	0.91±0.18a	4.13±0.62b
3.0	41.3±5.1d	32.6±5.3d	1.37±0.56c	4.23±1.59b	0.73±0.16a	4.54±0.74b
2.0	7.2±2.3e	5.3±1.8e	0.58±0.13d	2.13±0.58c	0.25±0.13b	6.78±0.85a
1.0	0	0	0	0	0	—

注:同列相同字母表示在 0.05 水平差异不显著,下表同。

表 2 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗生长的影响

pH	幼苗苗长/cm	苗鲜重/g	苗干重/g	根鲜重/g	幼苗根长/cm	根干重/g	根冠比
7.0(CK)	16.23±5.3a	0.185±0.07a	0.069±0.01a	0.156±0.07a	14.31±3.58a	0.058±0.019a	1.19
6.0	16.10±4.3a	0.176±0.08a	0.063±0.02a	0.123±0.05a	15.45±4.69a	0.052±0.021a	1.21
5.0	15.96±4.9ab	0.145±0.06a	0.059±0.01a	0.112±0.03a	14.36±3.56a	0.048±0.016a	1.23
4.0	12.19±3.9b	0.124±0.09ab	0.052±0.02ab	0.109±0.04a	13.56±2.54b	0.042±0.012a	1.24
3.0	9.21±2.8b	0.097±0.03b	0.041±0.01b	0.085±0.02a	10.23±3.12c	0.034±0.003a	1.21
2.0	3.09±1.0c	0.034±0.01c	0.011±0.01c	0.027±0.01b	1.56±0.78d	0.008±0.002b	1.38
1.0	0	0	0	0	0	0	—

2.3 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗保护性酶及非保护性酶活性的影响

由表 3 可知,不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗保护酶(SOD,POD,CAT)活性的影响整体呈下降趋势。当 pH 值为 7.0 时,小麦幼苗保护酶活性达到最大;pH 值高于 5.0 时,小麦幼苗保护酶活性与对照没有明显差异($P>0.05$),局部略高于对照;当 pH 值低于 5.0 时,小麦幼苗保护酶活性急剧降低,下降幅度也逐渐增大,并且各处理下均显著低于对照($P<$

0.05);当 pH 值低于 2.0 时,小麦幼苗基本失去活性,保护酶活性极低;当 pH 值为 1.0 时,与对照相比,POD,SOD 和 CAT 活性分别降低了 36.44%,50.69%,58.82%。由表 3 还可知,不同 pH 值处理下小麦幼苗非保护酶(PAL,PPO)活性与保护酶(SOD,POD,CAT)活性的变化趋势一致,也即 pH 值也降低了小麦幼苗非保护酶活性,当 pH 为 1.0 时,与对照相比,PAL 和 PPO 活性分别降低了 88.67%和 83.78%。

表 3 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗保护性酶及非保护性酶活性的影响

pH	POD/(U·g ⁻¹)	SOD/(U·g ⁻¹)	CAT/(mg·g ⁻¹)	PAL/(U·g ⁻¹)	PPO/(U·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
7.0(CK)	125.37±6.54a	230.48±7.56a	36.98±0.74a	20.3±3.1a	25.9±3.4a
6.0	128.96±5.89a	228.35±6.38a	37.12±1.23a	20.6±2.8a	24.8±2.8a
5.0	116.32±6.41ab	231.78±5.78a	36.12±0.98a	17.5±1.9a	23.9±3.2a
4.0	92.56±3.96b	197.65±4.23b	28.96±1.45b	12.3±2.4b	16.3±2.5b
3.0	83.68±5.21bc	122.21±6.56c	19.89±1.02bc	6.8±1.3c	7.6±1.7bc
2.0	81.45±3.89bc	111.45±7.85c	17.36±0.98c	2.5±0.9d	3.8±1.3c
1.0	79.68±4.21c	113.65±9.13d	15.23±1.36c	2.3±0.7d	4.2±0.8c

2.4 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗相对电导率和丙二醛(MDA)含量的影响

由图 1 可知,小麦种子浸提液电导率和丙二醛(MDA)含量随 pH 值的降低呈增加趋势,二者的变

化趋势相一致。当 pH 值为 7.0 时,小麦种子浸提液电导率和 MDA 含量最小;pH 值高于 5.0 时,小麦种子电导率和 MDA 含量缓慢增加并且与对照没有明显差异($P>0.05$)。

总的来说 MDA 含量的增幅不大表明其受到伤害程度较小;当 pH 值低于 5.0 时,电导率和 MDA 含量急剧上升,并且上升的幅度较大,各 pH 值处理下均显著高于对照($P<0.05$);当 pH 值在 1.0~3.0 之间时,小麦幼苗基本失去活性,此时电导率和 MDA

含量较高并且差异均不显著($P>0.05$);当 pH 值为 1.0 时,与对照相比,电导率和 MDA 含量分别增加了 67.85%和 45.83%,此时小麦种子受到严重伤害,膜脂过氧化作用增加,膜受到一定伤害,使丙二醛的含量急剧增加。

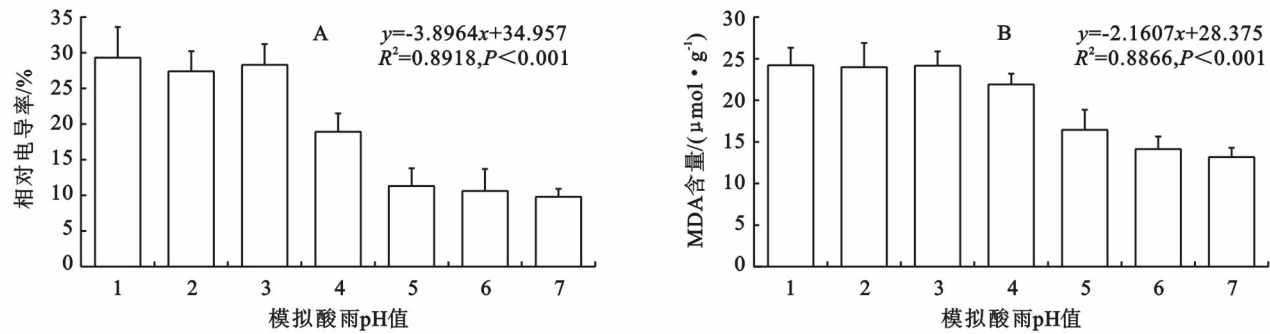


图 1 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗相对电导率和丙二醛(MDA)含量的影响

2.5 不同 pH 值模拟酸雨对小麦种子叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

类胡萝卜素是植物细胞中重要的辅助色素,在光合作用过程中能够过刺激发活性氧的清除、保护其细胞器免受伤害,叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,在光合作用的光吸收中起着核心的作用。不同 pH 值模拟酸雨条件下,类胡萝卜素含量的变化与叶绿素的变化趋势一致。由图 2 可知,种子浸提液中叶绿素含量和类胡萝卜素含量随 pH 值的增加而增加,

并且增加幅度逐渐增大最后趋于稳定,当 pH 值为 7.0 时,小麦种子叶绿素含量和类胡萝卜素含量最高;pH 值在 5.0~7.0 之间时,小麦种子叶绿素含量和类胡萝卜素含量与对照基本相等,局部有所波动;pH 值低于 5.0 时,叶绿素含量和类胡萝卜素含量急剧降低;pH 值低于 3.0 时,二者的变化趋势趋于平稳;pH = 1.0 时,小麦种子完全失去活性,与对照相比,小麦种子中叶绿素含量和类胡萝卜素含量分别降低了 69.70%和 66.19%。

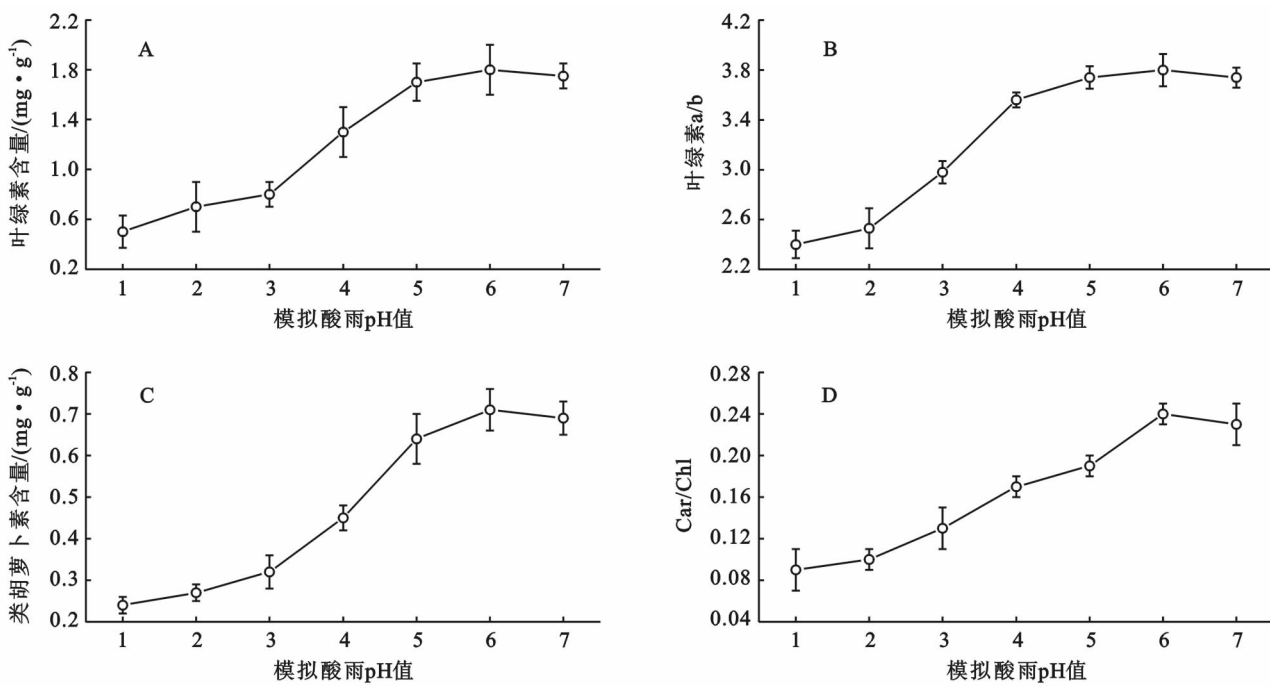


图 2 不同 pH 值模拟酸雨对小麦幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

3 讨论

种子萌发是植物生长发育和接受酸雨胁迫的起点^[11-12,21-22]。本试验结果表明,模拟酸雨对小麦种子

的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数均有不同程度的影响(表 1),在 pH 为 5.0~6.0 的弱酸条件下时,发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数与对照相比差异并不显著,说明小麦种子对弱酸具有一定的耐

性;当 pH 低于 5.0 时,小麦种子的发芽受到了抑制,各处理下小麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数与对照相比均有显著的差异;pH 低于 2.0 时小麦种子不能正常萌发,说明强酸条件下小麦种子萌发受到了严重的抑制,并且小麦种子平均发芽时间也随酸性的增加而延长,一定程度上 pH 值模拟酸雨也减缓了小麦种子萌发的进程。

小麦幼苗生长各指标随酸性的增强逐渐降低,说明酸胁迫条件下能抑制小麦种子的生长,并且 pH 值越低抑制作用越明显。酸胁迫造成了小麦体内生理代谢和形态建成的变化,表现为幼苗地上、地下部的鲜重下降幅度随酸雨胁迫程度加深而增大,但弱酸对小麦种子萌发与幼苗生长影响并不明显(表 2);pH 为 2.0 的处理对小麦幼苗生长的影响十分明显,其各项指标均显著低于对照($P < 0.05$),而 pH 为 1.0 时,小麦种子完全失去活性。主要是由于酸性条件促使小麦叶细胞原生质的酸化,增加细胞膜的透性,从而导致小麦幼苗生长受阻^[12,14,23]。同时,本研究也表明了小麦种子萌发和幼苗生长的各项指标对酸胁迫的敏感度不一样,有些指标的敏感性较强,而有些指标的敏感性较弱。对小麦幼苗生物量分配的研究发现(表 2),小麦幼苗地上部分下降的幅度高于地下部分,说明酸雨对小麦幼苗地下根系的抑制作用大于地上部分,这可能与小麦根尖细胞对酸雨的敏感性和幼苗生长过程中离子的积累有关^[11-12,24]。

电导率高低反映了种子细胞膜完整性好坏,酸处理种子能使细胞膜完整性得到一定修复,表现为种子浸提液的电导率增加^[11-12,22,25]。本试验小麦种子浸提液电导率随酸性的增强逐渐降低,说明酸性条件破坏了小麦种子细胞膜结构,并且强酸处理下小麦种子失活导致外膜破裂,而弱酸处理对膜具有一定的保护和修复作用^[22,25]。酸性逆境胁迫会造成细胞质膜的透性发生改变导致细胞内的盐类或有机物等渗出,而引起组织浸出液电导率发生变化,降低幼苗各项生理功能,从而引起了幼苗代谢失调^[12,14,23]。酸性胁迫环境下,MDA 是反映膜脂过氧化程度以及膜结构稳定性最为直接的指标,可用于衡量细胞膜伤害的程度^[12,23,26]。由图 1 可知,小麦幼苗 MDA 含量随着酸性的增强而增加,这与酸性环境下细胞膜系统受损伤、酶活性发生改变有关^[11-12,27]。小麦种子电导率与 MDA 含量呈一致的变化规律,也说明了强酸引起小麦种子代谢紊乱、造成无氧呼吸上升、大量消耗贮藏物质,最终导致强酸下的抑制作用。伴随着 MDA 含量明显增加,造成生理代谢紊乱而抑制了小麦幼苗的生长^[11,14,23,27]。

本研究中,弱酸处理对小麦幼苗保护酶活性并没有显著的影响,且局部有所波动,这是受酸性条件胁迫后小麦体内过氧化产物增多而启动的一种应激机制。当幼苗体内氧化产物累积到一定水平时导致酶活性下降,pH ≤ 5.0 时,小麦幼苗体内保护酶(SOD, POD, CAT)和非保护酶(PPO, PAL)活性随酸性的增强而急剧降低,其根本原因是酸雨酸化了小麦根系周围的微环境,引起根细胞中的 pH 值变化^[28-29]。由于代谢过程中的各种酶系的活力对 pH 值变化都很敏感,所以改变的微环境会对根细胞中酶系的活力产生影响,抑制酶活性的发挥,从而降低了根系的各项生理功能。

叶绿素是植物光合作用过程中吸收光的主要色素^[14,19,29]。本试验中随着酸性的增加,小麦种子生长受抑制的程度增大,光合色素叶绿素和类胡萝卜素的合成也明显被抑制,进而二者的比值也呈现出一致的变化规律,且强酸会促进叶绿素的分解加速,从而使叶绿素含量减少,而叶绿素含量的减少程度又会直接影响植物的光合生产能力,进而抑制植物生长;弱酸处理并没有降低小麦种子叶绿素和类胡萝卜素含量,其原因可能是适度的酸性条件下能够满足小麦种子蛋白质和淀粉的水解作用供给自身的生长^[9-14,23]。

4 小 结

本研究中,pH 值模拟酸雨胁迫对小麦种子萌发和幼苗生长均产生了一定的抑制作用,随着 pH 值的降低其抑制作用逐渐增强,pH 值 5.0~6.0 处理对小麦种子萌发和幼苗生长没有显著的影响和抑制作用($P > 0.05$),表现出一定的耐酸性;pH 值 2.0 处理则严重抑制了小麦种子萌发和幼苗生长;小麦种子萌发和幼苗生长各指标随着 pH 值的降低而降低,并且对地下根系的抑制作用大于地上部分;在 pH 值低于 5.0 时,小麦种子萌发和幼苗生长严重受阻,种子萌发和幼苗生长各指标均显著低于对照($P < 0.05$);pH 值为 1.0 时,小麦种子则完全失去活性;小麦叶绿素含量、类胡萝卜素含量、保护酶(SOD, POD, CAT)和非保护酶(PPO, PAL)活性随酸性的增强呈降低趋势,而相对电导率和丙二醛(MDA)含量呈上升趋势。综合分析认为,模拟酸雨对小麦幼苗生长的影响要比种子萌发的影响更为敏感。

酸雨对植物生长乃至整个生态系统有着重要影响,酸雨导致小麦幼苗叶片生长受抑,影响根系对氮素营养的吸收和同化,使小麦利用氮素能力下降,最终导致小麦生长发育受到抑制。小麦生长环境下的土壤酸度较高,对酸沉降的缓冲性差,而酸雨对小麦

种子萌发和幼苗生长的作用除了受酸度的影响外,还取决于酸雨的氮硫比,本试验仅仅做了简单的种子萌发和幼苗生长试验,使用的模拟酸雨 H_2SO_4 和 HNO_3 的比例为 8:1,有关这两种酸不同比例下的酸雨对小麦种子萌发和幼苗生长的影响及其作用机理还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Pound K L, Lawrence G B, Passy S I. Wetlands serve as natural sources for improvement of stream ecosystem health in regions affected by acid deposition[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2720-2728.
- [2] Shen W, Ren H, Darrel Jenerette G, et al. Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 64: 242-250.
- [3] Payne R J. Testate amoeba response to acid deposition in a Scottish peatland[J]. *Aquatic Ecology*, 2010, 44(2): 373-385.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [5] Cao J, Tie X, Dabberdt W F, et al. On the potential high acid deposition in northeastern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10): 4834-4846.
- [6] Fan Y F, Hu Z Q, Liu J L. Application of ultrasonic wave technology to evaluate the corrosion depth of concrete in acid rain environment[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 129: 128-133.
- [7] Wang S, Hao J. Air quality management in China: Issues, challenges, and options[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(1): 2-13.
- [8] You C F, Xu X C. Coal combustion and its pollution control in China[J]. *Energy*, 2010, 35(11): 4467-4472.
- [9] Nelson D C, Flematti G R, Ghisalberti E L, et al. Regulation of seed germination and seedling growth by chemical signals from burning vegetation[J]. *Plant Biology*, 2012, 63: 107-130.
- [10] Ahmad I, Akhtar M J, Zahir Z A, et al. Effect of cadmium on seed germination and seedling growth of four wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *The Journal of Environmental Biology*, 2012, 44(5): 1569-1574.
- [11] 张海艳. 模拟酸雨对不同类型玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1621-1626.
- [12] 樊后保, 黄玉梓, 李燕燕, 等. 模拟酸雨对杉木种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2005, 27(6): 875-879.
- [13] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特征的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3098-3107.
- [14] 王应军, 邓仕槐, 姜静, 等. 酸雨对木芙蓉幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(3): 588-593.
- [15] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 26(3): 815-822.
- [16] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量, 土壤硝态氮含量和氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3661-3669.
- [17] Berkman P J, Skarshewski A, Lorenc M T, et al. Sequencing and assembly of low copy and genic regions of isolated *Triticum aestivum* chromosome arm 7DS [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2011, 9(7): 768-775.
- [18] 卞雅姣, 黄洁, 孙其松, 等. 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀粉含量及组分的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4623-4630.
- [19] 张健, 王鹤龄. 模拟酸雨对春小麦开花期叶片光合特性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 30(6): 94-98.
- [20] 张志良. 植物生理学试验指导[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 李小双, 彭明春, 党承林. 植物自然更新研究进展[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2081-2088.
- [22] 张会慧, 张秀丽, 李鑫, 等. NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫对桑树幼苗生长和光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 625-631.
- [23] 樊后保, 臧润国. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应[J]. *林业科学*, 2000, 36(6): 90-94.
- [24] 刘可慧, 彭少麟, 莫江明, 等. 酸沉降对森林植物影响过程和机理[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 953-960.
- [25] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特征的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3098-3107.
- [26] 韩冰, 贺超兴, 闫妍, 等. AMF 对低温胁迫下黄瓜幼苗生长和叶片抗氧化系统的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1646-1653.
- [27] 李文英, 彭智平, 杨少海, 等. 植物根际促生菌对香蕉幼苗生长及抗枯萎病效应研究[J]. *园艺学报*, 2012, 39(2): 234-242.
- [28] 聂呈荣, 黄京华. 模拟酸雨对花生种子萌芽及幼苗生长的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2003, 25(1): 34-36.
- [29] 徐向东, 孙艳, 郭晓芹, 等. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(1): 179-184.