نقش کوددهی متعادل در بهبود سلامت خاک و دستیابی به کشاورزی پایدار و امنیت غذایی

محبوبه جلالی

گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

مدیریت پایدار سلامت خاک، نقشی مهم در ارتقای بهره‌وری کشاورزی و تضمین امنیت غذایی جهانی ایفا می‌نماید. این مطالعه، اثر نسبت‌های مختلف کودهای معدنی- آلی را بر ساختار و پویایی جوامع میکروبی خاک، فعالیت‌های آنزیمی، فراوانی ژن‌های عملکردی و شاخص‌های سلامت کلی خاک مورد ارزیابی قرار می‌دهد. با بهره‌گیری از رویکردهای بیوانفورماتیکی، آزمون‌های سنجش فعالیت آنزیمی و تحلیل‌های متاژنومیک، نتایج نشان می‌دهد که کوددهی متعادل به‌طور معنی‌داری سبب افزایش تنوع زیستی خاک، پایداری جوامع و افزایش عملکرد گیاهان در برابر تنش‌های محیطی می‌گردد. به‌ویژه، کاربرد هم‌افزایی کودهای معدنی و آلی سبب ارتقای فعالیت آنزیم‌های β-گلوکوزیداز و اوره‌آز شده و فرآیند تجزیه مواد آلی و چرخه عناصر غذایی را تسریع می‌کند و همزمان بر جمعیت‌های میکروبی در فرایندهای تغذیه‌ای و سرکوب عوامل بیماری‌زا اثرگذار است. این یافته‌ها ضرورت تدوین و اجرای راهبردهای کوددهی متعادل و منطقه‌محور را به‌منظور ارتقای بهره‌وری کشاورزی برجسته می‌سازد. در این راستا، تحقیقات آتی باید بر بهبود چارچوب‌های کوددهی از طریق رویکردهای میان‌رشته‌ای، تحلیل تعاملات خاک- محصول - اقلیم و بسط این شیوه‌ها به طیف گسترده‌ای از بوم‌نظام‌های کشاورزی متمرکز گردد.

واژگان کلیدی: جوامع میکروبی خاک، کودهای ترکیبی، کشاورزی پایدار

مقدمه

اگرچه افزایش عملکرد ناشی از مصرف کودهای شیمیایی موجب تغذیه جمعیت‌های رو به رشد شده است، اما مصرف بیش از حد این نهاده‌ها به بروز تخریب نگران‌کننده خاک و بحران‌های زیست‌محیطی منجر گردیده است. تحلیل‌های اخیر نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد از خاک‌های زراعی جهان اکنون با کاهش شاخص‌های حاصلخیزی مواجه‌اند و ۳۵ درصد از آن‌ها دچار تراکم شدید می‌باشند. کارایی مصرف نیتروژن در سامانه‌های عمده تولید غلات در محدوده ۳۰–۵۰ درصد باقی مانده است، به این معنا که ۷۰–۵۰ درصد از عناصر غذایی مصرف‌شده یا به ترکیبات اکسید نیتروژن در جو تبدیل شده و یا به سامانه‌های آبی آب‌شویی می‌شوند. این اتلاف مواد غذایی با کاهش بحرانی کربن آلی خاک در ۷۲ درصد از مناطق با کشت فشرده همزمان بوده است (Congreves et al., 2021).

افزودن مواد آلی در صورت کاربرد هدفمند و همزمان با کودهای معدنی، اثرات هم‌افزایی ایجاد می‌کند که فراتر از تأمین صرف عناصر غذایی است. به‌عنوان نمونه، کاربرد ورمی‌کمپوست با میزان ۵ تن در هکتار می‌تواند تشکیل ماکروآگریگات‌های خاک را تا ۴۰ درصد افزایش دهد، در حالی که کربن آلی محلول حاصل از کود مرغی با کلاته‌سازی کلسیم خاک، قابلیت دسترسی فسفر را افزایش می‌دهد. این بهبودهای فیزیکوشیمیایی، مزایای زیستی مهمی نیز به‌دنبال دارد؛ به‌طوری‌که کوددهی تلفیقی موجب افزایش ۲/۸ برابری زیست‌توده قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار نسبت به رژیم‌های صرفاً شیمیایی شده و ساختار بوم‌سازگان ریزوسفری را به‌طور بنیادین بازآرایی می‌کند (Fang et al., 2021) .

ساختار جامعه میکروبی خاک

نقش میکروارگانیسم‌ها در خاک

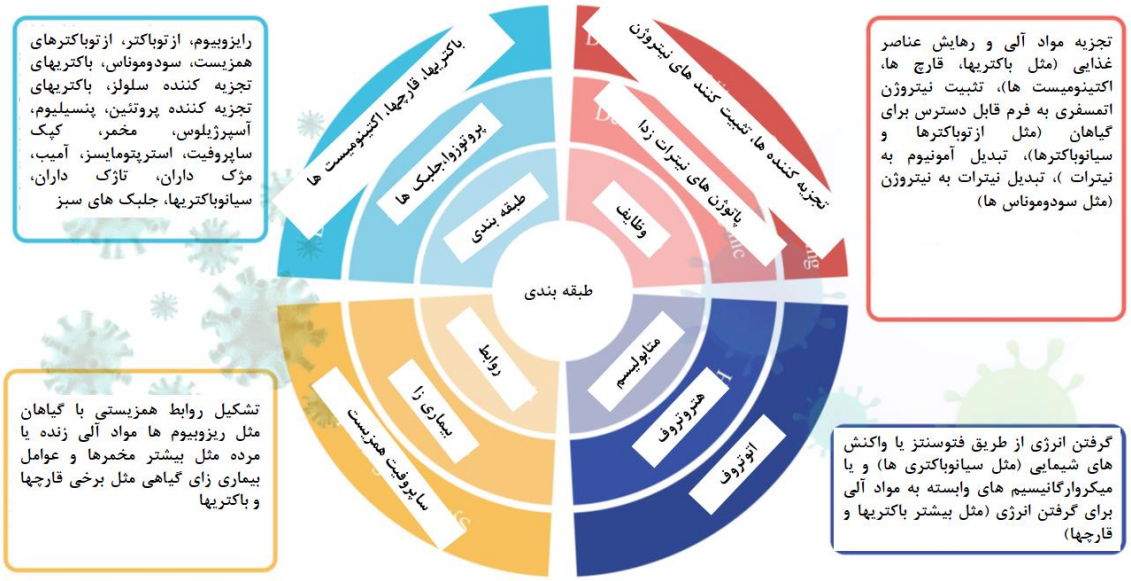
تلفیق نهاده‌های آلی با کودهای معدنی، اثرات زیادی بر بوم‌شناسی میکروبی خاک و بهره‌وری کشاورزی دارد. شواهد آزمایشی نشان می‌دهد که جایگزینی ۵۰ درصد از نیتروژن معدنی با کودهای آلی به‌عنوان مثال، کود دامی به میزان ۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، مسیرهای متابولیک میکروبی را بهینه کرده و کارایی استفاده از اسیدهای آمینه، آمین‌ها و بسترهای کربنی مشتق از اسیدهای کربوکسیلیک را افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2021). کودهای آلی به‌عنوان نهاده‌هایی چندمنظوره عمل کرده و کربن و عناصر غذایی زیست‌دسترس را فراهم می‌کنند که منجر به تحریک رشد و تنوع زیستی میکروبی شده و در نهایت کشاورزی پایدار را تقویت می‌نماید. کاربرد بلندمدت تلفیقی کودهای آلی و شیمیایی، میزان تجزیه سلولز و لیگنین را در اراضی زراعی تسریع می‌کند (Song et al., 2022).

میکروارگانیسم‌های خاک نقش مهمی در کیفیت خاک ایفا می‌کند. تحت شرایط ورودی استاندارد نیتروژن (۹۰ کیلوگرم در هکتار)، افزودنی‌های آلی از جمله کود مرغی، کودهای مشتق از ویناس و فضولات حشرات به‌طور معنی‌داری زیست‌توده کاهو را افزایش داده و وزن تر را تا ۷۵ درصد و وزن خشک را متناسب با آن ارتقا می‌دهند. همچنین، کاربرد فضولات حشرات موجب کاهش غلظت نیترات و سرب در برگ‌ها به‌ترتیب ۲۷ و ۴۶ درصد شده و همزمان موجب افزایش فعالیت‌های آنزیمی (فسفاتاز اسیدی/قلیایی، -Nاستیل-D-β-گلوکوزآمینیداز، آریل‌سولفاتاز، دهیدروژناز و هیدرولاز کل می‌گردد که حاکی از ظرفیت بالاتر معدنی‌سازی عناصر غذایی است (Cardarelli et al., 2023). در مقابل، کاربرد طولانی‌مدت کودهای شیمیایی موجب تخریب میکروبیوم خاک و کاهش تنوع میکروبی می‌گردد. کوددهی بیش از حد نیتروژن، پویایی آنزیم‌های چرخه کربن را مختل کرده و ترکیب جامعه میکروبی را دگرگون می‌سازد؛ به‌طوری‌که جوامع قارچی نسبت به رسوب نیتروژن حساسیت بالاتری نسبت به باکتری‌ها نشان می‌دهند.

رده‌بندی میکروبی خاک

میکروارگانیسم‌های خاک، فراوانی و تنوع بالایی دارند و شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، اکتینومیست‌ها، آرکئاها و پروتوزوآها هستند (شکل ۱). باکتری‌ها و قارچ‌ها اجزای اصلی میکروبیوتای خاک محسوب می‌شوند و جمعیتی معادل صدها میلیون تا میلیاردها سلول در هر گرم خاک خشک را شامل می‌شوند. باکتری‌ها به‌طور گسترده در خاک‌های کشاورزی توزیع شده و بیش از ۹۰

درصد کل میکروارگانیسم‌ها را تشکیل می‌دهند و نقش کلیدی در تجزیه مواد آلی و چرخه عناصر غذایی ایفا می‌کنند. قارچ‌ها از نظر جمعیتی کمتر از باکتری‌ها هستند اما طیف وسیعی از آنزیم‌ها را ترشح کرده و مواد آلی مقاوم را تجزیه می‌کنند. اکتینومیست‌ها که از نظر ظاهری بین باکتری‌ها و قارچ‌ها قرار دارند، مواد ضد میکروبی تولید کرده و نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و تشکیل خاکدانه‌ها دارند. آرکئاها نیز به‌طور گسترده به‌ویژه در محیط‌های بی‌هوازی حضور داشته و در متابولیسم متان و تثبیت دی‌اکسیدکربن مشارکت دارند. پروتوزوآها با تنظیم جمعیت‌های میکروبی، چرخه عناصر غذایی را تسهیل می‌کنند (Oyedoh et al., 2023).



شکل ۱- طبقه بندی میکروارگانیسم های خاک

حاصلخیزی خاک و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

شاخص ارزیابی حاصلخیزی خاک

حاصلخیزی خاک، که یکی از عوامل تعیین‌کننده اصلی بهره‌وری کشاورزی و پایداری بوم‌نظام‌ها است، نیازمند ارزیابی یکپارچه بر اساس مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیکوشیمیایی می‌باشد. راهبردهای بلندمدت کوددهی به‌طور معنی‌داری مخازن عناصر غذایی را بهبود می‌بخشند؛ به‌طوری‌که ترکیب کودهای معدنی–آلی موجب افزایش ۱۸–۲۲ درصدی نیتروژن قلیایی قابل‌هیدرولیز(NH_4^+-N)، ۳۰–۲۵ درصدی فسفر قابل‌دسترس (Olsen-P) و ۲۰–۱۵ درصدی پتاسیم قابل‌تبادل نسبت به تیمارهای صرفاً شیمیایی می‌شود (Lu et al., 2024). ماده آلی خاک به عنوان سنگ بنای حاصلخیزی، حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد از پایداری خاکدانه‌ها را تنظیم کرده و در عین حال ظرفیت نگهداری آب را در خاک‌های لومی تا ۲۵ تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد. این ماتریس زیستی، منجر به فعال‌سازی آنزیمی می‌شود، به‌ویژه فعالیت بتا-گلوکوزیداز (۱۲۲ درصد)، اوره‌آز (۸۳ درصد) و فسفاتاز اسیدی (۶۷ درصد).

تأثیر کود بر حاصلخیزی خاک

کوددهی از جمله عوامل کلیدی مؤثر بر حاصلخیزی خاک است. روش‌ها و مقادیر مختلف کوددهی می‌توانند اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک داشته باشند. مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی می‌تواند منجر به برهم‌خوردن تعادل مواد غذایی، فشردگی خاک، افزایش pH و تخریب ساختمان خاک شده و در نتیجه کیفیت خاک را کاهش دهد. علاوه بر این، استفاده بلندمدت از کودهای شیمیایی می‌تواند رشد برخی گروه‌های میکروبی را مهار نموده و بر فرآیندهای چرخه و تبدیل مواد مغذی تأثیر بگذارد. مطالعات نشان داده‌اند که تحت تاثیر تیمارهای مختلف کودی، غلظت نیتروژن قلیایی‌هیدرولیز شونده خاک می‌تواند

به طور قابل توجهی متفاوت باشد، به‌طوری که کاربرد کودهای آلی عموماً سطوح نیتروژن بالاتری نسبت به تیمارهای کود شیمیایی دارد. افزون بر این، عناصر فلزات سنگین موجود در کودهای شیمیایی به طور مستمر در خاک انباشته شده و باعث آلودگی جدی محیطی می‌شوند. مصرف ترکیبی کودهای آلی و شیمیایی می‌تواند تا حدی از اثرات منفی کودهای شیمیایی بکاهد و حاصلخیزی و کیفیت خاک را بهبود بخشد (Wang et al., 2023).

مصرف کود و تأثیرات زیست‌محیطی

کاربرد کودهای شیمیایی و آلی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد برنج و غلظت عناصر غذایی خاک را بهبود ببخشد، اما مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی می‌تواند منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب‌های زیرزمینی شود. مطالعات نشان داده‌اند که جایگزینی ۲۰ تا ۴۰ درصد از کودهای شیمیایی با کودهای آلی می‌تواند ضمن حفظ عملکرد، مصرف کود را کاهش داده و خطر آلودگی کشاورزی غیرنقطه‌ای را بکاهد. کاربرد تلفیقی کودهای معدنی و آلی می‌تواند محتوای ماده آلی خاک را افزایش دهد و توانایی خاک در نگهداری آب و مواد مغذی را تقویت کند. این بهبودها نه تنها رشد و عملکرد محصول را ارتقا می‌دهند، بلکه از طریق ارتقای سلامت خاک و کاهش اتکا به نهاده‌های شیمیایی، به توسعه پایدار اکوسیستم کشاورزی کمک کرده و در نتیجه اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند (Wang et al., 2023).

مزایای زیست‌محیطی کاربرد کودهای شیمیایی و آلی عمدتاً در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی فسیلی نمایان می‌شود. در مقایسه با مصرف کودهای شیمیایی به تنهایی، کاربرد کودهای آلی می‌تواند به‌طور معنی‌داری انتشار متان و اکسید نیتروژن در طول رشد برنج را کاهش دهد. این امر عمدتاً به این دلیل است که ماده آلی موجود در کودهای آلی می‌تواند فعالیت آنزیم کلیدی متان مونواکسیژناز را که تولیدکننده متان است، مهار کرده و در نتیجه تولید و انتشار متان را کاهش می‌دهد . کاربرد کودهای آلی همچنین می‌تواند آبشویی نیترات‌ها در خاک را به‌طور محسوسی کاهش داده و خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی را بکاهد. این موضوع به آن دلیل است که کودهای آلی می‌توانند تشکیل خاکدانه‌های خاک را تسهیل کرده، ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی خاک را بهبود بخشیده و از آبشویی مواد مغذی جلوگیری کنند. از منظر مصرف انرژی و ردپای کربن، تولید کودهای شیمیایی به مقادیر زیادی انرژی فسیلی نیاز دارد، در حالی که کودهای آلی عمدتاً از بازیافت پسماندهای کشاورزی به دست می‌آیند و مصرف انرژی در فرآیند تولید آنها نسبتاً پایین است. بنابراین، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای آلی می‌تواند تا حدی مصرف انرژی فسیلی در فرآیند تولیدات کشاورزی را کاهش داده و شدت انتشار کربن را کم کند. علاوه بر این، بازگرداندن کاه و کلش به مزرعه و تبدیل کود دامی و سایر پسماندهای آلی به کودهای آلی می‌تواند امکان استفاده بهینه از منابع پسماندهای کشاورزی را فراهم کرده و بار زیست‌محیطی مدیریت پسماندها را کاهش دهد.

تأثیرات کاربرد تلفیقی کود بر تغییرات ساختار جامعه میکروبی

تنوع جامعه

کاربرد تلفیقی کودهای معدنی و آلی به طور قابل توجهی تنوع جوامع میکروبی خاک را تغییر می‌دهد. در میان انواع مختلف کودهای آلی، کود دامی به دلیل ترکیب متعادل مواد مغذی و سینتیک تجزیه مطلوب، گزینه‌ای مؤثر به شمار می‌رود. کود دامی محتوای نیتروژن متوسط (۲/۲–۱/۸درصد) و نسبت کربن به نیتروژن متعادلی (۲۰–۱۵) دارد که آزادشوندگی تدریجی مواد مغذی را تسهیل می‌کند و در عین حال فعالیت میکروبی را حفظ می‌نماید. آزمایش‌های مزرعه‌ای نشان می‌دهند که جایگزینی ۵۰ درصد از نیتروژن معدنی با کود دامی (۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن)، در مقایسه با کوددهی معدنی تنها، عملکرد جو را ۱۵–۱۲ درصد افزایش می‌دهد که ناشی از بهبود بهره‌وری میکروبی از اسیدهای آمینه و اسیدهای کربوکسیلیک است (Wang and Kuzyakov, 2024). در مقابل، کود طیور اگرچه غنی‌تر از نیتروژن (۵/۴–۵/۳ درصد) و فسفر (۸/۱–۲/۱ درصد) است، اما نسبت کربن به نیتروژن کمتری (۱۵–۱۰) دارد که منجر به تجزیه سریع‌تر و احتمال آبشویی مواد مغذی می‌شود.کمپوست،

اگرچه در تثبیت کربن آلی خاک برتر است، اما به دلیل نسبت بالاتر کربن به نیتروژن (۳۰–۲۰)، عناصر غذایی را به‌کندی آزاد می‌کند و از این رو برای دسترسی کوتاه‌مدت به مواد مغذی کارایی کمتری دارد.

تحلیل‌های اخیر متاژنومیک نشان می‌دهند که کاربرد کود دامی سبب غنی‌سازی جنس‌های *Acidobacteria* و *Firmicutes* می‌شود که با تجزیه ماده آلی و چرخه عناصر غذایی مرتبط هستند. با این حال، کاربرد بیش از حد کودهای شیمیایی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر تنوع میکروبی خاک داشته باشد. استفاده گسترده از کودهای شیمیایی ممکن است موجب اسیدی‌شدن خاک شود و رشد برخی گروه‌های میکروبی را مهار کرده و ساختار جامعه میکروبی را دستخوش تغییر نماید. همچنین، مصرف بلندمدت کودهای شیمیایی می‌تواند میزان ماده آلی خاک را کاهش داده، ساختار خاک‌دانه‌ها را تخریب کرده و موجب فشردگی خاک شود؛ امری که شرایط زیست میکروارگانیسم‌ها را نامساعد می‌سازد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تحت کاربرد منفرد کودهای شیمیایی، شاخص تنوع باکتری‌ها و قارچ‌های خاک به‌طور معنی‌داری کمتر از حالتی است که از ترکیب کودهای معدنی و آلی استفاده می‌شود. این امر بیانگر آن است که نسبت بهینه کودهای آلی و شیمیایی نه تنها می‌تواند نیاز غذایی گیاهان را تأمین کند بلکه موجب حفظ تنوع میکروبی خاک و ارتقای سلامت خاک نیز می‌شود (Zhou et al., 2024).

تغییرات میکروبیوم

ساختار جامعه میکروبی خاک ارتباط نزدیکی با کاربرد کودهای معدنی و آلی دارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مصرف کودهای آلی می‌تواند به‌طور معنی‌داری تعداد نسخه‌های ژن 16S rRNAباکتری‌ها را در خاک افزایش داده و تنوع و فراوانی میکروارگانیسم‌ها را بهبود بخشد. همزمان، تحلیل توالی ITS قارچ‌ها نشان داده است که کاربرد کودهای آلی ترکیب جوامع قارچی خاک را به شکل قابل توجهی تحت تأثیر قرار داده و سهم قارچ‌های مفید نظیر قارچ‌های میکوریز آربوسکولار را افزایش می‌دهد (Liu H. et al., 2024). این تغییرات عمدتاً به ورود کودهای آلی نسبت داده می‌شوند که منابع غنی کربن را فراهم کرده، خواص فیزیکوشیمیایی خاک را بهبود می‌بخشند و شرایط مساعدی برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها ایجاد می‌کنند. ردیابی تغییرات گونه‌های غالب میکروبی نشان داد که در کاربرد بلندمدت کودهای معدنی و آلی، گونه‌های غالب باکتریایی از *Proteobacteria*و *Actinobacteria* به *Acidobacteria* و *Firmicutes* تغییر می‌کنند. در حالی‌که گونه‌های غالب قارچی از *Ascomycota*به *Basidiomycota* تغییر می‌کنند (Liu H. et al., 2024). علاوه بر ارتقای رشد میکروارگانیسم‌های مفید، کاربرد کودهای معدنی و آلی می‌تواند مقاومت میکروارگانیسم‌های خاک را نیز افزایش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که مصرف کودهای آلی می‌تواند مقاومت جوامع میکروبی در برابر تنش ناشی از آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین را تقویت کند که این پدیده احتمالاً با کلاته‌شدن فلزات سنگین توسط ماده آلی و تحریک بیان ژن‌های سم‌زدایی و مقاومت مرتبط است.

تغییرات در میکروارگانیسم‌های عملکردی

میکروارگانیسم‌های مرتبط با چرخه نیتروژن شامل باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک، باکتری‌های دنیتریفیکاسیون و باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن هستند. کاربرد کودهای معدنی و آلی می‌تواند به‌طور معنی‌داری فراوانی و تنوع باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک را در خاک افزایش داده، فرآیند نیترات‌سازی نیتروژن خاک را تسریع کند و قابلیت دسترسی نیتروژن را بهبود بخشد. از سوی دیگر، کودهای آلی غنی از کربن آلی بوده و منابع کربن و دهنده‌های الکترون را برای باکتری‌های دنیتریفیکاسیون فراهم می‌کنند، فرآیند دنیتریفیکاسیون را افزایش داده و از اتلاف نیتروژن جلوگیری می‌نمایند. همچنین باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در گره‌های ریشه گیاهان لگومینه با گیاه میزبان ارتباط همزیستی برقرار کرده و گاز نیتروژن موجود در هوا را به

آمینواسیدهای قابل جذب برای گیاهان تبدیل می‌کنند و در نتیجه ذخایر نیتروژن خاک را غنی می‌سازند. کاربرد کودهای آلی با بهبود شرایط زیست‌شناختی خاک و ریزوسفر می‌تواند کارایی این فرآیند همزیستی و میزان تثبیت نیتروژن را افزایش دهد.

میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در تبدیل اشکال مختلف فسفر خاک ایفا می‌کنند. به‌عنوان نمونه، باکتری‌های حل‌کننده فسفات با ترشح اسیدهای آلی، فسفرهای معدنی نامحلول را به شکل محلول تبدیل می‌کنند. برخی باکتری‌ها و قارچ‌ها نیز قادرند با ترشح فسفاتاز، فسفر آلی را معدنی کنند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کاربرد کودهای آلی موجب افزایش قابل توجه تعداد باکتری‌های حل‌کننده فسفات و باکتری‌های تولیدکننده فسفاتاز می‌شود و در نتیجه، فعال‌سازی و تبدیل فسفر خاک را تقویت کرده و کارایی مصرف کودهای فسفاته را ارتقاء می‌بخشد (Zhao et al., 2024). علاوه بر این، خاک حاوی میکروارگانیسم‌های مفیدی است که با عوامل بیماری‌زای گیاهی رقابت یا آن‌ها را مهار می‌کنند، از جمله اکتینومیسیت‌ها که آنتی‌بیوتیک ترشح می‌کنند و سودوموناسها که مواد ضدمیکروبی فرّار تولید می‌کنند. این میکروارگانیسم‌های آنتاگونیست با مهار رشد و تکثیر پاتوژن‌ها، وقوع بیماری‌های خاکزاد را کاهش می‌دهند. کاربرد کودهای معدنی و آلی می‌تواند به‌طور معنی‌داری تعداد و فعالیت این میکروارگانیسم‌های آنتاگونیست را افزایش داده و کنترل بیولوژیک بیماری‌های خاکزاد را تقویت نماید (Sulaiman and Bello, 2024). همچنین در خاک، میکروارگانیسم‌های فراوانی حضور دارند که توانایی غنی‌سازی، جذب و تغییر شکل فلزات سنگین را داشته و نقش مهمی در پالایش زیستی آلودگی فلزات سنگین مزارع ایفا می‌کنند. برخی باکتری‌ها و قارچ‌ها از طریق کمپلکس‌سازی خارج‌سلولی، جذب سطحی و کلاته‌سازی درون‌سلولی می‌توانند یون‌های فلزات سنگین را تثبیت کرده و سمیت و قابلیت زیست‌دستیابی آن‌ها را کاهش دهند. کاربرد کودهای آلی غنی از مواد هیومیکی و عوامل کلاته‌کننده می‌تواند منابع کربن و انرژی لازم برای این میکروارگانیسم‌ها را فراهم کرده و فرآیند تثبیت زیستی فلزات سنگین را تقویت کند، در نتیجه خطر آلودگی محصولات کشاورزی به فلزات سنگین کاهش می‌یابد.

تحلیل عملکرد جامعه میکروبی

تغییرات در فعالیت آنزیمی خاک

فعالیت آنزیم‌های خاک شاخص مهمی از تنوع عملکردی جوامع میکروبی بوده و توانایی میکروارگانیسم‌ها در تبدیل عناصر غذایی را منعکس می‌کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فعالیت آنزیم‌هایی نظیر-β گلوکوزیداز، اوره‌آز، پروتئاز و فسفاتاز پس از کاربرد کودهای معدنی و آلی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد . گلوکوزیداز ارتباط نزدیکی با تجزیه ماده آلی خاک دارد و افزایش فعالیت آن می‌تواند به افزایش کربن آلی خاک کمک کند. از سوی دیگر، اوره‌آز و پروتئاز به‌ترتیب در هیدرولیز اوره و پروتئین‌ها نقش دارند و افزایش فعالیت آن‌ها نرخ معدنی‌شدن نیتروژن را تسریع می‌کند و منابع نیتروژن قابل جذب بیشتری برای رشد گیاه فراهم می‌آورد. علاوه بر این، فسفاتاز نقش مهمی در معدنی‌سازی فسفر آلی خاک دارد و افزایش فعالیت آن می‌تواند قابلیت دسترسی فسفر را ارتقاء دهد. کاربرد تلفیقی کودهای معدنی و آلی با بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، محیط مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها فراهم کرده و در نتیجه، فعالیت آنزیمی خاک را افزایش می‌دهد. از یک سو، کودهای آلی منابع کربن و انرژی غنی برای میکروارگانیسم‌ها فراهم کرده و موجب افزایش جمعیت و تنوع میکروبی می‌شوند . از سوی دیگر، کاربرد منطقی کودهای معدنی با اصلاح pH و وضعیت تغذیه‌ای خاک شرایط مناسبی برای رشد میکروبی ایجاد می‌کند (Zhao et al., 2022).

افزایش فعالیت آنزیمی خاک از اهمیت ویژه‌ای برای حفظ حاصلخیزی خاک و پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی برخوردار است. این افزایش با تسریع چرخه عناصر غذایی و بهبود قابلیت دسترسی آن‌ها، مواد غذایی کافی برای رشد گیاهان فراهم می‌کند.

مطالعات نشان داده‌اند که بین فعالیت آنزیمی خاک و عملکرد محصول همبستگی مثبت معنی‌داری وجود دارد و افزایش فعالیت آنزیم‌ها جذب عناصر و تجمع ماده خشک در گیاهان را بهبود داده و در نهایت موجب افزایش عملکرد و کیفیت محصول می‌شود (Tahir et al., 2023). همچنین فعالیت آنزیمی خاک می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای سنجش تنش‌های محیطی به کار رود. در شرایط تنش ناشی از فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها یا سایر آلاینده‌ها، فعالیت آنزیمی خاک معمولاً مهار می‌شود. کاربرد کودهای معدنی و آلی می‌تواند خطر آلودگی کشاورزی را کاهش داده، شرایط محیطی خاک را بهبود بخشد و مقاومت فعالیت آنزیم‌های خاک را در برابر تنش افزایش دهد. بنابراین، پایش تغییرات فعالیت آنزیم‌های خاک امکان ارزیابی به‌موقع وضعیت سلامت خاک را فراهم کرده و مبنایی برای پیشگیری از آلودگی‌های کشاورزی و احیای خاک ارائه می‌دهد.

تحلیل ژن‌های عملکردی میکروبی

تحلیل ژن‌های عملکردی میکروبی خاک بر اساس متاژنومیک، از طریق توالی‌یابی گسترده و حاشیه‌نویسی عملکردی ژنوم‌های میکروبی خاک، امکان درک عمیق ظرفیت متابولیک و کارکردهای بوم‌شناختی جوامع میکروبی را فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد کودهای معدنی و آلی می‌تواند به‌طور معنی‌داری فراوانی و توزیع ژن‌های عملکردی میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. به‌عنوان مثال، در خاک‌های شالیزاری، کاربرد کودهای آلی فراوانی ژن‌های عملکردی مرتبط با چرخه کربن و نیتروژن مانند ژن‌های nifH[1] وamoA[2] را که به ترتیب در تثبیت نیتروژن و اکسیداسیون آمونیاک نقش دارند، افزایش می‌دهد. این یافته نشان می‌دهد که کودهای آلی می‌توانند ظرفیت تبدیل عناصر غذایی توسط میکروب‌های خاک را ارتقا دهند. در مقابل، مصرف بیش‌ازحد کودهای شیمیایی ممکن است فراوانی برخی ژن‌های عملکردی را کاهش داده و موجب تغییر در کارکردهای متابولیکی میکروبیوتای خاک شود (Li et al., 2023).

اثر میکروارگانیسم‌ها بر حاصلخیزی خاک

کاربرد تلفیقی کودهای معدنی و آلی به‌طور مستقیم بر ساختار و عملکرد جوامع میکروبی تأثیر گذاشته و در نتیجه عملکرد حاصلخیزی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میکروارگانیسم‌های خاک در تجزیه ماده آلی نقش اساسی دارند و این فرآیند نخستین گام در حفظ تعادل ماده آلی خاک و چرخه عناصر غذایی است. کاربرد متعادل کودهای آلی می‌تواند محتوای ماده آلی خاک را افزایش دهد، فعالیت میکروبی را ارتقاء بخشد و سرعت تجزیه و تبدیل ماده آلی را افزایش دهد. مقابل، کاربرد منفرد کودهای شیمیایی اغلب باعث برهم‌خوردن تعادل جامعه میکروبی، کاهش ظرفیت تجزیه ماده آلی و تجمع مواد غذایی در خاک می‌شود که قابلیت جذب مناسبی برای گیاهان ندارند (شکل ۲).

[1] Nitrogen fixation gene H
[2] **A**mmonia **mo**nooxygenase subunit **A**

شکل ۲- تحلیل پایداری کودهای معدنی و آلی بر جوامع میکروبی

نتیجه‌گیری

جامعه میکروبی خاک یکی از ارکان اصلی پایداری اکوسیستم‌های زراعی است و مدیریت صحیح آن از طریق ترکیب نهاده‌های آلی و معدنی، نقش کلیدی در بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش عملکرد گیاه و ارتقای کیفیت محصولات دارد. استفاده متعادل از کودهای آلی نه‌تنها مسیرهای متابولیکی میکروبی را فعال‌تر می‌کند بلکه تنوع زیستی و کارایی چرخه‌های غذایی خاک را افزایش می‌دهد و از پیامدهای منفی مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی مانند کاهش تنوع میکروبی و اختلال در چرخه‌های بیوشیمیایی جلوگیری می‌نماید. در نتیجه، رویکردهای تلفیقی در کوددهی می‌توانند به عنوان راهکاری مؤثر برای دستیابی به کشاورزی پایدار و حفاظت بلندمدت از سلامت خاک مورد توجه قرار گیرند.

فهرست منابع

Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S., and Arcand, M. M. (2021). Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. Front. Plant Sci. 12:637108.

Fang, H., Liu, K., Li, D., Peng, X., Zhang, W., and Zhou, H. (2021). Long-term effects of inorganic fertilizers and organic manures on the structure of a paddy soil. Soil Tillage Res. 213:105137.

Zhang, M. J., Jia, J.-Q., Hua, L., Feng, M.-C., and Yang, W.-D. (2021). Functional diversity of soil microbial communities in response to supplementing 50% of the mineral N fertilizer with organic fertilizer in an oat field. J. Integr. Agric. 20, 2255–2264.

Song, A., Zhang, J., Xu, D., Wang, E., Bi, J., Asante-Badu, B., et al. (2022). Keystone microbial taxa drive the accelerated decompositions of cellulose and lignin by long-term resource enrichments. Sci. Total Environ. 842:156814.

Cardarelli, M., El Chami, A., Iovieno, P., Rouphael, Y., Bonini, P., and Colla, G. (2023). Organic fertilizer sources distinctively modulate productivity, quality, mineral composition, and soil enzyme activity of greenhouse lettuce grown in degraded soil. Agronomy 13:194.

Oyedoh, O. P., Yang, W., Dhanasekaran, D., Santoyo, G., Glick, B. R., and Babalola, O. O. (2023). Rare rhizo-Actinomycetes: a new source of agroactive metabolites. Biotechnol. Adv. 67:108205.

Lu, W., Hao, Z., Ma, X., Gao, J., Fan, X., Guo, J., et al. (2024). Effects of different proportions of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on soil nutrients and fertilizer utilization in gray desert soil. Agronomy 14:228.

Wang, K., Hou, J., Zhang, S., Hu, W., Yi, G., Chen, W., et al. (2023). Preparation of a new biochar-based microbial fertilizer: nutrient release patterns and synergistic mechanisms to improve soil fertility. Sci. Total Environ. 860:160478.

Wang, C., and Kuzyakov, Y. (2024). Rhizosphere engineering for soil carbon sequestration. Trends Plant Sci. 29, 447–468.
Zhou, S., Chang, T., Zhang, Y., Shaghaleh, H., Zhang, J., Yang, X., et al. (2024). Organic fertilizer compost alters the microbial composition and network structure in strongly acidic soil. Appl. Soil Ecol. 195:105263.
Liu, T., Wang, Q., Li, Y., Chen, Y., Jia, B., Zhang, J., et al. (2024). Bio-organic fertilizer facilitated phytoremediation of heavy metal (loid) s-contaminated saline soil by mediating the plant-soil-rhizomicrobiota interactions. Sci. Total Environ. 922:171278.
Zhao, Y., Zhang, M., Liu, Z., and Yang, F. (2024). Migration and transformation of soil phosphorus by organic acids: a global meta-analysis. J. Soils Sediments 24, 589–602.
Sulaiman, M. A., and Bello, S. K. (2024). Biological control of soil-borne pathogens in arid lands: a review. J. Plant Dis. Prot. 131, 293–313.
Zhao, Y., Wang, Y., Sun, S., Liu, W., Zhu, L., and Yan, X. (2022). Different forms and proportions of exogenous nitrogen promote the growth of alfalfa by increasing soil enzyme activity. Plan. Theory 11:1057. d
Tahir, M., Wei, X., Liu, H., Li, J., Zhou, J., Kang, B., et al. (2023). Mixed legume–grass seeding and nitrogen fertilizer input enhance forage yield and nutritional quality by improving the soil enzyme activities in Sichuan, China. Front. Plant Sci. 14:1176150.
Li, D., He, H., Zhou, G., He, Q., and Yang, S. (2023). Rice yield and greenhouse gas emissions due to biochar and straw application under optimal reduced N fertilizers in a double season rice cropping system. Agronomy 13:1023.

The role of balanced fertilization in improving soil health and achieving sustainable agriculture and food security.

Mahboobeh Jalali
Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
Email: jalali.mah@lu.ac.ir

Abstract

Sustainable soil health management plays a crucial role in enhancing agricultural productivity and ensuring global food security. This study evaluates the effects of different ratios of mineral–organic fertilizers on soil microbial community structure and dynamics, enzymatic activities, functional gene abundance, and overall soil health indicators. Using bioinformatics approaches, enzymatic activity assays, and metagenomic analyses, the results show that balanced fertilization significantly increases soil biodiversity, stabilizes microbial communities, and improves plant performance under environmental stresses. In particular, the synergistic application of mineral and organic fertilizers enhances β-glucosidase and urease activities, accelerates organic matter decomposition and nutrient cycling, and simultaneously influences microbial populations involved in nutrient processes and pathogen suppression. These findings highlight the necessity of developing and implementing balanced, region-specific fertilization strategies to improve agricultural productivity. Future research should focus on refining fertilization frameworks through interdisciplinary approaches, analyzing soil–crop–climate interactions, and extending these practices to a wide range of agricultural ecosystems.

Keywords: Integrated fertilizers, Soil microbial communities, sustainable agriculture