

# V(V)、Cr(VI)单一和复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响\*

侯明\*\* 张兴龙 路畅 陈如

(桂林理工大学化学与生物工程学院, 桂林, 541004)

**摘要** 采用水培法研究了V(V)、Cr(VI)单一及复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响. 结果表明, 无论单一或复合胁迫, 随着V、Cr浓度的增加, 小麦幼苗鲜重、株高、叶绿素含量均呈先上升后下降的趋势. 当 $V \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Cr} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 小麦的鲜重、株高、叶绿素含量均高于对照, 当 $V > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Cr} > 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 则分别比对照降低0.2%—46.8%、0.8%—40.7%和2.5%—76.9%. 丙二醛含量随着V、Cr胁迫浓度的增加而增大, 与对照相比, 含量增加了7.5%—251.6%. 在V、Cr单一胁迫下, 随着金属浓度增加细胞膜透性增大, 比对照增加17.8%—59.8%, 根系活力则下降8.1%—53.0%; 复合胁迫时细胞膜透性先下降后上升, 但始终高于对照, 比对照增加了0.6%—126.2%; 根系活力呈先升高后下降的趋势, 降低6.1%—97.3%. 研究表明在低浓度范围, 复合胁迫在一定程度上可以缓解单一金属对小麦的毒害, 对小麦幼苗生长具有拮抗作用; 在高浓度范围两种金属复合胁迫对小麦幼苗的损伤和毒害作用比单一金属伤害更为严重, 表现为协同作用. 单一胁迫中Cr对小麦幼苗的毒性比V大.

**关键词** 钒, 铬, 复合胁迫, 小麦幼苗, 生理特性.

重金属是环境污染中的重要污染源, 不仅对作物造成伤害, 严重影响其产量和品质, 而且会通过食物链危害人类健康. 钒是可以侵害土壤、植物和动物整个生态系统的潜在危险化学污染物, 钒过量时可抑制植物生长, 出现矮化、失绿等症状. 随着V矿的开采、冶炼、燃煤以及V的广泛应用, 造成环境中V的含量增加, V污染对环境的影响已引起人们的关注<sup>[1-6]</sup>. 铬是环境中的有毒重金属, 尤其是六价铬毒性更大, 铬影响种子萌发、抑制植物的生物酶活性和减少光合成色素等, 作物受铬污染后会严重阻碍幼苗的发育、降低产量、严重时导致植株死亡. 印染、电镀、皮革、化工等行业排放的废水废渣致使土壤、水体和生物造成不同程度的Cr污染, 有关Cr对生态的危害已有报道<sup>[7-9]</sup>. V、Cr作为对农作物产生毒害作用的重金属污染物, 在自然环境中具共存现象, 容易形成复合污染. 目前, 金属对农作物的生长及生理影响报道较多, 重金属对小麦影响的研究有单一污染胁迫<sup>[10-18]</sup>, 两种金属的复合胁迫主要有Cu、Pb、Cd、Cr、As<sup>[19-28]</sup>等, 有关V、Cr复合污染对小麦幼苗生理特性影响鲜见报道.

本文以小麦为材料, 通过水培实验, 研究了V(V)、Cr(VI)单一和复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响, 旨在阐明V、Cr胁迫对小麦幼苗的毒害机理, 并为环境中重金属V、Cr污染的风险评价和防治提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

小麦(*Triticum aestivum*L.)种子为“山农15”, 种子由山东省农业科学院提供. 试剂为偏钒酸铵( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ )、重铬酸钾( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ).

### 1.2 幼苗培养

挑选饱满、大小一致的小麦种子, 经30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  (含少量硫酸钙) 消毒30 min之后, 均匀地播种于铺

2011年8月31日收稿.

\* 国家自然科学基金项目(41161076), 广西自然科学基金项目(2011GXNSFA018045)和广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金项目(桂科能0701k013)资助.

\*\* 通讯联系人, E-mail: glhou@glite.edu.cn

以 3 层滤纸的白瓷盘(35 cm × 25 cm)中,每盘种子的数量相当约 50 株,25 °C 自然光照培养,待种子发芽后,用 Hoagland 营养液培养,每 3 d 更换一次 Hoagland 营养液,每日补充蒸馏水使液面维持在培养皿的 1/2 高度处. 在小麦抽第 3 片真叶后,选择长势、大小一致的幼苗,进行 V、Cr 的单一和复合处理. V 处理浓度设 0、1.0、5.0、10 和 20 mg·L<sup>-1</sup> 5 个水平,Cr 处理浓度设 0、5、10、20 和 50 mg·L<sup>-1</sup> 5 个水平,共 25 个处理(表 1),每个处理 3 个重复. 用含各水平处理组合 V、Cr 的 Hoagland 营养液(pH 5.5)培养 14 d 后,分别采集小麦幼苗的茎叶和根,于 -40 °C 保存,立即进行各项生理生化指标的测定.

表 1 实验设计

Table 1 Experimental design(mg·L<sup>-1</sup>)

Cr(VI)	V(V)				
	0	1	5	10	20
0	0	1+0	5+0	10+0	20+0
5	0+5	1+5	5+5	10+5	20+5
10	0+10	1+10	5+10	10+10	20+10
20	0+20	1+20	5+20	10+20	20+20
50	0+50	1+50	5+50	10+50	20+50

### 1.3 测定方法

小麦株高和鲜重测量方法为:每个处理浓度的单次实验中均挑选 30 株长势均匀的小麦幼苗,分别测量其株高和鲜重,求其平均值,再求 3 次重复实验的平均值,得出每个处理浓度下小麦幼苗的株高和鲜重. 叶绿素含量测定采用丙酮提取法<sup>[29]</sup>;丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸分光光度法<sup>[30]</sup>;细胞膜透性(CMP)采用外渗电导率法<sup>[30]</sup>测定,用相对电导率表示,测定 MDA 和 CMP 的实验材料均选取小麦幼苗的茎叶. 根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定<sup>[29]</sup>.

### 1.4 数据处理

所有实验数据均采用平均值 ± 标准差表示,采用 DPS 数据处理系统和 Microsoft Excel 2003 对数据进行统计分析和制图.

## 2 结果与讨论

### 2.1 V、Cr 胁迫对小麦幼苗生长的影响

由图 1 可知,当 V、Cr 单独处理时,随着金属浓度的升高,小麦幼苗单株鲜重和平均株高呈先上升后下降的趋势,鲜重在 V 浓度为 5 mg·L<sup>-1</sup>,Cr 浓度为 10 mg·L<sup>-1</sup> 时达到最高,与对照相比,鲜重分别增加了 6.0% 和 5.5%,株高在 V 浓度为 5 mg·L<sup>-1</sup>,Cr 浓度 5 mg·L<sup>-1</sup> 时达最高,与对照相比,分别增加了 11.0% 和 7.9%,随后逐渐降低,V、Cr 单一胁迫最低鲜重分别降低了 2.5% 和 13.3%,株高降低了 10.6% 和 28.7%,说明低浓度金属有利于小麦幼苗的生长,高浓度时则有明显的抑制作用. V 和 Cr 复合胁迫时,当 V ≤ 5 mg·L<sup>-1</sup>,Cr ≤ 10 mg·L<sup>-1</sup>,小麦幼苗鲜重和株高均高于对照;当 V > 5 mg·L<sup>-1</sup>,Cr > 10 mg·L<sup>-1</sup>,随着浓度的升高显著下降,鲜重比对照降低 0.2%—46.8%,株高降低 0.8%—40.7%. 与单一 V、Cr 胁迫相比,V、Cr 复合胁迫处理对小麦幼苗鲜重和株高的影响大得多,在低浓度范围(V ≤ 5 mg·L<sup>-1</sup>,Cr ≤ 10 mg·L<sup>-1</sup>),复合胁迫对小麦生长的促进作用明显高于单一胁迫,当 Cr 为 10 mg·L<sup>-1</sup> 时这种促进作用减弱,这可能是在低浓度下两种微量元素共同促进了小麦的生长,但随着浓度增加,两者可能产生了某种竞争机制,使得促进作用减弱;在金属的高浓度范围,复合胁迫下小麦鲜重和株高显著低于单一胁迫,并且复合胁迫降低量明显大于单一胁迫降低量之和,说明高浓度复合胁迫会严重抑制小麦的生长,两种金属的协同作用增强了单一胁迫对小麦生长的抑制.

### 2.2 V、Cr 胁迫对小麦幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,是衡量叶片衰老的重要生理指标,各种环境胁迫均可导致叶绿素的破坏与降解. 由图 2 可知,V、Cr 单一胁迫时,低浓度处理可促进叶绿素的合成,随着金属浓度的增大叶绿素含量均超过对照,在 V 为 1 mg·L<sup>-1</sup>,Cr 为 5 mg·L<sup>-1</sup> 时达到最大值,以后随着 V、Cr 浓度加

大叶绿素含量逐渐下降. 当 V 浓度为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 与对照相比, 叶绿素分别降低 21.9% (a)、3.8% (b) 和 15.3% (a+b) 和 19.8% (a/b). Cr 浓度为  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 叶绿素分别降低了 29.3% (a)、9.2% (b) 和 22.5% (a+b) 和 22.2% (a/b), 可见 Cr 对小麦幼苗的毒害比 V 要大. V、Cr 复合胁迫时, 当  $\text{Cr} \leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  叶绿素含量变化趋势与 V 单独胁迫相似, 当 Cr 浓度  $> 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 复合胁迫对植物的光合作用影响加大, 叶绿素含量显著下降, 尤其在高浓度 V、Cr 复合污染时叶绿素含量显著降低, 如当  $\text{V} > 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{Cr} > 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 叶绿素含量比对照降低 2.5%—76.9%. 在 V、Cr 浓度分别为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  复合胁迫下, 叶绿素含量分别下降 76.9% (a)、60.0% (b)、71.2% (a+b) 和 42.3% (a/b). 可见, V、Cr 复合胁迫明显增强了单一胁迫对幼苗的毒害作用, 两者具有明显的协同放大效应. 这与前面两种金属对小麦的株高及鲜重的影响是一致的.

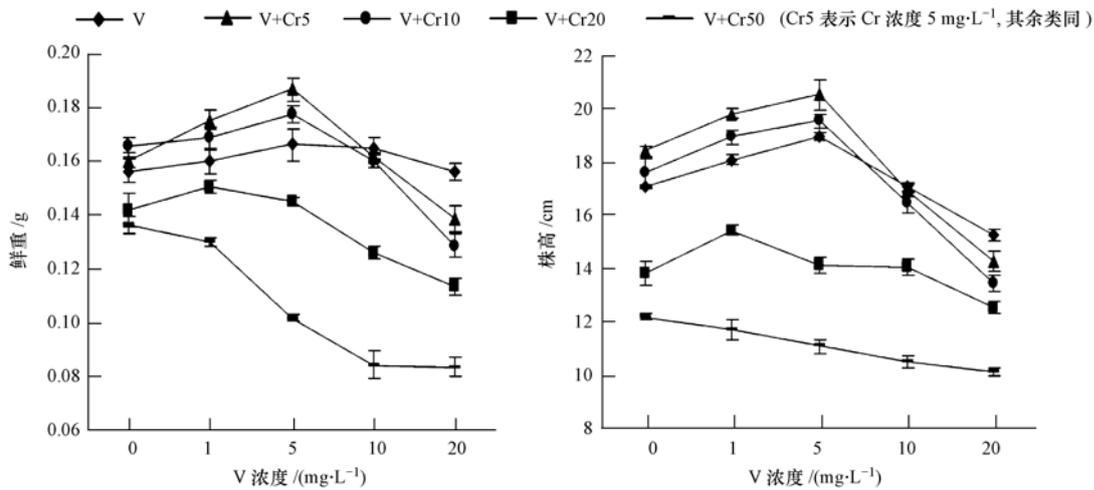


图 1 V、Cr 胁迫对小麦鲜重和株高的影响

Fig. 1 Effect of V, Cr stress on the fresh weight and plant height of wheat seedling

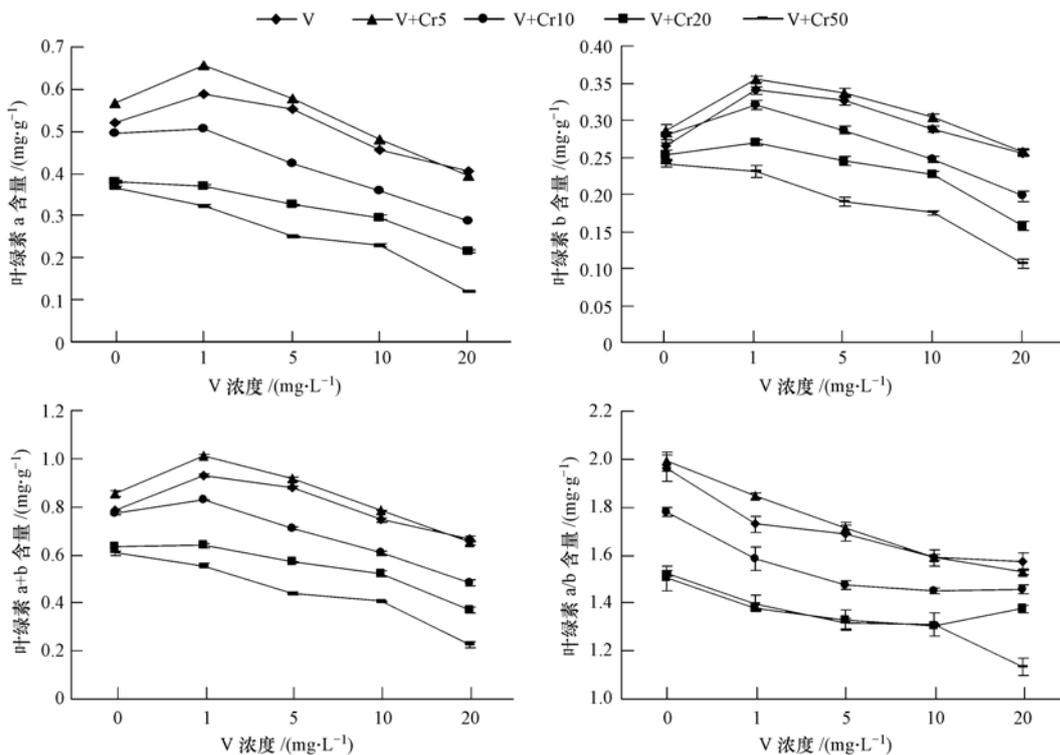


图 2 V、Cr 胁迫对小麦幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of V, Cr stress on Chlorophyll content of wheat seedling

无论 V、Cr 单一还是复合胁迫,随着金属处理浓度的增大,小麦幼苗叶绿素含量均呈先上升后下降趋势,并且高浓度金属处理使叶绿素含量显著降低,复合胁迫的影响更为显著. Stobart<sup>[31]</sup> 等研究认为重金属污染影响叶绿素含量的原因为:一是重金属抑制叶片中叶绿素酸酯还原酶的合成,二是影响了氨基- $\gamma$ -酮戊酸的合成,这两种物质是植物合成叶绿素所必需的酶和原料,从而造成叶绿素含量下降. 本实验表明,小麦幼苗受到低浓度重金属刺激作用,促进叶绿素的合成,使叶绿素含量呈上升趋势,这与“低浓度金属短时间内可以促进作物生长”的研究结果相似. 可能是由于小麦自身的抗性机制起作用,一方面小麦幼苗细胞壁中的果胶质提供大量的离子结合位点结合重金属离子,阻止过多的金属离子进入细胞;另一方面当细胞壁上的结合位点饱和,进入细胞的有毒金属离子会被细胞内的金属结合蛋白结合(如:金属硫蛋白和植物螯合肽结合)从而解除了重金属离子的毒害. 当胁迫浓度加大,超量重金属可能直接破坏解毒物质,从而抑制叶绿素前体的合成,并导致叶绿素分解,使叶绿素含量降低<sup>[24]</sup>. 鲁先文等<sup>[32]</sup> 研究铬对小麦叶绿素的影响也发现,低浓度铬( $<5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )能促进小麦叶绿素的合成,高浓度铬则产生毒害. 本研究结果(图 2)还可发现,随金属胁迫浓度的增加,叶绿素 a 含量下降得比叶绿素 b 快,使得叶绿素 a/b 的比值显著下降,从而说明叶绿素 a 对逆境反应要比叶绿素 b 更敏感,与叶绿素总量相比,叶绿素 a/b 值是衡量叶片感受重金属的相对敏感的生理指标之一,这与鲁先文等<sup>[32]</sup> 的实验结果相一致.

### 2.3 V、Cr 胁迫对小麦幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛(MDA)是植物体内膜脂过氧化的产物,含量越高表明细胞膜脂过氧化程度越高,细胞膜结构完整性越差,重金属胁迫可诱发生物代谢过程产生自由基,对植物细胞膜具有伤害作用,进而导致膜脂过氧化产物 MDA 含量明显增加. 因此 MDA 含量的变化可作为检测逆境条件下植物膜系统受伤害程度的指标<sup>[10,19]</sup>. 不同处理对小麦幼苗 MDA 含量的影响如图 3,随着 V、Cr 单一及复合处理浓度的升高,MDA 含量均呈上升趋势,表现出明显的剂量-效应关系. 在 V 处理中加入 Cr 进行复合胁迫,随着 Cr 浓度的增加,MDA 含量上升,表明 V、Cr 复合处理均导致小麦叶内 MDA 含量明显高于 V 单独处理,表现为 MDA 含量升高的放大效应,如当 V 为  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的单一胁迫时,MDA 比对照增加 7.5%. 当 V、Cr 处理浓度分别为  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,与对照相比,V、Cr 单一胁迫 MDA 含量分别增加了 29.3% 和 44.9%,复合胁迫增加了 94.2%;当 V、Cr 处理浓度分别为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,V、Cr 单一胁迫 MDA 含量分别增加了 104.2% 和 64.4%,复合胁迫增加了 251.6%,可见 V、Cr 复合胁迫下 MDA 含量显著高于 V、Cr 单独作用之和,说明两种金属具有明显的协同效应,这与刘建新<sup>[33]</sup> 等研究结果“Cd、Zn 复合胁迫对玉米 MDA 含量影响的交互作用主要表现为协同效应”的结论相同. 实验中高浓度复合污染对小麦幼苗的细胞质膜的损伤程度更大. 当小麦幼苗受到 V、Cr 复合胁迫,MDA 含量显著增大,显示多金属的复合氧化胁迫作用较强,膜脂过氧化水平明显提高,细胞内有害物质不断积累,膜系统的稳定性下降,对细胞膜系统伤害的程度超过了单独 V 的作用. 单一金属处理时,Cr 对 MDA 含量的影响比 V 要大.

### 2.4 V、Cr 胁迫对小麦幼苗细胞膜透性(CMP)的影响

植物在逆境中,其细胞膜的选择透性机能受损,透性增大,细胞内一些可溶性物质外渗,从而破坏了细胞内酶及代谢作用,所以,细胞质膜透性变化是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标<sup>[28]</sup>. 从图 4 可知,随着 V、Cr 单一胁迫浓度的升高,小麦幼苗细胞膜透性渐递增比对照增加了 17.8%—59.8%,而 V、Cr 复合胁迫则呈现先下降后上升的趋势,张义贤<sup>[34]</sup> 研究 4 种重金属对大麦幼苗细胞膜透性的影响时也得到类似结果. 与 V 单一处理相比较,Cr $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的复合胁迫时小麦幼苗细胞膜透性有不同程度的减小,但始终高于对照,表明低浓度的 Cr 可以适当缓解 V 对小麦幼苗细胞膜的损伤,其原因可能是进入植物的 V、Cr 竞争细胞膜上生物大分子的活性点位,减弱了某一重金属对膜系统的毒害效应<sup>[35]</sup>,从而导致小麦膜脂过氧化的减弱,使低浓度下两者的复合处理存在一定拮抗作用;但随着胁迫浓度的加大,这种缓解作用消失,其原因可能是随着胁迫浓度增大,金属离子浓度超过了小麦的耐受能力,大量的 V、Cr 离子与细胞膜蛋白的—SH 或磷脂分子层的磷脂类物质反应,造成膜蛋白的磷脂结构改变,导致细胞膜透性增大,细胞内一些可溶物质外渗,电导率增大. 由图 4 可知,当 Cr  $> 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,细胞膜透性明显高于 V 单一胁迫,当 V 浓度为  $10.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,Cr 浓度分别为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,与对照相比,V 单一胁迫下细胞膜透性增加了 49.1%,复合胁迫增加了 65.0% 和 80.8%;当 V 浓度为  $20.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,V 单一胁迫下细胞膜透性增加 59.8%,复合胁迫增加了 83.8% 和 126.2%,说明高浓度的

Cr 和 V 的复合胁迫对小麦幼苗细胞膜系统伤害的程度明显超过了单独胁迫,两者对细胞膜的损伤产生协同作用,影响了细胞的正常代谢.由此可见,V、Cr 复合胁迫下小麦幼苗细胞膜有一定的保护作用,但是这种保护作用与 V、Cr 的胁迫程度有关,随着胁迫程度的加重,保护作用消失,发生的协同作用使得质膜透性更大.

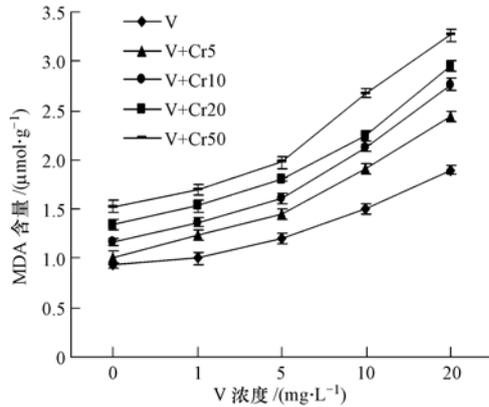


图 3 V、Cr 胁迫对小麦幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effect of V, Cr stress on MDA content of wheat seedling

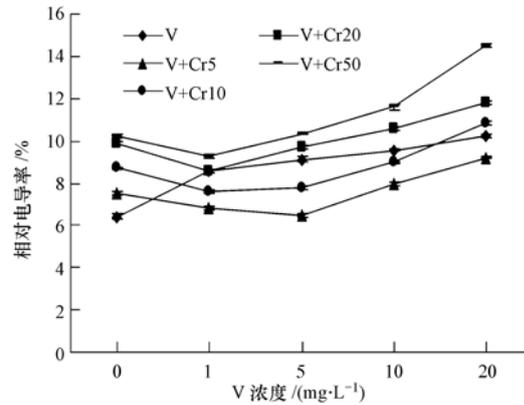


图 4 V、Cr 胁迫对小麦幼苗细胞膜透性的影响

Fig. 4 Effect of V, Cr stress on cell membrane permeability of wheat seedling

## 2.5 V、Cr 胁迫对小麦幼苗根系活力的影响

根系活力很容易受到重金属的影响,根系活力降低表明根中的能量转化和物质转化过程受阻,这样就会干扰根的代谢,最终使植物生长受阻.实验结果表明(图 5),单一胁迫下, $V \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对小麦根活力有所促进,与对照相比增加了 2.52%,随着 V 浓度增大根系活力受到抑制;而不同浓度水平 Cr 的处理均对小麦根活力产生抑制,并且随 Cr 浓度的升高抑制作用加剧.复合胁迫下,当 V 为  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Cr} \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,根系活力相比单一 Cr 胁迫略有上升,其上升幅度随 Cr 浓度的升高而下降,但均小于单一 V 胁迫,说明低浓度的 V ( $V \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )对 Cr 的毒害有一定的解毒作用,这可能是由于进入细胞内的 V 取代了 Cr 在细胞内活性物质上的结合位点,改变了相应活性蛋白或酶的活性,产生解毒作用,这也是一种竞争拮抗效应;当  $V > 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,无论 Cr 的浓度水平如何,小麦根系活力均呈明显下降趋势,且复合胁迫对根活力的抑制幅度总是大于单一胁迫.当 V、Cr 处理浓度分别为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与对照相比,V、Cr 单一胁迫根系活力分别降低 8.1% 和 22.5%,复合胁迫降低 45.6%;当 V、Cr 处理浓度分别为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与对照相比,V、Cr 单一胁迫根系活力分别降低 53.0% 和 42.7%,复合胁迫降低 97.3%,说明 V、Cr 复合胁迫下的小麦幼苗根系活力低于单一胁迫,并显著低于 V、Cr 单独作用之和,两种金属具有明显的协同效应<sup>[25]</sup>,而高浓度的重金属对小麦幼苗的根系活力有很强的抑制和毒害作用.

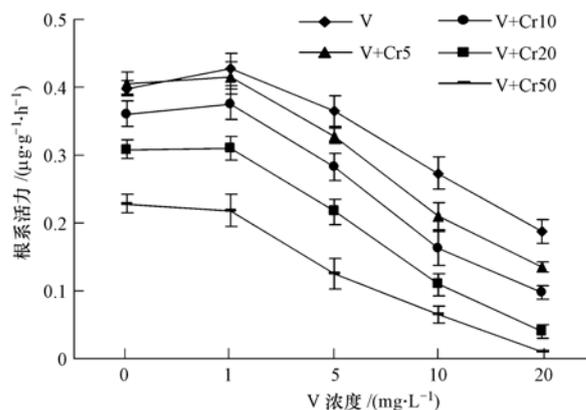


图 5 V、Cr 胁迫对小麦幼苗根系活力的影响

Fig. 5 Effect of V, Cr stress on root vires coefficient of wheat seedling

### 3 结论

(1)随着 V、Cr 浓度变化,小麦幼苗的鲜重、株高和叶绿素含量均呈先上升后下降的趋势.在低浓度范围( $V \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Cr} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )复合胁迫含量高于单一胁迫,高浓度范围( $V > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Cr} > 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )复合胁迫下含量显著低于单一胁迫,说明低浓度 V、Cr 共存时能激发植物的生理活性,促进小麦幼苗的生长和叶绿素的合成,高浓度 V、Cr 胁迫则会对小麦幼苗产生毒害,严重破坏植物的光合作用,抑制了小麦幼苗的生长,且复合胁迫毒害作用大于单一胁迫作用之和.

(2)V、Cr 胁迫使小麦幼苗的丙二醛(MDA)明显升高,呈现显著的剂量-效应关系,尤其复合胁迫的变化更为显著.V、Cr 复合胁迫下 MDA 含量显著高于单独作用之和,两种金属具有明显的协同效应.

(3)V、Cr 单一胁迫使小麦幼苗细胞膜透性逐渐递增,V、Cr 复合胁迫呈现先下降后上升的变化趋势,但始终高于对照.表明低浓度下两种金属存在一定的拮抗作用,减弱了单一金属对细胞膜的损害,而高浓度的 V、Cr 复合胁迫对细胞膜系统伤害程度超过了单一金属胁迫,存在显著的协同效应, $20.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 V 和  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cr 的协同作用更为明显,幼苗植株质膜透性明显增大,植物生长受到抑制.膜透性变化与 MDA 含量变化规律相似,表明 V、Cr 两种金属对小麦幼苗的毒害主要是对小麦幼苗细胞膜的损害.

(4)V、Cr 胁迫使小麦幼苗的根系活力降低,其剂量效应关系明显,两种金属的复合处理强化了彼此的胁迫效应,严重抑制了根系活力,具有显著的协同作用.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Weg W. Salinity dependence of vanadium toxicity against the Brackish water hydroid[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 48(1): 18-26
- [ 2 ] Wang J F, Liu Z. Effect of vanadium on the growth of soybean seedlings[J]. *Plant and Soil*, 1999, 216: 47-51
- [ 3 ] Panichev N, Mandiwana K, Moema D, et al. Distribution of vanadium(V) species between soil and plants in the vicinity of vanadium mine[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006. A137: 649-653
- [ 4 ] 胡莹,黄益宗,朱永官,等. 钒对水稻生长的影响-溶液培养研究[J]. *环境化学*, 2003, 22(5): 507-510
- [ 5 ] 侯明,黄以峰,何剑亮,等. 蔬菜根际环境钒的形态变化及植物有效性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7): 1353-1357
- [ 6 ] 郭零,侯明. 钒胁迫对芥菜生理特性的影响[J]. *桂林理工大学学报*, 2010, 30(4): 617-620
- [ 7 ] Dhira B, Sharmila P, Saradhi P P, et al. Physiological and antioxidant responses of *Sabina natans* exposed to chromium-rich wastewater [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72: 1790-1797
- [ 8 ] Perumal S, Alagappan C, Kaliyaperumal S G, et al. Chromium stress in paddy: (i) Nutrient status of paddy under chromium stress; (ii) Phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds[J]. *C. R. Biologies*, 2010, 333: 597-607
- [ 9 ] 陈桂葵,杨杰峰,黎华寿,等. 高氯酸盐和铬复合污染对水稻生理特性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4144-4153
- [ 10 ] Lin R Z, Wang X R, Luo Y, et al. Effects of soil cadmium on growth, oxidative stress and antioxidant system in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2007, 69: 89-98
- [ 11 ] Yang Y L, Zhang Y Y, Wei X L, et al. Comparative antioxidative responses and proline metabolism in two wheat cultivars under short term lead stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74: 733-740
- [ 12 ] Ewa G, Maria S. Differential effect of equal copper, cadmium and nickel concentration on biochemical reactions in wheat seedlings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73: 996-1003
- [ 13 ] Ge C L, Ding Y, Wang Z G, et al. Responses of wheat seedlings to cadmium, mercury and trichlorobenzene stresses[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 806-813
- [ 14 ] Li C X, Feng S L, Shao Y, et al. Effects of arsenic on seed germination and physiological activities of wheat seedlings[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 725-732
- [ 15 ] 王美娥,周启星. 重金属 Cd、Cu 对小麦 (*Triticum aestivum*) 幼苗生理生化过程的影响及其毒性机理研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(12): 2033-2038
- [ 16 ] 庞欣,王东红,彭安. 汞胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. *环境化学*, 2001, 20(4): 351-355
- [ 17 ] 刘全吉,孙学成,胡承孝,等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 854-859
- [ 18 ] 唐加红,杨玉兰,苑中原,等. 镉对干旱胁迫下小麦幼苗抗氧化系统的影响[J]. *稀土*, 2011, 32(1): 12-16
- [ 19 ] Shafaqat Ali, Pu Bai, Zeng F R, et al. The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Altolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 70: 185-191

- [20] Liu X L, Zhang S Z, Shan X Q, et al. Combined toxicity of cadmium and arsenate to wheat seedlings and plant uptake and antioxidative enzyme responses to cadmium and arsenate co-contamination[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68: 305-313
- [21] Pang X, Wang D H, Xing X Y. Effect of  $\text{La}^{3+}$  on the activities of antioxidant enzymes in wheat seedlings under lead stress in solution culture[J]. *Chemosphere*, 2002, 47:1033-1039
- [22] Nurcan Koleli, Selim Eker, Ismail Cakmak. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131:453-459
- [23] 翁南燕,周东美,汪鹏,等. 铜镉复合胁迫下硫素对小麦幼苗铜镉吸收、亚细胞分布及毒性的影响[J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(1): 87-93
- [24] 徐澜,杨锦忠,安伟,等. Cr、Pb 单一及其复合胁迫对小麦生理生化的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(6):119-126
- [25] 杜天庆,杨锦忠,郝建平,等. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(8):4475-4482
- [26] 李春喜,鲁旭阳,邵云,等. As、Zn 复合污染对小麦幼苗生长及生理生化反应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1):43-48
- [27] 庞欣,王东红,彭安. 镉对铅胁迫下小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. *环境化学*, 2002, 21(4):318-323
- [28] 王友保,刘登义. Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5):773-776
- [29] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版) [M]. 北京:高等教育出版社, 2003:67-70,39-41
- [30] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[J]. 北京:高等教育出版社, 2000:167-169,258-261
- [31] Stobart A K, Griffiths W T, Ameen-Bukharil, et al. The effect of  $\text{Cd}^{2+}$  on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley[J]. *Plant Physiol.* 1985, 63:293-298
- [32] 鲁先文,宋小龙,王三应,等. 重金属铬对小麦叶绿素合成的影响[J]. *农业与技术*, 2007, 27(4):61-63
- [33] 刘建新,赵国林,王毅民. Cd、Zn 复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 54-58
- [34] 张义贤,张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4):857-860
- [35] 王志香,周光益,吴仲民,等. 植物重金属毒害及其抗性机理研究进展[J]. *河南林业科技*, 2007, 27(2):26-28

## Effects of V, Cr single and combined stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedling

HOU Ming\* ZHANG Xinglong LU Chang CHEN Ru

(College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin, 541004, China)

### ABSTRACT

Effects of V, Cr single and combined stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedling were studied by water culture. The results showed that with the increase of V, Cr concentrations, fresh weight, plant height and chlorophyll content of wheat seedling increased first and decreased afterwards. At low concentrations ( $V \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Cr} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), fresh weight, plant height and chlorophyll content were higher than those of the control, while at high concentrations ( $V > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Cr} > 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), they decreased by 0.2%—46.8%, 0.8%—40.7% and 2.5%—76.9% respectively. The content of malondialdehyde (MDA) increased with increasing stress by 7.5%—251.6% respectively compared to the control. In V, Cr single treatment condition, the cell membrane permeability (CMP) increased and the activities of root subsystems decreased by 17.8%—59.8% and 8.1%—53.0% respectively with increasing stress, compared to the control. In V, Cr combined treatment condition, the cell membrane permeability decreased first and increased afterwards, and the activities of root subsystems increased first and decreased afterwards with increasing stress. The permeability increased by 0.6%—126.2% and the activities decreased by 6.1%—97.3%, compared to the control. The low concentration of V, Cr combined stress had antagonistic effect on the growth of wheat seedling, while, the high concentration of V, Cr had synergistic action. Toxicity and injury of V, Cr combined stress were higher than that of individual V, Cr treatment. The toxic harm of Cr stress was stronger than V stress.

**Keywords:** vanadium, chromium, combined stress, wheat seedling, physiological characteristics.