

镉和 UV-B 辐射增强复合胁迫对冬小麦幼苗生长和生理的影响

何永美, 湛方栋, 徐渭渭, 高召华, 李元, 祖艳群*

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要:通过种子萌发和盆栽试验研究了镉(Cd)与 UV-B 辐射增强单独和复合胁迫对冬小麦幼苗生长和生理的影响,结果表明:(1)Cd 与 UV-B 单独或复合胁迫对冬小麦种子萌发率没有显著影响,但明显抑制冬小麦幼苗的生长,复合胁迫的抑制效应明显大于单一胁迫;(2)UV-B 辐射增强导致冬小麦叶片的叶绿素含量显著或极显著下降,类黄酮含量极显著增加,Cd 胁迫没有显著影响,且复合 Cd 胁迫后不加刷 UV-B 辐射对冬小麦叶片叶绿素和类黄酮含量的影响;(3)Cd 与 UV-B 单独胁迫均导致冬小麦叶片的细胞膜透性极显著增大,Cd 胁迫导致冬小麦叶片的 MDA 含量显著增加,且 UV-B 辐射加剧 Cd 胁迫对冬小麦叶片 MDA 含量的影响;(4)Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦植株地上部的 Cd 含量显著高于 Cd 单独胁迫。可见,Cd 和 UV-B 辐射增强复合胁迫对冬小麦生长和生理的影响存在协同效应。

关键词:镉;UV-B 辐射增强;生长;叶绿素;类黄酮;丙二醛

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)03-0450-06 **doi:**10.11654/jaes.2013.03.007

Combined Effects of Cd and Enhanced UV-B Radiation on Growth and Physiology of Winter Wheat Seedling

HE Yong-mei, ZHAN Fang-dong, XU Wei-wei, GAO Zhao-hua, LI Yuan, ZU Yan-qun*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: The effects of the individual and combined cadmium (Cd), enhanced UV-B radiation on the growth and physiology of winter wheat were studied with seeds germination and pot experiments. Results showed that: (1) No significant effect of the Cd and enhanced UV-B radiation individual or combined stress on seeds germination rate of winter wheat was observed. The growth of winter wheat seedlings was inhibited significantly. The inhibitory effects with the combined stress were significantly greater than with a single stress. (2) The chlorophyll contents in winter wheat leaves decreased significantly and the flavonoid contents increased significantly under enhanced UV-B radiation. The effects of Cd stress were not obvious. The effects of enhanced UV-B radiation on chlorophyll and flavonoid contents did not intensify with the combined Cd stress. (3) The cell membrane permeability of winter wheat leaves increased significantly with individual Cd or enhanced UV-B radiation stresses. The MDA contents increased significantly with Cd stress. The effects of Cd stress on the MDA contents in winter wheat leaves were promoted by the combined enhanced UV-B radiation. (4) The contents of Cd in winter wheat shoots under Cd and enhanced UV-B radiation combined stresses were significantly higher than that under Cd stress. These results indicate that there were additive effects of Cd and enhanced UV-B radiation combined stress on the growth and physiology of winter wheat.

Keywords: cadmium; enhanced UV-B radiation; growth; chlorophyll; flavonoid; MDA

土壤重金属污染和地表 UV-B 辐射增强都是全球性的重大环境问题。由于有色金属矿产开采与冶炼、

污水灌溉、污泥农用等人类的活动,导致镉(Cd)大量扩散到环境中,在金属矿区、冶炼厂周边、污灌区等区域的表层土壤中累积,形成严重的农田土壤 Cd 污染^[1]。在 Cd 污染农田上,大量的 Cd 进入作物后,诱导作物体内产生自由基,引起细胞过氧化损伤,抑制酶活性,破坏光合色素,影响光合作用等,对作物的生长和生理产生明显的毒害效应^[2-3]。地表 UV-B 辐射增强使作物

收稿日期:2013-01-18

基金项目:国家自然科学基金(41205113;31060083)

作者简介:何永美(1980—),女,云南大姚人,在读博士,主要从事紫外辐射生态研究。E-mail:heyongmei06@126.com

*通信作者:祖艳群 E-mail:zuyanqun@yahoo.com.cn

叶片中产生了自由基和形成伤害作用,对农作物的生长发育、生理代谢有显著影响^[4]。

在许多地区,Cd污染和UV-B辐射增强的问题同时存在,二者对大豆^[5-8]、小麦^[9]、油菜^[10-11]、黄瓜^[12]、豌豆^[13]、菠菜^[14]等农作物的复合胁迫效应受到研究人员的关注。但目前研究涉及的农作物种类较少,仍然有许多重要的农作物对Cd污染和UV-B辐射增强复合胁迫的生理响应尚不清楚。为此,研究Cd污染和UV-B辐射增强单独和复合胁迫对冬小麦种子萌发、幼苗生长、光合色素含量、氧化伤害等方面的影响,探讨Cd污染和UV-B辐射增强复合胁迫影响农作物生理的作用与机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽土壤为云南农业大学后山农场土壤,土壤pH值为7.24,有机质含量为13.7 g·kg⁻¹,全氮、全磷和全钾含量分别为2.62、1.63、4.35 g·kg⁻¹,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为56.61、27.6、211.9 mg·kg⁻¹,镉含量为0.45 mg·kg⁻¹。

供试农作物材料为冬小麦,种子用10%的次氯酸钠溶液消毒10 min,经无菌水漂洗4次后,用无菌滤纸将水吸干。

1.2 试验设计与处理

在2010年11—12月,开展冬小麦种子萌发和盆栽试验,设对照(CK)、Cd单独胁迫(Cd)、UV-B辐射单独胁迫(UV-B)、Cd和UV-B辐射复合胁迫(Cd+UV-B)处理,每个处理3个重复。

采用40 W UV-B灯管(波长280~320 nm)对冬小麦种子和幼苗植株进行增强UV-B辐射处理,并用UV-B辐射测定仪测定辐射强度;辐射量为5.0 kJ·m⁻²·d⁻¹,每天辐照8 h(上午9:00至下午17:00)。

在室温条件下,参照《农作物种子检验规程》有关发芽试验的要求^[15],选用直径15 cm的培养皿,放置6层灭菌的滤纸,CK处理和Cd处理分别采用无菌水和Cd²⁺浓度为20 mg·L⁻¹的Cd溶液(CdCl₂·2.5H₂O)润湿滤纸,并在试验过程中添加溶液,以保证培养皿内的滤纸保持湿润。

采用污灌的方法模拟Cd污染,施加的重金属为分析纯的CdCl₂·2.5H₂O,配制100 mg·L⁻¹的母液,取6 L以液态加入到30 kg土壤中,充分混匀,平衡2周后用于盆栽试验,污灌土壤Cd含量为18.8 mg·kg⁻¹。每个花盆装入5.0 kg的土壤,将长势均匀的无污染冬小麦

幼苗种植于准备好的花盆内。根据土壤水分状态,浇灌蒸馏水保证土壤湿润,不施用化肥,常规管理。

1.3 样品采集与指标测定

在种子培养4 d后,选取60颗测定冬小麦种子的发芽率,7 d后选取30株幼苗测定冬小麦萌发幼苗的根长和芽长。

在种植30 d后,选取植株倒二叶,测定叶片的长度和宽度,计算叶面积。以80%丙酮溶液为提取液,采用分光光度法(663、645 nm)测定叶片叶绿素含量。采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定叶片丙二醛(MDA)含量,电导仪法测定溶液的电导率,以反映叶片的细胞膜透性^[16]。采用酸化甲醇(甲醇:水:盐酸=79:20:1)提取,分光光度法(305 nm)测定叶片类黄酮含量^[17]。收获时将冬小麦地上和地下部分分开,先用自来水冲洗干净,然后用蒸馏水漂洗干净,烘干(75℃,72 h)。由于地下部难于全部获取,试验仅称取了地上部的生物量。称取0.5 g磨碎的植株干样,硝酸—高氯酸湿法消解,过滤,将滤液定容到50 mL,采用火焰原子吸收分光光度法测定植株Cd的含量^[18]。

1.4 数据处理与统计分析

实验数据运用Microsoft Excel对数据进行处理,计算平均值和标准误差。用DPS软件进行统计分析,用LSD法检验样本平均数的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 镉和紫外辐射增强对冬小麦种子萌发的影响

研究结果(表1)显示,Cd与UV-B单独胁迫或复合胁迫均对冬小麦种子萌发没有明显影响,均导致冬小麦种子萌发的芽长和根长极显著下降($P<0.01$)。Cd与UV-B单独胁迫冬小麦的芽长分别下降了43.9%和59.7%,根长分别下降了65.5%和35.5%。Cd+UV-B胁迫处理冬小麦的芽长下降了73.5%,并极显著小于Cd与UV-B单独胁迫处理($P<0.01$);根长下降了72.0%,极显著小于UV-B单独胁迫处理($P<0.01$)。可见,Cd+UV-B复合胁迫处理对冬小麦芽长和根长的抑制作用明显大于单一胁迫处理。

2.2 镉和紫外辐射增强对冬小麦幼苗生长的影响

Cd与UV-B单独或复合胁迫均导致冬小麦幼苗的株高、叶面积和地上部生物量极显著下降($P<0.01$)。Cd与UV-B单独胁迫冬小麦的株高分别下降了25.6%和38.6%,叶面积分别下降了30.5%和50.9%,地上部生物量分别下降了20.5%和14.7%。Cd+UV-B复合胁迫处理冬小麦的株高下降了

表 1 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦种子的萌发情况
Table 1 Germination of winter wheat seeds under Cd and enhanced UV-B radiation stress

处理	发芽率/%	芽长/cm	根长/cm
CK	96.0±2.0A	7.16±0.91A	5.86±1.01A
Cd	97.3±1.2A	3.96±0.53B	2.03±0.35C
UV-B	95.3±4.2A	2.85±0.71C	3.78±0.62B
Cd+UV-B	95.3±3.1A	1.87±0.85D	1.64±0.57C

注:表中处理间标注的不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: Different capital letters above the table indicate significant differences at $P<0.01$ level, the same below.

48.2%,并极显著小于 Cd 单独胁迫处理($P<0.01$);叶面积下降了 53.0%;地上部生物量下降了 29.3%,极显著小于 UV-B 单独胁迫处理 ($P<0.01$)。可见,Cd+UV-B 复合胁迫处理对冬小麦生长的抑制作用明显大于单一 Cd 或 UV-B 胁迫处理(表 2)。

表 2 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦的生长情况

Table 2 Growth of winter wheat seedlings under Cd and enhanced UV-B radiation stress

处理	株高/cm	叶面积/cm ²	地上部生物量/mg·株 ⁻¹
CK	34.6±4.8A	13.1±4.2A	113.8±9.7A
Cd	25.7±4.0B	9.1±3.1B	90.4±6.0BC
UV-B	21.2±3.7BC	6.4±1.9B	97.0±5.9B
Cd+UV-B	17.9±2.1C	6.1±1.2B	80.5±12.7C

2.3 镉和紫外辐射增强对冬小麦幼苗生理的影响

Cd 单独胁迫使冬小麦幼苗叶片的叶绿素 a 和 b 含量有所下降,但均未达到显著差异水平。UV-B 单独或 Cd+UV-B 复合胁迫均导致冬小麦幼苗叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量显著下降($P<0.05$),但

UV-B 单独与 Cd+UV-B 复合胁迫处理间没有显著差异(图 1)。

Cd 单独胁迫对冬小麦幼苗叶片的类黄酮含量没有显著影响。UV-B 单独或 Cd+UV-B 复合胁迫均导致冬小麦幼苗叶片的类黄酮含量显著($P<0.05$)增加,分别增加了 69.7%和 87.0%。UV-B 单独和 Cd+UV-B 复合胁迫处理间没有显著差异(图 2)。

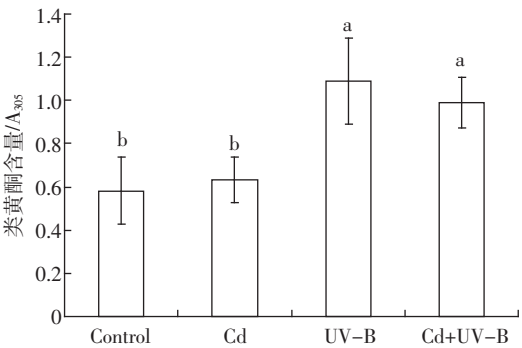
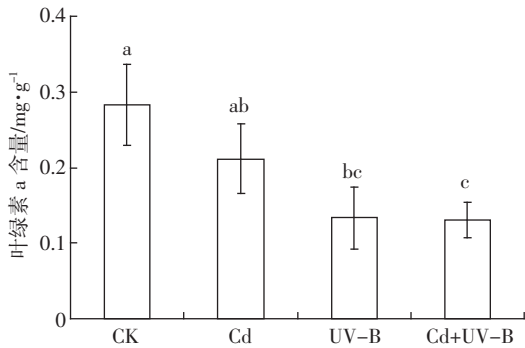


图 2 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦叶片类黄酮的含量

Figure 2 Flavonoids contents in the leaves of winter wheat under Cd and enhanced UV-B radiation stress

Cd 与 UV-B 单独或复合胁迫均导致冬小麦幼苗叶片的细胞膜透性极显著($P<0.01$)增大。Cd+UV-B 复合、Cd 和 UV-B 单独胁迫冬小麦幼苗叶片的细胞膜透性分别比对照增加了 99.3%、82.8%和 54.5%,其中,Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦幼苗叶片的细胞膜透性极显著($P<0.01$)高于 UV-B 单独胁迫处理(图 3)。

UV-B 单独胁迫导致冬小麦幼苗叶片的 MDA 含量增加,但没有达到显著差异水平。Cd 单独和 Cd+UV-B 复合胁迫均导致冬小麦幼苗叶片的 MDA 含量显著($P<0.05$)增加,分别增加了 1.99 和 2.92 倍,而且 Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦幼苗叶片的 MDA 含量显

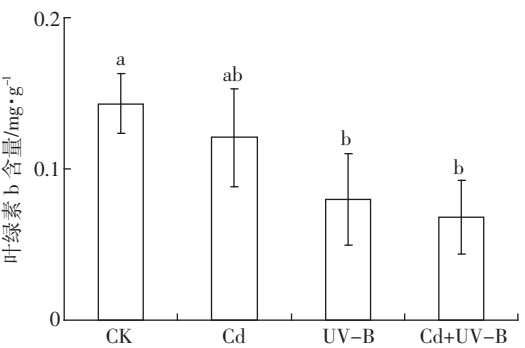


图中处理间标注的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Different letters above the columns indicate significant differences at $P<0.05$ level, the same below

图 1 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦叶片叶绿素的含量

Figure 1 Chlorophyll contents in the leaves of winter wheat under Cd and enhanced UV-B radiation stress



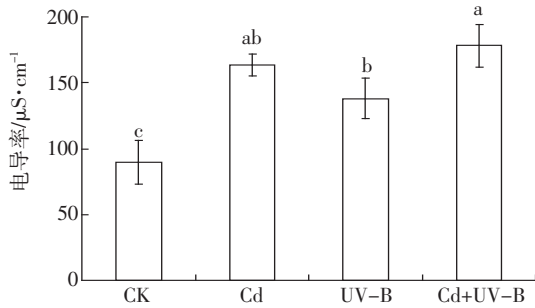


图 3 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦叶片渗漏液的电导率
Figure 3 Leachate conductivity of winter wheat leaves under Cd and enhanced UV-B radiation stress

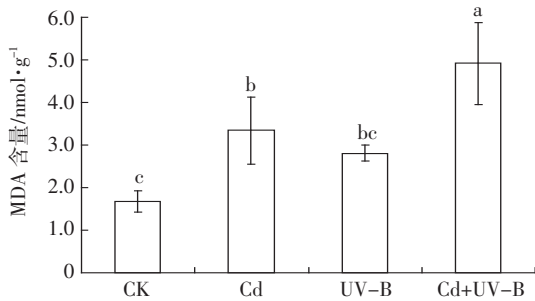


图 4 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦叶片丙二醛的含量
Figure 4 MDA contents in the leaves of winter wheat under Cd and enhanced UV-B radiation stress

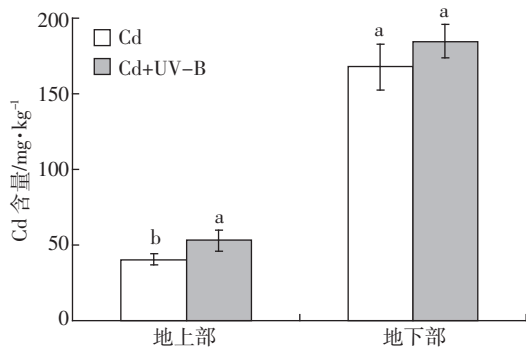


图 5 镉和紫外辐射增强处理下冬小麦植株 Cd 的含量
Figure 5 Cd contents in the leaves of winter wheat under Cd and enhanced UV-B radiation stress

著大于 Cd 单独胁迫(图 4)。

2.4 镉和紫外辐射增强对冬小麦幼苗镉累积的影响

研究结果(图 5)显示,Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦植株地上部的 Cd 含量显著高于 Cd 单独胁迫 ($P < 0.05$),但地下部镉含量无显著差异。

3 讨论

3.1 重金属污染和紫外辐射增强复合胁迫对植物生长的影响

相对于单独胁迫,重金属或 UV-B 复合胁迫导致

大豆地上部和根的生长下降,节间减少,株高降低,生物量降低的效应更明显^[5-6,19-20];黄瓜的叶片数、叶面积、株高、生物量和产量下降的程度更大^[12];菠菜^[14]、小麦^[9]、豌豆^[13]等植物的生长指标显著下降。本试验发现,Cd+UV-B 复合胁迫对冬小麦生长的抑制效应明显大于 Cd 或 UV-B 单一胁迫,这与前人的研究结果基本一致,表明重金属污染和 UV-B 辐射增强复合胁迫对植物的生长通常存在叠加抑制效应。但 Larsson 等发现,Cd+UV-B 复合胁迫与 Cd 单独胁迫油菜的叶面积、根系生物量等生长指标之间没有显著差异^[11]。这些研究表明植物通过长期自然进化,其对重金属的耐受性和 UV-B 辐射的敏感性存在明显的种间差异,进而导致植物对重金属污染与 UV-B 辐射复合胁迫响应存在种间差异。

3.2 重金属污染和紫外辐射增强复合胁迫对植物生理代谢的影响

试验发现,UV-B 单独和 Cd+UV-B 复合胁迫分别导致叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量极显著和显著下降,复合胁迫与单独胁迫间差异不显著。已有研究报道发现,复合胁迫比单因子胁迫更加显著地减少叶绿素含量,降低叶片同化 CO₂ 的速率,抑制植物的光合电子传递^[19]和光合作用^[21],从而影响植物的生长与生物量。此外,重金属污染与 UV-B 辐射复合胁迫增强其对植物的氮、磷营养代谢过程中的固氮酶、脲酶、碱性磷酸酶活性的抑制作用^[22],显著影响植物体内矿质营养元素的含量^[9,11],或通过改变植物激素的调控机制,如影响胚轴的 IAA 水平^[23],也可能通过影响植物叶片中的与植物生长密切相关的果胶酶(PG)和纤维素酶(Cx)等细胞壁酶活性^[8],影响到植物的生长。

另一方面,与单独胁迫相比,复合胁迫可能加剧对植物的氧化伤害,如复合胁迫显著增加叶片中氧化伤害产物 MDA^[24]和 H₂O₂^[20]的累积。本试验也有类似结果,Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦叶片的 MDA 含量显著大于 Cd 单独胁迫。而且,重金属胁迫加剧 UV-B 对细胞内 DNA 的损伤^[25]。由抗氧化酶和抗氧化物质组成的抗氧化防御系统是植物防御环境胁迫造成的氧化伤害的普遍有效机制之一。研究发现,SOD、CAT、POD 等抗氧化酶活性^[13-14,20],类黄酮^[20]、抗坏血酸、脯氨酸^[14]等防御物质含量对复合胁迫的响应也要明显大于单独胁迫,这可能有利于植物应对重金属污染和 UV-B 复合胁迫。

上述研究结果多数支持重金属污染和 UV-B 复合胁迫对植物的某些生理代谢存在协同效应,但也发

现 Cd 明显拮抗 UV-B 辐射对大豆叶片 POD 活性的诱导,使得植物体内 POD 活性较 UV-B 单独胁迫显著降低^[5];而相对于 Cd 单独胁迫,Cd+UV-B 复合胁迫对拟南芥的叶绿素荧光、氧释放、光化学产额、非光化学猝灭等生理指标的影响并没有加剧^[26]。可见,重金属污染和 UV-B 复合胁迫之间的交互作用很复杂,可能加剧、减轻或不改变单一胁迫对植物的光合、氧化伤害、抗氧化、内源激素、营养等生理代谢过程的影响,尚需开展更广泛的研究,才可能明确其影响规律与特征。

3.3 重金属污染和紫外辐射增强复合胁迫对植物吸收重金属的影响与机理

UV-B 辐射增强对植物重金属的吸收有影响。Mishra 等报道,与 Cd、Ni 单独胁迫相比,复合胁迫黄瓜根系、茎叶和果实中 Cd、Ni 的含量均显著增加,表明 UV-B 辐射促进黄瓜对重金属的吸收^[12]。还发现 UV-B 辐射处理增强盐生集胞藻 *Synechocystis salina* 吸收 Cu 和 Cd 的能力,分别增加 2.9 和 3.9 倍^[27]。本试验发现 Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦植株地上部的 Cd 含量显著高于 Cd 单独胁迫,但地下部并无显著差异,试验结果与 Mishra 等报道有所不同。这可能与 UV-B 对作物生物量的影响及作物对重金属的吸收转运能力差异有关。小麦吸收的 Cd 主要累积在根部,加之小麦地上部的生物量较小,因此 UV-B 辐射对小麦根系 Cd 含量的影响较小;黄瓜地上部生物量较大,能够将较多的 Cd 转运至地上部,由于 UV-B 辐射导致黄瓜地上部生物量明显下降,使得黄瓜地上部对 Cd 的吸收量下降,导致 Cd 更多地累积在黄瓜根部。但 UV-B 辐射增强促进植物对重金属吸收的机理尚不清楚,Rai 等认为,UV-B 辐射通过改变植物的细胞膜透性,促进了鱼腥藻 *Anabaena doliolum* 对 Cu、Pb 的吸收^[22],有待进一步的研究。

总之,目前有关重金属污染与 UV-B 辐射复合胁迫对植物影响及其机理的研究很有限,在当前全球环境和气候变化日益复杂的形势下,加强复合污染对农作物生长生理的影响与机理研究,为提出可行的应对措施提供科学依据,对于保障农作物生长和生产具有重要意义。

4 结论

(1)Cd 与 UV-B 单独或复合胁迫均导致冬小麦种子萌发的芽长和根长极显著下降,盆栽幼苗的株高、叶面积和地上部生物量极显著下降,复合胁迫的

抑制效应明显大于单一胁迫。

(2)UV-B 单独和 Cd+UV-B 复合胁迫显著或极显著降低冬小麦叶绿素含量,增加类黄酮含量;Cd 与 UV-B 单独或复合胁迫极显著增大冬小麦叶片的细胞膜透性,Cd 单独和 Cd+UV-B 复合胁迫导致冬小麦叶片的 MDA 含量显著和极显著增加,其中复合胁迫的 MDA 含量显著大于单独胁迫。

(3)Cd+UV-B 复合胁迫冬小麦植株地上部的 Cd 含量显著高于 Cd 单独胁迫。

参考文献:

- [1] Cheng S. Heavy metal pollution in China: Origin, pattern and control[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, 10(3): 192-198.
- [2] Bertin G, Averbeck D. Cadmium: cellular effects, modifications of biomolecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review)[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1549-1559.
- [3] Nordberg G F. Historical perspectives on cadmium toxicology[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2009, 238(3): 192-200.
- [4] 何永美,湛方栋,高召华,等.水稻对 UV-B 辐射响应的敏感性差异[J]. *生态环境学报*. 2012, 21(3): 489-495.
HE Yong-mei, ZHAN Fang-dong, GAO Zhao-hua, et al. Differences of UV-B radiation sensitivity of rice[J]. *Ecology and Environment*, 2012, 21(3): 489-495.
- [5] 强维亚,杨晖,汤红官,等.重金属镉(Cd)和增强 UV-B 辐射复合对大豆生长和生理代谢的影响[J]. *西北植物学报*. 2003, 23(2): 235-238.
QIANG Wei-ya, YANG Hui, TANG Hong-guan, et al. Effect of cadmium and UV-B radiation in combination on growth and physiology of soybean[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(2): 235-238.
- [6] 强维亚,杨晖,陈拓,等.镉和增强紫外线-B 辐射复合作用对大豆生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 697-700.
QIANG Wei-ya, YANG Hui, CHEN Tuo, et al. Effect of the combination of cadmium and UV-B radiation on soybean growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 697-700.
- [7] 强维亚,陈拓,汤红官,等. Cd 胁迫和增强 UV-B 辐射对大豆根系分泌物的影响[J]. *植物生态学报*. 2003, 27(3): 293-298.
QIANG Wei-Ya, CHEN Tuo, TANG Hong-guan, et al. Effect of cadmium and enhanced UV-B radiation on soybean root excretion[J]. *ACTA Phytocologica Sinica*, 2003, 27(3): 293-298.
- [8] 陈亮,左欢,刘思源,等. UV-B 和 Cd 胁迫对大豆细胞壁降解酶活性的影响[J]. *沈阳师范大学学报:自然科学版*. 2010, 28(2): 255-258.
CHEN Liang, ZUO Huan, LIU Si-yuan, et al. Effect of cadmium and enhanced UV-B radiation on cell wall degrading enzymes activities of soybean[J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 28(2): 255-258.
- [9] Shukla U C, Kakkar P. Effect of dual stress of ultraviolet-B radiation and cadmium on nutrient uptake of wheat seedlings[J]. *Communications*

- in *Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(11-12):1737-1749.
- [10] Shukla U C, Murthy R C, Kakkar P. Combined effect of ultraviolet-B radiation and cadmium contamination on nutrient uptake and photosynthetic pigments in *Brassica campestris* L. seedlings[J]. *Environmental Toxicology*, 2008, 23(6):712-719.
- [11] Larsson E H, Bornman J F, Asp H. Influence of UV-B radiation and Cd^{2+} on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(323):1031-1039.
- [12] Mishra S, Singh S, Sharma R K, et al. The interactive effect of heavy metals and UV-B radiation on two cucumber cultivars[J]. *Turkish Journal of Biology*, 2010, 34(4):367-378.
- [13] Agrawal S B, Mishra S. Effects of supplemental ultraviolet-B and cadmium on growth, antioxidants and yield of *Pisum sativum* L.[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(2):610-618.
- [14] Shweta M, Agrawal S B. Interactive effects between supplemental ultraviolet-B radiation and heavy metals on the growth and biochemical characteristics of *Spinacia oleracea* L.[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2006, 18(2):307-314.
- [15] 中华人民共和国国家标准. GB/T3543. 4 农作物种子检验规程 发芽试验[S]. 1995.
National Standard of the People's Republic of China. GB/T3543. 4 Rules for agricultural seed testing: Germination test[S]. 1995.
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
WANG Xue-quai. Principle and technique of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] Mirecki R M, Teramura A H. Effects of ultraviolet-B irradiance on soybean: V. The dependence of plant sensitivity on the photosynthetic photon flux density during and after leaf expansion[J]. *Plant Physiology*, 1984, 74(3):475.
- [18] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd edition. Beijing: Chinese Agriculture Publication, 2000.
- [19] Prasad S M, Dwivedi R, Zeeshan M. Growth, photosynthetic electron transport, and antioxidant responses of young soybean seedlings to simultaneous exposure of nickel and UV-B stress[J]. *Photosynthetica*, 2005, 43(2):177-185.
- [20] Li X, Zhang L, Li Y, et al. Changes in photosynthesis, antioxidant enzymes and lipid peroxidation in soybean seedlings exposed to UV-B radiation and/or Cd[J]. *Plant and Soil*, 2012, 352(1-2):377-387.
- [21] Dubé S L, Bornman J F. Response of spruce seedlings to simultaneous exposure to ultraviolet-B radiation and cadmium[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1992, 30(6):761-767.
- [22] Rai L C, Tyagi B, Rai P K, et al. Interactive effects of UV-B and heavy metals (Cu and Pb) on nitrogen and phosphorus metabolism of a N_2 -fixing cyanobacterium *Anabaena doliolum*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 39(3):221-231.
- [23] 强维亚, 周九菊, 杨 晖, 等. 镉(Cd)与UV-B复合胁迫影响大豆胚轴生长的生理调节机制研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(1):82-87.
QIANG Wei-ya, ZHOU Jiu-ju, YANG Hui, et al. Studying on effect of Cd in combination with UV-B on physiological mechanism in regulation of soybean epicotyl growth[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(1):82-87.
- [24] 杜英君, 史 奕, 刘振伟. UV-B辐射和 Hg^{2+} 复合处理对黑小麦生理代谢和生长的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5):111-115.
DU Ying-yun, SHI Yi, LIU Zhen-wei. Effect of UV-B radiation and Hg^{2+} combined treatment on physiological metabolism and growth of black wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5):111-115.
- [25] Otero S, Núñez-Olivera E, Martínez-Abaigar J, et al. Effects of cadmium and enhanced UV radiation on the physiology and the concentration of UV-absorbing compounds of the aquatic liverwort *Jungermannia exsertifolia* subsp. *cordifolia*[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2006, 5(8):760-769.
- [26] Larsson E H, Bornman J F, Asp H. Physiological effects of cadmium and UV-B radiation in phytochelatin-deficient *Arabidopsis thaliana*, cad1-3[J]. *Functional Plant Biology*, 2001, 28(6):505-512.
- [27] Toncheva-Panova T, Pouneva I, Chernev G, et al. Incorporation of *Synechocystis salina* in hybrid matrices: Effect of UV-B radiation on the copper and cadmium biosorption[J]. *Biotechnology & Bioengineering Equipment*, 2010, 24(3):1946-1949.