

ЗАСТОСУВАННЯ БІОЧАРУ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

НУРМУХАММЕДОВ А.К.,
д.с.-г.наук;
ГАНЖЕНКО О.М.,
д.с.-г.наук.

Біочар (biochar) — це багатий вуглецем твердий матеріал, який отримують шляхом високотемпературного піролізу або дегазації біомаси в середовищі з низьким вмістом кисню або без нього, що унеможлиблює процес горіння. За рахунок того, що піроліз протікає за температури близько 800 °С вміст вуглецю в біочарі становить 93–99%. На відміну від біочару, біовугілля (biocoal) утворюється в результаті піролізу за температури 300 °С, тому вміст вуглецю в ньому не перевищує 65% [1].

Біочар із давніх часів застосовували для підвищення родючості ґрунту в багатьох країнах світу. Його отримували в результаті тління сільськогосподарських відходів у ямах або траншеях [2]. Зростання чисельності населення, швидка індустріалізація та урбанізація призводять до масового утворення органічних відходів, в тому числі сільськогосподарських. Тільки незначна частина цих відходів використовується для відгодівлі травин, компостування чи виробництва біогазу [3]. Однак основна частина відходів не використовуються або утилізуються шляхом спалювання, або викидаються на звалища, що призводить до забруднення повітря, води й ґрунту. Тому, використання органічних відходів для виробництва біочару може бути одним із шляхів вирішення проблеми їх утилізації. Виробництво біочару — це швидкий процес, який також є економічно доцільним через високу цінність кінцевого продукту.

Основні процеси термохімічної конверсії ліпнино-целюлозної біомаси, в результаті яких утворюється біочар, є сушіння, торрефікація, піроліз [4, 5].

1. Сушіння — це випаровування води й інших невеликих молекул із утворенням білого диму (через виділення водяної пари) за температури нижче 200 °С. Зазвичай сушена деревина містить від 12% до 20% води, суха солома — 10–15%, зелена біомаса — більше 40%. Перш ніж біомаса стане придатною для виробництва енергії або біочару, необхідно витратити теплову енергію для видалення з неї вологи.

2. Торрефікація — це другий етап, що відбувається за температури 200–300 °С, зазвичай без доступу кисню. За таких умов розпочинається процес руйнування органічних структур, біомаса стає рихлою й легко руйнується. Цей процес супроводжується виділенням кислого диму

з характерним запахом, що пов'язано із випаровуванням таких з'єднань, як оцтова кислота.

3. Піроліз біомаси відбувається за температури від 350 до 600 °С без доступу кисню, що призводить до виділення коричневого або чорного диму (газоподібні масла та смоли) і утворенням полум'я. Для виробництва якісного біочару піроліз необхідно здійснювати за температури до 750 °С, що дозволяє збільшити площу активної поверхні, зменшити вміст летючих речовин і кисню.

Властивості біочару можуть значно змінюватись в залежності від сировини, з якої він виготовляється та способу отримання. Як правило, властивості біочару визначаються вмістом вуглецевої фракції й золи, а також їх фізичними характеристиками. Характеристики біочару також включають його елементний склад (вуглець, водень, азот, сірка й кисень) і параметри активної поверхні (площа поверхні, розмір пор, хімічний склад поверхні) [6].

Температура, за якої виробляється біочар, є ключовим фактором, що визначає його якість. Коли температура термічної конверсії збільшується, кількість летючих речовин, які залишаються у біочару, зменшується, в той час вміст стабільного зв'язаного вуглецю й золи збільшується. Відповідно, зі збільшенням температури збільшується й стабільність у часі отриманого продукту. Площа активної поверхні біочару, отриманого за низьких температур (<500 °С), зазвичай не перевищує 150 м²/г. В той же час, існує верхня температурна межа, зазвичай між 700 і 800 °С, після якої площа поверхні біочару починає зменшуватися [7].

Біочар із трав'яної сировини (трава, солома тощо) зазвичай має більш високий вміст золи, ніж біочар із деревини. Це пов'язано з тим, що в дерев'яних породах у результаті багаторічного розвитку основу біомаси складають целюлоза та лігнін. В той же час, приріст однорічної трав'янистої сировини пов'язаний з активним використанням мінералів (кальцію, калію, фосфору і т.п.), які збільшують кількість золи [8].

Біочар є потужним інструментом для подолання наслідків глобальних змін клімату. Відомо, що рослинна біомаса містить приблизно 45–60% вуглецю та 35–40% кисню, решта — водень, азот та інші елементи. Коли біомаса розкладається або спалюється, значна кількість вуглекислого газу виділяється в атмосферу, що спричиняє парниковий ефект. Цього можна уникнути застосовуючи біочар [9].

Застосування біочару забезпечує підвищення родючості ґрунту, стимулює проростання насіння, посилює процеси росту й

розвитку рослин, підвищує стійкість ґрунту до хвороб, забезпечує адсорбцію токсичних забруднювачів, поліпшує здатність ґрунту утримувати воду тощо. [10, 11]. Крім того, біочар можна використовувати в якості джерела енергії й поглинача вуглецю.

Вплив біочару на родючість ґрунту залежить від характеристик біочару. Вважається, що найбільший ефект досягається за високого (>70%) вмісту вуглецю, низького вмісту золи, великої площі активної поверхні (близько 300 м²/г), низького вмісту летких речовин, помірної кислотності (рН 7–9) із здатністю нейтралізації кислотності ґрунту [6].

Коли біомаса піддається процесу піролізу, основна частина вуглецю залишається в біочарі разом із мінералами та більшістю поживних речовин. Відповідно, це зменшує кількість вуглекислого газу, що виділяється в атмосферу, одночасно значно покращуючи родючість ґрунту. Крім того, під час виробництва біочару синтез-газ розглядається як джерело енергії, що дозволяє зменшити залежність від викопного палива. Таким чином, виробництво та використання біочару забезпечує стійкий підхід до зменшення викидів парникових газів і споживання викопного палива [12].

Встановлено, що нешкоджені шар гумусу зберігає поживні речовини та воду, а також велику кількість вуглекислого газу СО₂. Біочар має дуже схожий механізм дії, володіючи активною площею 200–500 м²/г і високою пористістю, він може вбирати воду й поживні речовини з ґрунту в п'ять разів більше його власної маси. Крім того, він є стабільним до розкладання та не гниє.

Таким чином, застосовуючи біочар, сільгоспвиробники, з одного боку, зможуть поліпшити родючість ґрунтів, заощадити гроші на мінеральних добривах, а з іншого боку — в майбутньому отримати додаткові екокредити на зменшення викидів парникових газів у атмосферу.

Аналіз літературних даних показує, що біочар значно знижує вміст нітратів у ґрунті й ґрунтових водах, покращує їх кислотність, збільшує накопичення гумусу та абсорбційну здатність ґрунту.

Відомо, що азот є важливим елементом для рослин, який існує в органічній і неорганічній формах. Велика частина органічного азоту перетворюється в неорганічний — амонійний і нітратний, які потім засвоюються рослинами [13]. Однак мікробіологічна активність ґрунту викликає розкладання й витрату азоту. Застосування біочару впливає як ґрунтова добавка та знижує втрати азоту, що, в кінцевому підсумку, покращує родючість ґрунтів [14]. Хоча існують суперечливі повідомлення

про адсорбції азоту під час застосування біочару, однак велика частина звітів показує його позитивний вплив [15, 16, 17, 18]. У кількох публікаціях повідомляється, що хімічні групи на поверхні біочару сприяють адсорбції азоту [19, 20]. Показано, що ефективність адсорбції азоту також залежить від часу й температури. Старий біочар адсорбує більше NH_4^+ , ніж щойно виготовлений, оскільки гідрофільність біочару збільшується під час його зберігання [21]. Біочар, отриманий за високої температури ($600\text{ }^\circ\text{C}$), демонструє знижену ємність катіонного обміну, оскільки кислотні функціональні групи (в основному карбоксильні) перетворюються в нейтральні або основні ароматичні групи [22]. Таким чином було виявлено, що біочар, вироблений за помірної температури, найкраще підходить для адсорбції розчинного азоту. Крім того, тип сировинної біомаси також впливає на адсорбційну здатність азоту біочаром. Біочар із трав'янистої біомаси демонструє більшу адсорбційну здатність, ніж біочар із деревної біомаси, у зв'язку з наявністю більшої кількості карбоксильних груп [23].

Фосфор є важливим елементом живлення рослин і метаболізму ДНК. У ґрунті він присутній в основному в фосфатній формі, а для засвоєння рослин необхідна розчинна форма фосфору. Фосформобілізуючі мікроорганізми розчиняють фосфор, потім він адсорбується у біочар і стає доступним для рослин. Отже, однею із найбільш важливих властивостей біочару є його здатність поглинати різні хімічні елементи, живильні речовини та метали на своїй поверхні й робити їх доступними для рослин упродовж більш тривалого періоду завдяки своїй великій площі активної поверхні, пористій структурі, ємності катіонного обміну й численним функціональним групам [24]. У кількох дослідженнях стверджується, що біочар може запобігти вимиванню азоту, фосфатів та інших поживних речовин із компосту [25, 26]. Показано, що внесення в ґрунт біочару з листяних порід зменшить вимивання азоту та фосфату [27]. Водночас застосування біочару значно збільшує концентрацію лужного азоту (на 29%), доступного фосфору (на 77%) і доступного калію (на 100%) [28].

Застосування біочару значно покращує структуру ґрунту, особливо збільшує пористість, площу поверхні, волого-утримуючу здатність, поглинання кисню тощо [29]. Збільшення площі активної поверхні й пористості важливо для розвитку ґрунтових бактерій і грибів, які поглинають поживні речовини з ґрунту [30]. Водночас, виявлена

стимуляція нітрифікації через підвищену пористість ґрунту за рахунок поглинання інгібіторів нітрифікаторів, наприклад, фенолів [31]. Біочар також може бути джерелом поживних мікроелементів, наприклад В, Мо, К, Р, Са і т.п. [32], які є необхідними елементами для бульбочкових бактерій *Rhizobia*.

Біочар у поєднанні з компостом значно збільшує доступність поживних речовин і в результаті підвищує врожайність сільськогосподарських культур [33]. Показано підвищення врожайності сільськогосподарських культур на 25% у порівнянні з хімічними добривами та збільшення вмісту органічного вуглецю в ґрунті з 0,93% (за застосування мінеральних добрив) до 1,25% (за застосування біочару), вмісту вологи в ґрунті з 18% (мінеральні добрива) до 23% (біочар) [34].

Застосування біочару може сприяти поліпшенню водоутримуючої здатності ґрунту, доступності вологи для сільськогосподарських культур, а також зменшенню втрати води через дренаж або стікання. Дослідження впливу біочару на щільність ґрунту, водоутримуючу здатність і швидкість інфільтрації води показали, що по мірі збільшення норми внесення біочару зменшувалась об'ємна щільність ґрунту, а утримання води збільшувалось, водночас швидкість інфільтрації зменшувалась [35]. Дослідження біочару за різних рівнів дефіциту волиги (60%, 80% і 100% від евапотранспірації) показали зростання врожайності кукурудзи зі збільшенням доз внесення біочару [36].

Також активно досліджується вплив біочару на збільшення видового складу та різноманітності мікроорганізмів і ферментативну активність ґрунту. Відзначено збільшення зростання чисельності ґрунтових бактерій і грибів за внесення біочару в дозі 1% від маси ґрунту, подальше збільшення концентрації біочару до 5% призвело до зниження мікробної біомаси [37]. Автори пояснюють це зміною показника рН ґрунту: за внесення біочару в дозі 1–2% від маси ґрунту він мав слабо-лужну або нейтральну реакцію (рН 7–7,5). Водночас, за внесення біочару в дозі до 5% від маси ґрунту, рН підвищується до 8,5, що є несприятливим для росту мікроорганізмів. Показано позитивний ефект біочару на ґрунтові мікорізні гриби [38]. Позитивний ефект біочару автори пояснюють покращенням умов існування (розвитку) ґрунтових бактерій і грибів за рахунок кращого забезпечення їх потреб у вуглеці та мінеральних поживних речовинах.

ґрунтові мікроби розкладають великих органічних молекул на прості мономери за допомогою своїх ферментів — целюла-

зи, уреази, інвертази, фосфатази, лаккази, глюкозидази, галактозидази тощо, які відіграють вирішальну роль у колообігу С, N і P [39]. Виявлений позитивний ефект біочару й на інші позаклітинні ферменти, такі як α -1,4-глюкозидази, β -целобіогідролази і β -1,4-N ацетілглюкозамінідази, а також негативний вплив на β -1,4-глюкозидази і фосфатазну активність [40]. Інші дослідження також підтвердили зниження активності інвертази й лужної фосфатази за внесення біочару [41]. В цілому, внесення біочару збільшує доступність поживних речовин, що, в свою чергу, збільшує мікробну біомасу й у кінцевому підсумку збільшує синтез і активність позаклітинних ферментів [42].

Завдяки зв'язуванню вуглецю, збагаченню поживними речовинами, поліпшенню якості ґрунту, стимулюванню активності мікроорганізмів і позаклітинних ферментів біочар може суттєво знизити ураженість рослин хворобами та стимулювати системні захисні реакції в рослин [43]. Показано, що внесення 3% біочару значно підвищує толерантність до грибового патогену *Botrytis cinerea* як на листках, так і на ягодах полуниці, в той же час його ефект на листові хвороби салату був не суттєвим [44, 45]. В іншій аналогічній роботі було показано, що рослини перцю та томатів були більш стійкі до *Botrytis cinerea* і *Oidiopsis sicula*, коли їх вирощували на ґрунті з додаванням біочару [46]. Подібні дослідження підтвердили здатність біочару зменшувати ураження огірків хворобами, які викликаються *Rhizoctonia solani* і нематодою *Pratylenchus penetrans*, що вражають корінь моркви [47]. Проте, показано, що основні механізми посилення захисту від ґрунтових мікроорганізмів під час використання біочару можуть бути пов'язані з доступністю поживних речовин для рослини-господаря, стимуляцією мікробної біомаси, видаленням або нейтралізацією токсинів патогенів, індукуванням системної захисної відповіді рослиною-господарем [48].

Таким чином, біочар може покращувати водоутримуючу здатність ґрунту, що надзвичайно важливо в посушливих умовах. Він може бути як джерело поживних речовин і одним із засобів покращення родючості ґрунту. Дані показують, що властивості біочару та його ефективність суттєво залежать від способу його виробництва й типу сировини. Більш того, якість і ефективність біочару, що впливає на родючість ґрунту та розвиток рослин, сильно різняться в залежності від температури піролізу, типу сировини, терміну зберігання біочару.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. British Biochar Foundation. 2013. Biochar Quality Mandate (BQM) v. 1.0: Version for public consultation [online], [cited Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. Article in press 15 12 September 2016]. Edinburgh, United Kingdom. Available from Internet: <http://www.geos.ed.ac.uk/homes/sshackle/BQM.pdf>.
2. Solomon D, Lehmann J, Thies J, Schäfer T, Liang B, Kinyangi J, Neves E, Petersen J, Luizão F, Skjemstad J (2007) Molecular signature and sources of biochemical recalcitrance of organic C in Amazonian Dark Earths. *Geochim*

Cosmochim Acta 71:2285–2298. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.02.014>.

3. Gabhane J, Tripathi A, Athar S, William SPMP, Vaidya AN, Wate SR (2016) Assessment of bioenergy potential of agricultural wastes: a case study cum template. *J Biofuels Bioenergy* 2:122. <https://doi.org/10.5958/2454-8618.2016.00011.0>.

4. OluwatosinOginni, Kaushlendra Singh Effect of carbonization temperature on fuel and caffeine adsorption characteristics of white pine and Norway spruce needle derived biochars, *Industrial Crops and Products* 162(113261), Received 13 February 2020, Revised 6 January 2021, Accepted

10 January 2021, Available online 19 January 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113261>.

5. Zhao David, O'Connor, Junli Zhang, Tianyue Penga, Zhengtao, Shenac Daniel C. W. Tsangd Deyi Houa Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar, *Journal of Cleaner Production*, Volume 174, 10 February 2018, Pages 977–987 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013>.

6. Wang, Jianlong, Wang, Shizong [Preparation, modification and environmental application of biochar: A review, *Journal of cleaner production*, Volume 227, 1 August 2019, Pages 1002–1022 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.

7. Marousek, J., Strunecky, O., Stehel, V Biochar farming: defining economically perspective applications *Clean Technologies and Environmental Policy* volume 21, pages 1389–1395 (2019) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-019-01728-7>.

8. Downie, A.; Crosky, A.; Munroe, P. Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J.; Joseph, S. (ed.). *Biochar for environmental management: Science and Technology*. 1. Londres: Earthscan, 2009. 416p.

9. Qambrani, NA, Rahman, MM, Won, S, Shim, S, Ra, C Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 79, November 2017, Pages 255–273 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057>.

10. Roberts DA, Cole AJ, Paul NA, de Nys R (2015) Algal biochar enhances the re-vegetation of stockpiled mine soils with native grass. *J Environ Manage* 161:173–180. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.002>.

11. Kelly CN, Peltz CD, Stanton M, Rutherford DW, Rostad CE (2014) Biochar application to hardrock mine tailings: soil quality, microbial activity, and toxic element sorption. *Appl Geochem* 43:35–48. <https://doi.org/10.1016/J.APGeochem.2014.02.003>.

12. Roy, P, Dias, G Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 77, September 2017, Pages 59–69 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>.

13. Walworth J (2013) Nitrogen in Soil and the environment, College Of Agriculture And Life Sciences, Cooperative Extension, AZ1591, January 2013, 3p. <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1591.pdf>.

14. Joseph S, Graber E, Chia C, Munroe P, Donne S, Thomas T, Nielsen S, Marjo C, Rutledge H, Pan G, Li L, Taylor P, Rawal A, Hook J (2013) Shifting paradigms: development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components. *Carbon Manag*. 4:323–343. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.23>.

15. Clough T, Condron L, Kammann C, Müller C, Clough TJ, Condron LM, Kammann C, Müller C (2013) A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*. 3:275–293. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020275>.

16. Bai SH, Reverchon F, Xu C-Y, Xu Z, Blumfield TJ, Zhao H, Van Zwieten L, Wallace HM (2015) Wood biochar increases nitrogen retention in fi settings mainly through abiotic processes. *Soil Biol Biochem* 90:232–240. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2015.08.007>.

17. Hosseini Bai S, Xu C-Y, Xu Z, Blumfi Id TJ, Zhao H, Wallace H, Reverchon F, Van Zwieten L (2015) Soil and foliar nutrient and nitrogen isotope composition ($\delta^{15}N$) at 5 years after poultry litter and green waste biochar amendment in a macadamia orchard. *Environ Sci Pollut Res* 22:3803–3809. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3649-2>.

18. Xu N, Tan G, Wang H, Gai X (2016) Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *Eur. J. Soil Biol.* 74:1–8. <https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2016.02.004>.

19. Brennan JK, Badosz TJ, Thomson KT, Gubbins KE (2001) Water in porous carbons, Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects 187–188 (2001) 539–568 <https://engineering.purdue.edu/~thomsonk/papers/KTT9.pdf>.

20. Amonette JE, Joseph S, Joseph S (2012) Characteristics of biochar: microchemical properties, pp 65–84. <https://doi.org/10.4324/9781849770552-10>.

21. Lehmann, J. and Joseph (2009) *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, 405 p.

22. Gai X, Wang H, Liu J, Zhai L, Liu S, Ren T, Liu H (2014) Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. *PLoS ONE* 9: e113888. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113888>.

23. Harvey OR, Herbert BE, Kuo L-J, Louchouart P (2012) Generalized two-dimensional perturbation correlation infrared spectroscopy reveals mechanisms for the development of surface charge and recalcitrance in plant-derived biochars. *Environ Sci Technol* 46:10641–10650. <https://doi.org/10.1021/es302971d>.

24. Mohan D, Sarswat A, Ok YS, Pittman CU (2014) Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent — a critical review. *Bioresour Technol* 160:191–202. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.01.120>.

25. Zheng H, Wang Z, Deng X, Herbert S, Xing B (2013) Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206:32–39. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2013.04.018>.

26. Iqbal H, Garcia-Perez M, Flury M (2015) Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems. *Sci Total Environ* 521–522:37–45. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.03.060>.

27. Lou Z, Sun Y, Bian S, Ali Baig S, Hu B, Xu X (2017) Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar. *Chemosphere* 169:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.044>.

28. Zhang M, Gao B (2013) Removal of arsenic, methylene blue, and phosphate by biochar/AIOOH nanocomposite. *Chem Eng J* 226:286–292. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.04.077>.

29. Janus A, Pelfrène A, Heymans S, Deboffe C, Douay F, Waterlot C (2015) Elaboration, characteristics and advantages of biochars for the management of contaminated soils with a specific overview on *Miscanthus* biochars. *J Environ Manage* 162:275–289. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2015.07.056>.

30. Liu X (2014) Sustainable biochar effects for low carbon crop production: a 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China. *Am. Geophys. Union, Fall Meet.* 2014, Abstr. id. B41A-0002.

31. Thies JE, Rillig MC, Graber ER, Rillig MC, Graber ER (2015) Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota, pp 359–422. <https://doi.org/10.4324/9780203762264-20>.

32. Rondon MA, Lehmann J, Ramirez J, Hurtado M (2007) Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *Biol Fertil Soils* 43:699–708. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0152-z>.

33. Fischer D, Glaser B (2012) Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In: *Management of Organic Waste*. InTech.

34. Agegnehu G, Bass AM, Nelson PN, Muirhead B, Wright G, Bird MI (2015) Biochar and biochar-compost as soil amendments: effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. *Agric Ecosyst Environ* 213:72–85. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2015.07.027>.

35. Angela Libutti, Matteo Francavilla, Massimo Monteleone Hydrological Properties of a Clay Loam Soil as Affected by Biochar Application in a Pot Experiment, *Agronomy* 2021, 11(3), 489; Received: 8 January 2021 / Revised: 21 February 2021 / Accepted: 2 March 2021 / Published: 5 March 2021, <https://doi.org/10.3390/agronomy11030489>.

36. Alfadiil Aboud Alfadiil, Hiba Shaghaleh, Yousef Alhaj Hamoud, Jihong Xia, Tianao Wu, Amar Ali Adam Hamad, Yitian Wang, Abdoulaye Oumarou Abdoulaye & Mohamed S. Sheteiwy Straw Biochar-induced Modification of the Soil Physical Properties Enhances Growth, Yield and Water Productivity of Maize under Deficit Irrigation, Received 08 Sep 2020, Accepted 11 Feb 2021, Published online: 25 Mar 2021, <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1901913>.

37. Ippolito JA, Stromberger ME, Lentz RD, Dungan RS (2016) Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil. *Chemosphere* 142:84–91. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.039>.

38. Elzobair KA, Stromberger ME, Ippolito JA, Lentz RD (2016) Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere* 142:145–152. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHER.E.2015.06.044>.

39. Patil PD, Yadav GD (2018) Comparative studies of white-rot fungal strains (*Trametes hirsuta* MTCC-1171 and *Phanerochaete chrysosporium* NCIM-1106) for effective degradation and bioconversion of ferulic acid. *ACS Omega*. 3:14858–14868. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01614>.

40. Foster EJ, Hansen N, Wallenstein M, Cotrufo MF (2016) Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system. *Agric Ecosyst Environ* 233:404–414. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2016.09.029>.

41. Bailey VL, Fansler SJ, Smith JL, Bolton H (2011) Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization. *Soil Biol Biochem* 43:296–301. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2010.10.014>.

42. Burns RG, DeForest JL, Marxsen J, Sinsabaugh RL, Stromberger ME, Wallenstein MD, Weintraub MN, Zoppini A (2013) Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biol Biochem* 58:216–234. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2012.11.009>.

43. Meller Harel Y, Elad Y, Rav-David D, Borenstein M, Shulchani R, Lew B, Graber ER (2012) Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant Soil* 357:245–257. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3>.

44. De Tender CA, Debode J, Vandecasteele B, D'Hose T, Cremelie P, Haegeman A, Ruttink T, Dawyndt P, Maes M (2016) Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar. *Appl Soil Ecol* 107:1–12. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2016.05.001>.

45. Elad Y, David DR, Harel YM, Borenshtein M, Kalifa H, Ben H, Silber A, Graber ER (2010) Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology* 100:913–921. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-9-0913>.

46. Meller Harel Y, Elad Y, Rav-David D, Borenstein M, Shulchani R, Lew B, Graber ER (2012) Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant Soil* 357:245–257. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3>.

47. George C, Kohler J, Rillig MC (2016) Biochars reduce infection rates of the root-lesion nematode *Pratylenchus penetrans* and associated biomass loss in carrot. *Soil Biol Biochem* 95:11–18. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2015.12.003>.

48. Graber ER, Frenkel O, Jaiswal AK, Elad Y (2014) How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? *Carbon Manag*. 5:169–183. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.913360>.