تأثیر اسیدهای آلی بر افزایش قابلیت جذب و برداشت فسفر از ریزوسفر گندم

زهرا خادمی،[۱*] دیوی جونز، محمد جعفر ملکوتی و فاطمه اسدی

استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب؛ **Zr_khademi@yahoo.com**

استاد خاکشناسی و محیط زیست دانشگاه ولز انگلستان؛ **afs080@bangor.ac.uk**

استاد دانشگاه تربیت مدرس؛ **mjmalakouti@hotmail.com**

کارشناس ارشد موسسه تحقیقات خاک و آب؛ **nel1355@hotmail.com**

چکیده

اسیدهای آلی نظیر اسید سیتریک و اسید اگزالیک در واکنشهای ریزوسفر خاک به ویژه در جذب عناصر غذایی نقش مهمی را ایفا می کنند. این تحقیق در سال ۱۳۸۲ به منظور بررسی تأثیر نوع و غلظت‌های مؤثر اسید در واکنشهای ریزوسفر گندم (*Triticum aestivum* L.) و تأثیر آنها بر جذب ^{33}P به وسیله ریشه گندم و انتقال آن به اندامهای هوایی گیاه انجام گرفت. به این منظور گیاه گندم در محفظه کوچک ریزوسفری محتوی خاک (microcosm) کشت گردید. ریشه به تدریج در لایه های خاک نشان‌دار شده با $KH_2{}^{33}PO_4$ نفوذ کرد. چهل و هشت ساعت بعد از نشان‌دار کردن خاک، سیترات و اگزالات در دو شکل یونی با غلظت‌های ۱ و ۱۰ میلی‌مولار به داخل محفظه ریزوسفر تزریق شدند و این عمل روزی یکبار، به مدت چهار روز از همان منفذ ادامه یافت. نتایج حاصل نشان داد اسید اگزالیک جذب فسفر ^{33}P را توسط گیاه به میزان چند برابر افزایش داد ولی اسید سیتریک تأثیر چندانی بر افزایش یا کاهش جذب ^{33}P نداشت. سرعت معدنی شدن اسید سیتریک در ریزوسفر بیشتر از اسید اگزالیک بود و به نظر می رسد که معدنی شدن سریع اسید سیتریک مانع از افزایش جذب ^{33}P به وسیله سیترات گردید، لذا اسید سیتریک در جذب ^{33}P به وسیله گندم اثری نداشت. در نتیجه می توان اظهار داشت که اسیدهای آلی سرعت آزادسازی ^{33}P از کانی ها را در ریزوسفر افزایش داده و جذب این عنصر به وسیله گندم را تسهیل می‌کنند. این تأثیر به نوع اسید آلی بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: سیترات، اگزالات، آزاد سازی، فسفر، گندم، ریزوسفر

مقدمه

در بسیاری از کشورها به علت کمبود اطلاعات کشاورزان، نبود سرمایه، گستردگی فقر و عدم رعایت استانداردهای زندگی، تغذیه کافی و موثر محصولات کشاورزی هنوز به صورت حل نشده باقی مانده است. استفاده از فرایندهای طبیعی در حل مسئله تغذیه فسفر راه حل جدیدی را پیش روی محققان علم تغذیه گیاه و حاصلخیزی خاک برای دستیابی به کشاورزی پایدار به ویژه در خاکهای آهکی گذارده است (Shenoy و Kalagudi ، ۲۰۰۵). ریشه گیاهان انواع مختلفی از مواد آلی از جمله اسیدهای آمینه، اسیدهای آلی، فنولها و قندهای مختلف از خود ترشح می‌کنند (Delhaize و Ryan، ۱۹۹۵). انواع اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، مالیک، مالونیک، اگزالیک و تارتاریک که از ریشه گیاهان به داخل ریزوسفر ترشح می‌شوند،

---

۱ – نویسنده مسئول: تهران، خیابان کارگر شمالی–خیابان جلال آل احمد– روبروی بیمارستان شریعتی–مؤسسه تحقیقات خاک و آب، صندوق پستی ۶۱۸۵–۱۴۱۵۵

* دریافت: ۸۶/۳/۱ و پذیرش: ۸۶/۱۲/۲۲

جذب مواد غذائی خاک از جمله فسفر را به وسیله ریشه‌ها تسریع می‌کنند (Delhaize و Ryan، ۱۹۹۵؛ Jones، ۱۹۹۸). تثبیت فسفر در سطح کانی های خاک و تشکیل رسوبات غیر محلول فسفردار از مشکلات عمده تولید در خاکهای آهکی می‌باشد. برای اینکه زراعت در چنین خاکهایی سودآور باشد، لازم است مقدار زیادی کود فسفاته به زمین اضافه شود (Ibrikci و همکاران، ۲۰۰۵) زیرا مقداری از کود فسفاته تبدیل به کانی های پایدار مانند Ca − P شده که برای گیاه غیر قابل دسترس می باشند (Marshner، ۱۹۹۵). به همین جهت دقت و مطالعه کافی در رابطه با تعیین مقدار فسفر مورد نیاز برای محصولات گوناگون در خاکهای مختلف با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی آنها لازم است. آزمایشهای متعددی نشان داده است که اسیدهای آلی که از ریشه گیاهان ترشح می‌شوند جذب فسفر توسط گیاهان را افزایش می دهند (Ryan و همکاران، ۲۰۰۱؛ Strom و همکاران، ۲۰۰۲). به عنوان مثال گونه‌های گیاهی که اسید آلی از ریشه آنها ترشح می شود، بهتر و بیشتر از گیاهانی که چنین توانایی را ندارند، شکل های معدنی فسفر خاک را که در شرایط طبیعی برای گیاه غیر قابل دسترس است، جذب می‌کنند (Randall و همکاران، ۲۰۰۱؛ Hocking، ۲۰۰۱). بنابراین در خاکهای آهکی می‌توان گیاهانی را که اسیدهای آلی را به مقدار زیاد ترشح می‌کنند (مانند لوپن) به صورت مخلوط و یا در تناوب با گیاهان دیگری که این اسیدها را ترشح نمی‌کنند، کشت کرد. به طوری که اسیدهای ترشح شده در طول زمان، عناصر غذایی را آزاد کرده تا در کشت‌های بعدی و یا برای گیاهان فاقد اسیدهای آلی به مصرف برسد. بدیهی است میزان کارآیی این مرحله بستگی به نوع اسید آلی، غلظت آن و همچنین نوع عنصر غذائی مورد نظر خواهد داشت (خادمی و همکاران، ۱۳۸۳؛ Jones، ۱۹۹۸).

واکنشهای شیمیایی ریزوسفر با اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه تعدیل شده و این خود باعث تغییر در قابلیت جذب ترکیبات فسفری می‌شود، زیرا در حضور اسیدهای آلی فعالیت ریزجاندارانی که فسفر آلی خاک را تجزیه می‌کنند، افزایش می‌یابد (Richardson، ۱۹۹۴) و یا مستقیماً تحت تأثیر این اسیدها، pH محلول خاک کاهش یافته و در نتیجه حلالیت ترکیبات کم محلول فسفر و عرضه این عنصر غذائی افزایش می‌یابد. همچنین ممکن است این اسیدها با تغییر دادن خصوصیات سطحی ذرات خاک، رقابت با یونهای فسفات برای محل های جذب سطحی و نیز تشکیل کمپلکس با کاتیونهائی که با P ترکیب شده‌اند، مقدار فسفر قابل دسترس ریشه را افزایش دهند (BarYosef، ۱۹۹۱؛ Jones و Darrah، ۱۹۹۴؛ Lan و همکاران، ۱۹۹۵؛ Jones، ۱۹۹۸؛ Hocking، ۲۰۰۱). اهمیت نسبی هر یک از این واکنش‌ها و مراحل آن ها به نوع خاک و نوع ترکیبات فسفری موجود در خاک بستگی. دارد. افزایش غلظت اسیدهای آلی از طرق مختلف می‌تواند باعث افزایش غلظت فسفر در محلول خاک شود. به عنوان مثال اسید سیتریک پس از ترشح از ریشه و کاهش pH خاک، از طریق حلالیت Ca –P (انحلال سنگ فسفات) و یا اسید اگزالیک با تشکیل رسوب اگزالات کلسیم (Ca-oxalate) و آزاد سازی فسفر از Ca-P می توانند غلظت فسفر محلول خاک را افزایش دهند (Strom و همکاران، ۲۰۰۱). میزان کارآیی اسید آلی در آزادسازی P کمپلکس شده با یونهای فلزی و همچنین جایگزینی P از سطوح باردار خاک بستگی به تعداد کربوکسیل‌های موجود در ملکول آن اسید دارد (Bar-Yosef، ۱۹۹۱؛ Bolan و همکاران، ۱۹۹۴؛ Staunton و Leprine ۱۹۹۶؛ Jones، ۱۹۹۸). به عبارت دقیق‌تر قدرت اسیدهای آلی در آزادسازی فسفر جذب سطحی شده ذرات خاک به صورت زیر است:

مونوکربوکسیلیک اسید < دی‌کربوکسیلیک اسید < تری‌کربوکسیلیک اسید

هدف اصلی از تحقیق حاضر این بود که بررسی شود آیا اسیدهای آلی نظیر اسید سیتریک و اسید اگزالیک توانایی بهبود تغذیه گندم در خاکها و افزایش جذب فسفر توسط گیاه را دارند؟ در این رابطه نوع و غلظت اسیدهای آلی از چه اهمیتی می تواند برخوردار باشد؟

مواد و روشها

جمع‌آوری نمونه های خاک

خاک مورد آزمایش متعلق به منطقه کرج (″۰۰ ′۳۹ ،°۳۵ و ″۰۰ ′۲ ،°۵۱) و بر اساس رده بندی Soil Toxonomy، *Fine-loamy, Mixed, Thermic, Typic Torrifluvents* می باشد. نمونه خاک از محلی که دارای بارندگی متوسط سالانه ۲۵۰mm میلی متر و میانگین دمای سالانه ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، شیب ۲-۰ درصد، ارتفاع ۱۱۵۰ متر بود و بیشتر با گیاهان تر انگبین (*Alhagi camelorum* Fisch) و کاسنی (*Chicorium intybus* L.) پوشیده بود، از افق A_{hk} (۳۰-۰ سانتیمتر) با بیل جمع‌آوری گردید. سپس خاک از الک ۵ میلی‌متر عبور داده شده و در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد تا موقع استفاده نگهداری شد. خواص فیزیکی و شیمیایی این خاک در جدول یک نشان داده شده است.

جذب ^{33}P به وسیله گندم

بذر گندم (*Triticum aestivum*) به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر خیسانده شد و بعد از قرار دادن بر روی کاغذ صافی مرطوب به مدت ۴۸ ساعت در حرارت

۲۰ درجه سانتی‌گراد جوانه زد. بعد از سه روز هر گیاهچه دارای یک ریشه اصلی و دو ریشه فرعی به طول ۱/۵ سانتیمتر بود. ریشه‌های جانبی قطع شد و ریشه اصلی گیاه در داخل محفظه محتوی خاک (microcosm) قرار داده شد (شکل ۱). این محفظه از لوله نایلونی به طول ۱۵ سانتیمتر و قطر ۳/۵ میلی‌متر ساخته شده بود و به محفظه ۲ سانتیمتری که محل نگهداری بذر بود، وصل شد. در طول لوله اصلی (rhizotube) منافذی به فاصله یک سانتیمتر و قطر ۰/۵ میلی‌متر برای تهویه ایجاد شد. قبل از نشاء کردن جوانه‌های گندم، محفظه با خاک مورد نظر با وزن مخصوص ظاهری ۱/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب پر گردید. بعد از نشاء جوانه‌های گندم، محفظه های پر از خاک داخل اتاق رشد که دارای دمای شب و روز به ترتیب ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۶ ساعت نور با شدت $300\ \mu molm^{-2}$ بود، قرار گرفتند. خاک محفظه‌ها از طریق یک اسفنج که در ته آن قرار داشت، به خاکی که دارای رطوبت در حد ظرفیت مزرعه بود، وصل شد. با اضافه کردن آب به سطح محفظه ها (به میزان یک میلی‌لیتر در روز) خاکهای درون محفظه ها مرطوب نگه داشته شدند.

شش روز بعد از نشاء کردن گیاهان، هنگامی که طول ریشه‌های اصلی ۱۲ سانتیمتر و اندامهای هوایی ۸ سانتیمتر شده بود، ۲۰۰ میکرولیتر از محلول $KH_2{}^{33}PO_4$ با غلظت ۵ میکرو مولار از طریق یکی از منافذ در قسمت جلویی ریشه اصلی به داخل خاک تزریق گردید. ریشه‌های جانبی و ریشه‌های موئین خاک ریزوسفر داخل محفظه را پرکردند. محفظه‌ها داخل کیسه‌های پلاستیکی بزرگی قرار داده شدند تا رطوبت نسبی آنها حفظ شود. بعد از آنکه ریشه گندم به داخل خاک نشان‌دار شده با ^{33}P نفوذ کرد (۴۸ تا ۷۲ ساعت بعد از تزریق ^{33}P)، اسیدهای آلی به مقدار ۴۰۰ میکرولیتر به داخل هر محفظه یکبار در روز و از همان منفذ تزریق گردید. محلولهای تزریقی حاوی سیترات و اگزالات در دو شکل یونی (H-citrate، K-citrate) و (H-oxalate، K-oxalate) به غلظتهای ۱ یا ۱۰ میلی‌مولار بود. در مورد محفظه‌های شاهد، آب مقطر به مقدار ۴۰۰ میکرولیتر به جای محلول اسید تزریق شد. هر تیمار در پنج تکرار اجرا گردید. بعد از ۵ روز اندامهای هوایی برداشت شدند. اندامهای هوایی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و در حرارت ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر گردیده و مقدار ^{33}P آنها به روش شمارش با Liquid scintillation اندازه‌گیری شد.

مقدار ^{33}P قابل دسترس در نمونه‌های خاک

برای تعیین اثر غلظت بر قابل دسترس نمودن ^{33}P موجود در خاک ریزوسفر، ۲۰۰ میکرولیتر از محلول ^{33}P با غلظت ۵ میکرومولار به ۲ گرم خاک ریزوسفر اضافه و به مدت ۴۸ ساعت در حرارت ۱۸ سانتی‌گراد نگهداری گردید. قبل از اضافه کردن محلول ^{33}P، نمونه‌های خاک با کلروفرم ضد عفونی شدند (۴۸ ساعت) تا از تجزیه شدن اسیدهای آلی به وسیله میکروبها در حین عصاره‌گیری جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها با ۱۰ میلی‌لیتر اسید سیتریک و اسید اگزالیک دارای غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۱ و ۱ و ۱۰ میلی‌مولار با تکان دهنده دورانی به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. بعد نمونه‌ها سانتریفیوژ شده (۱۵۰۰۰g به مدت ۱۵ دقیقه) و مقادیر ^{33}P در محلول به روش شمارش با Liquid scintillation اندازه‌گیری گردید.

معدنی شدن اسیدهای آلی

به منظور اندازه‌گیری سرعت تجزیه اسیدهای آلی، ۲۰۰ میکرولیتر از محلول نشاندار سیترات (^{14}C-citrat) و اگزالات (^{14}C-oxalate) با غلظتهای ۱ و ۱۰ میلی‌مولار به ۲ گرم خاک ریزوسفر که داخل لوله‌های ۶۰ میلی‌لیتری قرار داشت، اضافه گردید. خاک ریزوسفر از محفظه هایی که گیاه گندم در آنها قرار داشت، برداشت گردید و تا آنجا که امکان داشت ریشه‌های گندم از خاک جدا شدند. بعد از افزودن اسیدهای آلی به نمونه‌های خاک و مخلوط کردن آنها، نمونه ها در حرارت ۱۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سرعت معدنی شدن اسیدهای آلی با اندازه‌گیری $^{14}CO_2$ که در محلول NaOH یک مولار جذب شده بود، بعد از ۳، ۹، ۲۴ و ۴۸ ساعت به روش شمارش با Liquid scintillation محاسبه گردید.

تجزیه های آماری

محاسبات آماری با استفاده از برنامه رایانه ای سیگما پلات ۸ انجام گردید. اثرات معنی‌داری برای سطوح $P < ۰/۰۵$، $P < ۰/۰۱$ و $P < ۰/۰۰۱$ محاسبه و ارائه شده است.

نتایج

جذب ^{33}P به وسیله گندم

افزودن اسیدهای آلی به خاک باعث افزایش و تجمع معنی دار ^{33}P در اندامهای هوایی گندم گردید ($P<۰/۰۰۱$). افزودن اسید اگزالیک با غلظتهای ۱ و ۱۰ میلی‌مولار، جذب و تجمع فسفر در اندامهای هوایی گندم را به میزان ۴-۲ برابر در مقایسه با شاهد افزایش داد ولی اختلاف معنی داری در تجمع ^{33}P بین شکل های مختلف اگزالات (H-oxalate، K-oxalate) مشاهده نگردید ($P>۰/۰۵$). تفاوت بین غلظت ها نیز معنی دار بود ($P<۰/۰۰۱$) (شکل۲). افزودن اسید سیتریک در مقایسه با اگزالات باعث تجمع کمتر ($P<۰/۰۰۱$) ^{33}P در اندامهای هوائی گیاه گردید. H-citrate ۵۰٪ بیشتر از شاهد باعث افزایش و

تجمع ^{33}P گردید، در حالی که K-citrate تأثیر کمتری (۱۲٪) داشت. در تیمار H-citrate، غلظت تأثیر معنی‌داری بر جذب و تجمع ^{33}P نشان نداد (P>۰/۰۵).

میزان ^{33}P قابل دسترس در خاک

میزان آزادسازی ^{33}P از نمونه‌های خاک که با ^{33}P نشان‌دار شده بودند، براثر تکان دادن با محلولهای اسید سیتریک و اسید اگزالیک در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مخلوط کردن و تکان دادن خاک با غلظتهای بالای اسیدهای آلی (۱۰ میلی‌مولار) بعد از ۴۸ ساعت به طور معنی‌داری فسفر بیشتری را در مقایسه با مخلوط کردن و تکان دادن خاک با آب آزاد می کند. استخراج با غلظتهای پائین اسیدهای آلی (کمتر از ۱ میلی‌مولار) به استثنای اسید اگزالیک تأثیر معنی‌داری بر آزادسازی ^{33}P نداشت. اسید اگزالیک به طور معنی‌داری (P <۰/۰۱) بیشتر از اسید سیتریک، ^{33}P را آزاد کرد (شکل ۳).

معدنی شدن اسیدهای آلی

مقدار معدنی شدن اسیدهای آلی در زمانهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج آزمایش نشان داد که درصد معدنی شدن در هر دو غلظت ۱ و ۱۰ میلی‌مولار در مدت ۴۸ ساعت حداکثر بود. درصد معدنی شدن اسید سیتریک در هر دو غلظت چند برابر بیشتر از اسید اگزالیک بود (P <۰/۰۵) (شکل ۴).

بحث

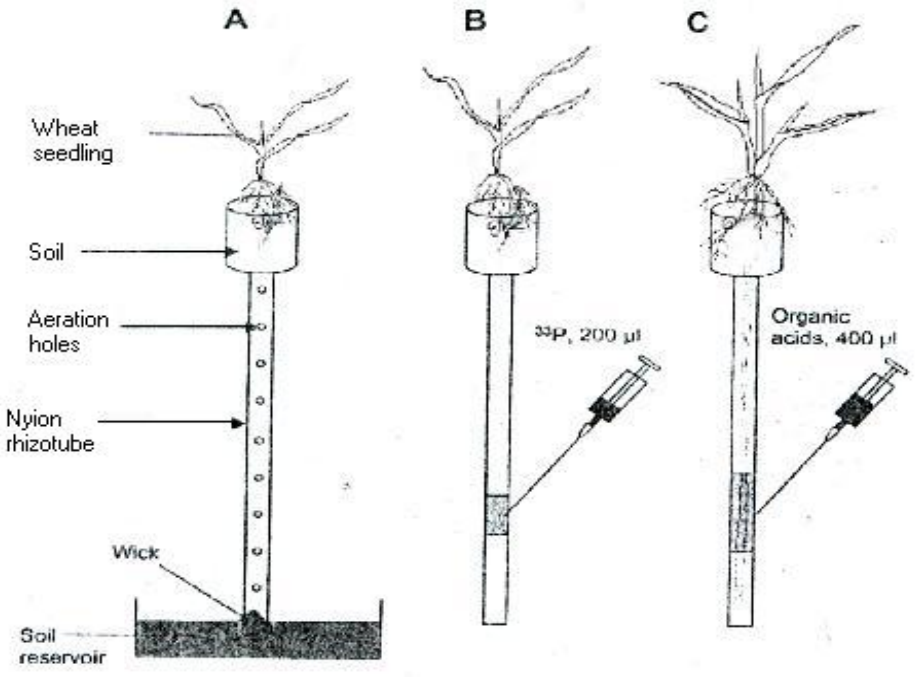
نتایج این آزمایش نشان داد که اسیدهای آلی فسفر خاک را به طور قابل ملاحظه‌ای آزاد نموده و آن را برای ریشه بیشتر قابل دسترس می سازند. ولی معمولاً غلظت اسیدهای آلی که در محلول ریزوسفر خاکها اندازه‌گیری می‌شود، کمتر از مقداری است که قادر به آزادسازی P به میزان قابل ملاحظه‌ای باشد (Jones، ۱۹۹۸؛ Drever و Stillings، ۱۹۹۷). این آزمایش نشان داد که میزان آزادسازی فسفر خاک تابع غلظت و نوع اسید آلی می باشد. این مسئله به طور واضح به وسیله محققان مختلف گزارش شده است (Pohlaman و McColl، ۱۹۸۶؛ Mench و Martin، ۱۹۹۱؛ Jones و Darrah،۱۹۹۴؛Strom، ۱۹۹۷). بسیاری از محققان عقیده دارند که اسید سیتریک و اسید اگزالیک که در این آزمایش مورد مطالعه قرار گرفته اند بیش از سایر اسیدها در آزادسازی فسفر خاک دخالت دارند (Gardaner و Boundy، ۱۹۸۳؛ Gerke، ۱۹۹۲؛ Jones و Darrah، ۱۹۹۴؛ Strom و همکاران، ۱۹۹۴؛ Marschner، ۱۹۹۵؛ Strom و همکاران، ۲۰۰۱). افزودن اسید اگزالیک به خاک ریزوسفر به طور معنی‌داری جذب P به وسیله گندم را افزایش داد ولی اسید سیتریک اثر کمتری بر افزایش دادن جذب P به وسیله این گیاه از خود نشان داد. مطالعه اثر غلظتهای اسید بر میزان حلالیت فسفر خاک نشان داد که غلظت یک میلی‌مولار و بیشتر از آن برای حلالیت میزان فسفر مورد نیاز گندم لازم می‌باشد. اختلافی که در افزایش مقدار فسفر خاک بر اثر افزودن اسید سیتریک و اسید اگزالیک دیده می‌شود، همانطور که Strom و همکاران (۲۰۰۱) گزارش نموده اند، مربوط به اختلاف در سرعت معدنی شدن این دو اسید به وسیله ریزجانداران خاک می‌باشد. Strom و همکاران (۲۰۰۱) و Jones و همکاران (۱۹۹۶) نشان دادند سیترات موجود در ریزوسفر خاک سریعتر از اگزالات به CO_2 تبدیل می شود. این اختلاف بر طول زمان تماس بین اسید و فسفر خاک اثر می‌گذارد، به عبارت دقیق‌تر در غلظتهای مساوی از این دو اسید، اگزالات به مدت بیشتر از سیترات بر فسفر خاک اثر خواهد گذاشت. به علاوه شدت واکنش این دو اسید با ترکیبات فسفر ریزوسفر خاک به خصوص در مورد خاکهای آهکی متفاوت خواهد بود (Jones و Darrah، ۱۹۹۴؛ Strom و همکاران، ۲۰۰۱). اسید اگزالیک ممکن است فسفر را از ترکیبات مختلف فسفاتهای کلسیم با تشکیل و رسوب اگزالات کلسیم آزاد کند، در حالی که اسید سیتریک احتمالاً به طور شدیدتری با فسفاتهای آهن و آلومینیم خاک ترکیب می‌شود. زیرا یون سیترات بیشتر از یون اگزالات جذب Al^{+++} و Fe^{+++} می‌شود (Strom و همکاران، ۲۰۰۱؛ van Hees و همکاران، ۲۰۰۰).

نتیجه گیری

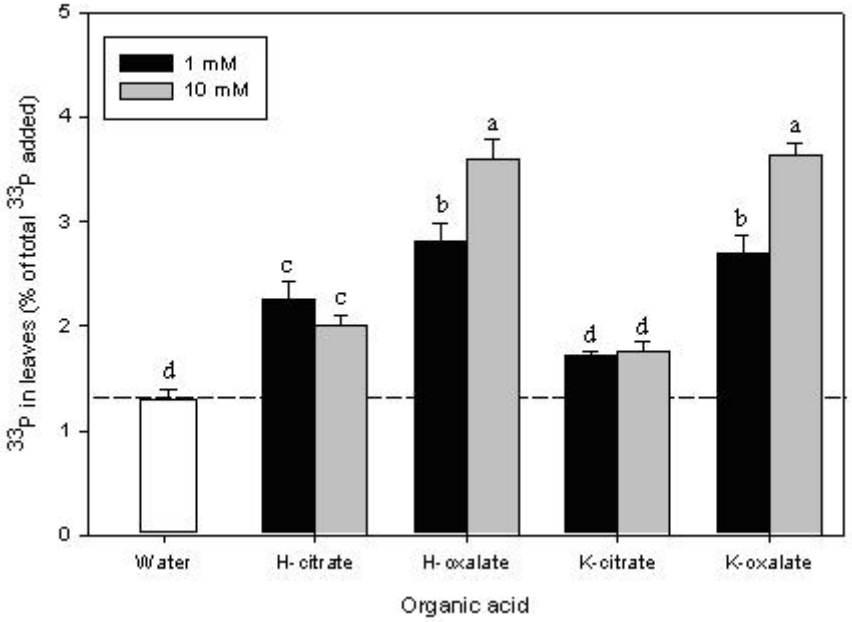
نتایج این مطالعه نشان داد اسید اگزالیک به طور معنی‌داری جذب و تجمع ^{33}P در اندامهای هوایی گندم را افزایش می دهد، در حالی که اسید سیتریک حتی در غلظتهای بالا اثر قابل ملاحظه‌ای برجذب و تجمع ^{33}P در اندامهای هوایی ندارد. سرعت معدنی شدن سیترات به وسیله ریز جانداران خاک بیشتر از سرعت معدنی شدن اگزالات است و این اختلاف می تواند دلیلی برای تأثیر کمتر سیترات بر آزادسازی ^{33}P باشد. احتمالاً بر اثر مصرف سیترات توسط ریز جانداران، از آزادسازی ^{33}P به وسیله آن تا اندازه ای جلوگیری می‌شود.

جدول ۱- خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

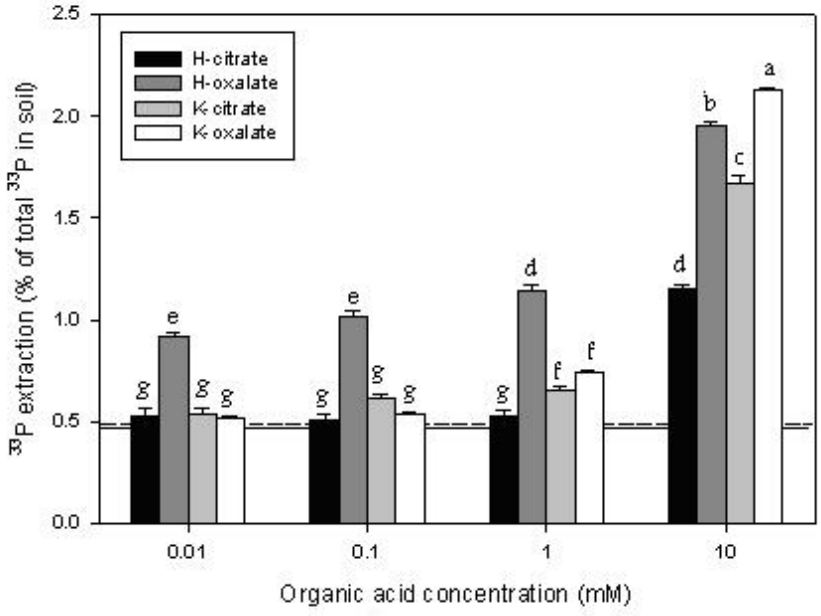
خصوصیت	مقدار
درصد اشباع	۳۳
شوری $dS\ m^{-1}$	۱
اسیدیته اشباع	۷/۸۸
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۸/۹
کربن آلی (درصد)	۰/۷۰
فسفر (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۵/۰
پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم درکیلوگرم)	۲۸۰
آهن قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۳/۹۲
منگنز (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۶/۸۴
روی (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۰/۶۲
مس (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۱/۳۶
رس (درصد)	۱۹
سیلت (درصد)	۳۶
شن (درصد)	۴۵



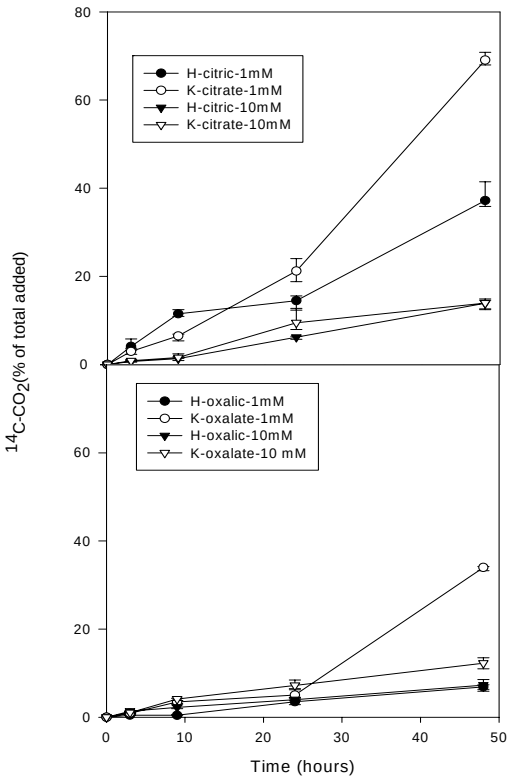
شکل ۱- نمای اجمالی از محفظه طراحی شده (microcosm) برای ریزوسفر گندم. تصویر سمت چپ نشانگر طراحی کلی طرح آزمایشی است. تصویر وسط نشان دهنده نشان دار کردن خاک با $KH_2{}^{33}PO_4$ ۵ میکرومولار مولار می باشد. تصویر سمت راست، تزریق اسید آلی به خاک نشان دار شده بعد از حرکت ریشه ها در خاک را نشان می دهد.



شکل ۲- اثر اسیدهای آلی بر جذب ^{33}P در برگها. اسید سیتریک و اسید اگزالیک با غلظتهای ۱ و ۱۰ میلی‌مولار روزانه به مدت چهار روز به ریزوسفر اضافه شدند. برای نمونه‌های شاهد به جای محلول اسید از آب مقطر استفاده شد. جذب ^{33}P بعد از ۵ روز اندازه‌گیری گردید. اعداد میانگین ۵ تکرار می‌باشند.



شکل ۳- میزان ^{33}P قابل دسترس در ریزوسفر تحت تأثیر غلظتهای مختلف اسیدهای آلی که به مدت ۴۸ ساعت با خاک آهکی در تماس بودند. نمونه‌های خاک با محلول اسید های آلی (۱۰-۰/۰۱ میلی‌مولار) و نمونه شاهد با آب مقطر تکان داده شدند. اعداد میانگین ۵ تکرار می باشند.



شکل ۴- سرعت تولید $^{14}CO_2$ به صورت تابعی از غلظت (۱ و ۱۰میلی‌مولار) اسیدهای آلی (سیتریک و اگزالیک). اعداد میانگین ۳ تکرار می‌باشند.

فهرست منابع:

۱. خادمی، زهرا.، دیوی، جونز و محمد جعفر، ملکوتی. ۱۳۸۳. نقش اسیدهای آلی در ریزوسفر ریشه گیاه. در «روشهای نوین تغذیه گیاه» (ملکوتی، خوگر و خادمی) صفحات ۲۱-۷، وزارت جهاد کشاورزی طرح خودکفایی گندم، انتشارات سنا، تهران، ایران.

2. Bar-Yosef, B. 1991. Root excretions and their environmental effects. Influence on availability of phosphorus. In "plant roots: The Hidden half" (Y. waisel, A.Eshel. and u. kafkafi. Eds). 529-557. Dekker, New York.
3. Bolan, N. S., R. Naidu, S. Mahimairaja, and S. Baskaran. 1994. Influence of low molecular weight organic acids on solubilization of phosphates. Biol. Fertil. Soils 18:311-319.
4. Delhaize, E., and P. R. Ryan. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. Plant. Physiol. 107: 315-321.
5. Drever, J. I., and L. L. Stillings. 1997. The role of organic acids in mineral weathering. Colloids Surf. 120: 167-181.
6. Gardner, W. K., and K. A. Boundy. 1983. The acquisition of phosphorus by *lupinus albus* I. IV. The effect of interpolating wheat and white lupin on the growth and mineral composition of the two species. Plant Soil. 70: 391-402.
7. Gerke, J. 1992. Phosphate, aluminum and iron in the soil solution of three different soils in relation to varying concentrations of citric acid. J. Plant Nutr. Soil Sci. 155: 339-343.
8. Hocking, P. J. 2001. Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminum tolerance of plants in acid soils. Adv. Agron. 74: 63-97.

9. Ibrikci, H., J. Ulger, A. C. Buyuk, G. Cakir, B. Korkmaz, K. Karnez. E. Ozgenturk, and G. Konuskan. 2005. Maintenance of phosphorus fertilizer and residual phosphorus effect on corn production. Nutr. Cycl. Agroecosys. 72: 279-286
10. Jones, D. L. 1998. Organic acids in the rhizosphere-A critical review. Plant Soil. 205:25-44.
11. Jones, D. L. and P. R. Darrah. 1994. Role of root derived organic-acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. Plant Soil. 166: 247-257.
12. Jones, D. L., P. R. Darrah, and L. V. Kochian. 1996. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in rhizosphere and its potential role in root iron uptake. Plant Soil. 180: 57-66.
13. Lan, M. N., B. Comerford and T. R. Fox. 1995. Organic anions effect on phosphorus release from spodic horizons. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 1745-1749.
14. Mraschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher Plants. Academic Press, London 912 pp.
15. Mench, M., and E. Martin. 1991. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L., *Nicotina tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L. Plant Soil. 132: 187-196.
16. Pohlaman, A. A., and J. G. McColl. 1986. Kinetics of metal dissolution from forest soils by soluble organic acids. J. Environ. Qual., 15: 86-92.
17. Randall, P. J., J. E. Hayes, P. J. Hocking, and A. E. Richardson. 2001. Root exudates in phosphorus acquisition by plants. In ‘‘Plant nutrient Acquisition- new perspectives (eds., N.Ae, J. Arihara, K. Okada, and Sriinivasan), Springer-Verlag, Tokyo Japan, pp. 71-100.
18. Richardson, A. E. 1994. Soil microorganisms and phosphorus availability. In Management of the Soil Biota in Sustainable Farming Systems (C.E. Pankhurst, B. M. Doube, V. V. S. R. Gupta, and P. R. Grace, Eds.). pp. 50-62. CSIRO, Melbourne.
19. Ryan, P. R., E. Delhaize, and D. L. Jones, 2001. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 52: 527-560.
20. Shenoy, V. V., and G. M. Kalagudi, 2005. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. Biotechnol. Adv. 23: 501-513.
21. Staunton, S., and F. Leprine, 1996. Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: Implication for P bioavailability. Eur. J. Soil Sci. 47: 231-239.
22. Strom. L. 1997. Root exudation of organic acids: importance to nutrient availability and the calcifuge and calcicole behavior of plants. Oikos. 80: 459-466.
23. Strom. L., T. Olsson, and G. Tyler. 1994. Differences between calcifuge and acidiguge plants in root exudation of low molecular organic acids. Plant Soil. 167:239-245.
24. Strom. L., A. G. Owen. D. L., Godbold, and D. L. Jones. 2001. Organic acid behavior in calcareous soils: Sorption reaction and biodegradation rates. Soil Biol. Biochem. 33: 2125-2133.
25. Strom. L., A. G. Owen. D. L., Godbold, and D. L. Jones. 2002. Organic acid mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. Soil Biology and Biochemistry 34, 703-710.
26. Van Hees. P. A. W., U. S. Lundstrom, and R. Giesler. 2000. Low molecular weight organic acids and their Al-complexes in soil solution-composition, distribution and seasonal variation in three Pozolized soils. Geoderma. 94: 173-200.