Archive of SID

نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد سیزدهم، شماره ۴(۵۲)، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۵۷۰-۵۵۵

تغییرات عملکرد و اجزای روغن دانه خردل سیاه (*Brassica nigra* L.) بر اثر باکتری‌ها و تنظیم کننده‌های رشد در شرایط تنش کادمیوم

علی برقی[1*]، عبدالقیوم قلی‌پوری[2]، اکبر قویدل[3] و محمد صدقی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۱

چکیده

کادمیوم یکی از آلاینده‌های اولیه خاک از نوع فلزات سنگین می‌باشد و گیاهان تیره شب‌بو با تولید وزن خشک بالا قادر به تجمع مقادیر بسیار بالایی از فلزات سنگین از جمله کادمیوم می‌باشند. به‌منظور ارزیابی تغییرات اسیدهای چرب، درصد روغن دانه و عملکرد و اجزای عملکرد خردل سیاه تحت تاثیر باکتری‌های محرک و تنظیم کننده‌های رشد گیاه در شرایط تنش کادمیوم آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی با چهار تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح کادمیوم (صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، سه سطح باکتری (شاهد، آزوسپریلوم و سودوموناس) و سه سطح تنظیم کننده‌های رشد (شاهد، سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید) بودند. مقایسات میانگین‌ها نشان داد که کادمیوم موجب کاهش معنی‌دار تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در نیام، وزن خشک ریشه، درصد روغن دانه، اولئیک اسید، لینولئیک اسید، ایکوزنوئیک اسید و اروسیک اسید گردید. باکتری‌های محرک رشد منجر به افزایش معنی‌دار مقادیر صفات مذکور و کاهش معنی‌دار پالمتیک اسید شدند. محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید به افزایش معنی‌دار محصول تک بوته، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، درصد روغن دانه و تمام انواع اسیدهای چرب غیراشباع انجامید، در حالی‌که استئاریک اسید و اسیدهای چرب اشباع را کاهش داد. اثر متقابل کادمیوم × باکتری نشان داد که در هر دو سطح کادمیوم، باکتری‌ها موجب افزایش معنی‌دار محصول تک بوته، وزن هزار دانه، وزن خشک اندام هوایی، لینولنیک اسید و اسیدهای چرب غیراشباع و کاهش معنی‌دار استئاریک و اسیدهای چرب اشباع گردیدند در حالی‌که کادمیوم نتیجه‌ای برعکس باکتری‌ها در این صفات نشان داد. در اثر متقابل کادمیوم × هورمون هم تیمار هورمونی در هر دو سطح کادمیوم منجر به کاهش معنی‌دار پالمیتیک و افزایش اسیدهای چرب غیراشباع شد و کاربرد کادمیوم نیز نتیجه عکس داشت.

واژگان کلیدی: اسید چرب، باکتری، تنظیم کننده رشد گیاه، خردل، کادمیوم.

۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. (نگارنده‌ی مسئول) a_barghi@uma.ac.ir
۲- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳- استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۴- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

آلودگی فلزات سنگین به یکی از نگرانی‌های روزافزون جهانی در دهه‌های اخیر تبدیل شده است (Lu *et al.*, 2017). کادمیوم (Cd) از آلاینده‌های اولیه خاک از نوع فلزات سنگین می‌باشد که ناشی از سمیت بالا و ویژگی‌های کارسیوژنیک آن است (Bell *et al.*, 2007). از این رو، نیاز بالایی به یافتن راهکارهای مؤثری برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به کادمیوم احساس می‌شود (Zhang *et al.*, 2010). گیاه پالایی که در آن از گیاهان تجمع‌دهنده فلزات سنگین برای حذف این فلزات از خاک استفاده می‌شود (Zhang *et al.*, 2013)، به علت صرفه اقتصادی و مزایای زیست محیطی آن، به‌عنوان یک روش مهم و مؤثر شناخته شده است (Ali *et al.*, 2013). سیستم ریشه‌ای گسترده گیاه می‌تواند کادمیوم را به آسانی جذب و به اندام‌های هوایی انتقال داده و در نتیجه غلظت آلاینده را در خاک کاهش دهد (Liu *et al.*, 2010). برخی فرآیندهای گیاهی مثل انتقال آب، متابولیسم نیتروژن، فتوسنتز و میزان کلروفیل تحت تاثیر کادمیوم قرار می‌گیرند (Feng *et al.*, 2010). کادمیوم همچنین موجب خسارت اکسیدتیو به گیاه می‌شود که از اثرات منفی سمیت فلزات سنگین می‌باشد (Sharma and Dhiman, 2014).

تولید وزن خشک بالا، تحمل و جذب فلزات سنگین در گیاه، عوامل اصلی به‌منظور انتخاب گونه‌های گیاهی برای پاک‌سازی و حفاظت خاک‌های آلوده می‌باشند (Khalid *et al.*, 2017). ثابت شده است که گیاهان تیره شب‌بو با تولید وزن خشک بالا قادر به تجمع مقادیر بسیار بالایی از فلزات سنگین می‌باشند (Broadley *et al.*, 2001). خردل سیاه (*Brassica nigra*) گیاهی روغنی از تیره شب‌بو است (Wanasundara Janitha, 2011). این گیاه دانه‌های کوچکی دارد که معمولاً در تهیه ادویه استفاده می‌شود. همچنین، روغن از دانه آن استخراج می‌شود که برای پخت و پز، ماساژ و برخی موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Grusak and Dellapenna, 1999). دانه‌های خردل حاوی روغن، پروتئین، غنی از فیبر غذایی و آنتی اکسیدان‌های طبیعی هستند (Ildiko *et al.*, 2006).

کارآیی گیاه‌پالایی می‌تواند در اثر توسعه ارتباط گیاه با باکتری‌های مقاوم به فلزات سنگین، بهبود یابد. این باکتری‌ها به تحرک فلزات سنگین در خاک کمک می‌کنند (Zhuang *et al.*, 2007). برخی باکتری‌ها قادر هستند فرم‌هایی از عناصری را که به‌طور بالقوه سمی هستند با ترشح اسیدهای آلی و سیدروفورها در خاک حل کنند (Ma *et al.*, 2009). از سوی دیگر برخی باکتری‌های مرتبط با گیاهان می‌توانند جذب فلزات را از طریق اتصال فلزات به گروه‌های آنیونی یا مواد پلی‌مری خارج سلولی، کاهش دهند (Rajkumar *et al.*, 2012). مطالعات بسیاری نشان داده است که باکتری‌های همیار با گیاه، توانایی تحریک رشد گیاه، افزایش جذب فلز و انتقال به اندام‌های هوایی گیاه و کاهش اثرات سمی فلزات را دارا می‌باشند (Lebeau *et al.*, 2008; Rajkumar *et al.*, 2009; Weyens *et al.*, 2009; Glick, 2010). یکی از جنبه‌های مهم تحمل تنش‌های غیر زنده در گیاهان، نقش تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه یا PGR (Plant Growth Regulator) می‌باشد. عموماً پنج گروه اصلی از تنظیم کننده‌های رشد گیاهی وجود دارند که شامل اکسین‌ها، جیبرلین‌ها، سیتوکینین‌ها، اتیلن و آبسیزیک اسید می‌باشند. در کنار این پنج گروه اصلی، تنظیم کننده‌های

www.SID.ir

Archive of SID

رشد گیاهی دیگری به‌طـور طبیعی وجـــود دارند که سالیسیلیک اسیدها، براسینواستروئیدها، جاسمونیک اسیدها و پلی‌آمین‌ها را شامل می‌شود (Upreti and Sharma, 2016). سالیسیلیک اسید در القای واکنش گیاهان به بسیاری از تنش‌های غیرزنده مانند فلزات سنگین نقش مهمی دارد (Rady and Mohamed, 2015). این ترکیب به عنوان یک مولکول پیام‌رسان، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را کاهش می‌دهد (Horvath *et al.*, 2007). براسینواستروئیدها همچنین نقش مهمی را در القای ویژگی‌های مقابله با تنش در گیاهان در برابر تعدادی از تنش‌های غیرزیستی مانند سرما، شوری، گرما، خشکی، فلزات سنگین و تنش‌های زیستی ایفا می‌کنند (Vardhini, 2013).

تغییرات لیپیدی ناشی از کادمیوم در گیاهان تحت تنش‌های مختلف محیطی گزارش شده است. مثلا تغییرات در میزان غیراشباع شدن اسیدهای چرب گیاهان در معرض تنش فلزات سنگین مشاهده شده است (Nouairi *et al.*, 2006). اثرات مستقیم کادمیوم بر ترکیبات لیپیدهای غشایی گزارش شده (Nouairi *et al.*, 2006) که ممکن است تاثیر مستقیمی بر نفوذپذیری غشایی داشته باشد. لینولئیک اسید و لینولنیک اسید از جمله فراوان‌ترین اسیدهای چرب لیپیدهای غشایی در گیاهان می‌باشند. ثابت شده است که تنش کادمیوم فعالیت لیپواکسیژناز را تحریک می‌کند (Ben Youssef *et al.*, 2005) و متعاقباً ممکن است منجر به تغییرات میزان اسیدهای چرب غیراشباع در گیاهان تیمار شده با کادمیوم گردد (Ben Ammar *et al.*, 2008). سیلوا و همکاران (Silva *et al.*, 2013) گزارش کردند که تلقیح سویا با کودهای زیستی، میزان روغن و اسیدهای چرب غیراشباع را افزایش داد درحالی‌که موجب کاهش اسیدهای چرب اشباع شد. تنظیم کننده‌های رشد گیاه نیز بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه اثر گذاشته و در القای ساز و کارهای حمایتی افزایش مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش دارد (Naghizadeh and Kabiri, 2017). تنظیم کننده‌های رشد گیاهی مختلفی وجود دارند که اثرات مختلفی مثل تولید مثل، تحریک پاسخ‌های دفاعی، توسعه و تقسیم سلولی یا جوانه‌زنی بذر و ممانعت از رشد ساقه را نشان می‌دهند (Hunt *et al.*, 2010). سالیسیلیک اسید اثرات منفی تنش غیرزنده را با افزایش تولید هورمون‌های درونی گیاه مثل اکسین و سیتوکینین، رفع می‌کند (Shakirova *et al.*, 2003).

هدف از این مطالعه بررسی تغییرات اسیدهای چرب و درصد روغن دانه خردل سیاه در جهت بهبود کمیت و کیفیت روغن و همچنین افزایش عملکرد و اجزای عملکرد دانه با استفاده از تلقیح باکتری‌های محرک رشد و روش‌های نوینی مانند محلول‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد گیاهی در شرایط تنش آلودگی خاک به فلز سنگین کادمیوم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی تغییرات اسیدهای چرب و درصد روغن دانه خردل سیاه تحت تاثیر تنظیم کننده‌های رشد گیاه و باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۵ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح کادمیوم (صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، سه سطح باکتری‌های

www.SID.ir

Archive of SID

محرک رشد (شاهد، آزوسپریلوم و سودوموناس) و سه سطح تنظیم کننده‌های رشد گیاه (شاهد، ۱ میلی‌مول سالیسیلیک اسید و ۰/۱ میکرومول براسینواستروئید) بودند. آزمایش در چهار تکرار انجام شد. هر گلدان با ۱۰ کیلوگرم خاک خشک با بافت لومی پر شده و تیمار کادمیوم به‌صورت $CdNo_3$ محلول در آب با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک به گلدان‌ها اضافه شد. خاک آلوده برای مدت چهار ماه در گلدان‌ها بدون کشت نگهداری گردید. در طول این مدت گلدان‌ها تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی آبیاری شده و خاک داخل هر گلدان ۳ بار در طول این دوره مخلوط گردید (Jeong *et al.*, 2012). پس از این مدت، ۳۰ عدد بذر خردل سیاه در هر گلدان در عمق یک سانتی‌متری کشت شد. قبل از کشت، بذرها در شرایط کاملاً استریل و دمای آزمایشگاه با باکتری‌های مورد نظر تلقیح گردیدند. برای تلقیح بذر، هفت گرم مایه تلقیح که هر گرم آن حاوی ۱۰۷ عدد باکتری زنده و فعال بود، استفاده شد. همچنین، از محلول صمغ عربی برای چسبندگی بهتر مایه تلقیح به بذرها استفاده شد. کلیه عملیات در محیط سایه و دور از نور آفتاب انجام گرفت و بذرها پس از خشک شدن در زیر هود استریل کشت شدند (Khosravi *et al.*, 2014). گلدان‌ها هر چهار روز یک‌بار تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند تا از آب‌شویی کادمیوم جلوگیری شود. گیاهچه‌های ظاهر شده تنک و به ۱۶ بوته در گلدان کاهش یافتند. تنظیم کننده‌های رشد گیاه در دو مرحله (قبل از گلدهی و در طول پر شدن نیام) روی گلدان‌ها محلول‌پاشی شدند. تیمار باکتری نیز در این دو مرحله همراه آب آبیاری در گلدان‌ها اعمال گردیدند.

پس از رسیدگی و برداشت بوته‌ها درصد روغن بذر خردل اندازه‌گیری شد. بدین منظور بذرها در آون ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت خشک شدند و رطوبت آنها به حدود پنج درصد رسید. سپس بذرها با استفاده از آسیاب پودر شدند. ۵ گرم از پودر بذر خردل جدا شده و روغن آن با استفاده از دستگاه سوکسله طی مدت ۴ ساعت استخراج گردید. محلول N- هگزان به عنوان حلال استفاده شد و درصد روغن برای هر نمونه محاسبه گردید (Anonymus, 1993).

برای تعیین پروفیل اسیدهای چرب در روغن خردل سیاه، ابتدا روغن با محلول ۱۴٪ BF_3 در متانول متیله شد (Anonymus, 2002) و سپس نمونه متیله شده به دستگاه کروماتوگرافی گازی (Chrompac, CP9001) تزریق شد. دستگاه کروماتوگرافی مجهز به آشکارساز FID و ستون CP Sill-88 (۲۵m×۰/۲۵mm ×۰/۲μm) بود. نیتروژن به‌عنوان گاز حامل با فشار ۷۰ کیلوپاسکال استفاده شد. برنامه دمایی ستون به صورت دمای $160^{o}C$ به مدت ۳۲ دقیقه، سپس افزایش دما تا $220^{o}C$ با سرعت ۴ درجه سلسیوس به ازای هر دقیقه و ماندگاری دما در $220^{o}C$ بود. دمای دتکتور و تزریق کننده $250^{o}C$ بود (Aksouh *et al.*, 2001).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد (جدول ۱) نشان داد که اثر اصلی کادمیوم و باکتری‌های محرک رشد بر محصول تک بوته، تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در نیام، وزن هزار دانه، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و درصد روغن دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. اثر اصلی تنظیم کننده‌های رشدی نیز بر محصول تک بوته و وزن خشک

www.SID.ir

Archive of SID

ریشه در سطح احتمال پنج درصد و بر وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل کادمیوم × باکتری بر محصول تک بوته، وزن هزار دانه و وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار به‌دست آمد. با توجه به جدول تجزیه واریانس اسیدهای چرب دانه خردل سیاه (جدول ۲)، اثرات اصلی کادمیوم، باکتری‌های محرک و تنظیم کننده‌های رشد گیاه بر تمام انواع اسیدهای چرب اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین، اثرات متقابل کادمیوم × باکتری بر استئاریک اسید، لینولنیک اسید و مجموع اسیدهای چرب غیراشباع در سطح احتمال یک درصد و بر اسیدهای چرب اشباع در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید. اثر متقابل کادمیوم×هورمون نیز بر پالمیتیک اسید در سطح احتمال پنج درصد و بر اسیدهای چرب غیراشباع در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار به دست آمد. افزون بر این، اثر متقابل باکتری × هورمون بر اسیدهای چرب غیراشباع در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

مقایسات میانگین اجزای عملکرد نشان داد که کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم در مقایسه با تیمار شاهد، موجب کاهش معنی‌دار تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در نیام، وزن خشک ریشه و درصد روغن دانه خردل سیاه گردید (جدول ۳). همچنین، باکتری‌های محرک رشد صفات مذکور را در مقایسه با شاهد بدون کاربرد باکتری، به‌طور معنی‌داری افزایش دادند و بین باکتری‌های آزوسپریلوم و سودوموناس از نظر تعداد نیام در بوته، وزن خشک ریشه و درصد روغن دانه تفاوت معنی‌داری وجود نداشت در حالی‌که باکتری سودوموناس تعداد دانه در نیام را در مقایسه با آزوسپریلوم به‌طور معنی‌داری بیشتر افزایش داد (جدول ۴). با توجه به نتایج مقایسات میانگین اثر اصلی تنظیم کننده‌های رشد بر عملکرد و اجزای عملکرد خردل سیاه مشاهده می‌شود که محلول‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد گیاه موجب افزایش معنی‌دار محصول تک بوته، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و درصد روغن دانه خردل گردید. بیشترین محصول تک بوته با اختلاف معنی‌دار نسبت به تیمار شاهد در شرایط محلول‌پاشی شده با براسینواستروئید حاصل شد که با تیمار سالیسیلیک اسید در گروه مشترک قرار داشت. تیمار سالیسیلیک اسید همچنین با تیمار شاهد از نظر محصول تک بوته تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. بیشترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار با سالیسیلیک اسید و بیشترین وزن خشک ریشه و درصد روغن دانه در تیمار با براسینواستروئید به‌دست آمد که بین دو تنظیم کننده رشد گیاه از نظر وزن خشک ریشه و اندام هوایی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۵). علاوه بر این، نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم × باکتری نشانگر افزایش معنی‌دار محصول تک بوته، وزن هزار دانه و وزن خشک اندام هوایی تحت تاثیر باکتری‌های محرک رشد در هر دو سطح کاربرد کادمیوم و بدون کادمیوم بود و تیمار با باکتری سودوموناس در هر دو سطح تیمار کادمیوم بیشترین مقادیر محصول تک بوته، وزن هزار دانه و وزن خشک اندام هوایی را در پی داشت. در تیمار بدون کادمیوم، بین باکتری‌های آزوسپریلوم و سودوموناس از نظر وزن هزار دانه و وزن خشک اندام هوایی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم نیز باکتری‌های آزوسپریلوم و سودوموناس از نظر وزن هزار دانه در گروه

www.SID.ir

Archive of SID

مشترک قرار داشتند و باکتری آزوسپریلوم نیز با تیمار شاهد بدون باکتری اختلاف معنی‌داری نشان نداد. همچنین، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم در مقایسه با شاهد بدون کادمیوم موجب کاهش معنی‌دار محصول تک بوته، وزن هزار دانه و وزن خشک اندام هوایی گردید (جدول ۶).

مقایسه میانگین اثر اصلی کادمیوم بر اسیدهای چرب اولئیک اسید، لینولئیک اسید، ایکوزنوئیک اسید و اروسیک اسید نشان داد که کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم در مقایسه با تیمار شاهد موجب کاهش معنی‌دار مقدار این اسیدهای چرب شد (جدول ۷). اثر اصلی باکتری‌های محرک نیز موجب کاهش معنی‌دار اسید چرب پالمتیک اسید و افزایش معنی‌دار اولئیک اسید، لینولئیک اسید، ایکوزنوئیک اسید و اروسیک اسید گردید که بین باکتری‌های آزوسپریلوم و سودوموناس از نظر پالمتیک اسید، اولئیک اسید و اروسیک اسید اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (جدول ۸). همچنین، اثر اصلی تنظیم کننده‌های رشد گیاه منجر به کاهش معنی‌دار استئاریک اسید و اسیدهای چرب اشباع و افزایش معنی‌دار اولئیک اسید، لینولئیک اسید، لینولنیک اسید، ایکوزنوئیک اسید و اروسیک اسید شد. باکتری‌های آزوسپریلوم و سودوموناس در تمام انواع اسیدهای چرب مذکور به جز ایکوزنوئیک اسید، بدون تفاوت آماری معنی‌دار در گروه مشترک قرار گرفتند (جدول ۹).

با توجه به مقایسات میانگین اثر متقابل کادمیوم × باکتری می‌توان دریافت که در هر دو سطح کادمیوم صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کاربرد باکتری‌های محرک رشد موجب کاهش معنی‌دار اسید چرب استئاریک اسید و اسیدهای چرب اشباع و افزایش معنی‌دار لینولنیک اسید و اسیدهای چرب غیراشباع گردید و بین باکتری‌های آزوسپریلوم و سودوموناس از نظر صفات مذکور در هر دوسطح کادمیوم تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم در مقایسه با تیمار شاهد بدون کادمیوم، منجر به افزایش معنی‌دار استئاریک اسید و اسیدهای چرب اشباع و کاهش معنی‌دار لینولنیک اسید و اسیدهای چرب غیراشباع گردید (جدول ۱۰). نتایج اثر متقابل کادمیوم × هورمون نشان داد که در هر دو سطح تیمار کادمیوم محلول‌پاشی تنظیم کننده‌های رشد گیاهی موجب کاهش معنی‌دار پالمتیک اسید و افزایش معنی‌دار اسیدهای چرب غیراشباع گردید و بین هورمون‌های سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید از نظر صفات مذکور اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم در مقایسه با شاهد بدون کاربرد کادمیوم منجر به افزایش پالمتیک اسید و کاهش اسیدهای چرب غیراشباع گردید (جدول ۱۱).

کاهش درصد روغن دانه خردل سیاه در اثر تیمار کادمیوم نشان می‌دهد که کادمیوم مانع عملکرد دستگاه بیوسنتز اسیدهای چرب می‌گردد (Ahmad *et al.*, 2015). همچنین، کاهش اسیدهای چرب غیراشباع به‌وسیله کادمیوم ممکن است به واکنش مستقیم رادیکال‌های آزاد اکسیژن با اسیدهای چرب غیراشباع و یا بازداری بیوسنتز اسیدهای چرب نسبت داده شود. نشان داده شده که کادمیوم فعالیت لیپواکسیژنازی را افزایش می‌دهد که مسئول کاتالیز پراکسیداسیون لیپیدی با استفاده از اجزای لیپیدهای غشایی به‌عنوان سوبسترا مخصوصاً اسیدهای چرب غیراشباع

www.SID.ir

Archive of SID

می‌باشد (Ben Youssef *et al.*, 2005). داناسکار و داناپانی (Dhanasekar and Dhandapani, 2012) گزارش کردند که کاربرد باکتری‌های محرک رشد مثل آزوسپریلوم، ازتوباکتر و ریزوبیوم به‌طور معنی‌دار عملکرد دانه و کیفیت روغن آفتابگردان را تحت تاثیر قرار داد (Heshmati *et al.*, 2016). گزارش دادند که کاربرد باکتری‌های محرک رشد، مقدار اسیدهای چرب اشباع را کاهش داد و مقدار اسیدهای چرب غیراشباع و درصد روغن دانه را بهبود بخشید. به همین ترتیب (Choudhury and Kennedy, 2004) دریافتند که تلقیح آفتابگردان با باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن، میزان فسفر دانه را افزایش داد که به دنبال آن مقدار روغن دانه و نسبت اسیدهای چرب غیراشباع به اشباع را تحت تاثیر قرار داد. حضور باکتری‌های محرک رشد در ریزوسفر گیاه و رابطه آنها با گیاه، کارآیی مصرف نیتروژن در گیاه را بهبود می‌بخشد (Tikhonovich and Provorov, 2011; Kraiser *et al.*, 2011). تولید هورمون‌ها به‌وسیله باکتری‌های محرک رشد نه تنها موجب تحریک توسعه ریشه‌ها می‌شود، بلکه منجر به افزایش ظرفیت دسترسی به عناصر غذایی توسط گیاه می‌گردد. این تغییرات منجر به تغییراتی در فرآیندهای متابولیکی می‌شود که مسئول بهبود عملکرد و کیفیت روغن گیاهان می‌شود. افزایش مقدار روغن در اثر تیمار با تنظیم کننده‌های رشد می‌تواند به افزایش فرآورده‌های فتوسنتزی مثل لیپیدها و انتقال آنها به مخازن به دنبال تیمار هورمونی، نسبت داده شود. همچنین، افزایش مقدار اسیدهای چرب غیراشباع تحت تاثیر هورمون‌های رشد می‌تواند ناشی از تاثیرات مثبت بر واکنش‌های متابولیکی اساسی در بافت‌های گیاهی باشد که اثر مستقیمی بر فرآیندهای رشدی دارد که با تغییرات آشکار در کیفیت روغن بذر انعکاس پیدا می‌کند. برخی از این تغییرات ممکن است ترکیبات اسیدهای چرب روغن بذر را تغییر دهد که ممکن است به تاثیرات محرک آن بر آنزیم‌هایی نسبت داده شود که بیوسنتز اسیدهای چرب غیراشباع را کاتالیز می‌کند (Sawan *et al.*, 2007).

نتیجه‌گیری کلی

ارزیابی اثر کادمیوم، باکتری‌های محرک و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه بر عملکرد و اجزای عملکرد و ویژگی‌های کمّی و کیفی روغن دانه خردل سیاه نشان داد که فلز سنگین کادمیوم به عنوان یک عامل منفی، موجب کاهش عملکرد و اجزای عملکرد، درصد روغن دانه و مقدار اسیدهای چرب غیراشباع روغن گردید در حالی که میزان اسیدهای اشباع را افزایش داد. از سوی دیگر، کاربرد باکتری‌های محرک و تنظیم کننده‌های رشد با اثرات مثبت بر رشد و فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه، عملکرد و اجزای عملکرد، درصد روغن و مقدار اسیدهای چرب غیراشباع را بهبود بخشید و موجب کاهش اسیدهای چرب اشباع در روغن دانه خردل گردید.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ - تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد خردل سیاه تحت تاثیر کادمیوم، باکتری‌های محرک رشد و تنظیم کننده‌های رشدگیاه

Table 1- Variance analysis of yield and yield components of black mustard affected by cadmium, rhizobacteria and plant growth regulators

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares						
		عملکرد گیاه Plant yield	تعداد نیام در بوته Pod number per plant	تعداد دانه در نیام Seed number per pod	وزن هزار دانه Thousand seed weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	مقدار روغن دانه Seed oil content
تکرار Replication	3	0.168**	12.05**	10.19**	0.025^{ns}	1.28*	0.76*	33.23**
کادمیوم Cadmium	1	8.1**	889.01**	36.12**	14.25**	52.03**	47.93**	686.47**
ریزوباکتری‌ها Rhizobacteria	2	1.707**	35.38**	41.43**	1.72**	12.5**	2.2**	63.21**
تنظیم کننده‌های رشد Growth regulators	2	0.176*	5.59^{ns}	5.38^{ns}	0.1^{ns}	8.63**	1.2*	32.13**
کادمیوم × ریزوباکتری‌ها Cadmium×Rhizobacteria	2	0.16*	0.38^{ns}	0.12^{ns}	0.33*	1.18*	0.019^{ns}	0.76^{ns}
کادمیوم × تنظیم کننده‌ها Cadmium×Growth regulators	2	0.015^{ns}	0.18^{ns}	0.5^{ns}	0.066^{ns}	0.027^{ns}	0.15^{ns}	2.79^{ns}
ریزوباکتری‌ها × تنظیم کننده‌ها Rhizobacteria×Growth regulators	4	0.025^{ns}	3.76^{ns}	0.53^{ns}	0.058^{ns}	0.16^{ns}	0.086^{ns}	0.75^{ns}
کادمیوم ×ریزوباکتری‌ها × تنظیم کننده‌ها Cadmium×Rhizobacteria×Growth regulators	4	0.023^{ns}	3.05^{ns}	2.18^{ns}	0.02^{ns}	0.54^{ns}	0.062^{ns}	1.19^{ns}
خطا Error	51	0.038	2.41	1.96	0.095	0.35	0.26	1.64
ضریب تغییرات (٪) C.V.	-	17.75	5.99	15.45	6.85	5.46	8.92	3.97

ns , * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns , * and ** are non significant and significant in probabilitie levels of 5 and 1 %, respectively.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ - تجزیه واریانس اسیدهای چرب دانه خردل سیاه تحت تاثیر کادمیوم، باکتری‌های محرک رشد و تنظیم کننده‌های رشدگیاه

Table 2- Variance analysis of fatty acids in black mustard seed affected by cadmium, rhizobacteria and plant growth regulators

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares				
		پالمتیک اسید Palmetic acid	استئاریک اسید Stearic acid	اولئیک اسید Oleic acid	لینولئیک اسید Linoleic acid	لینولنیک اسید Linolenic acid
تکرار Replication	3	0.051**	0.019**	0.025**	0.009**	0.006^{ns}
کادمیوم Cadmium	1	47.62**	38.23**	1.61**	24.67**	7.39**
ریزوباکتری‌ها Rhizobacteria	2	0.114**	0.133**	0.157**	0.24**	0.13**
تنظیم کننده‌های رشد Growth regulators	2	0.2**	0.065**	0.057**	0.13**	0.097**
کادمیوم × ریزوباکتری‌ها Cadmium×Rhizobacteria	2	0.001^{ns}	0.037**	0.009^{ns}	0.0081^{ns}	0.028**
کادمیوم × تنظیم کننده‌ها Cadmium×Growth regulators	2	0.021*	0.003^{ns}	0.003^{ns}	0.0082^{ns}	0.0008^{ns}
ریزوباکتری‌ها × تنظیم کننده‌ها Rhizobacteria×Growth regulators	4	0.001^{ns}	0.001^{ns}	0.001^{ns}	0.0063^{ns}	0.001^{ns}
کادمیوم ×ریزوباکتری‌ها × تنظیم کننده‌ها Cadmium×Rhizobacteria×Growth regulators	4	0.001^{ns}	0.0006^{ns}	0.0009^{ns}	0.0038^{ns}	0.004^{ns}
خطا Error	51	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002
ضریب تغییرات (٪) C.V.	-	2.03	4.08	0.44	0.307	0.26

ns , * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns , * and ** are non significant and significant in probabilitie levels of 5 and 1 %, respectively.

ادامه جدول ۲ -

Table 2- Continued

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares			
		ایکوزنوئیک اسید Eicosenoic acid	اروسیک اسید Erucic acid	اسیدهای چرب اشباع Saturated fatty acids	اسیدهای چرب غیراشباع Unsaturated fatty acids
تکرار Replication	3	0.015**	0.004^{ns}	0.08**	0.042**
کادمیوم Cadmium	1	1.71**	15.5**	171.21**	201.8**
ریزوباکتری‌ها Rhizobacteria	2	0.088**	0.053**	0.49**	3.17**
تنظیم کننده‌های رشد Growth regulators	2	0.085**	0.176**	0.49**	2.65**
کادمیوم × ریزوباکتری‌ها Cadmium×Rhizobacteria	2	0.001^{ns}	0.002^{ns}	0.053*	0.081**
کادمیوم × تنظیم کننده‌ها Cadmium×Growth regulators	2	0.005^{ns}	0.0006^{ns}	0.028^{ns}	0.054**
ریزوباکتری‌ها × تنظیم کننده‌ها Rhizobacteria×Growth regulators	4	0.001^{ns}	0.022^{ns}	0.004^{ns}	0.0055^{ns}
کادمیوم ×ریزوباکتری‌ها × تنظیم کننده‌ها Cadmium×Rhizobacteria×Growth regulators	4	0.002^{ns}	0.003^{ns}	0.004^{ns}	0.009^{ns}
خطا Error	51	0.0016	0.0101	0.012	0.0099
ضریب تغییرات (٪) C.V.	-	0.82	0.27	2.3	0.105

ns , * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns , * and ** are non significant and significant in probabilitie levels of 5 and 1 %, respectively.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ – مقایسات میانگین اثر اصلی کادمیوم بر اجزای عملکرد، روغن دانه و وزن خشک ریشه خردل سیاه

Table 3- Mean comparisons of main effect of cadmium on yield components, seed oil content and root dry weight of black mustard

تیمار Treatment	**تعداد نیام در بوته** Pod number per plant	**تعداد دانه در نیام** Seed number per pod	**وزن خشک ریشه** Root dry weight	**درصد روغن دانه** Seed oil content (%)
کادمیوم صفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 0 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	29.44 a	9.77 a	6.55 a	35.33 a
کادمیوم ۱۰۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 100 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	22.41 b	8.36 b	4.92 b	29.16 b

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.

Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

جدول ۴ – مقایسات میانگین اثر اصلی باکتری‌های محرک رشد بر اجزای عملکرد، روغن دانه و وزن خشک ریشه خردل سیاه

Table 4- Mean comparisons of main effect of rhizobacteria on yield components, seed oil content and root dry weight of black mustard

تیمار Treatment	**تعداد نیام در بوته** Pod number per plant	**تعداد دانه در نیام** Seed number per pod	**وزن خشک ریشه** Root dry weight	**درصد روغن دانه** Seed oil content (%)
شاهد Control	24.54 b	7.79 c	5.38 b	30.38 b
آزوسپریلوم Azospirillum	26.45 a	9 b	5.9 a	33.006 a
سودوموناس Pseudomonas	26.79 a	10.41 a	5.92 a	33.35 a

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.

Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$

جدول ۵ - مقایسات میانگین اثر اصلی تنظیم کننده‌های رشد گیاه بر عملکرد، وزن خشک ریشه و اندام هوایی و روغن دانه خردل سیاه

Table 5- Mean comparisons of main effect of growth regulators on yield, root and shoot dry weight and oil content of black mustard

تیمار Treatment	**عملکرد** Yield ($g.plant^{-1}$)	**وزن خشک اندام هوایی** Shoot dry weight (g)	**وزن خشک ریشه** Root dry weight (g)	**درصد روغن دانه** Seed oil content (%)
شاهد Control	1.014 b	10.21 b	5.49 b	30.93 b
سالیسیلیک اسید S.A.	1.127 ab	11.36 a	5.79 a	32.68 a
براسینواستروئید B.R.	1.182 a	11.07 a	5.92 a	33.12 a

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.

Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶ - مقایسات میانگین اثر متقابل کادمیوم × باکتری‌های محرک رشد گیاه بر عملکرد، وزن هزار دانه و وزن خشک اندام هوایی خردل سیاه

Table 6- Mean comparisons of the interaction of cadmium×rhizobacteria on yield, thousand grain weight and shoot dry weight of black mustard

تیمار Treatment		عملکرد Yield ($g.plant^{-1}$)	وزن هزار دانه 1000 grain weight (g)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g)
کادمیوم صفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 0 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	شاهد Control	1.08 c	4.51 b	11.14 b
	آزوسپریلوم Azospirillum	1.47 b	5.07 a	11.92 a
	سودوموناس Pseudomonas	1.77 a	5.25 a	12.13 a
کادمیوم ۱۰۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 100 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	شاهد Control	0.58 e	3.89 d	9.07 d
	آزوسپریلوم Azospirillum	0.77 d	4.09 cd	10.11 c
	سودوموناس Pseudomonas	0.95 c	4.18 c	10.92 b

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.

Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

جدول ۷ - مقایسات میانگین اثر اصلی کادمیوم بر اسیدهای چرب دانه خردل سیاه

Table 7- Mean comparisons of main effect of cadmium on fatty acids content of black mustard seed

تیمار Treatment	ایکوزنوئیک اسید Eicosenoic acid (%)	اروسیک اسید Erucic acid (%)	لینولئیک اسید Linoleic acid (%)	اولئیک اسید Oleic acid (%)	درصد روغن دانه Seed oil content (%)
کادمیوم صفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 0 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	5.15 a	37.29 a	20.13 a	14.209 a	35.33 a
کادمیوم ۱۰۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 100 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	4.85 b	36.36 b	18.96 b	13.909 b	29.16 b

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.

Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

جدول ۸ - مقایسات میانگین اثر اصلی باکتری‌های محرک رشد گیاه بر اسیدهای چرب دانه خردل سیاه

Table 8- Mean comparisons of main effect of rhizobacteria on fatty acids content of black mustard seed

تیمار Treatment	ایکوزنوئیک اسید Eicosenoic acid (%)	اروسیک اسید Erucic acid (%)	لینولئیک اسید Linoleic acid (%)	اولئیک اسید Oleic acid (%)	پالمتیک اسید Palmetic acid (%)
شاهد Control	4.937 c	36.77 b	19.43 c	13.96 b	3.502 a
آزوسپریلوم Azospirillum	5.021 b	36.85 a	19.58 b	14.104 a	3.38 b
سودوموناس Pseudomonas	5.056 a	36.86 a	19.62 a	14.107 a	3.38 b

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.

Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۹ - مقایسات میانگین اثر اصلی تنظیم کننده‌های رشد گیاه بر اسیدهای چرب دانه خردل سیاه
Table 9- Mean comparisons of main effect of growth regulators on fatty acids content of black mustard seed

تیمار Treatment	ایکوزنوئیک اسید Eicosenoic acid (%)	اروسیک اسید Erucic acid (%)	لینولئیک اسید Linoleic acid (%)	لینولنیک اسید Linolenic acid (%)	اولئیک اسید Oleic acid (%)	استئاریک اسید Stearic acid (%)	اسیدهای چرب اشباع Saturated fatty acids (%)
شاهد Control	4.937 c	36.73 b	19.46 b	19.27 b	14.002 b	1.47 a	5.002 a
سالیسیلیک اسید S.A.	5.025 b	36.87 a	19.58 a	19.38 a	14.089 a	1.39 b	4.76 b
براسینواستروئید B.R.	5.051 a	36.89 a	19.6 a	19.39 a	14.085 a	1.37 b	4.74 b

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.
Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

جدول ۱۰ - مقایسات میانگین اثر متقابل کادمیوم × باکتری‌های محرک رشد گیاه بر اسیدهای چرب دانه خردل سیاه
Table 10- Mean comparisons of the interaction of cadmium×rhizobacteria on fatty acids content of black mustard seed

تیمار Treatment		استئاریک اسید Stearic acid (%)	لینولنیک اسید Linolenic acid (%)	اسیدهای چرب اشباع Saturated fatty acids (%)	اسیدهای چرب غیراشباع Unsaturated fatty acids (%)
کادمیوم صفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 0 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	شاهد Control	0.81 c	19.62 b	3.51 a	96.101 b
	آزوسپریلوم Azospirillum	0.604 d	19.695 a	3.16 b	96.65 a
	سودوموناس Pseudomonas	0.63 d	19.698 a	3.205 b	96.67 a
کادمیوم ۱۰۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 100 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	شاهد Control	2.18 a	18.91 d	6.46 c	92.66 d
	آزوسپریلوم Azospirillum	2.12 b	19.06 c	6.32 d	93.25 c
	سودوموناس Pseudomonas	2.12 b	19.12 c	6.32 d	93.45 c

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.
Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$.

جدول ۱۱ - مقایسات میانگین اثر متقابل کادمیوم × تنظیم کننده‌های رشد گیاه بر اسیدهای چرب دانه خردل سیاه
Table 11- Mean comparisons of the interaction of cadmium×growth regulators on fatty acids content of black mustard seed

تیمار Treatment		پالمتیک اسید Palmetic acid (%)	اسیدهای چرب غیراشباع Unsaturated fatty acids (%)
کادمیوم صفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 0 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	شاهد Control	2.74 c	96.14 b
	سالیسیلیک اسید S.A.	2.54 d	96.59 a
	براسینواستروئید B.R.	2.53 d	96.67 a
کادمیوم ۱۰۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) 100 Cadmium ($mg.kg^{-1}$)	شاهد Control	4.306 a	92.68 d
	سالیسیلیک اسید S.A.	4.205 b	93.304 c
	براسینواستروئید B.R.	4.195 b	93.38 c

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال $P\leq0.05$ می‌باشد.
Different letters in each column indicate significant difference at $P\leq0.05$

www.SID.ir

Archive of SID

References منابع مورد استفاده

- Ahmad, P., M. Sarwat, N.A. Bhat, M.R. Wani, A.G. Kazi, and L.S. Tran. 2015. Alleviation of cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern. & Coss.) by calcium application involves various physiological and biochemical strategies. *Plos One.* 10(1): e0114571. doi:10.1371/journal.pone.0114571.
- Aksouh, N.M., B.C. Jacobs, F.L. Stoddart, and R.J. Mailer. 2001. Respone of canola to different heat stresses. *Australian Journal of Agricultural Researches*. 52: 817-824.
- Ali, H., E. EKhan, and M.A. Sajad. 2013. Phytoremediation of heavy metals concepts and applications. *Chemosphere*. 91: 869-881.
- Anonymus. 1993. Official methods and recommended practices. The American Oil Chemists Society, Champaign.
- Anonymus. 2002. Official methods of analysis of AOAC international. 17th Ed. MD, USA.
- Bell, J., P. Tanhuanpää, R. Kalendar, A.H. Schulman, and E. Kiviharju. 2007. A major gene for grain cadmium accumulation in oat (*Avena sativa* L.). *Genome.* 50: 588-594.
- Ben Ammar, W., I. Nouairi, M. Zarrouk, and F. Jemal. 2008. The effect of cadmium on lipid and fatty acid biosynthesis in tomato leaves. *Biologia*. 63(1): 86-93.
- Ben Youssef, N., I. Nouairi, S. Ben Temime, W. Taamalli, M. Zarrouk, M.H. Ghorbal, and D. Ben Miled Daoud. 2005. Effets du cadmium sur le metabolisme des lipides de plantules de colza (*Brassica napus* L.). *Biologia*. 328: 745–757.
- Broadley, M., M.J. Willey, J.C. Wilkins, A.J.M. Baker, A. Mead, and P.J. White. 2001. Phylogenetic variation in heavy metal accumulation in angiosperms. *New Phytologist*. 152: 9-27.
- Choudhury, A., and I.R. Kennedy. 2004. Prospects and potentials for systems of biological nitrogen fixation in sustainable rice production. *Biology and Fertility of Soils*. 39: 219-227.
- Dhanasekar, R., and R. Dhandapani. 2012. Effect of biofertilizers on the growth of *Helianthus annuus*. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*. 2: 143-147.
- Feng, J., Q. Shi, X. Wang, M. Wei, F. Yang, and H. Xu. 2010. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. *Scientia Horticulture*. 123: 521–530.
- Glick, B.R. 2010. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnological Advances.* 28: 367-374.
- Grusak, M.A., and D. Dellapenna. 1999. Improving the nutrient composition of plants to enhance human nutrition and health. *Annual Revolution of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 50: 133-161.
- Heshmati, S., M. Amini Dehaghi, and K. Fathi Amirkhiz. 2016. Effects of biological and chemical phosphorous fertilizer on grain yield, oil seed and fatty acids of spring safflower in water deficit conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*. 48: 159-169. (In Persian).
- Horvath, E., G. Szalai, and T. Janda. 2007. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*. 26: 290–300.

www.SID.ir

Archive of SID

- Hunt, R.W., S. Chinnasamy, A. Bhatnagar, and K.C. Das. 2010. Effect of biochemical stimulants on biomass productivity and metabolite content of the microalga, *Chlorella sorokiniana*. *Applications in Biochemistery and Biotechnology*. 162(8): 2400–2414.
- Ildiko, S.G., K.A. Klara, T.M. Marianna, B.A. gnes, M.B. Zsuzsanna, and C. Balint. 2006. The effect of radio frequency heat treatment on nutritional and colloid-chemical properties of different white mustard (*Sinapis alba* L.) varieties. *Innovative Food Science and Emerging Technology.* 7: 74–79.
- Jeong, S., H.S. Moon, K. Nam, J.Y. Kim, and T.S. Kim. 2012. Application of phosphate-solubilizing bacteria for enhancing bioavailability and phytoextraction of cadmium (Cd) from polluted soil. *Chemosphere.* 88: 204-210.
- Khalid, S., M. Shahid, N.K. Niazi, B. Murtaza, and I. Bibi. 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemistery Exploration*. 182: 247–268.
- Khosravi, A., R. Seyedsharifi, and A.A. Imani. 2014. Study of seed inoculation with azotobacter and psedomunas and nitrogen application timing on yield, fertilizer use efficiency and grain filling rate of sunflower. *Journal of Crops Improvement.* 16: 139-155.
- Kraiser, T., D. Gras, A.G. Gutièrrez, B. Gonzalez, and A.R. Gutièrrez. 2011. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of Experimental Botany.* 62: 1455-1466.
- Lebeau, T., A. Braud, and K. Jézéquel. 2008. Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: a review. *Environmental Pollution*. 153: 497-522.
- Liu, J., B.H. Liao, H. Zhou, Y. Zhang, M. Zeng, Y.X. Huang, and Q.R. Zeng. 2010. Main characteristics of physiological-ecological dynamics of soybean during the growth cycle under Cd stress. *Acta Ecologia Sinica*. 30: 333–340.
- Lu, H., Z. Li, J. Wu, Y. Shen, Y. Li, B. Zou, Y. Tang, and P. Zhuang. 2017. Influences of calcium silicate on chemical forms and subcellular distribution of cadmium in *Amaranthus hypochondriacus* L. *Scientific Reports*. 7: 45-83.
- Ma, Y., M. Rajkumar, and H. Freitas. 2009. Isolation and characterization of Ni mobilizing PGPB from serpentine soils and their potential in promoting plant growth and Ni accumulation by *Brassica* spp. *Chemosphere.* 75: 719-725.
- Naghizadeh, M., and R. Kabiri. 2017. Effect of foliar application of salicylic acid on some of physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 9: 315-327. (In Persian).
- Nouairi, I., T. Ghnaya, N. Ben Youssef, M. Zarrouk, and M. Habib Ghorbel. 2006. Changes in content and fatty acid profiles of total lipids of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum* under cadmium stress. *Journal of Plant Physiology.* 163: 1198–1202.
- Rady, M.M., and G.F. Mohamed. 2015. Modulation of salt stress effects on the growth, physio-chemical attributes and yields of *Phaseolus vulgaris* L. plants by the combined application of salicylic acid and Moringa oleifera leaf extract. *Scientia Horticulture.* 193: 105–113.

www.SID.ir

Archive of SID

- Rajkumar, M., N. Ae, and H. Freitas. 2009. Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction. *Chemosphere*. 77: 153-160.
- Rajkumar, M., S. Sandhya, M.N.V. Prasad, and H. Freitas. 2012. Perspectives of plant associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnological Advances*. 30: 1562-1574.
- Sawan, Z.M., S.A. Hafez, A.E. Basyony, and A.R. Alkassas. 2007. Nitrogen, potassium and plant growth retardant effects on oil content and quality of cotton seed. *Grasasy Aceites*. 58(3): 243-251.
- Shakirova, F.M., A.R. Sakhabutdinova, M.V. Bezrukova, R.A. Fatkhutdinova, and D.R. Fatkhutdinova. 2003. Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant Science*. 164: 317-322.
- Sharma, A., and A. Dhiman. 2014. Nickel and cadmium toxicity in plants. *Journal of Pharmaceutical Science Innovation*. 2(2): 20-24.
- Silva, L.R., M.J. Pereira, J. Azevedo, R. Mulas, E. Velasquez, F. Gonzalez-Anders, P. Valentao, and P.B. Andrade. 2013. Inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* enhances the organic and fatty acids content of soybean (*Glycine max* L. Merrill) seeds. *Food Chemistry*. 141: 3636-3648.
- Tikhonovich, I.A., and N.A. Provorov. 2011. Microbiology is the basis of sustainable agriculture: An opinion. *Annuals of Applied Biology*. 159: 155-168.
- Upreti, K.K., and M. Sharma. 2016. Role of plant growth regulators in abiotic stress tolerance. *Abiotic Stress Physiology in Horticultural Crops*. 58: 19-47.
- Vardhini, B.V. 2013. Brassinosteroids, role for amino acids, peptides and amines modulation in stressed plants- A review In: Anjum, N.A., S.S. Gill, and R. Gill (Eds.). Plant adaptation to environmental change: Significance of amino acids and their derivatives. International of Nosworthy Way, Wallingford OX10 8DE, United Kingdom. pp. 300-316.
- Wanasundara Janitha, P.D. 2011. Proteins of brassicaceae oilseeds and their potential as a plant protein source. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 51: 635-677.
- Weyens, N., S. Taghavi, T. Barac, D. Van der Lelie, J. Boulet, T. Artois, R. Carleer, and J. Vangronsveld. 2009. Bacteria associated with oak and ash on a TCE-contaminated site: characterization of isolates with potential to avoid evapotranspiration of TCE. *Environmental Science and Pollution Research*. 16: 830-843.
- Zhang, S., H. Lin, L. Deng, G. Gong, Y. Jia, X. Xu, T. Li, Y. Li, and H. Chen. 2013. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Siegesbeckia orientalis* L. *Ecological Engineering*. 51: 133-139.
- Zhang, S., M. Chen, T. Li, X. Xu, and L. Deng. 2010. A newly found cadmium accumulator-*Malva sinensis* Cavan. *Journal of Hazardous Materials*. 173: 705-709.
- Zhuang, X., J. Chen, and H. Shim. 2007. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environment International*. 33: 406-413.

www.SID.ir

Archive of SID

Changes in Seed Oil Yield and its Components of Black Mustard (*Brassica nigra* L.) as Affected by Rhizobacteria and Growth Regulators under Cadmium Stress Conditions

Ali Barghi[1*], Abdolghayoum Gholipoori[2], Akbar Ghavidel[3], and Mohammad Sedghi[4]

Received: June 2019 , Revised: 20 October 2019, Accepted: 2 December 2019

Abstract

Cadmium is one of the soil primary pollutants which is categorized as heavy metals and brassicaceae family are able to accumulate high amounts of heavy metals such as cadmium by producing high amounts of dry matter. In order to evaluate fatty acids variation, seed oil percentage, yield and yield components of black mustard as affected by growth promoting rhizobacteria and growth regulators under cadmium stress condition, a factorial experiment based on randomized complete block design was conducted at the Research Green House of Mohaghegh Ardabili University with four replications. Experimental treatments were two cadmium levels (0 and 100 milligrams per kilograms of soil), three rhizobacteria levels (control, Azospirillum and Pseudomonas) and three growth regulator levels (control, salicylic acid and brassinosteroid). Mean comparisons indicated that cadmium treatment decreased pods number per plant, grain number per pod, root dry weight, seed oil percentage, oleic, linoleic, eicosenoic and erucic acid percentages, significantly. Growth promoting rhizobacteria increased all of above mentioned parameters significantly, where as, it decreased palmitic acid content. Plant growth regulating sprays resulted in a significant increment in plant yield, shoot and root dry weight, seed oil percentage and all kinds of unsaturated fatty acids while it reduced stearic acid content and saturated fatty acids. The interaction of cadmium×rhizobacteria indicated that both cadmium levels used, along with rhizobacteria treatment, increased plant yield, thousand seed weight, shoot dry weight, linolenic acid and unsaturated fatty acids, where as decreased stearic and saturated fatty acids, significantly. In general, the effects of cadmium on these traits were different. Interaction of cadmium×growth regulators, spray application of growth regulators, under both cadmium levels, reduced palmitic acid and induced unsaturated fatty acids significantly and cadmium application had an inverse result.

Key words: Cadmium, Fatty acid, Mustard, Plant growth regulator, Rhizobacteria.

1- Ph.D. Student of Agro-Ecology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
4- Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
**Corresponding Author: a_barghi@uma.ac.ir*

www.SID.ir