19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱
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

بررسی اثر گوگرد در شرایط مختلف حرارتی بر اکسایش گوگرد در خاک‌های رسی، لومی و شنی لومی

جلال قادری[1*]، محمد حسین داوودی[2]، ندا محمدی[3]، کریم شهبازی[2] و کمال خلخال[4]

۱*. استادیار پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. پست الکترونیکی نویسنده مسئول ghaderij@yahoo.com
۲. دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳. کارشناس ارشد بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی.
۴. کارشناس محقق، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران.

چکیده:

این پژوهش به‌منظور ارزیابی تأثیر سطوح مختلف گوگرد (۰، ۵۰۰، و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و دماهای متفاوت (۱۴، ۲۵، و ۳۶ درجه سانتی‌گراد) بر اکسایش گوگرد در سه نوع خاک با بافت‌های رسی، لومی، و شنی لومی انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در شرایط رطوبتی ۶۰ درصد ظرفیت اشباع و همراه با باکتری *Thiobacillus neapolitanus* به‌مدت ۱۴، ۲۸، و ۴۲ روز انکوباسیون اجرا شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان اکسایش گوگرد در خاک‌های لومی (۹۲ µg/cm²/day) و شنی لومی (۳۵/۱ µg/cm²/day) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در خاک رسی (۴۶/۲ µg/cm²/day) در دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار منجر به کاهش اکسایش در مقایسه با سطح ۵۰۰ کیلوگرم شد که احتمالاً به دلیل اثرات بازدارندگی غلظت‌های بالای گوگرد بر فعالیت میکروبی است. همچنین، اکسایش گوگرد در روز ۱۴ به حداکثر خود رسید و پس از آن با افزایش زمان انکوباسیون کاهش یافت. بنابراین، بافت متوسط (لوم) با ایجاد تعادل بهتر بین تهویه، رطوبت و دما و در نتیجه ایجاد محیط مناسب برای باکتری‌های اکسید کننده گوگرد، بیشترین اکسایش را دارد.

واژگان کلیدی: اکسایش گوگرد، بافت خاک، دما.

مقدمه:

کمبود گوگرد در گذشته نه چندان دور فقط در خاک‌های خاص مشاهده می‌شد، اما اکنون به طور جهانی در حال کمبود است. میزان گوگرد موجود در خاک برای گیاه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، ۳۴ تا ۸۶ درصد کاهش یافته است و تولید محصولات کشاورزی را در معرض خطر قرار داده است (Sharma et al., 2024). اثربخشی گوگرد عنصری بستگی به مقدار

اکسایش آن دارد. اکسایش گوگرد باعث افزایش حاصلخیزی خاک نیز می‌شود (Zhao et al., 2015). متغیرهای خاکی متنوعی می‌توانند بر اکسایش گوگرد در خاک تأثیر بگذارند، مانند pH، بافت خاک، دما و میزان آب (Zhao et al., 2022). از میان این عوامل، دما و رطوبت دو عامل بسیار مهم هستند که اکسایش گوگرد را تحت تأثیر قرار می‌دهند و از این میان دما نسبت به مقدار رطوبت خاک دارای تأثیر بیش‌تری روی اکسایش گوگرد است (Janzen and Bettany, 1987). افزایش دما تا حدی که با افزایش فعالیت ریزجانداران اکسیدکننده همراه باشد، باعث افزایش میزان اکسیداسیون گوگرد می‌شود. با این حال، چگونگی تأثیر بافت خاک بر جوامع میکروبی اکسیدکننده گوگرد و اکسایش گوگرد هنوز مشخص نیست و تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس در شرایط حرارتی مختلف بر اکسایش گوگرد در خاک‌های با بافت متفاوت (رسی، لومی و شنی) در سطح کشور است.

مواد و روش‌ها:

در این پژوهش ابتدا سه نوع خاک با بافت کاملا متفاوت در سطح کشور از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شده و آنالیز شدند (جدول ۱).). سپس آزمایشی به منظور تأثیر سه شرایط حرارتی (۱۴، ۲۵ و ۳۶ درجه سانتی‌گراد) و در سه سطح گوگرد (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار) در ۶۰ درصد رطوبت اشباع نسبی به همراه باکتری تیوباسیلوس، در زمان‌های ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز انکوباسیون، در سه تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب بررسی شد.

جدول ۱. نتایج تجزیه خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاکهای مورد آزمایش (۳۰-۰ سانتیمتری)

سری	درصد اشباع	pH 1:2.5	هدایت الکتریکی	کربن آلی	فسفر	آهن	روی	CEC	CCE	گوگرد	بافت
	%		dSm^{-1}	%	mg. kg^{-1}	mg. kg^{-1}	mg. kg^{-1}	meq/ 100g	%	mg. kg^{-1}	
سری بابل (مازندران)	۶۳	۷/۶	۰/۳۶	۱/۸۱	۳۶/۴	۶۰/۲	۰/۹۵	۳۴	۳/۱	۱۶/۵	Clay
سری زرینه رود (آذربایجان غربی)	۴۳	/۱۶ ۸	۰/۳۶	۱/۲۹	۲۹	۱۰/۲	۵/۱	۲۱/۴	۱۸	۱۹	Loam
سری طالخونچه	۱۷	۸/۳	۰/۱۶	۰/۰۶	۶	۲/۴	۰/۴	۷	۷۰	/۲۵ ۱۰	Loam Sandy

برای انجام این آزمایش، ابتدا مقدار ۴۰۰ گرم خاک هوا خشک در داخل ظرف‌های پلاستیکی ۱۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته و نسبت به اعمال تیمارهای کودی همراه با باکتری تیوباسیلوس اقدام شد (به ازای هر ۵۰ کیلوگرم کود گوگرد مصرفی، یک کیلوگرم باکتری تیوباسیلوس از گونه *T. neapolitanous* استفاده شد). گوگرد تهیه شده متعلق به پژوهشگاه صنعت نفت بود. گوگرد پاستیل، یک نوع کود گوگردی گرانوله به رنگ سبز متمایل به زرد می‌باشد که دارای ۱۲ درصد رس بنتونیت و ۸۸ درصد گوگرد است. با استفاده از پیپت فاین جت، آب مقطر به نمونه‌های خاک اضافه تا به رطوبت مورد نظر (۶۰ درصد رطوبت اشباع) رسید. درب هر ظرف با استفاده از پارافیلم بسته شد (جهت جلوگیری از تبخیر). روی درب قوطی‌ها چند سوراخ برای انجام تهویه مناسب تعبیه شد. سپس ظرف‌ها در دمای مورد نظر (۱۴، ۲۵ و ۳۶ درجه سانتی‌گراد) در انکوباتور نگهداری شدند. کنترل رطوبت به‌وسیله روش وزنی و در فواصل ۴۸ الی ۷۲ ساعت انجام شد. در پایان هر دوره نگهداری شده، خاک‌ها را از ظرف‌ها برداشته، خوب مخلوط شده و برای تجزیه‌های مختلف استفاده شد. در پایان هر دوره نگهداری

شده، خاک‌ها را از ظرف‌ها برداشته، خوب مخلوط شده و میزان اکسایش گوگرد، در زمان‌های ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز بوسیله معادله Janzen و Bettany (1987) محاسبه شد.

نتایج و بحث:

نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک‌های لومی و شنی لومی با افزایش مصرف گوگرد در شرایط مختلف حرارتی، مقدار اکسایش کاهش و در خاک رسی با با افزایش مصرف گوگرد در شرایط مختلف حرارتی، مقدار اکسایش افزایش یافت. بیش-ترین مقدار اکسایش در خاک‌های لومی و شنی لومی با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در حرارت ۲۵ درجه سانتی گراد و در روز ۱۴ انکوباسیون و در خاک رسی با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در حرارت ۳۶ درجه سانتی‌گراد و در روز ۱۴ انکوباسیون مشاهده شد. احتمالاً دلیل دمای بالاتر برای اکسایش در خاک رسی، نیاز به دمای بالاتر برای جبران محدودیت‌های تهویه‌ای باشد. مصرف بالای گوگرد (۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) ممکن است باعث کاهش فعالیت میکروبی یا تجمع ترکیبات بازدارنده شود. اکسایش در روز ۱۴ انکوباسیون به دلیل فعالیت میکروبی شدید در مراحل اولیه تجزیه گوگرد به اوج می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. پس از ۴۲ روز، میزان اکسایش به پایین‌ترین سطح می‌رسد، زیرا بیشتر گوگرد اکسید شده است. بیش‌ترین مقدار اکسایش به‌ترتیب در خاک‌های لومی (۹۲ میکروگرم گوگرد بر سانتی مترمربع در روز) > رسی (۴۶/۲ میکروگرم گوگرد بر سانتی مترمربع در روز) > شنی لومی (۳۵/۱ میکروگرم گوگرد بر سانتی مترمربع در روز) نسبت به تیمار شاهد و در ۱۴ روز آنکوباسیون بدست آمد (جدول ۲). بهترین دما برای اکسایش گوگرد در خاک‌های لومی و شنی لومی، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در خاک رسی دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. با افزایش دما از ۲۵ به ۳۶ درجه سانتی‌گراد در خاک‌های لومی و شنی لومی از مقدار اکسایش گوگرد کاسته و در خاک رسی افزوده شد. خاک لومی با ساختار میانه (۴۳٪ درصد اشباع) تعادل بهتری بین تهویه و رطوبت ایجاد و در نتیجه محیط مناسبتری برای تجمع باکتری‌های تیوباسیلوس و اکسایش گوگرد فراهم می‌کند. Zhao و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که اکسایش گوگرد و در نتیجه آن کاهش pH در بافت لوم شنی (سبکتر) بیشتر از بافت لوم سیلتی بود. مطابق با نتایج این تحقیق Wainwright (۱۹۸۴) نیز بهترین دما برای اکسایش گوگرد در خاک را ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. درحالیکه Aulakh و همکاران (۲۰۰۲) و Jaggi و همکاران (۲۰۰۵)، دما خاک ۳۶ درجه سانتی‌گراد را برای اکسایش گوگرد در خاک‌های اسیدی، خنثی و قلیایی شمال غرب هند پیشنهاد کردند. اکسایش گوگرد فرآیند تشکیل SO_4^{2-} با اکسایش S°، H_2S و سولفید (S^{2-}) توسط برخی از میکروب‌های اکسیدکننده گوگرد است (Chaudhary et al., 2023)

جدول ۲. مقایسه میانگین تأثیر مقدار گوگرد در شرایط رطوبتی بر اکسایش گوگرد در زمان‌های مختلف آنکوباسیون خاک

(میکروگرم گوگرد بر سانتی مربع در روز)

	بابل								
گوگرد مصرفی (کیلوگرم بر هکتار)	۱۴ روز			۲۸ روز			۴۲ روز		
	۱۴ c°	۲۵ c°	۳۶ c°	۱۴ c°	۲۵ c°	۳۶ c°	۱۴ c°	۲۵ c°	۳۶ c°
۵۰۰	۱۷ de	۳۵/۶ b	۴۶/۲ a	۱۱/۵ e	۲۱/۹ c	۳۵/۲ d	۱۰ e	۲۱ b	۲۹/۵ a
۱۰۰۰	۲۳/۵ c	۳۶/۷ b	۳۹/۵ b	۱۴ d	۲۳/۸ b	۲۵ b	۱۱ e	۱۷/۸ d	۱۹/۳ c
	زرینه رود								
۵۰۰	۲۸/۲ c	۹۲ a	۷۱/۹ b	۱۸/۷ c	۵۶/۶ a	۴۲/۱ b	۱۳/۷ d	۴۷/۶ a	۳۷/۲ b
۱۰۰۰	۱۶/۹ cd	۵۷/۹ b	۵۸/۸ b	cd ۱۱/۹	۳۶ b	۳۳/۷ b	۱۰/۹ d	۲۶/۵ c	۲۳/۵ c

طالخونچه

۱۱/۲ b	۱۸/۲ a	۸/۱ c	۱۳/۲ c	۲۰/۴ b	۱۰/۴ d	۲۳/۷ b	۳۵/۱ a	۱۸/۴ c	۵۰۰
۸/۱ c	۱۷/۹ a	۶/۵ c	۱۱ d	۲۳ a	۸/۲ e	۱۷/۲ c	۳۴/۸ a	۱۲/۷ d	۱۰۰۰

* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد.

نتیجه‌گیری:

این پژوهش نشان داد که بافت خاک و دمای محیط تأثیر معناداری بر روند اکسایش گوگرد دارند. خاک لومی تعادل بهتری بین تهویه و رطوبت ایجاد و در نتیجه محیط مناسبتری برای تجمع باکتری‌های تیوباسیلوس و اکسایش گوگرد فراهم می‌کند. در خاک‌های لومی و شنی لومی، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین کارایی را در اکسایش گوگرد داشت، درحالی‌که در خاک رسی، دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد بهینه‌ترین شرایط بود که احتمالاً نیاز به دمای بالاتر برای جبران محدودیت‌های تهویه‌ای در خاک رسی باشد. همچنین، مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار نسبت به سطوح بالاتر (۱۰۰۰ کیلوگرم) نتایج بهتری در فرآیند اکسایش نشان داد. از طرفی، زمان انکوباسیون نیز عامل کلیدی بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان اکسایش در روز ۱۴ ثبت شد و پس از آن روند کاهشی داشت. این یافته‌ها حاکی از آن است که برای دستیابی به حداکثر کارایی در کاربرد گوگرد، باید به بافت خاک، دما، و مقدار گوگرد مصرفی توجه ویژه‌ای داشت.

منابع

Aulakh, M. S., Jaggi, R. C. and Sharma, R. (2002). Mineralization-immobilization of soil organic S and oxidation of elemental S in subtropical soils under flooded and nonflooded conditions. Biology and fertility of soils. 35: 197-203.

Chaudhary, S., Sindhu, S. S., Dhanker, R., & Kumari, A. (2023). Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. Microbiological Research, 271, 127340.

Jaggi, R. C., Aulakh, M. S., and Sharma, R. (2005). Impacts of elemental S applied under various temperature and moisture regimes on pH and available P in acidic, neutral and alkaline soils. Biology and Fertility of soils. 41: 52-58.

Janzen, H. H., & Bettany, J. R. (1987). Oxidation of elemental sulfur under field conditions in central Saskatchewan. Canadian Journal of Soil Science, 67, 609–618.

Wainwright, M. (1984). Sulfur oxidation in soils. Advances in Agronomy. 37: 350-397.

Zhao, C., Degryse, F., Gupta, V., McLaughlin, M.J. (2015). Elemental sulfur oxidation in Australian cropping soils. Soil Science Society of America Journal. 79, 89–96.

Sharma, R. K., Cox, M. S., Oglesby, C., & Dhillon, J. S. (2024). Revisiting the role of sulfur in crop production: A narrative review. Journal of Agriculture and Food Research, *15*, 101013.

Investigation of Sulfur's Effect under Different Thermal Conditions on Sulfur Oxidation in Clay, Loam, and Sandy Loam Soils

Jalal Ghaderi[1]✉ | Mohammad Hossein Davoodi[2], Neda Mohammadi[3], Karim Shahbazi [2] and Kamal Khalkhal[4]

1. Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran. Coresponding Author's E-mail: ghaderijalal@gmail.com

2. Associate Prof, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
3. Soil and Water Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran.
4. Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran.

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of different sulfur levels (0, 500, and 1000 kg/ha) and various temperatures (14, 25, and 36°C) on sulfur oxidation in three soil types with clay, loam, and sandy loam textures. The experiment was conducted using a completely randomized block design with three replications under 60% relative saturation moisture conditions, incorporating *Thiobacillus neapolitanus* bacteria over incubation periods of 14, 28, and 42 days. Results demonstrated that maximum sulfur oxidation occurred in loam soils (92 µg/cm²/day) and sandy loam soils (35.1 µg/cm²/day) at 25°C, while clay soils showed peak oxidation (46.2 µg/cm²/day) at 36°C. Application of 1000 kg S/ha led to reduced oxidation compared to 500 kg S/ha, likely due to inhibitory effects of high sulfur concentrations on microbial activity. Sulfur oxidation peaked at day 14 of incubation before gradually declining with extended incubation time. The study concludes that medium-textured (loam) soils provide optimal conditions for sulfur-oxidizing bacteria by maintaining the best balance between aeration, moisture retention, and temperature regulation, resulting in the highest oxidation rates.

Keywords: Soil Texture, Sulfur Oxidation, Temperature.