

DOI: 10.11766/trxb201709210394

玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响*

包立^{1, 2} 刘惠见¹ 邓洪¹ 黄维恒¹ 张乃明^{1, 2†} 董新星¹

(1 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室(云南农业大学), 昆明 650201)

(2 云南省土壤资源利用与保护创新团队(云南农业大学), 昆明 650201)

摘要 滇池是中国水体富营养化最严重的湖泊之一, 滇池流域大棚种植中大部分磷素最终汇入滇池, 是滇池富营养化的重要原因。生物炭作为一种土壤改良剂, 可以改良土壤的理化及生物性状, 吸附土壤中的磷肥, 减少磷素迁移流失。通过室内模拟结合实际农业生产的方法, 研究了生物炭对滇池流域大棚土壤中磷素利用和小白菜生长及产量的影响。结果表明: 施用生物炭能提高大棚土壤中小白菜磷肥利用率, 当生物炭添加量为 8% (质量百分比) 且减半施肥 (33 kg hm⁻², P₂O₅) 时, 小白菜磷肥利用率由 14.77% 提高至 31.21%, 提高了 1.11 倍, 大棚土壤的磷流失量降低 43.83%。生物炭可促进大棚小白菜的生长, 小白菜出苗率提高 7%~9%, 子叶展平率提高 10%~12%。株高提高 69.51%, 株重提高 71.75%, 产量提高 31.87%。总之, 施用比例 8% 的玉米秸秆生物炭可提高大棚土壤有效磷含量, 减少磷素流失, 改善小白菜生长状况, 可作为大棚土壤的优良改良剂。

关键词 生物炭; 大棚土壤; 小白菜; 磷肥利用率; 产量

中图分类号 S147.4; S158.3 **文献标识码** A

滇池流域是云南省居民最密集、人类活动最频繁、经济最发达的地区, 是支撑昆明国民经济建设和社会事业发展的基础。近三十年来, 随着滇池流域经济快速发展和城市规模的急剧扩大, 入湖污染负荷不断增大, 导致滇池富营养化日趋严重, 水体功能受到极大损害。

磷是水环境必需的元素, 也是湖泊生产力的限制因子之一^[1-2]。一般而言, 湖泊水体中的氮磷比 (N/P) 大于 7 时, 磷成为湖泊富营养化的限制性营养元素, 据资料统计^[3], 滇池草海氮磷比

为 16.2, 外海北部为 19.3, 中部为 21.8, 南部为 22.9, 所以磷是滇池富营养化的限制性营养元素。因此, 研究滇池流域磷素迁移规律对滇池治理与保护具有重要的科学意义和应用价值。

作物对磷肥的利用率很低, 通常情况下, 当季作物仅有 5%~15%, 加上后效一般也不超过 25%, 所以约占施肥总量 75%~90% 的磷滞留在土壤中。长期过量施用磷肥, 导致农田耕层土壤处于富磷状态, 从而可通过径流等途径加速磷向水体迁移。有研究估计, 全世界每年大约有 300~400 万 t

* 国家水污染控制科技重大专项 (2012ZX01702-003)、云南省科技创新人才计划项目 (2015HC018) 和云南省自然科学基金重点项目 (2009CC006) 共同资助 Supported by the National Water Pollution Control Science and Technology Major Projects (No. 2012ZX01702-003), the Talents Program of Science and Technology Innovation of Yunnan Province in China (No. 2015HC018) and the Key Projects of the Natural Science Foundation of Yunnan Province in China (No. 2009CC006)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangnaiming@sina.com

作者简介: 包立 (1985—), 男, 云南建水人, 博士, 讲师, 主要研究方向为农业非点源污染与土壤修复。E-mail: bblty@163.com

收稿日期: 2017-09-21; 收到修改稿日期: 2018-01-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-02-02

P_2O_5 从土壤进入水体^[4], 这一情况主要集中在农业发达的国家, 如美国每年进入水生态系统的磷达 450万 kg^[5], 又如在日本, 水田中的磷排放量为 0.3~8.4 kg hm⁻² a⁻¹^[6]。农田磷素流失已成为全世界的一个公共问题。滇池流域是中国最大的磷矿区之一, 流域土壤中全磷背景值较高, 但此区域作物又常年出现缺磷症状, 这是由土壤全磷中有效磷含量比例过低引起的。

农业生产上, 每年均产生大量的玉米秸秆等废弃物, 大部分被丢弃或焚烧, 仅有小部分被利用。秸秆还田存在应用地域狭窄、还田后负面效应较大、缺少配套机械等问题, 难以大面积推广。如何将秸秆等“废弃”资源返还给农田, 增加土壤输入, 改良土壤结构, 是当前我国农业发展迫切需要解决的问题之一^[7]。而生物质炭化还田技术则在解决废弃生物质资源利用难题的同时克服了其他秸秆利用形式的缺陷, 具有明显的环境友好、可持续特点^[8]。陈温福院士^[9]2006年率先提出“农林废弃物炭化还田技术”理念并开展相关科学研究工作, 其团队研究证明生物质直接炭化还田对作物生长、土壤蓄水保肥、提高肥料利用率、增产提质等方面均具有重要作用^[9]。生物质直接炭化还田技术对农业可持续发展、实现农业生产良性循环和增产增收均具有重要意义。生物炭对于小白菜氮素利用及排放的影响已有研究^[10-13], 但是, 在滇池流域种植面积很大的小白菜尚未见这方面的研究, 尤其缺少针对大棚土壤生物炭添加对小白菜磷有效性的研究, 因此, 本研究拟通过原状大棚土壤温室盆栽试验, 初步分析玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤中磷素利用及小白菜生长的影响, 以评估玉米秸秆生物炭在大棚土壤改良中的应用潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池流域涉及昆明市主城区(包括五华、盘龙、官渡、西山四区)、呈贡县、晋宁县和嵩明县, 流域面积2 920 km², 是云南省经济和社会水平发展水平最高的区域。

受地形、气候、生物和地质因素的综合作用, 滇池流域的土壤共有7类。红壤为地带性土壤, 棕壤、黄壤属垂直地带性土壤, 同时, 还分布有水稻土、沼泽土、冲积土和紫色土等隐域性土壤。红壤主要分布于山区和丘陵地区; 水稻土主要分布于滇池湖滨地区、河流谷地和山区平坝; 第三系紫色土主要分布于流域东南的侏罗系红层地区。整个流域红壤分布面积最广, 其次为水稻土。研究区气候特点: 春旱严重, 夏无酷暑, 秋凉少雨, 冬无严寒, 四季之分不显著, 气候的地区性明显。多年平均气温14.7°C, 多年平均相对湿度74%, 多年平均风速2.2 m s⁻¹, 多年平均日照2 448.7 h, 无霜期227 d。多年平均降水量935 mm, 降水年内分配不均, 年际变化大。

1.2 供试材料

供试土壤: 根据《土壤农化分析》^[14], 在野外实地考察的基础上, 遵循空间上均匀分布、典型性、代表性的原则, 于滇池流域的大棚采集土壤样品。土样的采集遵循土壤学实验基本原理^[14], 土样取自全流域大棚种植区(棚龄2~20 a), 于2014年6月至10月采基础混合样102个, 土壤类型为水稻土。采样深度为0~80 cm。采用随机多点取样, 不同棚龄土样均匀混合后作为供试大棚土壤样品。土样风干去除石砾、有机残体(包括作物根系)等非土壤物质, 以消除对元素测定的影响。风干后土样过1 mm、0.25 mm、0.149 mm筛后进行基本性质测定。供试大棚土壤为滇池流域土壤混合样品, 基本性质如下(表1):

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the test soil

土壤类型 Soil type	pH	BD (g cm ⁻³)	EC (μ S cm ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	AN (mg kg ⁻¹)	AP (mg kg ⁻¹)	AK (mg kg ⁻¹)
水稻土 Paddy soil	7.19	1.40	1435	55	243	93	661

注: BD: 容重, EC: 电导率, OM: 有机质, AN: 碱解氮, AP: 有效磷, AK: 速效钾。下同 Note: BD: Bulk density, EC: Electrical conductivity, OM: Organic matter, AN: Alkaline nitrogen, AP: Available phosphorus, AK: Available potassium. The same below

供试生物炭：实验用生物炭为云南省土壤培肥与污染修复工程实验室利用玉米秸秆烧制而成，在

高温500℃部分缺氧条件下，持续热解6 h而成黑色粉末，基本性质如下（表2）：

表2 供试生物炭基本性质

Table 2 Basic properties of the tested biochar

生物炭 Biochar	pH	BD (g cm ⁻³)	EC (μS cm ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	AN (mg kg ⁻¹)	AP (mg kg ⁻¹)	AK (mg kg ⁻¹)
玉米秸秆 Maize straw	8.37	0.84	3751	570	33.3	62	157

磷肥：购于滇池流域大棚周边，成分为粒状过磷酸钙（一等品），TP（总磷，P₂O₅）≥44.0%。AP（有效磷，P₂O₅）≥42.0%。经研究区现场调查、称量、求平均值得到滇池流域大棚种植中普通过磷酸钙施用量折合P₂O₅为99 kg hm⁻²。

小白菜：品种名为四季绿，植株小，叶色深绿，初期生长快，叶数多，生长期为40~50 d，属于食用品种。

1.3 试验设计

试验在云南农业大学大棚中进行，在大棚中用单格种植箱（45 cm × 32 cm × 22 cm）种植小白菜，每个种植箱装大棚土壤5 kg，种植小白菜8株。

生物炭对土壤磷素活化试验：试验设5个生物炭添加梯度：0、2%、4%、8%、16%（质量百分比，下同）。首先进行5水平单因素实验，共5个处理，每个处理重复3次，通过计算有效磷在全磷中所占的比例确定添加不同量的生物炭对土壤磷素的活化效果。

生物炭对小白菜磷肥利用率影响试验：本试验为双因素交叉分组有重复试验，生物炭添加梯度同上，共5个处理。设4个磷肥（普通过磷酸钙）添加梯度：不施磷肥（CK）、1/3施肥（22 kg hm⁻²，以P₂O₅计，下同）、1/2施肥（33 kg hm⁻²）和常规施肥（66 kg hm⁻²）。氮肥用量折合纯氮（N）为180 kg hm⁻²，钾肥用量折合K₂O为50 kg hm⁻²。共20个处理，每个处理重复3次。小白菜种植前测定各处理土壤中全磷（TP）和有效磷的含量，计算它们之间的比例。种植期内收集种植箱内的下渗水，记录体积并测定渗滤液TP。在小白菜收获后差减法计算单季小白菜种植试验磷肥利用率，统计结果按全年计算（按照当地习惯全年种植6季）。

生物炭对小白菜生长影响试验：本研究为单因素试验，生物炭添加量同上，共5个处理，每个处理重复3次，施肥水平为取样区常规施肥量（氮肥用量折合纯N为180 kg hm⁻²，磷肥用量折合P₂O₅为66 kg hm⁻²，钾肥用量折合K₂O为50 kg hm⁻²）。种植后3 d测定小白菜的发芽率和子叶展平率。小白菜生长的第10、20、30、40天（收获）测定小白菜的株高、株重，分析生物炭对小白菜生长的影响及作用过程。小白菜收获后按盆测定小白菜产量并折合成公顷产量，分析生物炭对小白菜产量的影响。

1.4 测定项目和方法

土壤全磷（TP）采用高氯酸-硫酸消煮—钼锑抗比色紫外分光光度法测定；土壤有效磷（AP）采用碳酸氢钠浸提—钼蓝比色紫外分光光度法测定；小白菜全磷含量采用钒钼黄紫外分光光度法测定^[14]，渗滤液总磷采用过硫酸钾消解—紫外分光光度法^[15]测定。

小白菜当季磷肥利用率（%）=（处理小白菜养分吸收量-不施磷不施生物炭小白菜养分吸收量）/肥料中有效养分含量 × 100。

单次磷流失量=渗滤液TP含量 × 渗滤液体积。

单季磷流失量=种植期内所有单次磷流失量加和。

1.5 数据处理

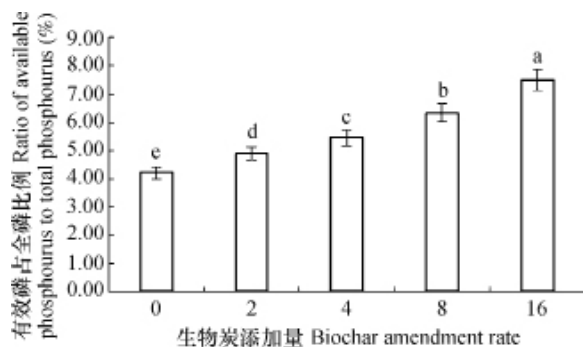
基本计算和图表的绘制用Excel 2013完成；数据进行预处理后发现，生物炭添加量与施肥量无显著交互效应（磷肥利用率实验 $p=0.879 2$ ，磷流失量实验 $p=0.825 5$ ，均大于0.05），因此，常规数据统计分析采用SPSS 19.0软件完成，采用单因素方差分析（ANOVA）法进行均值显著性检验（ $p<0.05$ ），邓肯（Duncan）法进行多重比较。

2 结果与讨论

2.1 生物炭对大棚土壤有效磷活化的影响

在滇池流域, 大棚土壤中虽然全磷含量高, 但是有效磷所占比例不高, 施肥时有效磷会迅速升高, 但是肥料中的有效养分会迅速被作物利用或流失。如图1所示, 从采样检测结果来看, 滇池流域大棚土壤平均全磷含量为 1.571 g kg^{-1} , 平均有效磷含量为 66.15 mg kg^{-1} , 有效磷含量仅占全磷的4.21%。添加生物炭能显著增加大棚土壤有效磷在全磷中所占的比例, 各处理之间的差异显著。经不同生物炭添加量处理后, 有效磷含量分别为76.84、85.64、66.62、117.9 mg kg^{-1} , 所占比例分别提高至4.89%、5.45%、6.34%、7.50%, 较不加生物炭的大棚土壤提高了16.15%、29.45%、50.59%、78.15%。

本研究表明施用生物炭能提高大棚土壤中有效磷含量, 一是由于生物炭本身含有一定量的有效磷, 二是生物炭改良了大棚土壤环境, 优化了解磷环境。这与其他研究成果一致: 研究表明, 在有外源磷的条件下, 施入生物炭显著提高了水稻土^[16]、红壤^[17]和冻融期棕壤^[18]中的有效磷含量, 有效磷含量随生物炭添加量的增加而增加; 但是在褐土和潮土中的实验得到相反的结果^[19], 这可能与土壤本身的pH有关, 高pH下生物炭可能与磷素反应生成难溶物。生物炭施入土壤后能明显提高低肥力红壤的有效磷含量, 增加土壤保肥能力, 改善植物生长环境^[20]; 施用竹炭颗粒的土壤, 其理化性能得到了改良, 有效磷含量也明显提高^[21]。



注: 不同小写字母表示差异达5%显著水平。下同 Note: Different lowercase letters mean significant difference at 5% level. The same below

图1 添加生物炭对大棚土壤有效磷比例的影响

Fig 1 Effect of adding biochar on ratio of available phosphorus to total phosphorus in greenhouse soil

2.2 生物炭对大棚小白菜磷肥利用率及土壤磷素流失的影响

添加生物炭和施用磷肥均能显著提高磷肥的利用率。如图2所示, 随着生物炭添加量的增加, 各施肥处理小白菜磷肥利用率有显著提高, 整体呈现先增大后减小的趋势; 2%和4%的添加量效果差异显著; 当生物炭添加量为8%时, 添加生物炭的效果最好, 当生物炭添加量为16%时, 小白菜磷肥利用率反而下降。添加生物炭对1/2施磷处理的效果显著高于其他处理; 不添加生物炭且1/2施肥时, 小白菜磷肥利用率为14.77%, 当生物炭添加量为8%且1/2施肥时, 小白菜磷肥利用率提高至31.21%, 提高了1.11倍。

在滇池流域大棚土壤中, 磷流失主要通过下渗的迁移。实验研究了滇池流域大棚土壤每年磷流失量, 结果如图3所示, 磷肥使用量越大, 磷素流失量越大。滇池流域大棚土壤未添加生物炭处理且磷肥施肥量为 66 kg hm^{-2} 的磷流失量为 $698.8 \text{ g hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 添加生物炭能有效减少大棚土壤磷的流失, 随着添加量的增加, 磷流失量分别为603.7、513.8、387.4、456.8 $\text{g hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 分别较未加生物炭大棚土壤降低12.47%、25.51%、43.83%、33.77%, 添加生物炭量为8%时效果最好。

因此, 滇池流域大棚土壤中添加8%的生物炭并进行减半施肥最有利于磷肥的利用, 小白菜磷肥利用率提高, 也相对减少磷肥的损失, 降低农业磷素的非点源污染。农田磷素流失危害很大, 会严重影响生态环境和农业生产。本研究表明, 添加秸秆生物炭可减少土壤磷素流失, 改良土壤环境, 这与前人的研究一致: 在太湖流域水稻田^[22]和小麦田^[23]、云南洱海水稻田^[24]、长春水稻田^[25]、宁夏黄灌区稻田^[26]、江西旱地红壤^[27]及苹果园土壤^[28]的研究中, 生物炭配合减施化肥均能达到增产或不减产的条件下显著降低农田磷素流失风险。本研究表明, 8%生物炭添加量为最佳控制磷素流失添加量, 也与他人研究结果^[29]一致。

2.3 生物炭对大棚种植小白菜生长的影响

出苗率是种子破土出苗数和种子总数的百分比, 直接反映播种后的成活比例; 子叶展平率代表了成活幼苗的茁壮程度。试验测定了播种3 d后在大棚内小白菜的出苗率和子叶展平率, 结果如图4所示, 在对照大棚土壤中, 小白菜的出苗率为74%, 子叶展平率为76%。添加生物炭处

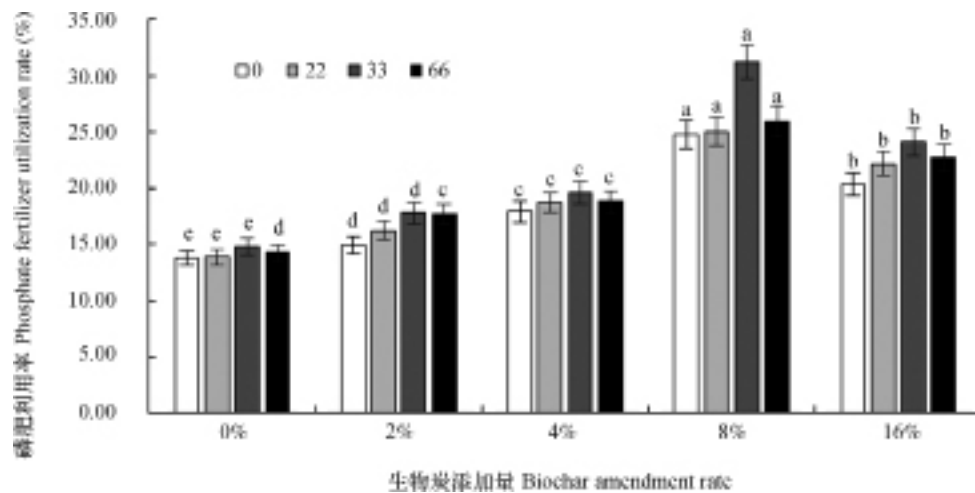
理小白菜出苗率提高7%~9%，子叶展平率提高10%~12%，但各添加生物炭处理间差异不显著。

添加生物炭能提高大棚土壤种植小白菜的株高，如图5A所示，不同生物炭添加量对株高的影响不同，总体呈现先增大后减小的趋势。未添加生物炭的小白菜株高为13.31 cm；当生物炭添加量为2%时，小白菜株高显著升高，2%和4%添加量之间差异不显著；生物炭添加量为8%时株高达到最大值，为22.57 cm，较未添加生物炭提高了69.51%；当生物炭添加量为16%时，株高反而有所降低。

如图5B所示，从小白菜的生长周期来看，未

添加生物炭处理的株高增加主要在10~20 d，以后增速变慢，添加生物炭以后，株高增加的时间延后。当添加量为2%时，株高主要在10~30 d增长；当添加量为4%时，株高主要在30~40 d增长，当添加量为8%和16%的时候，株高在20~40 d显著线性增长。

如图6A所示，添加生物炭能显著提高大棚土壤种植小白菜的株重，各处理间差异显著。大棚土壤直接种植小白菜的株重为28.50 g。随着生物炭添加量的增加，株重分别为33.73、38.88、48.95、44.19 g，生物炭添加量为8%时增加最多，



注：图例表示磷肥施用量 (P_2O_5 , $kg\ hm^{-2}$)，不同小写字母表示相同施肥水平下不同生物炭添加量处理差异达5%显著水平。下同 Note: The figure legend shows application rate of phosphate fertilizer (P_2O_5 , $kg\ hm^{-2}$), lowercase letters indicate significant difference at 5% level between treatments the same in fertilization rate, but different in biochar amendment rate. The same below

图2 添加生物炭在不同施肥量条件下对大棚土壤小白菜磷肥利用率的影响

Fig. 2 Effect of adding biochar on phosphate fertilizer utilization by bok choy in treatments different in fertilization rate

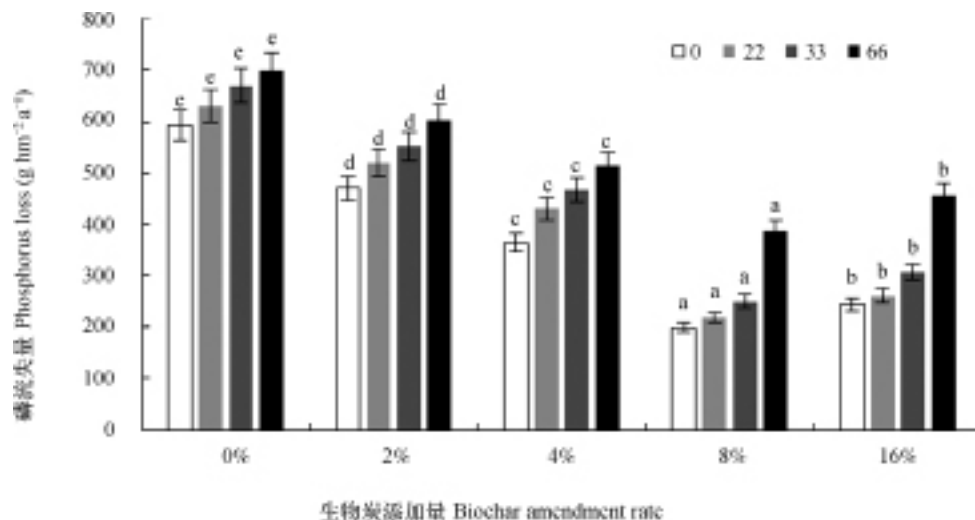


图3 添加生物炭在不同施肥量条件下对大棚土壤磷流失量的影响

Fig. 3 Effect of adding biochar on loss of phosphorus from greenhouse soil in treatments different in fertilization rate

较CK提高71.75%。

如图6B所示，在小白菜的生长周期中，未添加生物炭处理的株重增加主要出现在第10~30 d。添加生物炭能让小白菜在30 d后株重持续显著增加，10~30 d中，添加生物炭的处理增速反而不如未添加生物炭，但是在30~40 d，增速迅速增加，增长量分别为16.51%、22.19%、33.63%、28.05%，当添加量为8%时，株重增加效果最好。

添加生物炭能显著提高大棚土壤小白菜产量。如图7所示，对照大棚土壤种植小白菜产量为17 055 kg hm⁻²，各生物炭处理的产量分别为19.23 × 10³、19.97 × 10³、22.49 × 10³、20.42 × 10³ kg hm⁻²，8%生物炭添加量产量显著高于其他处理，2%、4%、16%添加量之间差异不显著。

随着生物炭研究的不断深入，生物炭在农业生产上的应用也逐渐受到重视。本研究证明，添加生物炭能显著提高大棚土壤中小白菜的生物量和产量，这与前人在中国其他农产品上的研究结果一致，如在水稻、玉米、高粱、小麦、大豆、花生、豇豆、萝卜、菠菜、西红柿、辣椒等作物上均已有了生物炭促进生长的证据^[30-34]。然而，生物

炭对作物生长的效应并不一致。有学者^[35]综述了近年来生物炭对作物产量的影响，正负产量效应均有出现，其中，50%产量增加，20%产量减少，30%无显著影响。生物炭的材料来源、制备方式和当地土壤类型等因素均是应用生物炭需要考虑的问题^[36]。

生物炭是否需要连续施用、连续施用是否有累加效应也是值得关注的问题。有研究表明，施用生

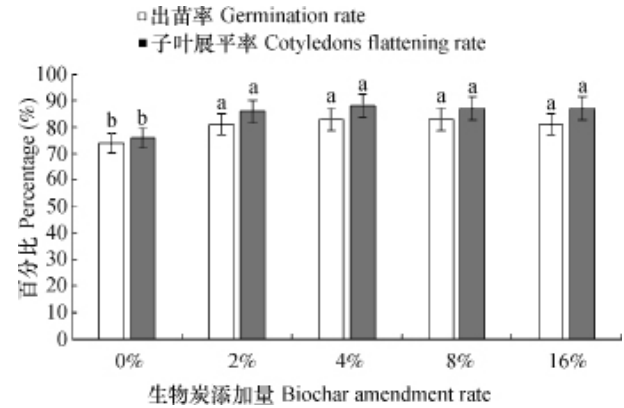


图4 添加生物炭对小白菜幼苗的影响

Fig 4 Effects of adding biochar on growth of bok choi seedlings

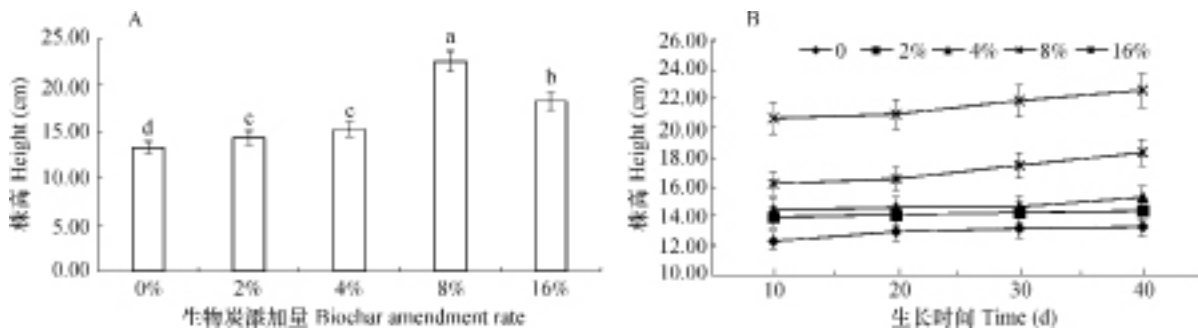


图5 添加生物炭对小白菜株高的影响

Fig. 5 Effects of adding biochar on height of bok choi

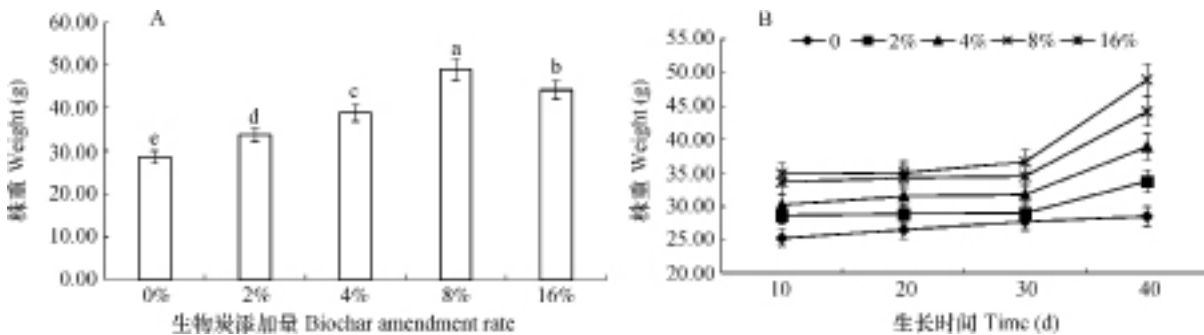


图6 添加生物炭对小白菜株重的影响

Fig. 6 Effects of adding biochar on plant weight of bok choi

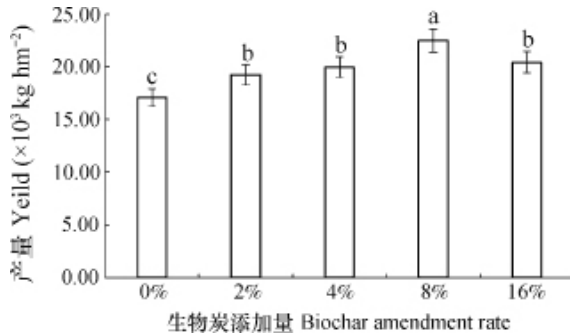


图7 添加生物炭对小白菜产量的影响

Fig. 7 Effects of adding biochar on yield of bok choy

物炭第1年未提高玉米产量，增产效应出现在第2年以后^[37-38]。而本研究中，小白菜的生长时间较短，仅一个多月，且单季种植，未进行连续栽培。所以，生物炭对小白菜增产是否存在时间的累加效应尚待进一步研究。

3 结 论

大棚土壤的小白菜磷肥利用率低，添加生物炭可提高大棚土壤有效磷占全磷的比例，提高作物小白菜磷肥利用率，其中，当生物炭添加量为土壤质量的8%时效果最好，在8%生物炭添加量情况下，当施肥量为常规施肥的1/2（33 kg hm⁻²，P₂O₅）时，小白菜磷肥利用率为31.21%，较常规施肥不施生物炭的大棚土壤提高111.3%，当施肥量为1/3（22 kg hm⁻²，P₂O₅）的时候，小白菜磷肥利用率与常规施肥时无显著差异。提高小白菜磷肥利用率能降低大棚土壤磷流失量，当生物炭添加量为8%时，大棚土壤磷流失量为387.4 g hm⁻² a⁻¹，降低了43.83%。小白菜磷肥利用率的提高还能改善小白菜的生长状况：出苗率提高7%~9%，子叶展平率提高10%~12%；当生物炭添加量为8%时，株高提高69.51%，对株高的影响主要出现在种植的第20~40d；株重提高71.75%，对株重的影响主要出现在种植的第30~40d；小白菜最终产量提高31.87%。

参 考 文 献

[1] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments—Lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Chemosphere*, 2002, 46 (8): 1147—1155

[2] Ahlgren J, Tranvik L, Gogoll A, et al. Sediment depth attenuation of biogenic phosphorus compounds measured by ³¹P NMR. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39 (3): 867—872

[3] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1992

Jin X C, Liu H L, Tu Q Y, et al. Eutrophication of lakes in China (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1992

[4] 刘怀旭. 土壤肥料. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1987

Liu H X. Soil and fertilizer (In Chinese). Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1987

[5] 彭近新. 水质富营养化与防治. 北京: 中国环境科学出版社, 1988

Peng J X. Eutrophication and prevention of water quality (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1988

[6] 田渊俊雄, 高村义亲. 集水域の窒素の流出. 东京: 东京大学出版会, 1985

Tanaka T, Takamura Y. Nitrogen / spillage in the catchment area (In Japanese). Tokyo: Tokyo University Press, 1985

[7] 田升平, 东野脉兴, 周建明, 等. 滇池湖泊磷负荷及其对水环境的影响. *化工矿产地质*, 2002, 24 (1): 11—16

Tian S P, Dongye M X, Zhou J M, et al. Phosphorus burden on water body of Dianchi Lake and its impact on water environment (In Chinese). *Chemical and Mineral Geology*, 2002, 24 (1): 11—16

[8] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向. *土壤*, 2011, 43 (6): 857—861

Xie Z B, Liu Q, Xu Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (6): 857—861

[9] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究. *中国工程科学*, 2011, 13 (2): 83—89

Chen W F, Zhang W M, Meng J, et al. Researches on biochar application technology (In Chinese). *Engineering Sciences*, 2011, 13 (2): 83—89

[10] 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. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 759—767

Yu Y L, Xue L H, Yang L Z, et al. Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica Chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 759—767

[11] 王军, 施雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中N₂O产排的影响. *土壤学报*, 2016, 53

- (3): 713—723
Wang J, Shi Y, Li Z Y, et al. Effects of biochar application on N₂O emission in degraded vegetable soil and in remediation process of the soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (3): 713—723
- [12] 李涛, 王小国, 胡廷旭. 生物炭对紫色土农田土壤NO排放的影响. *土壤*, 2016, 48 (5): 879-886
Li T, Wang X G, Hu T X. Impact of biochar on NO emission from cropland of purple soil (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (5): 879—886
- [13] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究. *中国工程科学*, 2011, 13 (2): 83—89
Chen W F, Zhang W M, Meng J, et al. Researches on biochar application technology (In Chinese). *Chinese Engineering Sciences*, 2011, 13 (2): 83—89
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and agro-chemistry analysis* (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
State Environmental Protection Administration. *Determination methods for examination of water and wastewater* (In Chinese). 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002
- [16] 巢军委, 王建国, 戴敏, 等. 生物炭对水稻土Olsen-P的影响. *土壤*, 2015, 47 (4): 670—674
Chao J W, Wang J G, Dai M, et al. Effects of biochar amendment on phosphorus availability in paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (4): 670—674
- [17] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37 (4): 439—445
Huang C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth (In Chinese). *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences Edition)*, 2011, 37 (4): 439—445
- [18] 周丽丽, 李静楠, 米彩虹, 等. 秸秆生物炭输入对冻融期棕壤磷有效性的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 171—179
Zhou L L, Li J N, Mi C H, et al. Effect of straw biochar on availability of phosphorus in brown soil during the freezing and thawing period (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 171—179
- [19] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (10): 2075—2080
Zhou G Y, Dou S, Liu S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (10): 2075—2080
- [20] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展. *土壤*, 2012, 44 (4): 541—547
Yuan J H, Xu R K. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (4): 541—547
- [21] 傅秋华, 张文标, 钟泰林, 等. 竹炭对土壤性质和高羊茅生长的影响. *浙江林学院学报*, 2004, 21 (2): 159—163
Fu Q H, Zhang W B, Zhong T L, et al. Bamboo charcoal's effect on the soil characteristics and *Fescue arundinacea* growth (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2004, 21 (2): 159—163
- [22] 刘雅文, 马资厚, 潘复燕, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (7): 1395—1405
Liu Y W, Ma Z H, Pan F Y, et al. Effects of different soil additives on rice yield and utilization of nitrogen and phosphorus in the Tai Lake region (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (7): 1395—1405
- [23] 潘复燕, 薛利红, 卢萍, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (5): 928—936
Pan F Y, Xue L H, Lu P, et al. Effects of different soil additives on wheat yield and nitrogen and phosphorus loss in Tai Lake region (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (5): 928—936
- [24] 华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响. *农业环境科学学报*, 2016, 35 (7): 1376—1383
Hua L L, Wang H Y, Zhai L M, et al. Effects of maize stover biochar on phosphorus losses in rice-oilseed rape cropping system (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (7): 1376—1383
- [25] 冯轲, 田晓燕, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响. *农业环境科学学报*, 2016, 35 (2): 329—335
Feng K, Tian X Y, Wang L X, et al. Influence of combined synthetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface

- water of paddy field (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (2): 329—335
- [26] 肖建南, 张爱平, 刘汝亮, 等. 生物炭施用对稻田氮磷肥流失的影响. *中国农业气象*, 2017, 38 (3): 163—171
Xiao J N, Zhang A P, Liu R L, et al. Effects of biochar application on the losses of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field (In Chinese). *Journal of Chinese Agrometeorology*, 2017, 38 (3): 163—171
- [27] 靖彦, 陈效民, 刘祖香, 等. 生物黑炭与无机肥料配施对旱作红壤速效磷含量的影响. *应用生态学报*, 2013, 24 (4): 989—994
Jing Y, Chen X M, Liu Z X, et al. Effects of combined application of biochar and inorganic fertilizers on the available phosphorus content of upland red soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (4): 989—994
- [28] 葛顺峰, 周乐, 门永阁, 等. 添加不同碳源对苹果园土壤氮磷淋溶损失的影响. *水土保持学报*, 2013, 27 (2): 31—35
Ge S F, Zhou L, Men Y G, et al. Effect of carbon application on nitrogen and phosphorus leaching in apple orchard soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (2): 31—35
- [29] 庞荣丽, 介晓磊, 谭金芳. 有机酸对合成磷源施入石灰性潮土后速效磷动态变化的影响. *中国土壤与肥料*, 2006 (6): 33—35
Pang R L, Jie X L, Tan J F. Effect of organic acids on the dynamic of rapidly available phosphorus after phosphate was applied to calcareous alluvial soil (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006 (6): 33—35
- [30] 张广格, 邓春生, 张燕荣. 生物炭对土壤拦截外源氮磷等污染物效果的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (9): 1782—1789
Zhang G K, Deng C S, Zhang Y R. Effect of biochar on interception of sewage nitrogen, phosphorus and COD (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (9): 1782—1789
- [31] Graber E R, Harel Y M, Kolton M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 2010, 337 (1/2): 481—496
- [32] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, et al. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere*, 2009, 77 (4): 574—581
- [33] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响. *作物学报*, 2013, 39 (8): 1445—1451
Zhang W M, Meng J, Wang J Y, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (8): 1445—1451
- [34] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长, 养分吸收及土壤化学性状的影响. *生态环境学报*, 2010, 19 (11): 2713—2717
Zhang H Z, Huang Y, Liu G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19 (11): 2713—2717
- [35] Spokas K A, Novak J M, Stewart C E, et al. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere*, 2011, 85 (5): 869—882
- [36] Novak J M, Busscher W J. Selection and use of designer biochars to improve characteristics of southeastern USA Coastal Plain degraded soils//James W L. *Advanced biofuels and bioproducts*. New York: Springer, 2013: 69—96
- [37] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 2010, 333 (1/2): 117—128
- [38] 韩晓日, 葛银凤, 李娜, 等. 连续施用生物炭对土壤理化性质及氮肥利用率的影响. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48 (4): 392—398
Han X R, Ge Y F, Li N, et al. Effects of continuous application of biochar on soil physic-chemical properties and nitrogen use efficiency (In Chinese). *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48 (4): 392—398

Effect of Straw Biochar on Utilization of Soil Phosphorus and Growth of Bok Choi in Greenhouse in Dianchi Lake Basin

BAO Li^{1,2} LIU Huijian¹ DENG Hong¹ HUANG Weiheng¹ ZHANG Naiming^{1,2†} DONG Xinxing¹

(1 Yunnan Soil Fertility and Pollution Restoration Laboratory (Yunnan Agricultural University), Kunming 650201, China)

(2 Yunnan Soil Resources Utilization and Protection Innovation Team (Yunnan Agricultural University), Kunming 650201, China)

Abstract 【Objective】Lake Dianchi is a lake the most serious in eutrophication in China. Most of the phosphorus applied in farmlands in the Dianchi Lake watershed is finally imported into the Lake, which is an important reason for eutrophication of the Lake. Biochar as a soil amendment can be used to improve soil physical and chemical properties, adsorb soil phosphate, and hence reduce phosphorus loss from the soil. In order to improve bio-availability of soil phosphorus, increase yield of crops, reduce phosphorus pollution of the soil and the environment, and provide a theoretical basis for management and application of biochar in the soil environment, this study was carried out. 【Method】In this study, an indoor simulation and greenhouse pot experiments were conducted to explore effects of biochar on loss and utilization of phosphorus in the production of bok choy and yield of the crop. The experiment was designed to have a gradient of five levels of biochar application rate, and four levels of phosphate application rate, thus making up 20 treatments and three replicates for each. Bok choy was planted in single-compartment planting boxes in a greenhouse. Each box contained 5 kg of soil and had 8 bok choy plants. After the application of biochar, the soils in the boxes were analyzed for total phosphorus and available phosphorus, separately and ratio of the two calculated. After the plants were harvested, the soils in the boxes were analyzed again for fertilizer utilization efficiency and phosphorus loss and effects of the biochar. On D3 (Three days after sowing), germination rate and cotyledon flattening rate of the plants were measured. On D10, D20, D30 and D40, plant height and plant weight was checked of the plants harvested, and effects of the biochar on growth of bok choy were analyzed. After harvesting of the crop, effect of the biochar on yield of bok choy analyzed, calculated and converted into yield per hectare. 【Result】Application of biochar may improve P utilization efficiency of bok choy in greenhouse. In the treatment, 8% in biochar application rate and 33 kg hm⁻², (1/2 of the conventional rate) in P₂O₅ application rate, P fertilizer utilization efficiency increased from 14.77% up to 31.21% or by 111.3%, thus reducing P loss by 43.83%, and germination rate of the crop increased by 7%–9%, cotyledons flattening rate by 10%–12%, plant height by 69.51%, plant weight by 71.75% and yield by 31.87%. The effect of biochar on plant height appeared the most significantly during the period of D20–D40 and that on plant weight did during the period of D30–D40. 【Conclusion】The application of 8% corn stalk-derived biochar can increase the content of soil available phosphorus in greenhouse, reduce the loss of phosphorus, improve the growth of bok choy. Therefore, it can be used as a good soil amendment in greenhouse.

Key words Biochar; Greenhouse soil; Bok choy; Phosphorus utilization rate; Yield

(责任编辑: 陈荣府)