19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

تأثیر شوری آب آبیاری بر توزیع مکانی فعالیت لوسین‌آمینوپپتیداز در ریزوسفر گندم: مقایسه ژنوتیپ‌های حساس و متحمل با روش زیموگرافی درجا

طاهره هژبری[1*]، اکرم حلاج‌نیا[1]، امیر لکزیان[1]، سیدسجاد حسینی[1]

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله: tahereeh.hozhabry@gmail.com

چکیده

ریزوسفر به عنوان یکی از هات‌اسپات‌های مهم فعالیت آنزیمی خاک، نقش کلیدی در چرخه عناصرغذایی ایفا می‌کند و توزیع مکانی آنزیم‌ها در این ناحیه می‌تواند تحت تأثیر تنش‌های محیطی مانند شوری قرار گیرد. در این مطالعه، اثر تنش شوری بر توزیع مکانی فعالیت آنزیم لوسین‌آمینوپپتیداز در ریزوسفر دو ژنوتیپ گندم (نارین و طلایی) با استفاده از روش زیموگرافی، بررسی شد. شاخص‌هایی مانند درصد هات‌اسپات‌های آنزیمی و گستره ریزوسفر ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار درصد هات‌اسپات‌های آنزیمی و محدود شدن گستره ریزوسفر در هر دو ژنوتیپ گردید. برخلاف انتظار، ژنوتیپ متحمل (نارین) تحت تنش، گستره ریزوسفر کمتری داشت، اما با تمرکز فعالیت آنزیمی در نواحی محدودتر، کارآمدی آنزیم‌ها را حفظ کرد. در مقابل، ژنوتیپ حساس (طلایی) با گسترش بیشتر اما، فعالیت آنزیمی کمتر واکنش داد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده بهره‌گیری از سازوکارهای متفاوت در دو ژنوتیپ بود. بنابراین، تفاوت در الگوی ترشحات ریشه‌ای و توزیع فعالیت آنزیمی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در سازوکارهای تحمل به شوری در ژنوتیپ‌های مختلف گندم ایفا کند.

واژگان کلیدی: تنش شوری، توزیع مکانی آنزیم، فعالیت آنزیمی، گستره ریزوسفر، هات‌اسپات

مقدمه

ریزجانداران در خاک به صورت یکنواخت توزیع نشده‌اند و اغلب در مکانی با ورودی زیاد سوبسترا نسبت به خاک اطراف که به آن‌ها هات‌اسپات گفته می‌شود، تجمع می‌یابند (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015; Tecon & Or, 2017). ریشه‌های زنده طیف وسیعی از ترکیبات را به خاک ترشح می‌کنند (Jones et al., 2009) و ریزوسفر را به عنوان یکی از مهم‌ترین هات‌اسپات‌های آنزیمی به وجود می‌آوردند (Bais et al., 2004). یکی از شاخص‌های مهم در پویایی متابولیک موجودات زنده در خاک، آنزیم‌های خاک هستند که عمدتاً از ترشحات گیاهی و ریزجانداران سرچشمه می‌گیرند (Lian et al., 2019). این آنزیم‌ها، می‌توانند مواد مغذی را برای گیاهان و ریزجانداران معدنی کنند و در فرآیندهای تبدیل انرژی و چرخه مواد نقش داشته باشند (Szoboszlay et al., 2015). آنزیم‌های خاک به تغییرات ناشی از تنش‌های محیطی واکنش نشان می‌دهند و این تأثیرات موجب تغییر در فعالیت آن‌ها می‌شود (Gu et al., 2019).

تاکنون مطالعات متعددی به بررسی اثرات تنش‌های خشکی، غرقابی، دمایی و فلزات سنگین بر توزیع مکانی فعالیت‌های آنزیمی خاک پرداخته‌اند، اما تأثیر تنش شوری کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Duan ChengJiao et al., 2018; Hosseini et al., 2022). این در حالی است که شوری یکی از عوامل محدودکننده اصلی در تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود و با ایجاد اختلال در فشار اسمزی و جذب عناصر غذایی، به طور مستقیم سلامت و رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Yaish & Kumar,

2015). در پاسخ به چنین محدودیت‌هایی، گیاهان مجموعه‌ای از راهکارهای مرتبط با ریزوسفر را برای افزایش بهره‌وری از منابع محدود مانند آب و عناصر غذایی توسعه داده‌اند. این راهکارها شامل تغییرات مورفولوژیکی در ریشه، برقراری روابط همزیستی با ریزجانداران مفید و تغییر در ترکیب ترشحات ریشه و آنزیم‌های خارج سلولی می‌باشد (Smith et al., 2001; Vetterlein et al., 2020; Vives-Peris et al., 2020). از سوی دیگر توانایی گیاه در ایجاد و تنظیم این پاسخ‌های ریزوسفری، می‌تواند بین گونه‌ها و حتی میان ژنوتیپ‌های مختلف درون یک گونه، متفاوت باشد. این تفاوت‌ها، احتمالاً بر الگوی توزیع مکانی فعالیت‌های آنزیمی نیز اثرگذاشته و موجب تغییر در فراهمی عناصر غذایی در ریزوسفر می‌شود (Gianfreda, 2015). با این حال، اطلاعاتی درباره چگونگی تفاوت توزیع مکانی فعالیت‌های آنزیمی بین ژنوتیپ‌های متحمل و حساس به شوری در گندم، تاکنون گزارش نشده است.

بر این اساس، هدف این پژوهش، بررسی اثر شوری آب آبیاری بر توزیع مکانی فعالیت آنزیم لوسین‌آمینوپپتیداز در ریزوسفر ژنوتیپ‌های مختلف گندم بود. در این پژوهش، تلاش شده است که با اتکا به تکنیک نوین زیموگرافی، توزیع مکانی فعالیت لوسین‌آمینوپپتیداز که در چرخه نیتروژن نقش دارد، توصیف و تحلیل شود. در پژوهش حاضر فرض شده است که تنش شوری با کاهش فعالیت آنزیم لوسین‌آمینوپپتیداز، منجر به کاهش سطح نسبی نواحی با فعالیت آنزیمی بالا و محدود شدن گستره ریزوسفر می‌گردد. همچنین، ژنوتیپ متحمل به شوری، احتمالاً دارای ریزوسفر گسترده‌تر و درصد بالاتری از هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی نسبت به ژنوتیپ حساس به شوری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور اجرای این پژوهش، خاک زراعی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد برداشته شد. نمونه خاک پس از عبور از الک دو میلی‌متری با ماسه بادی به نسبت وزنی یک به یک مخلوط و کودهای شیمیایی مورد نیاز براساس توصیه کودی به خاک اضافه گردید. سپس، شانزده ریزوباکس با این بستر خاکی به‌صورت افقی پر شدند. بذرهای دو رقم نارین و طلایی به عنوان ارقام متحمل و حساس به شوری، انتخاب شدند. در هر ریزوباکس، یک بذر جوانه‌دار سالم کاشته شد. ریزوباکس‌ها با زاویه ۴۵ درجه در شرایط گلخانه با دمای روز ۲۷ و شب ۱۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در طی مدت زمان رشد گیاه، رطوبت خاک در سطح معادل ۸۰٪ ظرفیت نگهداشت آب در خاک از طریق وزن کردن، ثابت نگه داشته شد. در طی دو هفته، نخست، تمام ریزوباکس‌ها با آب مقطر آبیاری شدند. از ابتدای هفته سوم، جهت اعمال تیمار شوری، نیمی از ریزوباکس‌ها با محلول کلرید سدیم (NaCl) با غلظت ۱۵۰ میلی‌مولار و نیمه دیگر با آب مقطر، تحت شرایط یکسان، آبیاری شدند. این رژیم آبیاری تا پایان دوره رشد (۸ هفته) و انجام آزمایش‌های نهایی ادامه یافت.

جهت بررسی الگوی مکانی فعالیت آنزیم لوسین‌آمینوپپتیداز[1] در خاک، از روش زیموگرافی درجا استفاده شد (Razavi et al, 2019). در پایان دوره رشد، ابتدا دیواره پایینی ریزوباکس‌ها باز شده و سپس غشاهای پلی‌آمید (با قطر ۲۰ سانتی‌متر و اندازه منفذ ۰/۴۵ میکرومتر) که با سوبسترای اختصاصی این آنزیم، یعنی ال - لوسین - ۷ - آمینو - ۴ - متیل‌کومارین[2] اشباع شده بودند، به‌طور مستقیم بر سطح خاک قرار گرفتند. پس از انکوباسیون به مدت ۱ ساعت در دمای محیط، غشاها به‌آرامی از سطح خاک جدا شده و در محیط تاریک، تحت تابش نور UV با طول موج تحریک ۳۵۵ نانومتر و طول موج نشر ۴۶۰ نانومتر، با دوربین دیجیتال Nikon D5600 (به همراه لنز AF-S DX NIKKOR 18-140mm f/3.5-5.6G ED VR) تصویربرداری شدند. به منظور کالیبراسیون شدت فلورسانس و تبدیل آن به مقادیر نسبی فعالیت آنزیمی، از غشاهای استاندارد با ابعاد تقریبی ۳ تا

[1] Leucine aminopeptidase
[2] L-Leucine-7-amido-AMC

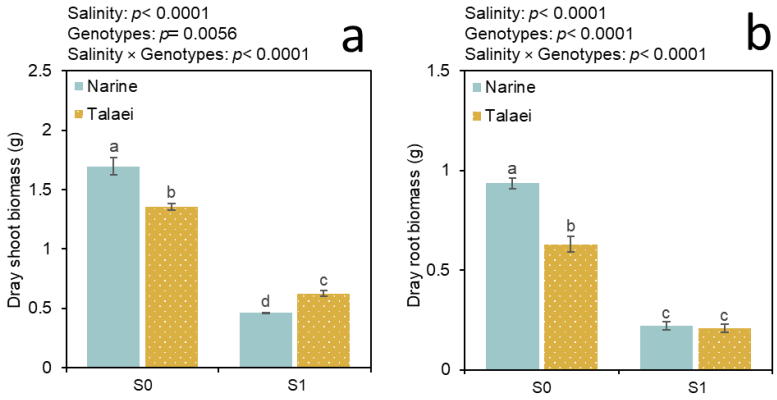
۴ سانتی‌مترمربع استفاده شد که با حجم ثابتی (۵ میکرولیتر) از محلول AMC در غلظت‌های مختلف (۰/۰۱ تا ۱۰ میکرومولار) آغشته شده و در شرایطی مشابه با نمونه‌ها تصویربرداری شدند.

پردازش و تحلیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ImageJ انجام گرفت. برای تعیین درصد هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی، از روش آماری mean+2SD استفاده شد (Bilyera et al., 2020). درصد هات‌اسپات‌های نرمال شده از تقسیم مساحت هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی به کل سطح ریشه تعیین شد. همچنین گستره فعالیت آنزیمی در ریزوسفر، از مرکز ریشه تا ناحیه‌ای تعریف شد که در آن مقدار فعالیت آنزیمی حداقل ۲۰ درصد بیشتر از مقدار متناظر در خاک غیرریزوسفری بود. گستره ریزوسفر نرمال شده یا استاندارد از طریق تقسیم گستره ریزوسفر بر شعاع ریشه محاسبه شد. وزن خشک اندام هوایی و ریشه، پس از خشک کردن نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد.

برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از آنالیز واریانس دوطرفه استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی HSD در سطح احتمال ۵ درصد با نرم‌افزار JMP انجام گرفت.

نتایج و بحث

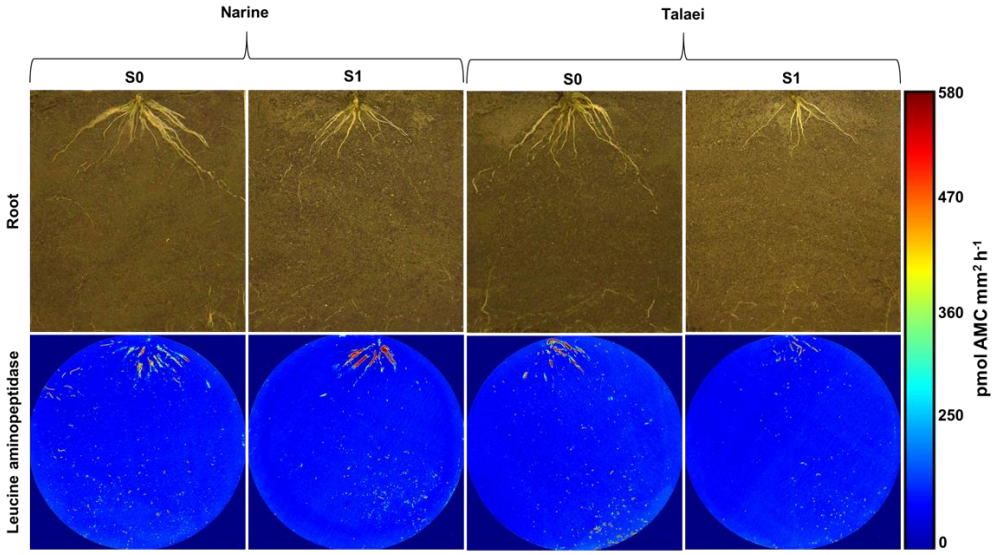
در شرایط بدون تنش، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در ژنوتیپ نارین به‌ترتیب ۲۵٪ و ۴۸٪ بیشتر از ژنوتیپ طلایی بود (شکل a۱ و b، $p< 0.05$). تحت تنش شوری، وزن خشک اندام‌هوایی در نارین ۷۳٪ و در طلایی ۵۴٪ کاهش یافت (شکل a۱، $p< 0.05$). در ریشه نیز این کاهش برای نارین ۷۶٪ و برای طلایی ۶۷٪ بود (شکل b۱، $p< 0.05$). بنابراین، برخلاف انتظار تنش شوری اثر بازدارنده بیشتری بر رشد ژنوتیپ نارین نسبت به طلایی داشت.



شکل ۱- زیست‌توده خشک a) اندام هوایی و b) ریشه در ژنوتیپ‌های حساس و متحمل تحت شرایط مطلوب و تنش شوری.

حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال $p<0.05$ هستند. میله‌های خطا نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشند.

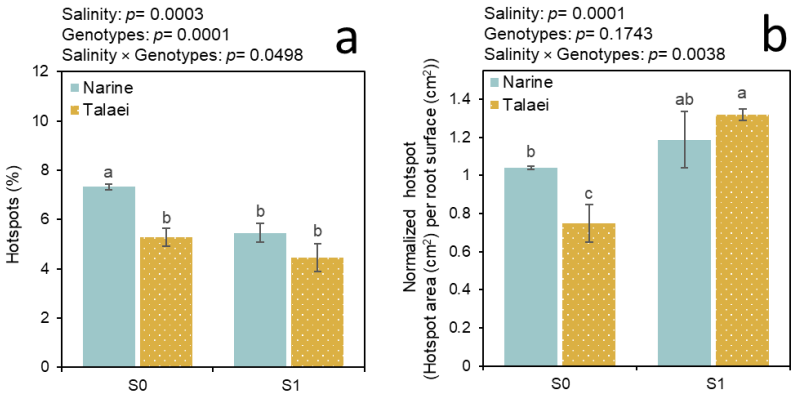
تصاویر زیموگرام نشان داد که توزیع مکانی فعالیت آنزیمی میان ژنوتیپ‌های گندم متفاوت بوده و با ویژگی‌های ریشه و ژنتیک گیاه مرتبط بود. ژنوتیپ نارین در هر دو شرایط، سطح وسیع‌تری از هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی را در ریزوسفر نشان داد (شکل ۲). همچنین تنش شوری در هر دو ژنوتیپ منجر به محدود شدن توزیع مکانی فعالیت آنزیمی در ریزوسفر شد.



شکل ۳- توزیع مکانی فعالیت آنزیم لوسین‌آمینوپپتیداز در ریزوسفر ژنوتیپ‌های حساس و متحمل.

S0 وS1 به ترتیب شرایط مطلوب و تنش شوری می‌باشند. رنگ قرمز نشان دهنده فعالیت آنزیمی زیاد و رنگ آبی نشان دهنده فعالیت آنزیمی کم است.

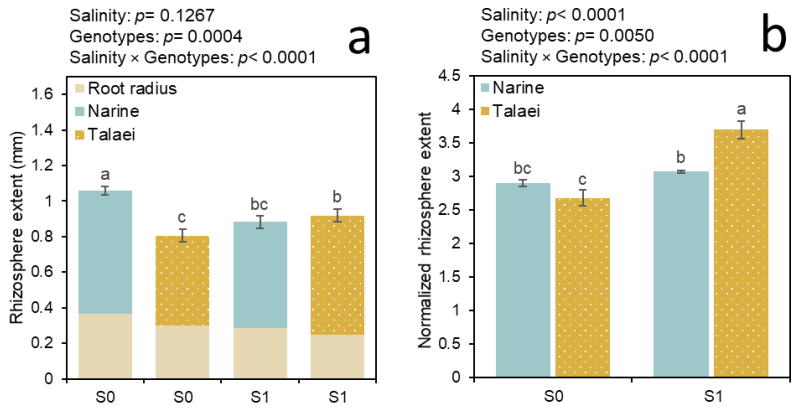
در شرایط بدون تنش، درصد هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی در ریزوسفر ژنوتیپ نارین ۳۹٪ بیشتر از ژنوتیپ طلایی بود (شکل a۳، $p< 0.05$). در شرایط تنش شوری نیز درصد هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی در ژنوتیپ نارین حدود ۲۳٪ بیشتر از طلایی بود، اما این اختلاف معنی‌دار نبود (شکل a۳). این افزایش می‌تواند به دلیل رشد بیشتر ژنوتیپ نارین نسبت به ژنوتیپ طلایی باشد. هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی معمولاً در پاسخ به رشد ریشه شکل می‌گیرند که این امر هم ناشی از تولید آنزیم توسط گیاه به‌منظور تسهیل جذب عناصر غذایی و هم به دلیل افزایش فعالیت میکروبی در مجاورت ریشه‌ها است (Lee et al., 2025; Hosseini et al., 2024). فراوانی و گسترش ریشه معمولاً به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده گستره مکانی و شدت فعالیت آنزیم‌های برون‌سلولی گزارش شده‌اند (Hosseini et al., 2024; Kaloterakis et al., 2024). تنش شوری به ترتیب موجب کاهش ۲۵٪ و ۱۶٪ هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی در ژنوتیپ‌های نارین و طلایی شد (شکل a۳، $p< 0.05$). این کاهش می‌تواند ناشی از اثر مستقیم سمیت یون‌های سدیم و کلر بر ریزجانداران خاک (Singh, 2016)، و یا نتیجه اثرات غیرمستقیم این یون‌ها از طریق کاهش رشد گیاه باشد (Shabaan et al., 2022). در شرایط بدون تنش، هات‌اسپات نرمال شده در ژنوتیپ نارین بیشتر از طلایی بود (شکل b۳، $p< 0.05$). در شرایط تنش شوری، مساحت هات‌اسپات‌ها به ازای هر واحد سطح ریشه برای ژنوتیپ طلایی بیشتر از نارین بود، هرچند این تفاوت معنی‌دار نبود (شکل b۳). این نتایج نشان می‌دهد که افزایش هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی در ژنوتیپ نارین صرفاً ناشی از زیست‌توده بیشتر ریشه نبوده، بلکه بیانگر پتانسیل ژنتیکی بیشتر این ژنوتیپ در تولید ترشحات ریشه‌ای و آنزیم‌های خارج سلولی می‌باشد. همچنین، تنش شوری موجب افزایش درصد هات‌اسپات نرمال شده در هر دو ژنوتیپ شد (شکل b۳)، که بیانگر آن است که کاهش درصد هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی در اثر شوری عمدتاً ناشی از کاهش زیست‌توده ریشه بوده است.



شکل ۳- a) درصد هات‌اسپات و b) هات‌اسپات نرمال شده در ژنوتیپ‌های حساس و متحمل تحت شرایط مطلوب و تنش شوری.

حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال $p<0.05$ هستند. میله‌های خطا نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشند.

در شرایط بدون تنش، گستره فعالیت آنزیمی در ریزوسفر ژنوتیپ نارین تقریباً ۳۱٪ از ژنوتیپ طلایی بیشتر بود (شکل a۴، $p< 0.05$). این یافته هم‌راستا با درصد بالاتر هات‌اسپات‌های فعالیت آنزیمی در نارین است. با این حال، در مواجهه با تنش شوری، الگوی متفاوتی مشاهده شد. اعمال تنش شوری در ژنوتیپ طلایی موجب افزایش گستره ریزوسفر شد، در حالی‌که در ژنوتیپ نارین کاهش در گستره ریزوسفر مشاهده شد (شکل a۴، $p< 0.05$). این موضوع نشان می‌دهد که ژنوتیپ نارین منابع کربنی خود را بیشتر صرف فرآیندهای درون‌گیاهی (مانند تنظیم اسمزی و سنتز پرولین) کرده (Munns & Tester, 2008) و احتمالاً ترشحات ریشه‌ای خود را کاهش داده یا در فضایی محدودتر متمرکز کرده است (Hosseini et al., 2024). در حالی که ژنوتیپ طلایی که توانایی تنظیم اسمزی کمتری دارد در مواجه با تنش شوری احتمالاً ترکیب ترشحات ریشه‌ای خود را تغییر داده یا آن را افزایش داده است. نتایج گستره نرمال‌شده ریزوسفر این الگو را تأیید می‌کند (شکل b۴). در شرایط بدون تنش ژنوتیپ نارین حدود ۸/۲٪ گستره ریزوسفر نرمال شده بیشتری نسبت به ژنوتیپ طلایی داشت (شکل b۴، $p< 0.05$). اما، در مواجهه با تنش شوری، یک الگوی معکوس مشاهده شد و ژنوتیپ طلایی با جهشی حدود ۳۸٪ بیشترین افزایش را تجربه کرد (شکل b۴، $p< 0.05$). به طورکلی تنش شوری موجب افزایش گستره ریزوسفر نرمال شده در هر دو ژنوتیپ شد (شکل b۴).



شکل ۴- گستره a) ریزوسفر و b) ریزوسفر نرمال شده در ژنوتیپ‌های حساس و متحمل تحت شرایط مطلوب و تنش شوری.

حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال $p<0.05$ هستند. میله‌های خطا نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تنش شوری موجب کاهش معنی‌دار تشکیل هاتاسپات‌های فعالیت لوسین‌آمینوپپتیداز در ریزوسفر هر دو ژنوتیپ شد. با این حال، ژنوتیپ نارین به عنوان ژنوتیپ متحمل، همچنان فراوانی بیشتری از هاتاسپات‌های فعالیت آنزیمی نسبت به ژنوتیپ طلایی داشت. همچنین اثر تنش شوری بر گستره فعالیت آنزیمی در ریزوسفر برای دو ژنوتیپ متفاوت بود. ژنوتیپ نارین در شرایط تنش شوری، گستره ریزوسفر کمتری داشت، اما با تمرکز فعالیت آنزیمی در نواحی محدود، امکان صرفه‌جویی در انرژی و منابع را در شرایط تنش فراهم آورد. در مقابل، ژنوتیپ طلایی در شرایط شوری گستره فعالیت آنزیمی در ریزوسفر را افزایش داد؛ موضوعی که نشان‌دهنده بهره‌گیری از سازوکارهای متفاوت در دو ژنوتیپ است. بنابراین، تفاوت در الگوی ترشحات ریشه‌ای و توزیع فعالیت آنزیمی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در سازوکارهای تحمل به شوری در ژنوتیپ‌های مختلف گندم ایفا کند.

فهرست منابع

1. Bais, H. P., Park, S.-W., Weir, T. L., Callaway, R. M., & Vivanco, J. M. (2004). How plants communicate using the underground information superhighway. Trends in plant science, 9(1), 26–32.
2. Bilyera, N., Kuzyakova, I., Guber, A., Razavi, B. S., & Kuzyakov, Y. (2020). How “hot” are hotspots: Statistically localizing the high-activity areas on soil and rhizosphere images. Rhizosphere, 16, 100259.
3. Duan ChengJiao, D. C., Fang LinChuan, F. L., Yang CongLi, Y. C., Chen WeiBin, C. W., Cui YongXing, C. Y., & Li ShiQing, L. S. (2018). Reveal the response of enzyme activities to heavy metals through in situ zymography.
4. Gianfreda, L. (2015). Enzymes of importance to rhizosphere processes. Journal of soil science and plant nutrition, 15(2), 283–306.
5. Gu, C., Zhang, S., Han, P., Hu, X., Xie, L., Li, Y., Brooks, M., Liao, X., & Qin, L. (2019). Soil enzyme activity in soils subjected to flooding and the effect on nitrogen and phosphorus uptake by oilseed rape. Frontiers in plant science, 10, 368.
6. Hosseini, S. S., Lakzian, A., & Razavi, B. S. (2022). Reduction in root active zones under drought stress controls spatial distribution and catalytic efficiency of enzyme activities in rhizosphere of wheat. Rhizosphere, 23, 100561.
7. Hosseini, S. S., Razavi, B. S., & Lakzian, A. (2024). Drought tolerance of wheat genotypes is associated with rhizosphere size and enzyme system. Plant and Soil, 502(1), 671–685.
8. Jones, D. L., Nguyen, C., & Finlay, R. D. (2009). Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil–root interface. In: Springer.
9. Kaloterakis, N., Rashtbari, M., Razavi, B. S., Braun-Kiewnick, A., Giongo, A., Smalla, K., Kummer, C., Kummer, S., Reichel, R., & Brüggemann, N. (2024). Preceding crop legacy modulates the early growth of winter wheat by influencing root growth dynamics, rhizosphere processes, and microbial interactions. Soil Biology and Biochemistry, 191, 109343.
10. Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: concept & review. Soil Biology and Biochemistry, 83, 184–199.
11. Lee, J. H., Kim, K., Guber, A. K., Oerther, M., Kuzyakov, Y., & Kravchenko, A. N. (2025). Direct root contact among neighboring plants influences activity of soil extracellular enzymes. Applied Soil Ecology, 215, 106422.
12. Lian, T., Ma, Q., Shi, Q., Cai, Z., Zhang, Y., Cheng, Y., & Nian, H. (2019). High aluminum stress drives different rhizosphere soil enzyme activities and bacterial community structure between aluminum-tolerant and aluminum-sensitive soybean genotypes. Plant and Soil, 440, 409–425.
13. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. Annu. Rev. Plant Biol., 59(1), 651–681.
14. Razavi, B. S., Zhang, X., Bilyera, N., Guber, A., & Zarebanadkouki, M. (2019). Soil zymography: simple and reliable? Review of current knowledge and optimization of the method. Rhizosphere, 11, 100161.

15. Shabaan, M., Asghar, H. N., Zahir, Z. A., Zhang, X., Sardar, M. F., & Li, H. (2022). Salt-tolerant PGPR confer salt tolerance to maize through enhanced soil biological health, enzymatic activities, nutrient uptake and antioxidant defense. Frontiers in Microbiology, 13, 901865.
16. Singh, K. (2016). Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. Land Degradation & Development, 27(3), 706–718.
17. Smith, S. E., Dickson, S., & Smith, F. A. (2001). Nutrient transfer in arbuscular mycorrhizas: how are fungal and plant processes integrated? Functional Plant Biology, 28(7), 685–696.
18. Szoboszlay, M., Lambers, J., Chappell, J., Kupper, J. V., Moe, L. A., & McNear Jr, D. H. (2015). Comparison of root system architecture and rhizosphere microbial communities of Balsas teosinte and domesticated corn cultivars. Soil Biology and Biochemistry, 80, 34–44.
19. Tecon, R., & Or, D. (2017). Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. FEMS microbiology reviews, 41(5), 599–623.
20. Vetterlein, D., Carminati, A., Kögel-Knabner, I., Bienert, G. P., Smalla, K., Oburger, E., Schnepf, A., Banitz, T., Tarkka, M. T., & Schlüter, S. (2020). Rhizosphere spatiotemporal organization–a key to rhizosphere functions. Frontiers in Agronomy, 2, 8.
21. Vives-Peris, V., De Ollas, C., Gómez-Cadenas, A., & Pérez-Clemente, R. M. (2020). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. Plant cell reports, 39(1), 3–17.
22. Yaish, M. W., & Kumar, P. P. (2015). Salt tolerance research in date palm tree (Phoenix dactylifera L.), past, present, and future perspectives. Frontiers in plant science, 6, 348.

The Effect of Irrigation Water Salinity on the Spatial Distribution of Leucine Aminopeptidase Activity in the Wheat Rhizosphere: A Comparison of Salt-Sensitive and Salt-Tolerant Genotypes Using In-Situ Zymography

T. Hozhabri[1]. A. Halajnia[1]. A. Lakzian[1]. S.S. Hosseini[1]
1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*Corresponding Author Email: tahereeh.hozhabry@gmail.com

Abstract

The rhizosphere, as a critical enzymatic hotspot in soil, plays a key role in nutrient cycling. The spatial distribution of enzymes within this zone can be influenced by environmental stresses such as salinity. This study investigated the effect of salinity stress on the spatial distribution of leucine aminopeptidase activity in the rhizosphere of two wheat genotypes (Narin and Talaei) using zymography. Indices such as the percentage of enzymatic hotspots and rhizosphere extent were evaluated. Results demonstrated that salinity stress significantly reduced the percentage of enzymatic hotspots and contracted the rhizosphere extent in both genotypes. Contrary to expectations, the tolerant genotype (Narin) exhibited a smaller rhizosphere extent under stress but maintained enzymatic efficiency through concentrated activity within restricted zones. In contrast, the sensitive genotype (Talaei) responded with a more extensive yet low enzymatic activity. These differences indicate the deployment of distinct mechanisms in the two genotypes. Therefore, differences in root exudation patterns and the distribution of enzymatic activities may play a decisive role in the mechanisms of salinity tolerance among different wheat genotypes.

Keywords: Salinity stress, Enzyme spatial distribution, Enzyme activities, Rhizosphere extent, Hotspot