

秸秆及其生物炭添加对土壤 Olsen-P 及磷素组分的影响

甘国渝¹, 金慧芳¹, 李燕丽¹, 杨军¹, 李继福^{1*}, 姚荣江², 杨劲松², 朱海^{1,2*}

(1.长江大学 农学院/湿地生态与农业利用教育部工程研究中心/

涝渍灾害与湿地农业湖北省重点实验室, 湖北 荆州 434025;

2.中国科学院 南京土壤研究所/土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:【目的】研究和对比秸秆和生物炭添加对土壤磷素及 Olsen-P 量变化的影响。【方法】以江汉平原典型水稻土为研究对象, 进行了室内恒温土培试验。试验设置不同水分模拟旱地和水田两种土地利用方式, 分别设置高量生物炭(BC2)、低量生物炭(BC1)、高量秸秆(SC2)、低量秸秆(SC1)和无添加(CK)处理, 25℃下恒温培养 30 d。利用 Hedley 磷素形态分级法对各处理土壤进行磷素分级, 同时测定土壤 Olsen-P 量及其他理化指标。

【结果】在旱地土壤中, 添加生物炭使得土壤 Olsen-P 量增加了 1.78~1.46 mg/kg, 添加秸秆使得土壤 Olsen-P 量分别增加了 4.46~1.72 mg/kg。在水田土壤中, 添加生物炭使得土壤 Olsen-P 量分别增加了 22.42~12.04 mg/kg, 添加秸秆使得土壤 Olsen-P 量分别增加了 6.37~4.27 mg/kg。磷素形态分级结果表明各处理土壤中不同磷素组分量差异较大, 由高到低依次表现为 HCl-P>NaOH-P>NaHCO₃-P>H₂O-P。综合旱地和水田土壤来看, 添加生物炭提高了土壤 pH 值、总氮(TN)、可溶性有机碳(DOC)和土壤总有机碳(SOC)量。而添加秸秆提高了土壤总磷(TP)、DOC 和 SOC 量。添加生物炭处理土壤中, Olsen-P 量与 H₂O-P、NaHCO₃-P、SOC 和 NH₄⁺-N 量呈极显著正相关。添加秸秆处理土壤 Olsen-P 量与 NaOH-P、HCl-P、TN 和 NH₄⁺-N 量呈显著正相关关系。【结论】可见, 生物炭和秸秆还田主要是通过影响土壤 pH、TN 和 SOC 量, 促进土壤中 Olsen-P 的积累, 同时改变土壤的磷素分级状况, 进而提高土壤供磷水平和能力。

关键词: 生物炭; 秸秆; Hedley 磷素形态分级法; Olsen-P

中图分类号: S565

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022289

OSID:



甘国渝, 金慧芳, 李燕丽, 等. 秸秆及其生物炭添加对土壤 Olsen-P 及磷素组分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 43-51.

GAN Guoyu, JIN Huifang, LI Yanli, et al. Effects of Straw Incorporation and Biochar Amendment on Olsen-P and Phosphorus Fraction in Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 43-51.

0 引言

【研究意义】磷是植物正常生长发育的必需营养元素, 土壤磷素有效性不仅影响作物产量水平, 也影响到区域农业生态系统的平衡和稳定^[1]。然而我国农田磷肥当季利用率远低于氮肥和钾肥的吸收利用率^[2]。施入土壤的磷肥, 大部分被土壤吸附固定并转化为植物难以利用的磷素形态, 导致土壤磷素有效性的降低^[3]。因此, 探究磷素形态转化及其有效性提高途径, 对于解决上述问题具有重要的科学价值和实践意义。秸秆是传统的农田土壤培肥和增碳措施, 其不仅直接改变土壤有机碳量, 还会对提高土壤磷素库

容产生积极影响。【研究进展】有学者^[4]开展了连续 3 a 的稻麦秸秆还田试验, 发现秸秆还田能够显著增加土壤有效磷量。有机物料添加(如秸秆、有机肥等)是通过增加土壤微生物数量、释放养分转化相关水解酶从而提高土壤磷素养分有效性^[5]。相较于秸秆, 生物炭具有更好的吸附性和固碳潜力。而农作物秸秆是生物炭的理想来源, 秸秆炭化利用成为农业和生态等领域的研究热点^[6]。有研究在连续 5 a 增施生物炭后^[7]发现, 生物炭可促进棕壤中磷的累积, 提高土壤磷素有效性。而且能够不同程度增加水稻土中总磷量和速效磷量^[8]。生物炭对土壤酶活性和细菌群落有一定的影响, 生物炭是通过降低土壤体积质量, 提高土壤 pH、速效磷、有机质量和 C/N 比进而影响土壤磷素转化相关的酶和微生物活性^[9]。然而, 受秸秆类型、粉碎方式和还田量等的影响, 不同研究中秸秆还田对土壤理化性质的影响程度存在较大差异。有研究指出小麦秸秆的含碳量较高, 还田后会导致土壤 C/N 和 C/P 比例失调,

收稿日期: 2022-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207414, 42107370); 湖北省教育厅中青年人才项目(Q20181303); 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金项目(KF202115)共同资助

作者简介: 甘国渝(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态与环境研究。E-mail: 202071646@yangtzeu.edu.cn

通信作者: 朱海(1990-), 男, 讲师, 主要从事土壤生态与环境土壤改良及氮素养分高效利用研究。E-mail: zhuhai0917@163.com

李继福(1987-), 男, 副教授, 主要从事土壤生态与环境研究。

E-mail: jifuli@yangtzeu.edu.cn

出现微生物与作物争氮、争磷现象^[10]。此外，土壤含水率对磷素有效性也起着重要作用，影响着土壤中有效磷的变化和作物生长^[11]。研究指出，在干旱条件下土壤中的含磷量显著低于淹水条件，但与次生矿物（铁/铝氧化物）结合的无机和有机磷量增加^[12]。相关研究表明，双季稻田采用秸秆还田配合间歇灌溉或长期淹水均可显著提高土壤柠檬酸磷（Citrate-P）和酶磷（Enzyme-P）量，且长期淹水较间歇灌溉主要提高土壤氯化钙磷（CaCl₂-P）量^[13]。【切入点】江汉平原地下水位埋藏较浅，受长江水位波动影响显著，极易发生涝渍灾害，土壤潜育化现象十分严重，有研究表明潜育性土壤磷素有效性普遍偏低，严重制约作物对磷素的吸收利用^[14]。因此，有必要寻求合理的改良利用途径，提高磷素有效性和作物磷素利用效率。前人研究已表明秸秆还田对提高土壤中磷素量起到积极作用，但是有关秸秆与生物炭还田的对比研究还不多见^[15-16]，江汉平原地区更鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究选取江汉平原典型的水稻土，开展秸秆和生物炭添加室内恒温培养试验，同时设置不同水分模拟旱地和水田 2 种土地利用方式，探究其对土壤 Olsen-P 量、磷素组分变化、土壤理化性质的影响，结合磷素与驱动

因子的相关性分析，阐明秸秆与生物炭添加对土壤磷素有效性的影响机制。以期为江汉平原秸秆资源综合利用和土壤磷素高效利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤采样区位于长江大学教学科研试验基地，属江汉平原腹地（30°21'N、112°09'E，海拔 32 m），东部季风农业气候大区、北亚热带农业气候带、长江中下游农业气候区，年平均气温 16.5 ℃，年均降水量约 1 095 mm，年均日照时间 1 718 h。地下水位较浅，约 3 m，该区农作物主要为冬小麦、水稻、玉米和油菜等。试验前 0~20 cm 耕层土壤理化性质见表 1。于 2021 年 6 月，利用五点取样法采集试验基地 0~20 cm 耕层土壤，置于实验室风干、磨碎、过 2 mm 筛，以备后续培养试验使用。

秸秆取自长江大学教学科研试验基地，于 2021 年 5 月，小麦收获期，人工采集小麦秸秆，取回实验室用烘箱烘干，再用高速粉碎机打碎备用。生物炭由本试验所用秸秆制备，在缺氧条件下以 5 ℃/min 的速率将温度升高到 550 ℃，然后保持 4 h 制得^[17]，小麦秸秆与生物炭基础理化性质见表 1。

表 1 各供试材料基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of each test material

供试材料	TN/(g kg ⁻¹)	TP/(g kg ⁻¹)	TK/(g kg ⁻¹)	pH	SOC/(g kg ⁻¹)	TOC/(g kg ⁻¹)	Olsen-P/(mg kg ⁻¹)
0~20 cm 耕层土壤	3.3	0.7	6.3	7.6	15.5	-	14.3
小麦秸秆	3.6	0.9	11.2	7.8	-	371.2	-
生物炭	2.2	0.8	10.6	9.5	-	455.3	-

1.2 试验设计

本研究通过室内培养试验来进行，模拟旱地和水田 2 种土地利用方式，参考相关文献^[18]分别设高量生物炭（BC2，添加量为土质量的 2%）、低量生物炭（BC1，添加量为土质量的 1%）、高量秸秆（SC2，添加量为土质量的 2%）、低量秸秆（SC1，添加量为土质量的 1%）和无添加（CK）为对照共 10 个处理。每个处理 3 个重复。

于 2021 年 6 月小麦收获后，采集 0~20 cm 土层的土样，自然风干粉碎过 2 mm 筛，充分混匀储存备用。使用 500 mL 的广口玻璃瓶，每个瓶中装入 100 g 风干土样。水田模式采用淹水处理，土面保持 2 cm 高水位，旱地模式土壤含水率参考相关研究^[19]，设置为 60%WFPS（≈20%质量含水率）。在 25 ℃条件下恒温培养 30 d，每 3 d 利用称质量法对各样品进行补水，以保持恒定的土壤含水率^[20]。

1.3 样品测定

土壤磷分级采用改进后的 Hedley 磷分级法提

取^[21]，钼酸铵比色法测定。针对同一份样品，依次使用 H₂O，NaHCO₃，NaOH 和 HCl 溶液浸提，测定各处理土壤中 H₂O-P，NaHCO₃-P，NaOH-P 和 HCl-P 量。具体方法为：①水溶态磷：用蒸馏水浸提。②NaHCO₃ 提取态磷（NaHCO₃-P）：包括无机态和有机态 2 部分，无机部分主要是吸附在土壤表面的磷；有机部分主要是易于矿化的可溶性有机磷。③NaOH 提取态磷（NaOH-P）：用 0.1 mol/L NaOH 提取，它们是以化学吸附作用吸附于土壤 Fe，Al 表面的磷。其也包括有机和无机 2 部分。④磷灰石型磷（HCl-P）：用盐酸提取，在石灰性土壤中主要提取的是磷灰石型磷，但在高度风化的土壤（如红壤）中也能提取部分闭蓄态磷。同时称取 1 份土样直接用 NaHCO₃ 浸提，测定土壤 Olsen-P 量。

pH 值、全氮量（TN）、全磷量（TP）、速效磷量（Olsen-P）和有机碳量（SOC）等指标按照常规方法测定^[22]，其中土壤有机碳量采用重铬酸钾外加热法测定。土壤可溶性碳（DOC）测定：称取 20 g 各处

理土壤样品, 用 40 mL 0.5 mol/L 硫酸钾提取后, 浸提液经 0.45 μm 滤膜进行抽滤, 滤液在 TOC-Analyzer 分析仪上测定^[23]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 Origin2018 软件处理数据并绘图, SPSS20 进行统计方差分析, LSD 法检验 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。采用 Canoco5.0 软件进行环境因子对土壤磷组分的冗余分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭和秸秆添加对土壤理化性质的影响

秸秆和生物炭处理土壤基本理化性质的变化如表 2 所示。就旱地来看, 与 CK 相比, 生物炭处理提高了土壤 pH、TN、TP、SOC 量, 且上述指标随着生物炭用量的增加而增加, 平均增幅分别为 19.7%、80.0%、31.4%和 23.4%; 同时生物炭处理降低了土壤硝态氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) 和铵态氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) 量, 平均降幅分别为 8.3%和 14.6%。秸秆处理提高了土壤 TN 和 SOC 量, 且其量随着秸秆用量的增加而增加, 平均增幅分别为 67.0%和 31.7%; 同时秸秆处理降低了

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量, 平均降幅为 56.3%。就生物炭与秸秆对比来看, 生物炭对土壤 pH 的提升作用更显著, 不同用量水平下, 生物炭处理的土壤 pH 均显著高于秸秆处理。高量生物炭 (BC2) 处理下土壤 TN 量也显著高于高量秸秆 (SC2) 处理。而就 SOC 来看, 不同用量水平下, 秸秆处理的 SOC 量均显著高于生物炭处理。

就水田来看, 与 CK 相比, 生物炭处理提高了土壤 pH、TN、TP、SOC 量, 且上述指标随着生物炭用量的增加而增加, 平均增幅分别为 20.4%、80.0%、31.3%和 23.4%; 同时生物炭处理降低了土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 量, 平均降幅分别为 6.1%和 25.0%。秸秆处理提高了土壤 TN 量和 DOC 量, 且其随着秸秆用量的增加而增加, 平均增幅分别为 106.5%和 88.0%; 同时秸秆处理降低了土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 量, 平均降幅分别为 8.1%和 52.9%。就生物炭与秸秆对比来看, 二者对土壤 pH 的影响规律与旱地一致, 也表现为生物炭处理的土壤 pH 均显著高于秸秆处理。而秸秆处理对土壤 TN 量和 SOC 量的提升作用更显著, 相同用量水平下, 秸秆处理的土壤 TN 量和 SOC 量均高于生物炭处理, 其中高量水平下差异显著。

表 2 各处理土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil in each treatment

耕作方式	处理	pH	TN/(g kg ⁻¹)	TP/(g kg ⁻¹)	DOC/(mg kg ⁻¹)	SOC/(g kg ⁻¹)	$\text{NO}_3^- \text{-N}/(\text{mg kg}^{-1})$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/(\text{mg kg}^{-1})$
旱地	CK	7.04c	2.27c	1.40a	26.21b	68.92e	85.68a	1.51c
	BC1	8.33a	2.89c	1.41a	33.1ab	80.57d	77.14c	1.30d
	BC2	8.53a	5.28a	1.84a	47.33ab	89.59c	79.95b	1.28d
	SC1	7.26b	2.25c	1.64a	29.90ab	84.27b	35.68e	2.07a
	SC2	7.44b	3.79b	1.56a	55.39a	97.33a	39.16d	1.74b
水田	CK	7.23c	1.93c	1.42a	29.37c	67.24d	4.80d	11.53a
	BC1	8.50a	3.43b	1.67a	42.11b	82.94c	4.66a	9.28b
	BC2	8.91a	3.80b	2.06a	55.86a	91.58b	4.55b	8.02c
	SC1	7.25c	3.50b	1.45a	51.65ab	85.49c	4.34c	7.10c
	SC2	7.44b	4.47a	1.48a	58.81a	102.62a	4.48b	3.77d
利用方式		ns	ns	ns	ns	ns	**	**
碳种类		**	ns	ns	*	*	**	**
利用方式×碳种类		ns	*	ns	ns	ns	**	**

注 不同土地利用方式处理中, 同列不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性; ns、*、**分别表示没有差异、显著差异、极显著差异, 下同。

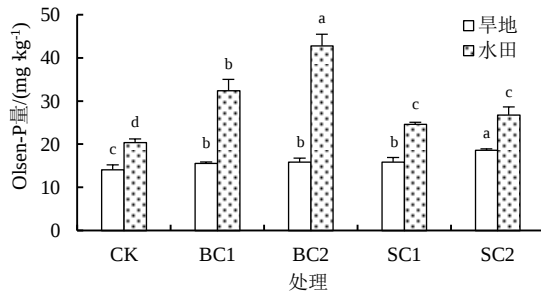
2.2 生物炭和秸秆添加对土壤 Olsen-P 的影响

整体来看, 不同用量生物炭及秸秆处理下旱地土壤 Olsen-P 量均低于水田土壤 (图 1)。就旱地来看, 生物炭处理显著提高了土壤 Olsen-P 量, 其中低量生物炭 (BC1) 和高量生物炭 (BC2) 处理分别使土壤 Olsen-P 量增加了 1.46 mg/kg 和 1.78 mg/kg, 且高量生物炭 (BC2) 处理土壤 Olsen-P 量增加更显著, 增幅为 12.6%; 秸秆处理也显著提高了土壤 Olsen-P 量, 其中低量秸秆 (SC1) 和高量秸秆 (SC2) 处理分别使土壤 Olsen-P 量增加了 1.72 mg/kg 和 4.46 mg/kg, 且高量秸秆 (SC2) 处理土壤 Olsen-P 量增加更显著, 增幅为 31.5%; 就生物炭与秸秆对比来看, 高量生物

炭 (BC2) 处理土壤 Olsen-P 量显著低于高量秸秆 (SC2) 处理。

就水田来看, 生物炭处理也显著提高了土壤 Olsen-P 量, 其中, 低量生物炭 (BC1) 和高量生物炭 (BC2) 处理下, 土壤 Olsen-P 量分别增加了 12.04 和 22.42 mg/kg, 高量生物炭 (BC2) 处理土壤 Olsen-P 量变化更显著, 最大增幅为 110.0%; 秸秆处理也显著提高了土壤 Olsen-P 量, 其中低量秸秆 (SC1) 和高量秸秆 (SC2) 处理分别使土壤 Olsen-P 量增加了 4.27 mg/kg 和 6.37 mg/kg, 高量秸秆 (SC2) 处理土壤 Olsen-P 量变化更显著, 最大增幅为 31.3%; 就生物炭与秸秆对比来看, 各用量下, 生物炭处理土壤

Olsen-P 量均显著高于秸秆处理。



注 不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性。

图 1 各处理土壤 Olsen-P 量变化

Fig.1 Changes of soil Olsen-P content in each treatment

2.3 生物炭和秸秆添加对土壤磷组分的影响

表 3 为各处理土壤 Olsen-P 量变化,由表 3 可知,生物炭和秸秆均显著提高了旱地和水田土壤中 H_2O-P , $NaHCO_3-P$, $NaOH-P$ 和 $HCl-P$ 量;不同处理土壤中 4 种磷素组分量差异较大,由高到低依次为 $HCl-P > NaOH-P > NaHCO_3-P > H_2O-P$ 。就旱地来看,生物炭处理显著提高了 H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 、 $NaOH-P$ 和 $HCl-P$ 量,平均增幅分别为 8.9%、66.6%、21.7% 和 82.3%。但高量生物炭 (BC2) 处理下土壤 H_2O-P 、 $NaOH-P$ 和 $HCl-P$ 量低于低量生物炭 (BC1) 处理, $NaHCO_3-P$ 量在不同用量下差异不显著。秸秆处理显

著提高了 H_2O-P 、 $NaOH-P$ 和 $HCl-P$ 量,平均增幅分别为 49.6%、7.8%和 26.3%, $NaHCO_3-P$ 量变化不显著。其中,随着秸秆用量的增加, $HCl-P$ 量逐渐上升, H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 和 $NaOH-P$ 量变化不显著。就生物炭和秸秆对比来看,不同用量下生物炭处理的 $NaHCO_3-P$ 量均显著高于秸秆处理;而生物炭处理的 H_2O-P 量均显著低于秸秆处理;同时,低量生物炭 (BC1) 处理下 $NaOH-P$ 的量显著高于低量秸秆 (SC1) 处理;此外,不同用量下生物炭处理的 $HCl-P$ 量均显著高于秸秆处理。

就水田来看,生物炭处理显著提高了 H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 和 $HCl-P$ 量,平均增幅分别为 27.0%、118.8%和 19.2%, $NaOH-P$ 量变化不显著。但高量生物炭 (BC2) 处理下,土壤 $NaOH-P$ 和 $HCl-P$ 量低于低量生物炭 (BC1) 处理,而 $NaHCO_3-P$ 量逐渐升高, H_2O-P 量变化不显著。秸秆处理显著提高了 $HCl-P$ 量,平均增幅为 24.3%。 H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 和 $NaOH-P$ 量变化不显著。但高量秸秆 (SC2) 处理下土壤 $HCl-P$ 量低于低量秸秆 (SC1) 处理。就生物炭和秸秆对比来看,不同用量下生物炭处理的 H_2O-P 和 $NaHCO_3-P$ 量均显著高于秸秆处理;而生物炭处理的 $NaOH-P$ 和 $HCl-P$ 量均显著低于秸秆处理。

表 3 不同处理土壤中各磷素量变化

Table 3 Changes of phosphorus content in soil with different treatments

耕作方式	处理	$H_2O-P/(mg\ kg^{-1})$	$NaHCO_3-P/(mg\ kg^{-1})$	$NaOH-P/(mg\ kg^{-1})$	$HCl-P/(mg\ kg^{-1})$
旱地	CK	8.17±0.42c	12.14±0.56b	52.64±1.60c	234.89±14.87e
	BC1	9.15±0.37b	19.34±0.29a	70.70±6.10a	442.60±16.21a
	BC2	8.64±0.35c	21.12±2.96a	58.16±9.53b	413.59±33.77b
	SC1	12.43±1.02a	13.26±0.85b	56.95±3.97b	276.53±15.59d
	SC2	12.01±1.50a	12.98±0.37b	56.57±0.65b	316.76±23.84c
水田	CK	10.74±0.21c	11.01±0.28c	72.29±0.58d	400.03±25.47d
	BC1	13.69±0.49a	21.21±1.97b	81.37±1.55b	493.59±27.97b
	BC2	13.60±1.73a	26.96±0.45a	72.48±2.40d	459.90±29.28c
	SC1	12.71±2.32b	13.40±1.35c	86.04±2.39a	505.28±5.84a
	SC2	10.79±1.58c	11.71±0.64c	76.03±1.99c	488.91±33.04b
土地利用方式		*	ns	**	**
碳种类		ns	**	ns	*
土地利用方式×碳种类		ns	*	*	**

2.4 生物炭和秸秆添加对土壤磷素与各理化指标的相关分析

图 2 为各处理土壤中磷素与各理化指标的相关性 (图中**、*分别表示在 0.01、0.05 水平上 (双侧) 显著相关。相关系数 0.8~1.0、0.6~0.8、0.4~0.6、0.2~0.4、0~0.2 分别表示极强相关、强相关、中等程度相关、弱相关、极弱相关或无相关;负值表示负相关。),由图 2 (a) 可知,生物炭处理土壤中 Olsen-P 量与 H_2O-P ($r=0.915$)、 $NaHCO_3-P$ ($r=0.769$)、 SOC ($r=0.656$) 和 NH_4^+-N ($r=0.890$) 量极显著正相关,而与 NO_3^--N ($r=-0.942$) 极显著负相关。 H_2O-P 量与 NH_4^+-N ($r=0.930$) 量极显著正相关,而与 NO_3^--N ($r=-0.951$)

极显著负相关。 $NaHCO_3-P$ 量与 SOC ($r=0.765$) 显著正相关,而与 pH ($r=-0.623$) 显著负相关。 $NaOH-P$ 量与 NH_4^+-N ($r=0.682$) 量显著正相关,而与 NO_3^--N ($r=-0.663$) 量显著负相关。

由图 2 (b) 可以看出,秸秆处理下土壤 Olsen-P 量与 $NaOH-P$ ($r=0.854$)、 $HCl-P$ ($r=0.864$)、 TN ($r=0.664$) 和 NH_4^+-N ($r=0.657$) 量显著正相关,而与 NO_3^--N ($r=-0.897$) 量显著负相关。 $NaOH-P$ 量与 NH_4^+-N ($r=0.940$) 量极显著正相关,而与 NO_3^--N ($r=-0.947$) 量显著负相关。 $HCl-P$ 量与 NH_4^+-N ($r=0.740$) 量极显著正相关,而与 NO_3^--N ($r=-0.843$) 和 NO_2^--N ($r=-0.726$) 量极显著负相关。

2.5 生物炭和秸秆添加对土壤磷素与环境因子冗余分析

利用 RDA 模型分析生物炭和秸秆添加后，土壤基础理化性质对各土壤磷素的影响如图 3 所示。结果表明，生物炭处理下土壤理化性质对土壤磷素量的贡献率分别为 67.3%和 4.4%，排序轴 1 和排序轴 2 的解

释率分别为 66.0%和 71.7%，其中 NH_4^+ 对 Olsen-P、 $\text{H}_2\text{O-P}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 的影响最大，而 pH 对 HCl-P 的影响最大。秸秆处理下土壤理化性质对土壤磷素量的贡献率分别为 80.1%和 89.03%，其中排序轴 1 和排序轴 2 的解释率分别为 88.1%和 0.2%， HCl-P 受 TN 和 DOC 的双重影响。

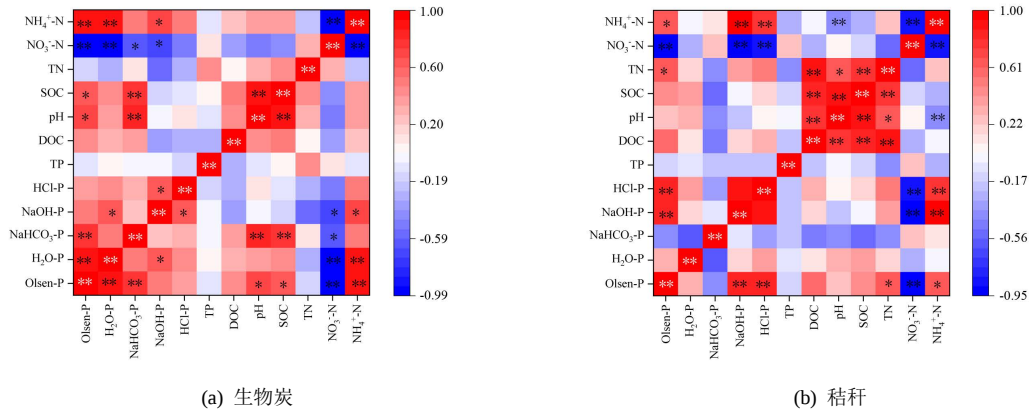


图 2 各处理土壤中磷素与各理化指标的相关性

Fig.2 Correlation of phosphorus and physicochemical indexes in soil of different treatments

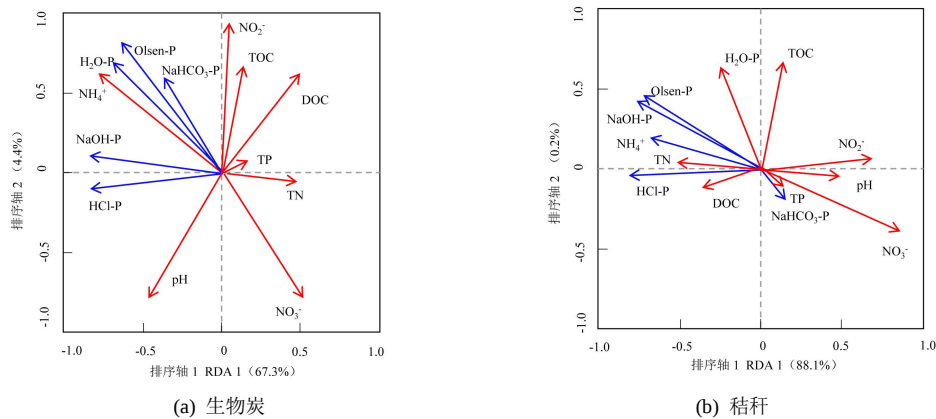


图 3 碳添加土壤中各指标间冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis among indicators in carbon-added soils

3 讨论

3.1 添加生物炭和秸秆对土壤 Olsen-P 量影响

磷素作为植物生长发育所需的主要营养元素之一，其量高低和形态转化直接影响作物的产量和养分利用效率。探究适宜的磷素提升途径，对于维持区域农业经济的发展和生产力的提高具有重要意义。

前人^[24]研究表明，秸秆还田可以有效提高土壤速效磷和全磷量，也能够提升磷活化系数（PAC）；即使在磷肥减量条件下，秸秆还田也能有效维持土壤磷素的有效性^[25]。本研究中，秸秆还田后旱地和水田土壤有效磷量均有显著提高，且高量秸秆（SC2）处理下土壤 Olsen-P 量增幅最大（图 1），这与王国骄等^[26]和黄容等^[27]的研究结果一致。秸秆提高磷素有效性的原因可能是，一方面秸秆提高了

土壤磷酸酶活性，土壤有机磷可以在土壤酶和土壤微生物的共同作用下进行矿化而分解为无机磷，进而提高土壤中 Olsen-P 量^[28]。另一方面秸秆腐解后，促进了土壤养分的循环与释放，从而提高了磷素活化与供应^[29-30]。生物炭（BC）处理下旱地和水田土壤有效磷量也均有显著提高，同时高量生物炭（BC2）处理下土壤 Olsen-P 量增幅最高，这与前人^[31-32]的研究结果一致。生物炭提高磷素有效性的原因可能是：生物炭含有部分不稳定的有机结合态磷化物，进入土壤后会矿化释放，使磷的有效性得到大幅提高，进一步提高了土壤磷素量^[33-34]。综上，添加生物炭和作物秸秆均有助于提高土壤 Olsen-P 量，但在旱田和水田模式下二者对土壤 Olsen-P 量影响存在一定的差异，相同用量秸秆及生物炭处理下，水田土壤中 Olsen-P 量增加更为显著。

这是由于淹水土壤 O_2 缺乏, 进而影响土壤硝化速率^[35], 并产生大量低分子量有机酸和质子 (H^+), 有利于土壤无机磷活化, 且可促进土壤中部分铁结合态磷和闭蓄态磷的转化和释放, 进而增加土壤有效磷量^[36]。使得在秸秆和生物炭添加后, 水田土壤中 Olsen-P 量变化更为明显。

3.2 添加生物炭和秸秆对土壤磷素形态变化影响

土壤磷素分级是揭示土壤对植物磷供给能力的有效方法, 也是研究土壤中磷迁移转化的重要途径^[37]。赵小军等^[38]选用 BowmanCole 法^[39]对秸秆还田土壤有机磷进行分级指出, 随着秸秆用量的增加, 土壤全磷、Olsen-P 和无机磷中的 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P 均显著增加, 其中以 Olsen-P 增幅最大。马艳梅^[40]通过对长期定点下不同施肥处理对磷素形态转化的研究表明, 秸秆还田后, 土壤有机磷主要向中稳性有机磷和高稳性有机磷转化, 而不利活性较强的有机磷组分的积累。本文中, 采用 Hedley 磷分级法对各处理土壤进行磷素分级, 4 种磷素量大小表现为 HCl -P > $NaOH$ -P > $NaHCO_3$ -P > H_2O -P (表 3)。与中等活性磷 (HCl -P 和 $NaOH$ -P) 相比, 土壤水溶态无机磷 (H_2O -P) 和活性磷 ($NaHCO_3$ -P) 只占了土壤全磷的很少一部分, 这与张奇春等^[41]的研究结果保持一致。秸秆还田在不造成土壤磷素大量盈余的情况下进一步提高了土壤有效磷浓度, 原因可能是秸秆碳活化了土壤磷库^[42], 促进了土壤磷素有效化。随着秸秆和生物炭添加量的增加, HCl -P 和 $NaOH$ -P 量逐渐减小, 而对应的 Olsen-P 量逐渐增大 (图 1)。添加生物炭处理中, Olsen-P 与 H_2O -P、 $NaHCO_3$ -P 量极显著正相关, 添加秸秆处理中, Olsen-P 量与 $NaOH$ -P、 HCl -P 量极显著正相关 (图 2), 这表明 HCl -P、 $NaOH$ -P、 $NaHCO_3$ -P 和 H_2O -P 在土壤供磷中可能起着重要的缓冲作用, 秸秆和生物炭本身含有一定的磷, 在土壤中腐解后其中一部分可以转化成土壤有效态磷^[43]。且有学者指出, 当土壤有效磷量处于极低水平、土壤有效磷处于消耗状态时, 作物吸收利用的磷素主要来自非活性磷库的补充^[44-45], 即中稳性和稳性磷向活性磷转化。探讨生物炭对土壤磷素转化的影响研究发现, 不同剂量秸秆生物炭处理均能显著提高水稻土和赤红壤的全磷及有效磷量, 且增加幅度随生物炭添加剂量的增加而升高^[46]。因此, 适量的秸秆还田或生物炭添加的投入可以维持土壤磷供应能力, 对土壤活性磷具有补充作用。

3.3 添加生物炭和秸秆对土壤其他理化性质影响

前人^[47]研究结果表明, 施用生物炭后红壤理化性质得到不同程度的改善; 土壤 pH 值、有机碳和

有效磷量在油菜各生育期均得到不同程度的提高。通过盆栽试验研究不同生物质炭添加量对烤烟土壤养分影响发现, 施用生物炭显著提高了土壤有机质量、土壤速效氮量、速效磷量^[48]。本文结果显示秸秆还田和生物炭添加显著增加了土壤中有效磷 (Olsen-P)、总氮 (TN)、pH、有机碳 (SOC) 和可溶性有机碳 (DOC) 量 (表 2、图 1), 且添加生物炭处理土壤中 Olsen-P 量与 pH 和 SOC 量极显著正相关。这是由于生物炭自身属于碱性, 施入土壤有助于提高土壤 pH。此外, 有机碳是土壤的重要组成部分, 可通过矿化释放磷, 可对土壤溶液中的磷进行补充更新^[49]。添加秸秆处理土壤中 Olsen-P 量与 TN 量显著正相关 (图 2)。可见, 农田中添加生物炭和秸秆处理对提升土壤中磷素量起到积极作用, 且添加生物炭和秸秆还可提升土壤总氮量、有机质量等。

4 结论

生物炭和秸秆添加均可提高土壤中 Olsen-P 量, 且随着用量的增加, 土壤 Olsen-P 量逐渐增加。其中, 生物炭处理在水田土壤中对提升 Olsen-P 量影响更显著, 秸秆处理在旱地土壤中对提升 Olsen-P 量更显著。生物炭和秸秆处理下中等活性磷 (HCl -P 和 $NaOH$ -P) 在土壤中占全磷量比重更大, 水溶态无机磷 (H_2O -P) 和活性磷 ($NaHCO_3$ -P) 只占了土壤全磷的很少一部分。由高到低依次表现为 HCl -P > $NaOH$ -P > $NaHCO_3$ -P > H_2O -P。生物炭增加了土壤 pH、TN、DOC 和 SOC 量。而秸秆增加了土壤 TP、DOC 和 SOC 量。生物炭处理下土壤 Olsen-P 量与 H_2O -P、 $NaHCO_3$ -P、SOC 和 NH_4^+ -N 量极显著正相关。秸秆处理下土壤 Olsen-P 量与 $NaOH$ -P、 HCl -P、TN 和 NH_4^+ -N 量显著正相关。

参考文献:

- [1] KUNITO T, HIRUTA N, MIYAGISHI Y, et al. Changes in phosphorus fractions caused by increased microbial activity in forest soil in a short-term incubation study[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2018, 30(1): 9-13.
- [2] YUAN J H, WANG L, CHEN H, et al. Responses of soil phosphorus pools accompanied with carbon composition and microorganism changes to phosphorus-input reduction in paddy soils[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 83-93.
- [3] PASTORE G, KERNCHEN S, SPOHN M. Microbial solubilization of silicon and phosphorus from bedrock in relation to abundance of phosphorus-solubilizing bacteria in temperate forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108 050.
- [4] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(2): 215-222.
- XU Jianglai, HU Naijuan, ZHU Liqun. Effect of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 215-222.

- [5] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1 606-1 612.
CAI Guan, HU Yajun, WANG Tingting, et al. Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil[J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1 606-1 612.
- [6] 高天一, 李娜, 彭靖, 等. 连续施用生物炭对棕壤磷素形态及有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1 451-1 460.
GAO Tianyi, LI Na, PENG Jing, et al. Effect of consecutive application of biochar on phosphate morphology and availability in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9): 1 451-1 460.
- [7] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 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): 1 402-1 417.
YUAN Shuai, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1 402-1 417.
- [8] 魏永霞, 朱焯豫, 刘慧. 连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 291-301.
WEI Yongxia, ZHU Tianyu, LIU Hui. Effects of successive application of biochar on soil improvement and maize yield of black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 291-301.
- [9] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 422-432.
FENG Huilin, XU Chensheng, HE Huanhui, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 422-432.
- [10] KALKHAJEH Y K, HE Z F, YANG X R, et al. Co-application of nitrogen and straw-decomposing microbial inoculant enhanced wheat straw decomposition and rice yield in a paddy soil[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2021, 4: 100 134.
- [11] OGWU M C, KERFAHI D, SONG H, et al. Changes in soil taxonomic and functional diversity resulting from gamma irradiation[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 7 894.
- [12] ZHANG H Z, SHI L L, LU H B, et al. Drought promotes soil phosphorus transformation and reduces phosphorus bioavailability in a temperate forest[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 732: 139 295.
- [13] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 309-317.
JIANG Bingshen, SHEN Jianlin, WANG Juan, et al. Effect of straw incorporation on biologically-based phosphorus fractions and phosphorus uptake by rice in paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 309-317.
- [14] 陈世俭, 马毅杰. 潜育化作用对水稻土磷素形态与供磷能力的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 275-277.
CHEN Shijian, MA Yijie. Effects of soil gleyization on phosphorus fractions and supply in paddy soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 275-277.
- [15] 杨世梅, 何腾兵, 杨丽, 等. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 75-81.
YANG Shimei, HE Tengbing, YANG Li, et al. Effects of straw and biochar mulching on the soil nutrients and greenhouse gas emissions[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2022, 48(1): 75-81.
- [16] HU Y J, SUN B H, WU S F, et al. After-effects of straw and straw-derived biochar application on crop growth, yield, and soil properties in wheat (*Triticum aestivum* L.)-maize (*Zea mays* L.) rotations: A four-year field experiment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: 146 560.
- [17] 常西亮, 胡雪菲, 蒋煜峰, 等. 不同温度下小麦秸秆生物炭的制备及表征[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 24-29.
CHANG Xiliang, HU Xuefei, JIANG Yufeng, et al. Biochar made from wheat straw: Preparation and characterization[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(4): 24-29.
- [18] YANG Y P, TANG X J, ZHANG H M, et al. The characterization of arsenic biotransformation microbes in paddy soil after straw biochar and straw amendments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 391: 122 200.
- [19] YAO R J, LI H Q, YANG J S, et al. Interactive effects of amendment materials and soil salinity on net rates of urea hydrolysis and nitrification in salt-affected soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(4): 3 414-3 427.
- [20] 甘国渝, 陈曦, 朱海, 等. 水热耦合对不同土地利用类型土壤磷生物有效性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 58-66.
GAN Guoyu, CHEN Xi, ZHU Hai, et al. Hydrothermal effects on phosphorus bioavailability in different soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 58-66.
- [21] 谢英荷, 洪坚平, 韩旭, 等. 不同磷水平石灰性土壤 Hedley 磷形态生物有效性的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 141-144.
XIE Yinghe, HONG Jianping, HAN Xu, et al. Study on soil bioavailability of the hedley P forms in calcareous soil with different phosphorus level[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 141-144.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] 田静, 郭景恒, 陈海清, 等. 土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 338-346.
TIAN Jing, GUO Jingheng, CHEN Haiqing, et al. Effect of land use on composition of soil dissolved organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 338-346.
- [24] 黄少辉, 杨军芳, 刘学彤, 等. 长期小麦秸秆还田对壤质潮土磷素含量及磷盈亏的影响[J]. 作物杂志, 2020(6): 89-96.
HUANG Shaohui, YANG Junfang, LIU Xuetong, et al. Effects of wheat long-term straw returning on soil phosphorus content and phosphorus balance in loamy tidal soil[J]. Crops, 2020(6): 89-96.
- [25] 王秀娟, 解占军, 何志刚, 等. 秸秆还田条件下减量施磷对玉米产量、磷素利用率及土壤磷含量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(8): 39-44.
WANG Xiujuan, XIE Zhanjun, HE Zhigang, et al. Effects of reducing phosphorus application on maize yield, phosphorus use efficiency and soil phosphorus content under straw returning condition[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(8): 39-44.
- [26] 王国驹, 宋鹏, 杨振中, 等. 秸秆还田对水稻光合物质生产特征、稻米品质和土壤养分的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 67-72.
WANG Guojiao, SONG Peng, YANG Zhenzhong, et al. Effects of straw returning on photosynthetic matter production characteristics, quality of rice and soil nutrients[J]. Crops, 2021(4): 67-72.
- [27] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4 446-4 456.
HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yilin, et al. Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils[J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4 446-4 456.
- [28] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. 作物杂志, 2015(2): 78-83.
ZHAN Houqiang, YAN Shuangshuang, WANG Jiarui, et al. Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil[J]. Crops, 2015(2): 78-83.
- [29] 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 131-135.
LIU Yiguo, LIU Yonghong, LIU Hongjun, et al. Effects of straw returning amount on soil physical and chemical properties and yield of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(3): 131-135.
- [30] 信秀丽, 钦绳武, 张佳宝, 等. 长期不同施肥下潮土磷素的演变特征[J].

- 植物营养与肥科学报, 2015, 21(6): 1 514-1 520.
- XIN Xiuli, QIN Shengwu, ZHANG Jiabao, et al. Dynamics of phosphorus in fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1 514-1 520.
- [31] 袁访, 李开钰, 杨慧, 等. 生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4 655-4 661.
- YUAN Fang, LI Kaiyu, YANG Hui, et al. Effects of biochar application on yellow soil nutrients and enzyme activities[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4 655-4 661.
- [32] ARUNKUMAR B R, THIPPESHAPPA G N. Effect of levels of biochar and FYM on physico-chemical properties, nutrients release and carbon dioxide evolution from the soil[J]. International Journal of Chemical Studies, 2020, 8(1): 2 389-2 395.
- [33] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
- LIU Yuxue, LIU Wei, WU Weixiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 977-982.
- [34] ZHAO X R, LI D, KONG J, et al. Does biochar addition influence the change points of soil phosphorus leaching? [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 499-506.
- [35] 王若水, 康跃虎, 万书勤, 等. 水分调控对盐碱地土壤盐分与养分及分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 96-104.
- WANG Ruoshui, KANG Yuehu, WAN Shuqin, et al. Effects of water regulation methods on soil salt, nutrient content and its distribution in overlying saline wasteland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 96-104.
- [36] 田娟, 刘凌, 董贵明, 等. 淹水土壤磷释放机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 426-430.
- TIAN Juan, LIU Ling, DONG Guiming, et al. Study progress of phosphorus release mechanics in flooded soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 426-430.
- [37] MKHABELA M S, WARMAN P R. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 106(1): 57-67.
- [38] 赵小军, 李志洪, 刘龙, 等. 种还分离模式下玉米秸秆还田对土壤磷有效性及其有机磷形态的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 243-247.
- ZHAO Xiaojun, LI Zhihong, LIU Long, et al. Effects of maize straw returning on soil phosphorus availability and organic phosphorus forms under the mode of planting and returning[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 243-247.
- [39] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95-101.
- [40] 马艳梅. 长期定点施肥对白浆土磷素形态转化的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(2): 39-41.
- MA Yanmei. Effects of long-term location fertilization on the transformation of various phosphorus forms in albic soil[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2006, 18(2): 39-41.
- [41] 张奇春, 王光火, 冯玉科. 水稻肥料定位试验中土壤各形态磷的变化动态研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(1): 82-88.
- ZHANG Qichun, WANG Guanghuo, FENG Yuke. Research on soil phosphorus dynamic change under rice fertilization experiments[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2007, 33(1): 82-88.
- [42] JING Z W, CHEN R R, WEI S P, et al. Response and feedback of C mineralization to P availability driven by soil microorganisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 105: 111-120.
- [43] SALEQUE M A, NAHER U A, ISLAM A, et al. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1 635-1 644.
- [44] AULAKH M S, KABBA B S, BADDESHA H S, et al. Crop yields and phosphorus fertilizer transformations after 25 years of applications to a subtropical soil under groundnut-based cropping systems[J]. Field Crops Research, 2003, 83(3): 283-296.
- [45] DAKORA F D, PHILLIPS D A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments[J]. Plant and Soil, 2002, 245: 35-47.
- [46] 宋文涛, 田纪辉, 董宇豪, 等. 秸秆生物炭对水稻土和赤红壤磷素有效性及化学形态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(6): 1 422-1 429.
- SONG Wentao, TIAN Jihui, DONG Yuhao, et al. Effects of straw biochar amendment on the availability and fractions of phosphorus in paddy soil and lateritic red soil[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(6): 1 422-1 429.
- [47] 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有效磷含量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 989-994.
- JING Yan, CHEN Xiaomin, LIU Zuxiang, et al. Effects of combined application of biochar and inorganic fertilizers on the available phosphorus content of upland red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 989-994.
- [48] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 85-92.
- ZHAO Dianfeng, XU Jing, LUO Xuan, et al. Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition of tobacco[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(3): 85-92.
- [49] OHNO T, HOSKINS B R, ERICH M S. Soil organic matter effects on plant available and water soluble phosphorus[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(6): 683-690.

Effects of Straw Incorporation and Biochar Amendment on Olsen-P and Phosphorus Fraction in Soil

GAN Guoyu¹, JIN Huifang¹, LI Yanli¹, Yang Jun¹, LI Jifu^{1*}, YAO Rongjiang², YANG Jinsong², ZHU Hai^{1,2*}

(1. College of Agriculture, Yangtze University/Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland,

Ministry of Education, Jingzhou 434025, China; 2. Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences/

State Key Laboratory of Soil and Agricultural Sustainable Development, Nanjing 210008, China)

Abstract: 【Objective】The low mobility of phosphorus in soil is a main factor limiting its bioavailability. In this paper. The efficacy of straw incorporation and biochar amendment in improving Olsen-P and changing P fraction in soil was studied. 【Method】The study was based on incubation experiment. Soil taken from a rice field was used in

experiments under two soil water contents to mimic paddy field and dried land, respectively. For each soil water treatment, there were four soil amendments: a high (BC2) and a low (BC1) biochar amendment, a high (SC2) and a low (SC1) straw incorporation. The control is without soil amendment (CK). The Hedley phosphorus speciation method was used to classify P fraction in each treatment, and the Olsen-P content and other soil physicochemical properties were measured using standard methods. **【Result】** Depending on its application rate, biochar amendment increased Olsen-P content in the dried soil and the paddy soil by 1.78 to 1.46 mg/kg and 12.04~22.42 mg/kg, respectively. Straw incorporation increased Olsen-P content in the dried soil and the paddy soil by 4.46~1.72 mg/kg and 6.37 to 4.27 mg/kg, respectively, also depending on its application amount. The phosphorus components varied with treatment but in all treatments, it was found that $\text{HCl-P} > \text{NaOH-P} > \text{NaHCO}_3\text{-P} > \text{H}_2\text{O-P}$. Biochar amendment increased soil pH, total nitrogen (TN), soluble organic carbon (DOC) and organic carbon (SOC) content, while straw incorporation increased soil total phosphorus (TP), DOC and SOC content. In soil amended with biochar, Olsen-P content was positively correlated with $\text{H}_2\text{O-P}$, $\text{NaHCO}_3\text{-P}$, SOC and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, at significant level, while in soil amended with straw, Olsen-P content was positively correlated with NaOH-P , HCl-P , TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, also at significant level. **【Conclusion】** Biochar amendment and straw incorporation promoted accumulation of Olsen-P in the soils, primarily affected by change in soil pH, TN, and SOC, as well as the changes in phosphorus components. These enhanced the bioavailability of phosphorus.

Key words: biochar; straw; Hedley phosphorus classification method; Olsen-P

责任编辑：赵宇龙

(上接第 32 页)

Monitoring Winter Wheat Growth and Analyzing Its Determinants Using High-Resolution Satellite Imagery

WANG Le¹, FAN Yanguo^{1*}, FAN Bowen², WANG Yong³

(1. China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Yantai Geographic Information Center, Yantai 264000, China)

Abstract: 【Objective】 Winter wheat is the second-largest stable crop in China and comprehending its growth and the factors affecting it on a large scale is crucial for food security. This paper aims to investigate the feasibility of using satellite imagery to accomplish this objective. **【Method】** The study is based on Sentinel-2 images. The spatial distribution of winter wheat planted from 2018 to 2020 in the studied region was extracted using the random forest method, which were then used to analyze the changes in wheat growth in rejuvenation, jointing, pregnant ear pumping, and flowering stages in each year. For comparison, we divided the growth into health growth, normal growth and poor growth. Wheat growth was linked to 11 abiotic and geographic factors, including temperature, precipitation, slope of the lands, slope aspect, elevation, soil type, soil moisture, sunshine time, population density, rural labor resources and GDP. **【Result】** Compared with 2018—2019, wheat in 2020 grew better during the greening and jointing stages in more than 90% of the studied area, but worse in the pregnant ear pumping stage in more than 20% of the studied area. Wheat growth was normal during the flowering stage in 80% of the studied area. The factors which affect winter wheat growth were ranked in the following order based on their significance: rural labor resources > soil moisture > precipitation > temperature > sunshine time. It was also found that the interaction between different factors in their impact on wheat growth is manifested as a bifold or nonlinear enhancement. **【Conclusion】** The change in winter wheat growth in the studied region is due to the complex interplay of multiple factors.

Key words: winter wheat; area extraction; growth monitoring; geographic detector; Weishan Irrigation District

责任编辑：赵宇龙