

夏浩, 张梦阳, 刘波, 等. 生物炭对作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 177-186.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.020

生物炭对作物氮肥利用率影响的整合分析

夏浩¹, 张梦阳¹, 刘波¹, 李宇轩¹, 丛铭¹, 布麦热姆·热则克¹, 姜存仓^{1,2}

1. 华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070;

2. 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832000

摘要 为科学施用生物炭、提高氮肥利用率, 采用整合分析的方法, 收集符合筛选标准的文献 33 篇, 统计了 170 组包含生物炭配施化肥(BC+NPK)和单施化肥(NPK)处理下作物氮肥利用率的数据, 从不同地域、土壤养分、氮肥用量、生物炭特性与施用量、作物种类等方面量化分析生物炭对作物氮肥利用率的影响。结果显示: 施用生物炭可以使作物氮肥利用率提高 4.76%, 其中南方地区生物炭的促进效果最为明显, 提高了 11.73%。土壤肥力影响生物炭对氮肥利用率的增幅, 在土壤 pH 值、有机质含量、速效氮含量较低的南方地区, 施用生物炭对氮肥利用率的提升效果最优, 而在有机质含量较高、pH 值较高的东北地区, 施用生物炭的效果则有所降低; 当氮肥施用量 $\leq 120 \text{ kg/hm}^2$ 时, 生物炭的增效效果最明显, 氮肥利用率提高了 10.73%。与经济作物相比, 粮食作物的氮肥利用率提升效果更为明显, 增加了 5.71%。生物炭施用量控制在 $\leq 1\%$ 时, 氮肥利用率提高 3.43%, 木质材料制备的生物炭的提升效果最明显, 氮肥利用率提高 7.99%; 生物炭含氮量 $> 2\%$ 时, 氮肥利用率提高 19.43%; 生物炭 pH 9~10 时氮肥利用率最佳, 肥料利用率能够提升 5.01%。

关键词 氮肥利用率; 生物炭; 土壤养分; 传统施肥; 整合分析; 氮肥施用量; 文献计量学

中图分类号 S 512.1⁺1; S 143.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0177-10

近年来, 我国氮肥施用量逐渐增加, 其消费量占全球氮肥消费的 25%^[1]。多数研究表明我国农田土壤的氮肥施用量很高, 但氮肥利用率仅为 30%~50%, 显著低于世界上发达国家^[2-3]; 并且氮肥长期施用方法不当、施用比例不合理, 会造成水体富营养化、土壤酸化等一系列生态环境问题^[4]。过量施肥还会导致土壤酸化, 产量降低, 抑制农作物对土壤氮素营养的吸收, 从而导致氮肥的利用效率降低^[5]。

目前生物炭在改良土壤环境、促进作物生长方面发挥着重要作用^[6-7]。生物炭是指农林废弃物在厌氧条件下低温热解形成的一类高度芳香化难溶性的产物, 在土壤中可以长期存留, 不易发生分解^[8]。生物炭具有特殊的理化性质, 一般为碱性, 孔隙结构发达, 比表面积大, 对土壤重金属具有较强的吸附能力^[9-10]。生物炭与化肥配施可延缓养分释放, 促进作物对养分的吸收, 降低化肥的损失^[11]。朱盼等^[12]研究表明, 与常规施肥相比, 添加生物炭后烟草的株高、茎粗等农艺性状及生物量有显著增加。

但也有相关研究发现施用生物炭会导致水稻、小麦减产^[13-14]。俞映惊等^[15]发现施用生物炭后小白菜的生物量有明显提升, 氮素累积量也有显著提高。Xia 等^[16]研究结果表明在生物炭处理下苗期玉米的氮肥利用率有明显提高。方明等^[17]发现在不同类型土壤上施用生物炭有明显差异, 在红壤上施用生物炭后小白菜的氮素吸收效率提高了 44.0%~59.0%, 而在潮土上施用生物炭后小白菜的氮素吸收效率降低了 64.7%~74.5%, 生物量也出现明显降低。此外, 相关研究表明, 随着生物炭用量增加, 烟草的氮肥利用率呈现先增加后降低的趋势^[18]。李静静等^[19]也发现在低氮施肥条件下 (22.5 kg/hm^2), 生物炭对氮肥利用率提升的效果较为明显, 且低水平生物炭 (2.4 t/hm^2) 的促进效果会更好。生物炭对作物氮肥利用率的影响受到诸多因素影响, 例如生物炭的 pH、含氮量、施用量以及原材料、氮肥施用量、作物类型以及土壤养分等。

目前我国关于生物炭对氮肥利用率影响的研究

收稿日期: 2020-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200803)

夏浩, E-mail: 1589833422@qq.com

通信作者: 姜存仓, E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

主要基于某一个或几个特定的区域进行,未综合考虑土壤理化性质、当地气候条件以及生物炭材料等因素。为系统认识施用生物炭对氮肥利用率的影响,本研究采用整合分析(Meta-analysis)的方法^[20]系统比较不同施用条件(地域差异、生物炭的性质、土壤的理化性质、氮肥添加量等因素)下氮肥配施生物炭的氮肥利用率增效效果,为提升经济、环境和社会等综合效益提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 数据获取

通过搜索文献数据库(中国知网、万方、Web of Science),检索施用生物炭对植物氮肥利用率影响的相关文献。设置检索关键词主要包括:生物炭/生物炭(biochar/black carbon)、氮肥利用率(nitrogen use efficiency/nitrogen utilization efficiency),筛选出 2000—2020 年符合以下基本要求的文献:(1)试验类型分为大田试验和盆栽试验;(2)每个试验必须有处理组和对照组^[21],处理组为常规施

肥+生物炭处理,对照组为常规施肥处理;(3)试验数据必须含有标准差或标准误;(4)处理组和对照组除生物炭处理外,其他试验条件均一致;(5)研究中要求试验处理重复至少 3 组^[22];(6)试验场所的土壤和生物炭的基本性质均明确;(7)若文献没有明确规定,土层一般为耕作层(0~20 cm)^[23];(8)若文献中基础土壤的速效养分没有测定,则用土壤全量养分反映土壤养分;(9)若土壤养分包含有机碳含量,则有机质含量=有机碳含量×1.724。基于以上筛选标准,截至 2020-12-02,获得 33 篇有效文献,采集了 170 组数据。

1.2 数据库建立与分类

将植物氮素吸收的影响因素分组,主要指标包括:地域、试验类型、土壤性质(pH、速效磷、速效钾、碱解氮、有机质)、生物炭性质(pH、氮素含量、生物炭材料、施用量)、氮肥施用量以及作物种类等。

本研究将试验地域分 6 个主要区域。表 1 为各个区域具体的文献数量及试验点位分布。土壤养分、试验类型、生物炭性质等分类情况如表 2 所示。

表 1 33 篇有效文献的分布区域及试验点数

Table 1 The distribution areas and experiment points of 33 valid literatures analyzed

地区 Region	省(区)试验点数 Provinces and regions(number of experiment points)
东北地区(5) Northeast(5)	辽宁省(4)、黑龙江省(1) Liaoning Province (4), Heilongjiang Province (1)
华北地区(4) North China (4)	河南省(2)、天津(2) Henan Province (2), Tianjin City(2)
华东地区(18) East China (18)	山东省(2)、江苏省(9)、江西省(7) Shandong Province (2), Jiangsu Province (9), Jiangxi Province (7)
西北地区(2) Northwest(2)	新疆(1)、宁夏(1) Xinjiang (1), Ningxia (1)
南方地区(10) Southern(10)	云南省(1)、湖南省(3)、海南省(2)、广西(1)、湖北省(1)、广东省(1)、福建省(1) Yunnan Province(1), Hunan Province(3), Hainan Province(2), Guangxi(1), Hubei Province (1), Guangdong Province (1), Fujian Province(1)
国外地区(2) Foreign regions(2)	巴西(1)、巴基斯坦(1) Brazil (1), Pakistan (1)

表 2 数据分类及依据

Table 2 Data groups used in the Meta-analysis

基础土壤养分状况 Basic soil nutrient status								生物炭性质 Basic properties of biochar			添加量 Adding amount		试验类型 Type of experiments	作物种类 Crop species
pH	有机质/ (g/kg) SOM	速效磷/ (mg/kg) AP	速效氮/ (mg/kg) AN	速效钾/ (mg/kg) AK	全磷/ (g/kg) TP	全氮/ (g/kg) TN	全钾/ (g/kg) TK	pH	含氮 量/% Nitrogen content	材料 类型 Material type	氮肥/ (kg/hm ²) N fertilizer	生物炭/% Biochar		
≤6.5	≤20	≤10	≤60	≤50	≤0.75	≤1	≤5	≤8	≤1	秸秆类	≤120	≤1	盆栽	粮食作物
6.5~7.5	20~30	10~20	60~120	50~150	0.75~1.5	1~1.5	5~15	8~9	1~2	壳渣类	120~240	1~3	大田	经济作物
>7.5	>30	>20	>120	>150	>1.5	>1.5	>15	9~10	>2	木质类	240~360	>3		
								>10			>360			

注:pH:土壤酸碱度;SOM:土壤有机质;AP:土壤速效磷;AN:土壤有效氮;AK:土壤速效钾;TP:土壤全磷;TN:土壤全氮;TK:土壤全钾。Note:SOM:Soil organic matter content; pH:Soil pH; AP:Soil available phosphorus content; AN:Soil available nitrogen content; AK:Soil available potassium content; TP:Soil total phosphorus content; TN:Soil total nitrogen content; TK:Soil total potassium content.

1.3 数据分析

在搜集文献数据时,采用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件对文中图片进行数据提取。利用 Excel 2013 软件建立数据库,用 R 软件中 Meta 包的随机效应模型对原始数据实现 Meta 分析。文献中数据标准误(SE)和标准差(SD)的转化如公式(1)所示:

$$SD = SE / \sqrt{n} \quad (1)$$

式(1)中, n 是指试验的重复次数。

在分析过程中,为了消除不同试验点的气候、降雨等外界因素的影响,用 $\ln R$ 作为效应值来评估指标^[24],计算公式为:

$$\ln R = \ln(NUE_{(NPK+Biochar)}) - \ln(NUE_{(NPK)}) \quad (2)$$

式(2)中, R 为相应比; $NUE_{(NPK+Biochar)}$ 为处理组作物氮肥利用率的平均值; $NUE_{(NPK)}$ 为对照组作物氮肥利用率的平均值。

为更直观地观察生物炭对作物氮肥利用率的影响效果,需将 $\ln R$ 转化为氮肥利用的增效率(Z):

$$Z = (R - 1) \times 100\% \quad (3)$$

若 Z 的 95% 置信区间跨过横坐标原点,则说明施用生物炭对 NUE 的差异显著,反之 95% 置信区间与 0 重叠,则说明施用生物炭对 NUE 无影响^[25]。

2 结果与分析

2.1 地域对氮肥利用率增效作用的影响

国外地区仅有 2 篇文献符合要求,因此不纳入本节讨论。我国土壤耕地面积广,不同地域的土壤质地、理化性质差异很大,生物炭改良效果也会有很大差别。不同地域下 $NPK+BC$ 和 NPK 处理下作物氮肥利用率如图 1A 所示,在不添加生物炭情况下,东北地区的氮肥利用率最高,达到了 42.66%,其次是华北地区达到 39.75%,最低的是华东、南方以及西北地区氮肥利用率约为 30%。施用生物炭对作物氮肥利用率的增幅效果如图 1B 所示,总体来说 $NPK+BC$ 较 NPK 处理下作物的氮肥利用率提高 4.76%。从各个区域氮肥利用率提高效果来看,南方地区生物炭的增加效果最为明显,提高了 11.73%,其次是东北、华东和西北地区,分别提高了 6.56%、6.39% 和 6.07%。与 NPK 处理比较,华北地区施用生物炭对氮肥利用率的增加效果不显著(图 1B)。这可能是由于南方土壤地区高温多雨,土壤淋溶作用强烈,导致土壤养分贫瘠,添加生物炭后效果更加显著。

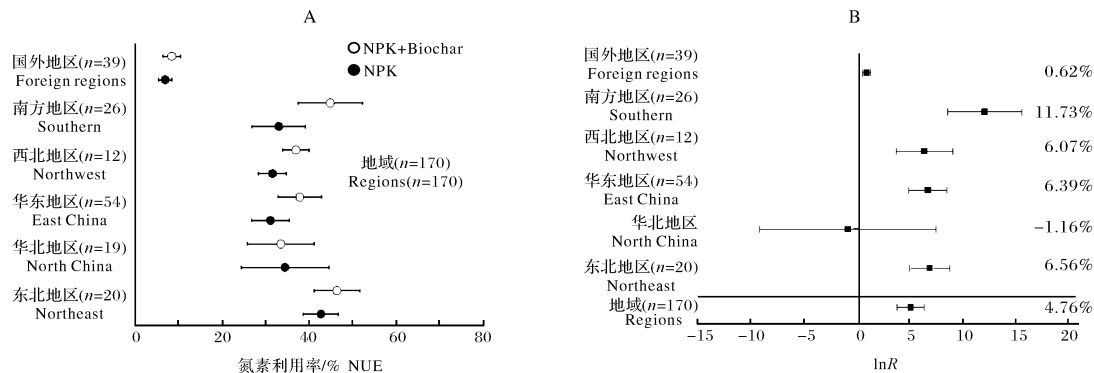


图1 不同地域下单施化肥(NPK)和生物炭配施(NPK+Biochar)氮肥利用率的差异(A)以及生物炭对氮肥利用率的增长幅度(B)

Fig.1 Differences of NUE between NPK and NPK+Biochar in different regions(A) and the increment of NUE by applying biochar(B)

2.2 生物炭及氮肥用量对氮肥利用率增效作用的影响

不同生物炭施用量对作物氮肥利用率的增幅见图 2,氮肥利用率随着生物炭施用量的增加呈下降的趋势。当生物炭施用量 $\leq 1\%$,生物炭的增效作用最明显,氮肥利用率提高了 3.43%;而施用生物炭用量 $> 1\%$ 对氮肥利用率的促进效果反而不显著。这

可能是一方面由于高添加量的生物炭会吸附土壤中的氮素营养,另一方面是土壤碳氮比过高,引起土壤中有效氮的生物固定。生物炭的氮肥利用率增效作用随着施氮量的增加呈现降低的趋势,在氮肥施用量 $\leq 120 \text{ kg/hm}^2$ 时,生物炭的氮肥利用率的增幅最高,达到 10.73%;而当氮肥施用量 $> 120 \text{ kg/hm}^2$ 时,生物炭的氮肥利用率的增幅降为 2.33%~7.87%。

2.3 试验类型以及作物种类对氮肥利用率增效作用的影响

从图 3A 可见,仅施用氮肥情况下经济作物的氮肥利用率为 19.90%,粮食作物的氮肥利用率达到 27.44%。生物炭的增幅如图 3B 所示,结果显示,NPK+BC 较 NPK 处理下经济作物的氮肥利用率提高了 3.70%。粮食作物较经济作物的氮肥利用率提升更为显著,氮肥利用率提升了 5.71%(图 3B)。这可能是由于追求经济效益,经济作物生长

过程施用了过多氮肥,造成氮肥利用率偏低。

目前探究生物炭对作物氮肥利用率影响的试验类型主要是田间试验和盆栽试验。从图 3A 可见,在 NPK 处理下,盆栽试验的氮肥利用率为 24.89%,而大田试验的氮肥利用率 34.50%。从整合分析中发现(图 3B),施用生物炭处理后大田试验和盆栽试验的氮肥利用率分别提高 9.66%和 2.55%,且大田试验中施用生物炭后氮肥利用率的增效作用更为明显。

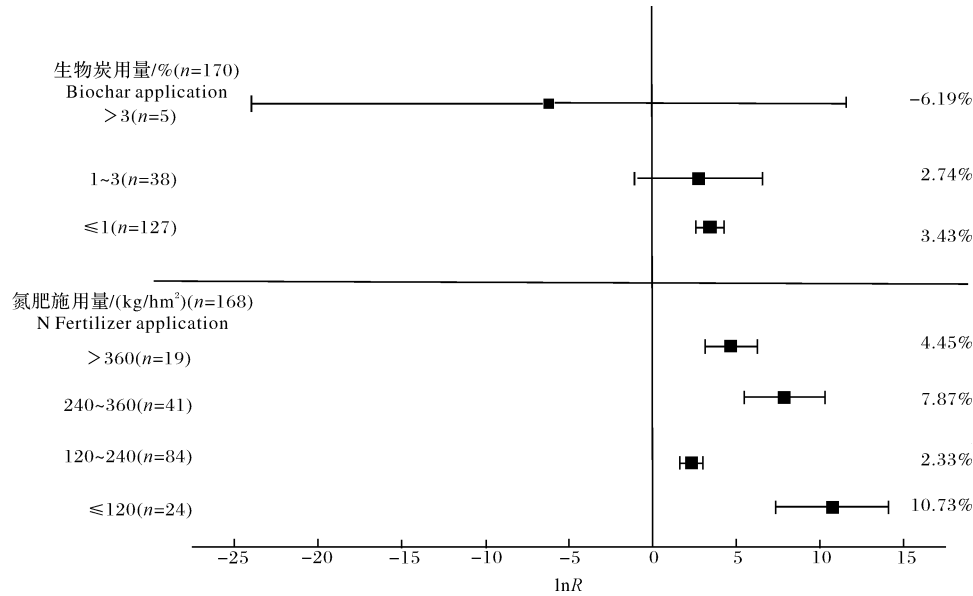


图 2 不同的生物炭以及氮肥添加水平下对氮肥利用率的增长幅度

Fig.2 Increment of NUE under different levels of biochar and nitrogen fertilizer

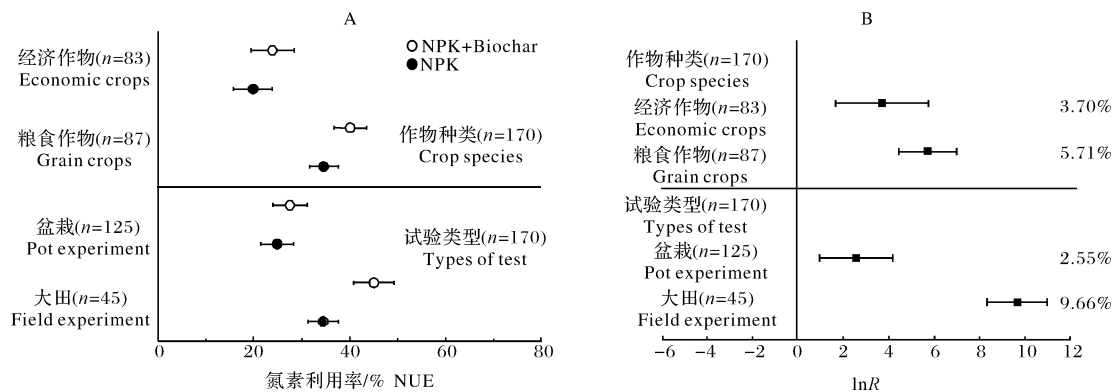


图 3 不同作物种类及试验类型下单独施肥(NPK)和生物炭配施(NPK+Biochar)氮肥利用率的差异(A)以及氮肥利用率的增长幅度(B)

Fig.3 Differences of NUE between NPK and NPK+Biochar under different crop types and types of experiments(A) and the increment of NUE(B)

2.4 生物炭性质对氮肥利用率增效作用的影响

生物炭自身理化性质的差异,也是影响氮素利用率增幅的重要因素之一。从图 4 可见,不同材料生物炭对作物氮肥利用率的增效作用不同,相较于 NPK 处理,添加木质材料、秸秆材料、壳渣材料制备的生物炭氮肥利用率分别提高了 7.99%、6.83%、

1.12%,这可能是由于不同材料制备的生物炭在养分、pH 方面存在差异。本研究发现当生物炭含氮量和 pH 越高,生物炭对氮肥利用率的增幅作用越明显。当生物炭的含氮量 $>2\%$,生物炭对氮肥利用率的增幅为 19.43%,pH 为 9~10 时生物炭的增效作用最明显,生物炭对氮肥利用率的增幅为 5.01%。

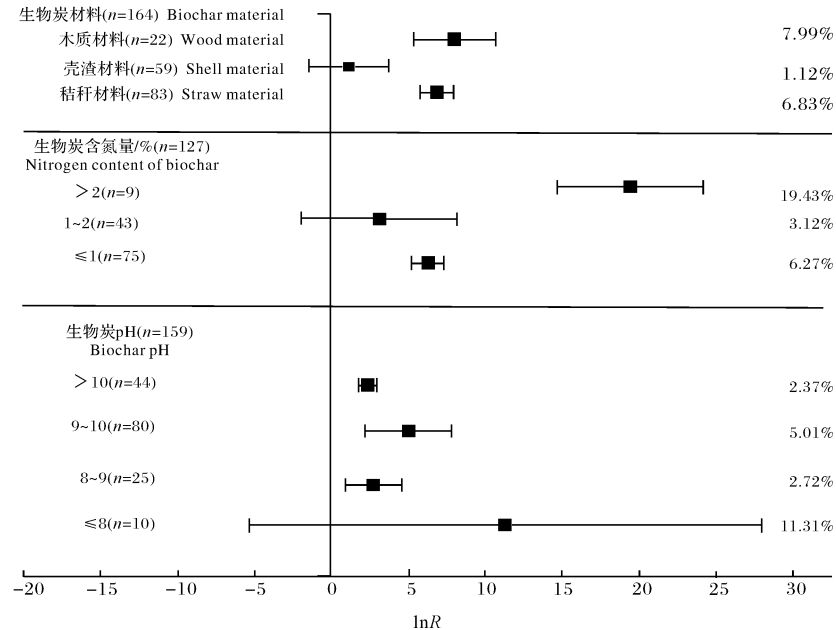


图 4 不同性质的生物炭对氮肥利用率的增长幅度

Fig.4 Differences of NUE between NPK and NPK + Biochar under different properties of biochar

2.5 土壤养分对氮肥利用率增效作用的影响

不同土壤养分条件下作物氮肥利用率如图 5A 所示,发现在不同的养分条件下添加生物炭对作物的氮肥利用率呈现明显的促进作用。生物炭对作物氮肥利用率的增幅作用见 5B,发现土壤 pH 值、有机质、速效氮含量越高,生物炭对作物氮肥利用率的促进作用反而减弱。在 $\text{pH} \leq 6.5$ 且 NPK+BC 处理下氮肥利用率提高了 9.32%,而当 $\text{pH} > 7.5$ 时,作物的氮肥利用率反而降低了 2.83%。当有机质含量在 20~30 g/kg 时,生物炭对作物的氮肥利用率的增效作用最明显,达到 8.44%,而当土壤有机质含量 >30 g/kg 时,生物炭对作物的氮肥利用率的增效作用最低,仅提高 1.17%。当速效氮含量在 60~120 mg/kg 时,氮肥利用率的提高最明显,达到了

7.35%,而土壤速效氮含量 >120 mg/kg 时,生物炭的增幅作用反而最低,仅为 0.98%。这可能是由于生物炭对土壤的改良主要表现为土壤 pH、有机质含量提高。同时,随着土壤养分速效钾、速效磷含量的提高,生物炭对作物氮肥利用率的效果也提高,当速效钾含量 >150 mg/kg 时,生物炭对氮肥利用率的增幅达到 10.46%,当速效钾含量 ≤ 50 mg/kg 时,生物炭的增效作用不显著。当速效磷 >20 mg/kg 时,生物炭对氮肥利用率的增幅达到 10.12%,当土壤速效磷含量为 10~20 mg/kg 时,与对照组相比,生物炭的增效最低,增幅仅 3.99%。这可能是由于作物吸收养分时, K^+ 和 NH_4^+-N 是竞争关系,施用生物炭后缓解了其拮抗作用,从而提高了作物对氮素的吸收。

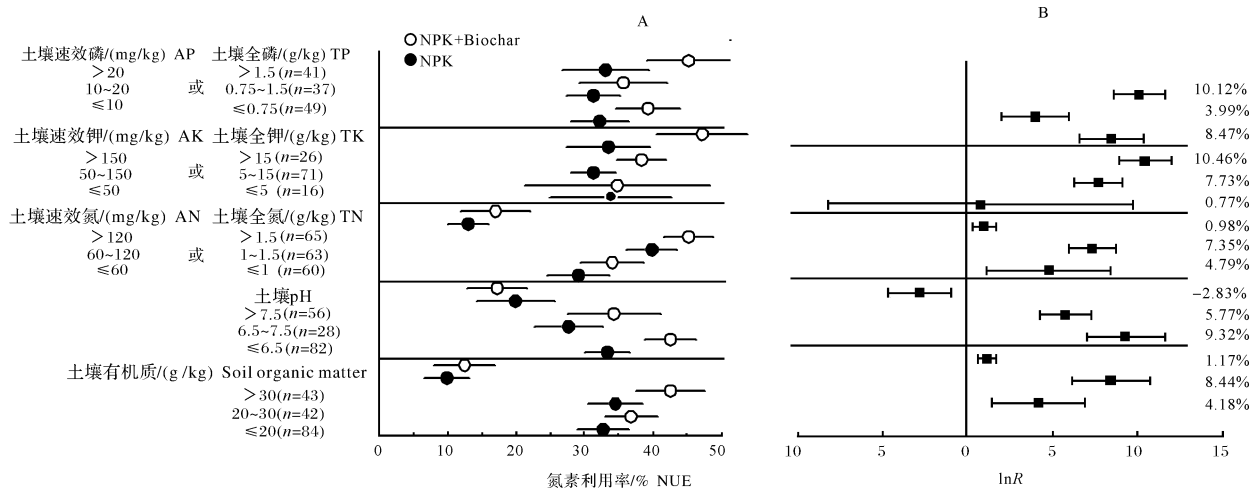


图 5 不同土壤养分状态下单施化肥(NPK)和生物炭配施(NPK+Biochar)的氮肥利用率(A)以及生物炭对氮肥利用率的增长幅度(B)

Fig.5 The NUE between NPK and NPK+Biochar in different basic soil nutrient status(A) and the increment of NUE by applying biochar (B)

3 讨 论

通过整合分析研究了影响生物炭提高作物氮肥利用率的因素,结果表明,我国南方地区施用生物炭对作物氮肥利用率的提升效果最明显,这可能是因为南方地区的土壤类型主要属于酸性红壤,红壤地区高温多雨,土壤淋溶作用强烈,酸胁迫严重、肥力低下导致当地作物的氮肥利用率不高^[26-27]。在土壤pH偏酸,有机质、速效氮含量较低时,添加生物炭对作物氮肥利用率的提升效果十分明显。由于生物炭表面具有丰富的碱性官能团,施入土壤后pH显著升高^[28-29]。研究发现,施用生物炭对红壤和砖红壤具有积极的改土培肥效果,增加土壤养分、改善土壤微生物群落,对作物具有显著的增产效应^[30-31]。当有机质含量>30 g/kg、速效氮含量>120 mg/kg时,生物炭的增效作用明显降低,这可能是由于在肥力较高的土壤,施用生物炭破坏了土壤的碳氮平衡,引起土壤中“争氮效应”的发生。我国西北、华东和东北地区生物炭的增效作用较南方地区有明显降低,可能是由于这些地区的土壤养分相对于南方地区较为肥沃,因此,外源添加的生物炭在生产当季没有显著的增效作用^[32]。

生物炭对于作物的养分吸收效率与外界氮肥、生物炭的施用量有很大的关系^[33-35]。整合分析发现,低投入量的生物炭有利于提高作物的氮肥利用率,随着生物炭施用量的增加,作物的氮肥利用率反

而降低。王悦满等^[36]研究也发现,施用3%的水热裂解生物炭显著抑制了水稻产量,对氮肥利用率和农学效率产生了消极影响。这可能是由于生物炭具有丰富的比表面积和孔隙结构,较高的施炭量吸附了一部分养分,从而在一定程度上抑制了根系的养分吸收^[37]。此外,氮肥利用率的降低也可能与生物炭的成分有关,在长期雨水淋洗条件下,土壤中生物炭释放的这些有机物质会影响氮矿化和微生物活性,会对作物生长产生不利影响^[38-39]。有研究表明氮素是影响作物的产量以及品质形成的重要因子,适量的氮肥可促进作物对氮素的吸收和利用,过量施氮会引起无机氮在土壤中累积,降低肥料利用率,增加氮素面源污染的潜在风险^[40-41]。相关研究表明,随着施氮水平的提高,水稻植株氮素累积量迅速增加,但施氮量超过225 kg/hm²后,多数水稻品种的氮素吸收量不再增加^[42]。肖小军等^[43]研究发现,施氮量对早稻氮肥吸收以及利用效率具有显著影响。随着施氮量的增加,总吸氮量表现出增加的趋势,但当氮肥投入量达到210 kg/hm²时,氮肥利用率显著低于其他施氮量处理。因此,在研究生物炭提高作物氮肥利用率的同时,应考虑氮肥的施用量,维持土壤氮素平衡,充分考虑土壤残留氮的后效,降低氮肥施用量,以免造成浪费,增大面源污染潜在风险。

根据整合分析结果,我们发现粮食作物施用生物炭对氮肥利用率的增效作用高于经济作物

(图3)。闫湘^[44]调查发现我国不同作物氮肥施用水平中,粮食作物施用量最低,平均为245.1 kg/hm²,而蔬菜作物、果树施用量达到了573、724.5 kg/hm²,是粮食作物的2~7倍,这也直接导致经济作物的氮肥利用率较低。这可能是由于经济作物带来的效益高,为了保持高产量,农户投入较多的肥料。盆栽试验和大田试验主要用于模拟植物生长环境,盆栽试验条件易于控制,试验结果较好,而大田试验更加贴近实际情况,能更真实反映试验结果。研究表明大田试验中生物炭的增效作用明显高于盆栽试验。这可能是由于盆栽试验与大田试验在土壤通透性上存在差异,土壤通透性是保持土壤空气质量、维持土壤肥力不可缺少的条件,而盆栽试验由于土壤底部完全密闭,从而抑制了作物根系的伸长^[45]。

目前,生物炭对氮素利用率的研究大多是针对单一的生物质材料,缺少不同生物炭效果之间的比较^[46]。本研究整合分析结果发现,生物炭的增效作用表现为:木质材料>秸秆材料>壳渣材料。壳渣材料对生物炭氮肥利用率的提升效果不明显,这可能是因为壳渣类材料比表面积大,能提供较多的吸附位点,对土壤氮素养分吸收能力较强^[47]。生物炭自身的含氮量对土壤速效氮含量有促进作用,本研究发现当生物炭含氮量>2%时,生物炭的增效作用达到了19.43%。生物炭的pH值越高,对作物氮肥利用率的促进作用越明显。这可能是由于我国土壤大多数呈酸性或者弱酸性,该地区土壤贫瘠,供氮能力弱,施用生物炭可以明显提高土壤的pH值,缓解铝毒、酸毒胁迫,从而提高作物的氮肥利用率^[48]。

因此,在选择生物炭提高作物氮肥利用率时,应尽可能选择pH较低、养分贫瘠的地区,生物炭对氮肥利用率的提升效果最好。此外,我们要充分考虑生物炭的特性、施用量等因素以达到更好提升作物氮肥利用率的效果。

参考文献 References

- [1] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795. JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2014, 20(4): 783-795 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李嘉,吕慎强,杨泽宇,等.氮肥运筹对黄土塬区春玉米产量、效益和氮肥利用率的综合效应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):32-41. LI J, LYU S Q, YANG Z Y, et al. Comprehensive effects of nitrogen fertilizer management on yield, economic performance and nitrogen use efficiency of spring maize in Loess Plateau [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(1): 32-41 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吴玉玲.秸秆还田和氮肥施用对梗稻生长和产量性状的影响研究[D].合肥:安徽农业大学,2018. WU Y L. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on growth and yield traits of japonica rice [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [4] LIU Q, ZHANG Y H, LIU B J, et al. How does biochar influence soil N cycle? a Meta-analysis [J]. Plant and soil, 2018, 426 (1/2): 211-225.
- [5] 薛欣欣,吴小平,张永发,等.控施尿素对稻田氨挥发、氮素转运及利用效率的影响[J].应用生态学报,2018,29(1):133-140. XUE X X, WU X P, ZHANG Y F, et al. Effects of loss-controlled urea on ammonia volatilization, N translocation and utilization efficiency in paddy rice [J]. Chinese journal of applied ecology, 2018, 29(1): 133-140 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈芳,张康康,谷思诚,等.不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J].华中农业大学学报,2019,38(5):57-63. CHEN F, ZHANG K K, GU S C, et al. Effects of kinds and application rate of biochar on rice growth and soil nutrients [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38 (5): 57-63 (in Chinese with English abstract).
- [7] 丛铭,张梦阳,夏浩,等.施用生物炭对红壤中不同形态钾含量及小白菜生长的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(4):22-28. CONG M, ZHANG M Y, XIA H, et al. Effect of biochar application on potassium content of different forms in red soil and the growth of pakchoi [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 22-28 (in Chinese with English abstract).
- [8] GROENIGEN J W V, VOORDE T F J V D. Biochar application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability [J]. Agriculture ecosystems and environment, 2014, 191: 83-89.
- [9] 王宇函,吕波,张林,等.不同土壤改良剂对酸性铝富集红壤毒性缓解效应的差异[J].华中农业大学学报,2019,38(2):73-80. WANG Y H, LYU B, ZHANG L, et al. Differences in toxicity mitigation effects of different amendments on acidic aluminum-enriched red soil [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(2): 73-80 (in Chinese with English abstract).
- [10] LIU Y, LU H, YANG S, et al. Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a cold waterlogged paddy for two crop seasons [J]. Field crops research, 2016, 191: 161-167.
- [11] 乔光,洪怡,田田,等.生物炭对玛瑙红樱桃土壤微生物和养分的影响[J].华中农业大学学报,2017,36(3):51-56. QIAO G,

- HONG Y, TIAN T, et al. Effect of biochar on soil microbial and nutrients of *Prunus pseudocerasu* 'Manahong'[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(3): 51-56 (in Chinese with English abstract).
- [12] 朱盼, 应介官, 彭抒昂, 等. 生物炭和石灰对红壤理化性质及烟草苗期生长影响的差异[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 590-595. ZHU P, YING J G, PENG S A, et al. Effect of biochar and lime on soil physicochemical properties and tobacco seedling growth in red soil[J]. Journal of agricultural resources and environment, 2015, 32(6): 590-595 (in Chinese with English abstract).
- [13] 韩自强. 生物炭和硝化抑制剂对麦玉两熟温室气体排放特征的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017. HAN Z Q. Study on the characteristics of greenhouse gas emission from wheat and maize by biochar and nitrification inhibitors[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [14] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 165-173. SUN H N, WANG S W, LI Y L, et al. Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau[J]. Agricultural research in the arid areas, 2018, 36(6): 165-173 (in Chinese with English abstract).
- [15] 俞映惊, 薛利红, 杨林章, 等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 49-57. YU Y L, XUE L H, YANG L Z, et al. Effects of biochar application on pakchoi utilizing nitrogen in acid soil[J]. Acta pedologica sinica, 2015, 52(4): 49-57 (in Chinese with English abstract).
- [16] XIA H, RIAZ M, JIANG C C, et al. Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil[J/OL]. Ecotoxicology and environmental safety, 2020, 196: 110531 [2020-12-02]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110531>.
- [17] 方明, 任天志, 赖欣, 等. 花生壳生物炭对潮土和红壤理化性质和温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1300-1310. FANG M, REN T Z, LAI X, et al. Effects of peanut shell biochar on physico-chemical properties and greenhouse gas emission in fluvo-aquic soil and red soil[J]. Journal of agro-environment science, 2018, 37(6): 1300-1310 (in Chinese with English abstract).
- [18] 刘卉, 周清明, 黎娟, 等. 生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1411-1419. LIU H, ZHOU Q M, LI J, et al. Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco[J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2016, 30(7): 1411-1419 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李静静, 丁松爽, 李艳平. 生物炭与氮肥配施对烤烟干物质积累及土壤生物学特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(1): 96-103. LI J J, DING S S, LI Y P. Effects of biochar and nitrogen fertilizers on dry matter accumulation of flue-cured tobacco and soil biological characteristics[J]. Acta agriculture Zhejiangensis, 2016, 28(1): 96-103 (in Chinese with English abstract).
- [20] ARNQVIST G, WOOSTER D. Meta-analysis: synthesizing research findings in ecology and evolution[J]. Trends in ecology & evolution, 1995, 10(6): 236-240.
- [21] 雷相东, 彭长辉, 田大伦. 整合分析(Meta-analysis)方法及其在全球变化中的应用研究[J]. 科学通报, 2006, 51(22): 2587-2597. LEI X D, PENG C H, TIAN D L. Meta-analysis method and its application research in global change[J]. Chinese science bulletin, 2006, 51(22): 2587-2597 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郭明, 李新. Meta分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009(5): 129-137. GUO M, LI X. Meta-analysis and its application in the field of ecological environment [J]. Journal of desert research, 2009, 29(5): 129-137 (in Chinese with English abstract).
- [23] 吴伟祥, 孙雪, 董达. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015. WU W X, SUN X, DONG D. Environmental effects of biochar in soil[M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese).
- [24] 郑凤英, 彭少麟. 植物生理生态指标对大气 CO₂ 浓度倍增响应的整合分析[J]. 植物学报, 2001, 43(11): 1101-1109. ZHENG F Y, PENG S L. Meta-analysis of the response of plant eco-physiological variables to doubled atmospheric CO₂ concentrations[J]. Acta botanica sinica, 2001, 43(11): 1101-1109 (in Chinese with English abstract).
- [25] CURTIS P S, WANG X Z. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology[J]. Oecologia, 1998, 113(3): 299-313.
- [26] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963-967. WANG D, ZHANG X, JIANG C C, et al. Biochar research advances regarding soil improvement and crop response [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2012, 20(8): 963-967 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 71-76. ZHANG X, WANG D, JIANG C C, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China region[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2013, 21(8): 71-76 (in Chinese with English abstract).
- [28] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785. YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. Ecology and environmental sciences, 2011, 20(4): 779-785 (in Chinese with English abstract).
- [29] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472-476. YUAN J H, XU R K. Effects of rice-hull-based biochar regula-

- ting acidity of red soil and yellow brown soil[J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2010, 26(5): 472-476 (in Chinese with English abstract).
- [30] GASKIN J W, SPEIR R A, HARRIS K. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. *Agronomy journal*, 2010, 102: 623-633.
- [31] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and soil*, 2010, 327: 235-246.
- [32] 黄健, 张惠琳, 傅文玉, 等. 东北黑土区土壤肥力变化特征的分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(5): 21-25. HUANG J, ZHANG H L, FU W Y, et al. Analysis of the changing characteristics of the soil fertility in the black soil area of Northeast China [J]. *Chinese journal of soil science*, 2005, 36(5): 21-25 (in Chinese with English abstract).
- [33] 刘悦, 黎子涵, 邹博. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1030-1038. LIU Y, LI Z H, ZOU B. Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2017, 28(3): 1030-1038 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨和川, 樊继伟, 任立凯, 等. 种植密度与施氮量对稻麦轮作体系作物产量及地表径流氮素流失的影响[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(7): 17-18, 23. YANH H C, FAN J W, REN L K, et al. Effects of planting density and nitrogen application rate on crop yield and nitrogen overland runoff loss in rice-wheat rotation system[J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(7): 17-18, 23 (in Chinese with English abstract).
- [35] 刘世杰, 窦森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 79-82. LIU S J, DOU S. The effects of black carbon on growth of maize and the absorption and leaching of nutrients[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2009, 23(1): 79-82 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王悦满, 冯彦房, 杨林章, 等. 水热及裂解生物炭对水稻产量及氮素利用率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(8): 755-761. WANG Y M, FENG Y F, YANG L Z, et al. Effects of hydrochar and pyrochar on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2018, 34(8): 755-761 (in Chinese with English abstract).
- [37] BARGMANN I, RILLIG M C, BUSS W. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley[J]. *Journal of agronomy and crop science*, 2013, 199(5): 360-373.
- [38] DEENIK J L, MCCLELLARA T, UEHARA G. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil science society of America journal*, 2010, 74(4): 1259-1270.
- [39] KARER J, ZEHETNER F, DUNST G, et al. Immobilisation of metals in a contaminated soil with biochar-compost mixtures and inorganic additives: 2-year greenhouse and field experiments[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2018, 25(3): 2506-2516.
- [40] 黄金生, 周柳强, 曾艳. 广西赤红壤区玉米氮肥效应及适宜施氮量研究[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(3): 551-558. HUANG J S, ZHOU L Q, ZENG Y. Effect of nitrogen fertilizer and optimal nitrogen application rate of maize in lateritic red soil region of Guangxi [J]. *Southwest China journal of agricultural sciences*, 2019, 32(3): 551-558 (in Chinese with English abstract).
- [41] 孙志广, 王宝祥, 杨波. 施氮量对不同水稻品种氮肥利用率和农艺性状的影响[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(12): 23-28. SUN Z G, WANG B X, YANG B. Effects of nitrogen application levels on nitrogen use efficiency and agronomic traits of rice cultivars [J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(12): 23-28 (in Chinese with English abstract).
- [42] 冯涛, 杨京平, 孙军华, 等. 两种土壤不同施氮水平对稻田系统的氮素利用及环境效应影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 64-67. FENG T, YANG J P, SUN J H, et al. Effect of different nitrogen levels on nitrogen utilization of paddy field system and environment impact under two soils [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2005, 19(1): 64-67 (in Chinese with English abstract).
- [43] 肖小军, 肖国滨, 吕伟生, 等. 三熟制油菜秸秆还田条件下施氮量对早稻产量形成和氮肥利用率的影响[J]. *作物杂志*, 2019(2): 103-109. XIAO X J, XIAO G B, LYU W S, et al. Effects of nitrogen application rate on yield formation and nitrogen use efficiency of early rice under rape straw returning in triple cropping [J]. *Crops*, 2019(2): 103-109 (in Chinese with English abstract).
- [44] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008. YAN X. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition of China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [45] 张立成, 姚帮松, 肖卫华, 等. 盆栽与大田栽培水稻的生长及产量的比较研究[J]. *天津农业科学*, 2016, 22(3): 102-106. ZHANG L C, YAO B S, XIAO W H, et al. Study on the growth and yield of rice in pot and field cultivation [J]. *Tianjin agricultural sciences*, 2016, 22(3): 102-106 (in Chinese with English abstract).
- [46] 尹俊慧, 李小英. 不同类型生物炭混施对土壤磷素淋失的影响试验研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(6): 32-36. YIN J H, LI X Y. Different types of biochar mixed additions affect soil phosphorus leaching loss: experimental research [J]. *Chinese agricultural science bulletin*, 2019, 35(6): 32-36 (in Chinese with English abstract).
- [47] 袁帅, 赵立欣, 孟海波. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1402-1417. YUAN S, ZHAO L X, MENG H B. The main types of biochar and their properties and expectative researches [J]. *Journal of plant*

- nutrition and fertilizer, 2016, 22(5): 1402-1417 (in Chinese with English abstract).
- [48] 林庆毅, 张梦阳, 张林, 等. 老化生物炭对红壤铝形态影响的潜在机制[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 491-497. LIN Q Y, ZHANG M Y, ZHANG L, et al. The potential mechanism of the effect of aging biochar on aluminum morphology in red soil [J]. Ecology and environmental sciences, 2018, 27(3): 491-497 (in Chinese with English abstract).

Effect of biochar on nitrogen use efficiency of crops: a Meta-analysis

XIA Hao¹, ZHANG Mengyang¹, LIU Bo¹, LI Yuxuan¹,
CONG Ming¹, BUMAIREMU Rezeke¹, JIANG Cuncang^{1,2}

1. Microelement Research Center/College of Resources and Environment,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecoagriculture, Xinjiang Production and Construction
Corps/College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Abstract To provide a theoretical reference for scientifically applying biochar and improving the utilization of nitrogen fertilizers, 33 publicly published documents were collected, and 170 sets of nitrogen fertilizer utilization data including biochar combined with chemical fertilizer (NPK + BC) and single chemical fertilizer (NPK) treatment were established, and integrated analysis (Meta-analysis) to study the differences in nitrogen use efficiency in various regions under NPK and NPK + BC treatments. Quantify the impacts of biochar on the nitrogen use efficiency (NUE) of crops from various aspects: different areas, soil nutrients, nitrogen fertilizer dosage, biochar characteristics and application rate, crop types. In general, the application of biochar could increase the NUE of crops by about 4.76%. Among these regions, the effect of biochar promotion in the southern region was the most pronounced, increasing by about 11.73%. Soil fertility could affect the effects of biochar on NUE. The application of biochar had the best effect on the improvement of NUE of crops in the southern regions with low pH, organic matter and available nitrogen content, while the effect was relatively low in the northeast regions with high organic matter and pH. When the nitrogen fertilizer application rate was less than 120 kg/hm², the synergistic effect of biochar was the most evident, and the NUE was increased by 10.73%. The nitrogen utilization rate was higher in grain crops than in commercial crops, and it was increased by 5.71%. The amount of biochar that is applied should be controlled below 1%, and the NUE should be increased by 3.43%. The improvement effect of biochar made from wood materials was the most obvious, and the NUE was increased by 7.99%. When the nitrogen content of biochar exceeded 2%, the NUE could be increased by 19.43%. When the pH of biochar was 9-10, the NUE could be increased by 5.01%.

Keywords nitrogen use efficiency; biochar; soil nutrients; traditional fertilization; Meta-analysis; nitrogen application; bibliometric

(责任编辑: 赵琳琳)