



卢志红, 魏宗强, 杨敏琪, 等. 有机物料添加磷素释放动态与土壤磷组分响应[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1582-1591.

LU Z H, WEI Z Q, YANG M Q, et al. Phosphorus release dynamics of organic amendments and soil phosphorus fractions response[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6): 1582-1591.

有机物料添加磷素释放动态 与土壤磷组分响应

卢志红, 魏宗强, 杨敏琪, 颜 晓*, 吴建富

(江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】为农业生产中秸秆等的资源化利用及广辟磷源、磷素高效利用提供理论依据。【方法】通过不同物料(紫云英秸秆、油菜秸秆、400 °C稻壳生物质炭、700 °C稻壳生物质炭、无机磷肥)等磷量添加入土壤,进行18周恒温培养试验;采用土壤颗粒有机质分离法与修正的Hedley化学连续浸提法相结合,研究物料磷素释放动态与土壤磷素形态响应转化机制。【结果】(1)紫云英秸秆添加入土壤腐解后,有最高的磷素释放率,达95.4%;其次为700 °C稻壳生物质炭,磷的释放率为77.3%;而400 °C稻壳生物质炭与油菜秸秆,磷素释放不显著。(2)等磷量各物料添加对土壤无机磷的提升率由高到低顺序为:紫云英秸秆,700 °C稻壳生物质炭,400 °C稻壳生物质炭,油菜秸秆,无机磷肥;对土壤 conHCl-P_o 组分的提升率顺序为:紫云英秸秆,油菜秸秆,400 °C稻壳生物质炭,而700 °C稻壳生物质炭添加与无机磷肥添加,对土壤有机磷组分均无影响;各物料添加对土壤Residual-P组分的提升率顺序为:700 °C稻壳生物质炭,400 °C稻壳生物质炭,紫云英秸秆,油菜秸秆,无机磷肥。(3)就土壤磷组分而言,外源磷的添加,均以提升土壤Residual-P组分为主,其提升率最高;土壤各无机磷组分中,外源有机物料添加均以HCl-Pi组分提升率最高,而等磷量无机磷肥添加,以Resin-Pi组分提升率最高,HCl-Pi组分次之。外源磷的添加能显著提升土壤磷素有效性;有机物料添加对土壤磷素有效性的提升效果均显著优于等磷量无机磷肥添加。【结论】农业生产中,相对于其他有机物料,紫云英等绿肥作物还田,在土壤磷素有效性及土壤供磷能力提升方面有明显优势。土壤颗粒有机质分离法用于分离土壤与秸秆腐解残余物以监测秸秆腐解动态,经试验验证及物料回收率数据来看,此法在技术上可行,但后续仍需更多的研究加以对比验证。

关键词: 秸秆; 生物质炭; 土壤培养; 颗粒态有机质(POM); Hedley P组分

中图分类号: S156.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2022)06-1582-10

Phosphorus Release Dynamics of Organic Amendments and Soil Phosphorus Fractions Response

LU Zhihong, WEI Zongqiang, YANG Minqi, YAN Xiao*, WU Jianfu

(College of Environmental and Land Resource Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

收稿日期: 2022-02-23 修回日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967014)和江西省自然科学基金项目(20161BAB213080, 20212BAB205012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(41967014) and the National Natural Science Foundation of Jiangxi Province(20161BAB213080, 20212BAB205012)

作者简介: 卢志红, orcid.org/0000-0001-5639-4705, luzhihong1@163.com; *通信作者: 颜晓, 博士, 副教授, 主要从事土壤养分循环方面的研究, orcid.org/0000-0002-9494-922X, yx198499@126.com。

Abstract: [Objective] This study aims to supply theoretical foundations for utilization of straw and green manure resources, and high phosphorus (P) use efficiency in agricultural production. [Method] An 18-week soil incubation experiment was conducted to study the P release dynamics of organic amendments (Chinese milk vetch, rape straw, 400 °C rice husk biochar and 700 °C rice husk biochar) and soil P transformation mechanisms by the methods of soil particulate organic matter (POM) separation and modified Hedley chemical sequential fractionation. [Result] After 18 weeks, the Chinese milk vetch had the highest P release rate about 95.4%, followed by 700 °C rice husk biochar (77.3%); 400 °C rice husk biochar and rape straw had no significant P release. The sequence of soil inorganic P (IP) increase rates after 18 weeks incubation by organic amendments with equivalent P input was: Chinese milk vetch addition > 700 °C rice husk biochar addition > 400 °C rice husk biochar addition > rape straw addition > chemical fertilizer addition; the sequence of soil conHCl-P_o increase rates was: Chinese milk vetch addition > rape straw addition > 400 °C rice husk biochar addition, 700 °C rice husk biochar addition and chemical fertilizer addition had no significant effects on soil organic P (OP); the sequence of soil residual-P increase rates was: 700 °C rice husk biochar addition > 400 °C rice husk biochar addition > Chinese milk vetch addition > rape straw addition > chemical fertilizer addition. For soil P fractions, soil residual-P fraction had the highest increase rates by exogenous P additions. For soil IP fractions, HCl-P_i had the highest increase rates by organic amendments; Resin-P_i had the highest increase rate by chemical fertilizer addition with equivalent P input, followed by soil HCl-P_i fraction. Compared with chemical fertilizer addition, organic amendments with equivalent P input may significantly increase soil P availability. [Conclusion] Green manure crops such as Chinese milk vetch have the obvious advantage in promoting soil P supply ability and soil P availability. The methods of soil POM separation was successfully employed in separating soil and straw residues to track straw decomposition dynamics, however, more studies are needed for comparative verification.

Keywords: straw; biochar; soil incubation experiment; soil particulate organic matter (POM); Hedley P fractions

【研究意义】磷在土壤中易被黏土矿物或铁、铝、钙等矿质离子固定,其有效性普遍不高,尤其在亚热带及热带地区土壤^[1]。长期大量磷肥的投入,已极大提升农田土壤磷素有效性,同时也消耗了大量磷矿石原料。肥料磷源的不可再生性及快速消耗将严重限制农业的可持续发展^[2]。秸秆及其生物质炭制品作为农业生产系统中重要的生物资源,在土壤养分调节及高效利用等方面发挥了巨大作用。【前人研究进展】关于秸秆、绿肥等还田腐解的磷素释放特征,前人已做了大量研究^[3-9],但还田后磷素释放对土壤磷组分的影响,研究相对较少。究其原因之一是受限于相关研究方法。较早的研究采用测定土壤与秸秆混合物来间接研究还田秸秆磷素释放对土壤磷形态的影响^[10-12];较多研究者采用“网袋法”监测秸秆腐解动态及养分释放规律^[8,13]。该法操作方便,易于获取不同降解阶段的秸秆进行直接观测。但是,网袋法不能保证秸秆与土壤充分接触,特别是在袋内秸秆较多的情况下,一定程度上无法真实反映秸秆养分的释放及养分在土壤中的转化情况。Salas等^[14]采用颗粒有机质分离法成功地研究了秸秆在淋溶土(Alfisol)与老成土(Ultisol)中的腐解过程与释磷特征;Ha等^[15]通过颗粒有机质分离法全面研究了秸秆降解过程中碳、氮、磷的释放以及微生物群落结构变化。土壤颗粒有机质(particulate organic matter, POM)主要是指土壤中与砂粒(>53 μm)结合的植物残体半分解产物^[16],可用于表征不同腐解阶段的秸秆残体。【本研究切入点】与网袋法相比,通过分离土壤颗粒有机质来获取不同腐解阶段的秸秆残体,既可保证秸秆还田后与土壤的充分接触,又能恰当地将秸秆与土壤分离,可能会更有效地揭示秸秆的腐解释磷机制及秸秆磷在土壤中的形态转化过程。但目前颗粒有机质分离仍主要用于研究土壤的碳氮转化过程,在研究秸秆腐解及其释磷特征方面应用较少。【拟解决的关键问题】本研究采集亚热带地区常见还田作物紫云英、油菜秸秆及稻壳生物质炭等,以等磷量添加入土壤,进行恒温培养试验;通过颗粒有机质分离法分离土壤与秸秆残余物,以监测秸秆磷素释放动态;采用修正的Hedley连续浸提法^[17-18]表征物料腐解过程中土壤磷素形态响应;探讨不同物料添加,物料磷素释放与土壤磷素形态转化机制,以期为农业生产中秸秆等的资源化利用及广辟磷源、磷素高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自江西省南昌市向塘镇,土壤类型为发育于第四纪红色黏土的肥熟旱耕人为土。作物收获后采集0~20 cm耕层土壤,经风干过筛后,混匀备用。其基本理化性质为:有机质23.4 g/kg,全氮1.04 g/kg,全磷2.86 g/kg,碱解氮131 mg/kg,速效磷176 mg/kg,速效钾254 mg/kg,pH为7.15,粘粒9.7%,砂粒59.3%,粉粒31.0%,土壤为砂质壤土。

供试有机物料如秸秆、稻壳等原材料均采自江西农业大学绿肥基地。紫云英、油菜秸秆收集风干后切成2 cm左右备用。稻壳生物质炭为自制,稻壳用蒸馏水洗净烘干,粉碎过2 mm筛,过筛后的稻壳置于用锡箔纸包裹的坩埚内以隔绝空气,分别于400 °C和700 °C的马弗炉中炭化1 h,即得400 °C稻壳生物质炭和700 °C稻壳生物质炭样品(60目)。供试有机物料的养分状况见表1。供试无机磷肥选用磷酸二氢钠(A.R.)。

表1 供试有机物料养分状况

Tab.1 Basic nutrient contents of tested organic materials

物料种类 Organic materials	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	全磷/(g·kg ⁻¹) Total P	全氮/(g·kg ⁻¹) Total N	C/P	C/N
紫云英秸秆 Chinese milk vetch	934.06	2.18	18.60	248.5	29.1
油菜秸秆 Rape straw	898.28	1.08	5.75	482.4	90.6
400 °C稻壳生物质炭 400 °C rice husk biochar	674.62	5.51	1.07	71.0	365.7
700 °C稻壳生物质炭 700 °C rice husk biochar	527.40	6.98	1.64	43.8	186.5

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计 试验为室内培养,分别称取50 g过2 mm筛的风干土壤样品与上述一定量的物料充分混匀,置于100 mL塑料瓶中,于25 °C恒温培养18周。试验共设置6个处理:(1)不添加物料(CK);(2)添加无机磷肥磷酸二氢钠(P);(3)添加紫云英秸秆(AS);(4)添加油菜秸秆(BS);(5)添加400 °C制备的稻壳生物质炭(RB400);(6)添加700 °C制备的稻壳生物质炭(RB700)。各处理物料按以纯磷30 mg/kg等磷量添加。培养期内以称重法保持田间持水量的60%。每个处理设置21个重复,分别于培养的第0、1、2、3、6、12、18周进行破坏性取样,每次每处理取3个重复。各阶段土壤采集后,风干、过筛备用。

1.2.2 有机物料的腐解监测 借鉴土壤有机质分组中颗粒态有机质(POM)提取的方法^[14,16],将培养各阶段土壤中的有机物料分离,以监测各阶段有机物料的腐解情况。称取培养各阶段的风干土样20 g,加入60 mL 0.05 mol/L的NaCl溶液,于振荡器上以150 r/min震荡2 h,过53 μm的筛,用蒸馏水反复冲洗。留在筛上的是砂和POM的混合物,此混合物通过浮选再进一步分离。

转移筛上物于铝盒中,烘干至恒重,转入50 mL离心管,加入35 mL的NaI(密度1.85 g/cm³),缓慢手动震荡混合,于离心机中1 250 g离心45 min,过0.45 μm滤膜抽滤,并洗去多余的NaI。转移滤膜上残留物于一预先称重的锡箔纸上,于60 °C烘至恒重。烘干后的POM称重,磨细备用。采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—钼锑抗比色法进行POM-P的测定。

1.2.3 土壤磷素分组 采用修正的Hedley化学连续浸提法^[17-18]提取各培养阶段土壤的磷素组分:称取0.5 g风干土于50 mL离心管中,逐级采用阴离子交换树脂、0.5 mol/L NaHCO₃、0.1 mol/L NaOH、1 mol/L HCl和浓HCl进行提取,每次提取震荡时间为16 h,之后离心(2 100 g, 15 min)、过滤收集悬液。最后浸提残留的样品采用浓H₂SO₄-H₂O₂消解测定全磷。浸提液无机磷和总磷分别采用钼蓝比色法和ICP法测定,有机磷用差减法计算。

1.3 数据处理与分析

运用Excel2010和SAS8.2进行数据处理与统计分析,采用Origin8.1作图。不同处理间的差异分析采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(Duncan)检验($P<0.05$)。有机物料磷与土壤磷组分的相关分析采用Pearson法。

2 结果与分析

2.1 有机物料的腐解动态

借鉴土壤有机质分组中颗粒态有机质(POM)提取的方法,将不同有机物料添加处理培养各阶段的有机物料再分离,以监测各阶段有机物料的腐解情况。从回收率来看,培养初始(第0周)有机物料回收率分别为AS 77.3%,BS 126%,RB400 82.2%,RB700 91.3%;有机物料磷的回收率分别为AS 72.5%,BS 132%,RB400 44.1%,RB700 72.7%。

不同处理有机物料腐解趋势相似,均表现为有机物料质量的缓慢递减(图1a)。AS处理在物料添加的第1周内腐解速率最大,紫云英秸秆腐解率为31.4%,至培养第12周时腐解74.6%,第18周培养结束时腐解82.5%。BS处理在培养的前12周,油菜秸秆基本不腐解,第18周培养结束时仅腐解39.7%。RB400、RB700处理在整个培养期内稻壳生物质炭质量均无显著变化($P>0.05$)。

不同处理有机物料腐解残余磷的变化趋势亦大体一致(图1b)。AS处理在培养的第12周,紫云英秸秆磷素含量有显著的降低($P<0.05$),秸秆磷的释放率为73.2%,至培养第18周,磷的释放率达95.4%。BS与RB400处理,在培养期内,油菜秸秆磷与稻壳生物质炭磷变化均不明显。RB700处理在培养第18周时,有稻壳生物质炭磷的显著降低($P<0.05$),磷的释放率为77.3%。

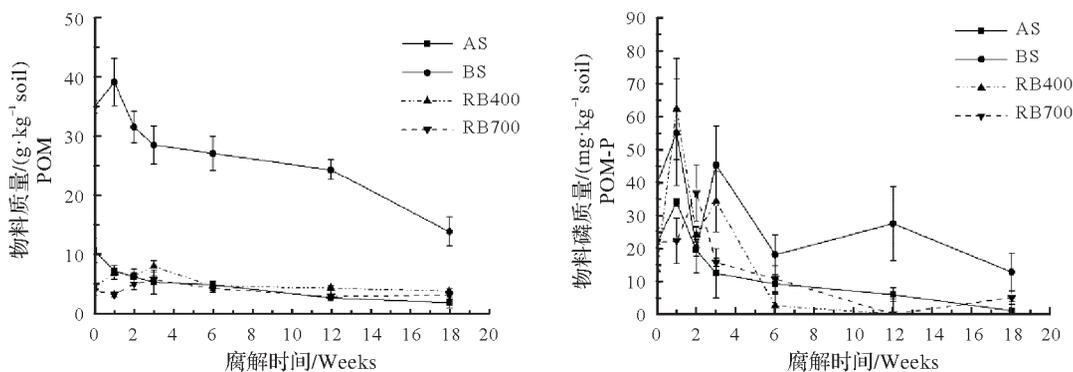


图1 有机物料的腐解(a)与磷素残留(b)动态

Fig.1 Decomposition dynamics (a) and residual P dynamics (b) of organic materials

2.2 物料添加对土壤磷组分含量的影响

由修正的Hedley连续浸提法测得,在供试土壤各磷素组分中,以HCl-Pi与NaOH-Pi两组分含量最高(表2)。培养结束后,各有机物料添加处理(AS、BS、RB400、RB700)均不同程度地显著提升了土壤各无机磷组分的含量($P<0.05$);无机磷肥添加处理(P)显著提升了Resin-Pi、NaOH-Pi、HCl-Pi和conHCl-Pi等无机磷组分含量($P<0.05$)(表2)。整体来看,等磷量不同物料添加培养结束时,以AS处理土壤各无机磷组分含量最高,其对土壤各无机磷组分含量的提升效果最优,由高到低顺序为RB700、RB400、BS和P处理。即等磷量无机磷肥添加,其对土壤各无机磷组分的提升效果显著低于各有机物料添加处理($P<0.05$)。AS处理对Resin-Pi、NaHCO₃-Pi、NaOH-Pi、HCl-Pi和conHCl-Pi的提升率分别为14.38%, 16.23%, 12.15%, 21.19%, 18.0%; RB700处理对土壤各无机磷组分的提升率分别为14.65%, 14.43%, 10.20%, 19.11%, 11.21%; RB400处理的提升率分别为13.06%, 13.66%, 9.68%, 20.15%, 9.16%; BS处理土壤各无机磷组分含量分别提升9.18%, 8.11%, 7.08%, 17.50%, 9.59%; P处理对Resin-Pi、NaOH-Pi、HCl-Pi和conHCl-Pi的提升率分别为5.84%, 2.21%, 5.58%, 3.13%。

就土壤有机磷组分,物料添加未显著提升NaHCO₃-Po、NaOH-Po含量($P>0.05$); AS、BS、RB400处理显著提升了土壤中conHCl-Po含量($P<0.05$),提升率分别为23.22%、17.0%、14.23%。

添加外源磷显著提升了 Residual-P 组分含量,其中有机物料添加处理(RB700、RB400、AS、BS)提升作用尤为显著($P<0.05$)。RB700、RB400、AS、BS 及 P 处理土壤 Residual-P 含量分别提升 64.35%, 48.51%, 44.55%, 32.67%, 23.76%, 即等磷量添加稻壳生物质炭对土壤 Residual-P 的提升作用要大于等磷量秸秆、无机磷肥添加处理。

表2 培养结束后不同物料添加土壤磷组分含量
Tab.2 The soil P fraction contents after incubation

处理 Treatments		CK	P	AS	BS	RB400	RB700
无机磷 IP	Resin-Pi	339.60 e	359.42 d	388.45 a	370.78 c	383.94 b	389.35 a
	NaHCO ₃ -Pi	263.85 d	269.93 d	306.66 a	285.25 c	299.90 b	301.92 ab
	NaOH-Pi	693.52 e	708.85 d	777.79 a	742.64 c	760.67 b	764.27 b
	HCl-Pi	714.48 c	754.36 b	865.89 a	839.53 a	858.46 a	851.02 a
	conHCl-Pi	209.09 d	215.63 c	246.72 a	229.15 b	228.25 b	232.53 b
有机磷 OP	NaHCO ₃ -Po	202.65 a	199.40 a	206.77 a	202.45 a	199.68 a	199.35 a
	NaOH-Po	401.75 a	405.09 a	407.39 a	397.87 a	401.33 a	409.60 a
	conHCl-Po	103.79 c	109.04 bc	127.89 a	121.43 ab	118.56 ab	117.58 abc
	Residual-P	91.03 d	112.66 c	131.58 b	120.77 bc	135.19 ab	149.61 a

Resin-Pi 指阴离子交换树脂浸提的无机磷; NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 分别指 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提的无机磷和有机磷; NaOH-Pi、NaOH-Po 分别指 0.1 mol/L NaOH 浸提的无机磷和有机磷; HCl-Pi 指 1 mol/L HCl 浸提的无机磷; conHCl-Pi、conHCl-Po 分别指浓盐酸浸提的无机磷和有机磷; Residual-P 指残渣态磷。同一行之间小写字母不同,表示在 0.05 水平上差异显著,即 $P<0.05$ 。

Resin-Pi: Inorganic P extracted with resin strip; NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po: Inorganic P and organic P extracted with 0.5 mol/L NaHCO₃; NaOH-Pi、NaOH-Po: Inorganic P and organic P extracted with 0.1 mol/L NaOH; HCl-Pi: Inorganic P extracted with 1 mol/L HCl; conHCl-Pi、conHCl-Po: Inorganic P and organic P extracted with concentrated HCl; Residual-P: Residual P. Different small letters in the same row means significant difference among different treatments at 0.05 level.

2.3 土壤磷组分的动态变化

土壤各无机磷组分含量均表现为随培养时间先逐渐增加后稍有降低的趋势,各无机磷组分均有峰值出现;土壤各有机磷组分含量大体表现为随培养时间先稍有降低后逐渐增加的趋势,到培养结束时,达最大值(图2)。

CK、P 处理,在培养过程中,土壤各无机磷组分含量均有显著的动态波动。CK 处理在第 18 周培养结束时,NaHCO₃-Pi、conHCl-Pi 组分含量分别比培养初期第 1 周提升 2.36%、3.10%;其他无机磷组分 Resin-Pi、NaOH-Pi、HCl-Pi 含量与培养初期相比,未有显著变化($P>0.05$)。P 处理在第 18 周培养结束时,conHCl-Pi 组分含量比培养初期显著提升 3.77%,其他无机磷组分含量培养初期与后期无显著差异($P>0.05$)。AS、BS、RB400、RB700 处理,在培养过程中,土壤各无机磷组分含量随培养时间均呈现近似抛物线的变化趋势;各处理无机磷组分含量在培养第 12 周时出现峰值,后稍有降低。

土壤各有机磷组分含量动态变化与无机磷组分变化不同,NaHCO₃-Po、NaOH-Po 及 conHCl-Po 组分各处理分别在培养第 6、3、6 周有一个显著低谷,后随时间显著升高($P<0.05$)。AS、BS、RB400、RB700 处理,在第 18 周培养结束时与培养初期(第 1 周)相比,NaHCO₃-Po 组分含量提升率分别为 8.68%、9.14%、6.24%、5.56%;NaOH-Po 组分含量在培养结束时,各处理分别提升 14.4%、13.0%、15.4%、22.7%;conHCl-Po 组分含量,各处理分别提升 33.0%、31.5%、24.7%、24.3%。P 处理,在培养结束时与培养初期相比,3 个有机磷组分含量分别显著提升 9.75%、20.3%、20.7%。

CK、P 处理,在培养过程中,土壤 residual-P 含量无显著波动,培养前后无显著变化($P>0.05$)。AS、BS、RB400、RB700 处理,土壤 residual-P 含量呈现近似线性增加的趋势,在培养第 12 周出现 residual-P 的显著升高($P<0.05$),分别提升 43.4%、27.8%、36.5% 和 31.8%。

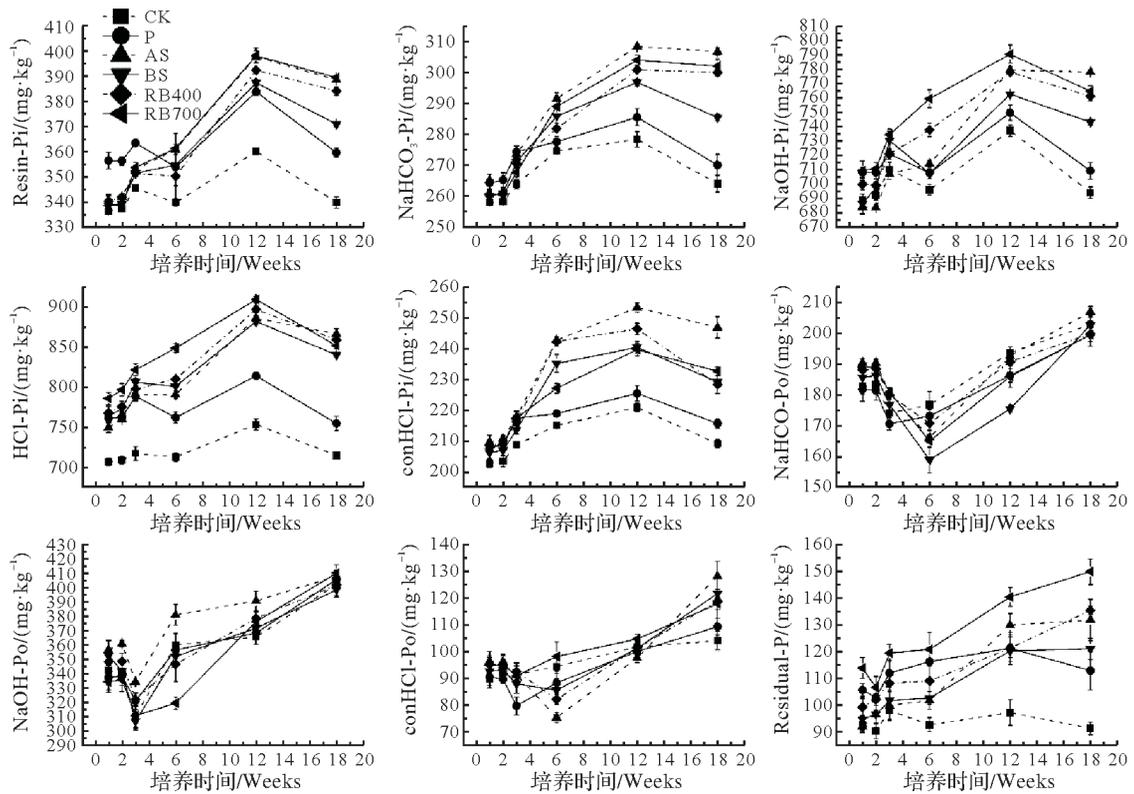


图2 土壤磷组分的动态变化

Fig.2 Dynamics of soil P fractions

2.4 有机物料磷与土壤磷组分的关系

讨论有机物料磷与土壤各磷组分的相关性(表3)。培养期间有机物料磷POM-P与土壤NaHCO₃-Po组分无显著相关性,但与土壤其他各磷组分均呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)负相关。在土壤各磷组分之间,NaHCO₃-Po除与Resin-Pi有显著正相关($P<0.05$)外,与其他各组分均无显著相关性。conHCl-Po除与conHCl-Pi无显著相关性外,与其他各组分均呈极显著正相关($P<0.01$)。其他各土壤磷组分之间均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

表3 有机物料磷与土壤磷组分的相关分析(N=72)

Tab.3 Correlation coefficients between organic materials P and soil P fractions(N=72)

	POM-P	Resin-Pi	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	HCl-Pi	conHCl-Pi	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Po	conHCl-Po	Residual-P
POM-P	1.000									
Resin-Pi	-0.577**	1.000								
NaHCO ₃ -Pi	-0.633**	0.928**	1.000							
NaOH-Pi	-0.570**	0.891**	0.869**	1.000						
HCl-Pi	-0.574**	0.902**	0.859**	0.951**	1.000					
conHCl-Pi	-0.608**	0.811**	0.912**	0.773**	0.764**	1.000				
NaHCO ₃ -Po	-0.121	0.283*	0.114	0.215	0.184	-0.050	1.000			
NaOH-Po	-0.422**	0.663**	0.669**	0.428**	0.461**	0.575**	0.539**	1.000		
conHCl-Po	-0.244*	0.535**	0.435**	0.503**	0.467**	0.184	0.724**	0.591**	1.000	
Residual-P	-0.531**	0.793**	0.746**	0.829**	0.781**	0.567**	0.354**	0.523**	0.619**	1.000

** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。

3 讨论

3.1 土壤磷组分

连续浸提法可在一定程度上定量土壤中磷素的赋存形态。不同类型的土壤,因土壤中“固磷底物”

类型及活性的差异,磷的赋存形态亦不同。在中性或碱性土壤中,土壤磷素形态以 Ca-P 为主或 HCl-Pi 组分居多^[11,18-21];而在热带或亚热带酸性土壤中,磷素形态以 Fe/Al-P 为主或 NaOH-Pi 组分居多^[22-24]。本试验中,供试土壤磷以 HCl-Pi 组分含量最高,其次为 NaOH-Pi;即供试土壤磷素赋存形态以钙结合态磷和铁铝结合态磷为主^[17-18]。本试验土壤为亚热带季风气候区第四纪红色黏土母质上发育的肥熟早耕人为土,该气候区域内典型的脱硅富铁铝化成土过程,造就了土壤中大量的 Fe/Al-P 的富集;但长期的早耕熟化,使得土壤发生复盐基作用(盐基组成中主要是钙)^[25],因而土壤中 Ca-P 与 Fe/Al-P 大量并存。陈利军等^[26]在江西红壤旱地上的研究也有相似的结论。

本研究结果显示,添加有机物料,显著提升了土壤无机磷、conHCl-Po(RB700 除外)及 Residual-P 组分含量;以 Residual-P、conHCl-Po、HCl-Pi 组分提升率最高。同条件下,等磷量添加无机磷肥,显著提升了土壤无机磷(NaHCO₃-Pi 除外)、Residual-P 组分含量;其中以 Residual-P、Resin-Pi、HCl-Pi 组分提升率最高。即无机外源磷可提升土壤无机磷含量尤其是活性无机磷(Resin-Pi);而有机外源磷可提升土壤无机磷和有机磷(conHCl-Po)。这与前人^[21,27]的研究结果相近。前人^[18]研究还表明,conHCl-Po 是来源于土壤颗粒态有机质中的磷,随土壤中纤维素等的降解而释放,具有一定的生物有效性。本研究结果也显示,POM-P 与 conHCl-Po 含量呈显著负相关关系($r=-0.244, P<0.05$),即随土壤中各有机物料的逐渐腐解,POM-P 不断转化,土壤中 conHCl-Po 组分含量不断提升。

3.2 有机物料磷素释放与土壤磷素响应

等磷量不同物料添加培养,以紫云英秸秆添加处理对土壤各无机磷组分含量的提升效果最优,其次由高到低顺序为添加 700 °C 稻壳生物质炭、400 °C 稻壳生物质炭、油菜秸秆和无机磷肥处理;这与有机物料腐解磷的释放规律相呼应。即紫云英秸秆在培养 18 周后磷的释放率最高,达 95.4%;700 °C 稻壳生物质炭处理次之,磷的释放率达 77.3%;而 400 °C 稻壳生物质炭处理、油菜秸秆处理在培养期内磷的释放相对不明显。宋莉等^[28]通过盆栽模拟稻田环境,运用埋袋法在潮土上的研究显示,在翻压 90 d 后,紫云英秸秆磷的释放率达 87.14%,油菜秸秆为 62.65%。Talgre 等^[8]对几种绿肥作物的腐解监测发现,在埋袋后的 6 个月内,磷的释放率可达 80%。Lupwayi 等^[9]的研究显示,还田绿肥作物比其他还田作物可释放更高比例的磷,绿肥磷素释放率在 56%~74%。有机物料中磷的矿化或释放主要受土壤微生物、物料性质及土壤环境因素(温度、水分、pH)等的调控;而物料性质是影响植物性有机物料腐解过程及养分释放的主导因素^[29]。还田有机物料中磷的释放率与物料磷浓度呈显著正相关,与物料 C/P、木质素/P 呈显著负相关^[8-9]。一般情况下,还田秸秆 C/P 大于 300,总磷含量大于 0.3% 时,秸秆磷以固定为主;而 C/P 小于 200,总磷含量小于 0.2% 时,则以矿化为主^[30-31]。本研究中,紫云英秸秆磷含量高于油菜,C/P 小于油菜,其有较高的磷素释放率,与前人研究结论相一致;油菜秸秆因其相对高的 C/P(482.4)和较低的磷含量(1.08 g/kg),其在土壤中磷素倾向于生物固定,磷素释放不显著。

生物质炭的施用可显著提升土壤磷的有效性^[32]。前人^[32-34]研究表明,制备生物质炭的热裂解温度越高,其磷素有效性越低;热裂解温度超过 700 °C,生物质炭磷完全失去其有效性^[33]。生物质炭制备的热裂解过程改变了原生物质中磷素的赋存形态。Xu 等^[35]利用 Hedley 连续化学浸提法,对 3 种作物秸秆生物质炭热裂解制备过程中磷素的形态转化做了研究,发现随裂解温度升高,生物质炭磷由水溶态或有机态,逐渐转化为活性态(NaHCO₃-Pi)或半活性态(NaOH-Pi),最终转化为稳定态(HCl-P 与 Residual-P);通过 ³¹P NMR 技术表征各形态磷素的化学性质,发现生物质炭热裂解制备过程中,有机磷快速降解,有更稳定的无机磷矿物(如 CaAl₃(OH)₅(PO₄)₂、Al₃(OH)₃(PO₄)₂·5H₂O 等)的形成。本研究中,700 °C 和 400 °C 稻壳生物质炭添加入土壤后,发现土壤中 HCl-Pi 与 Residual-P 均有显著提升,且 Residual-P 的提升率 RB700(64.35%)>RB400(48.51%),并均高于等磷量秸秆添加处理;另外,RB400 处理,土壤中有 conHCl-Po 的显著提升,且提升率 RB400(14.23%)<BS(17.0%)<AS(23.22%),而 RB700 处理未发现土壤有机磷的提升。这说明,400 °C 热裂解所制备的稻壳生物质炭,其仍有一定量的有机磷组分,可补充土壤有机磷库(conHCl-Po);当裂解温度为 700 °C 时,生物质炭中有机磷或已完全转化为形态更为稳定的无机态磷,补充土壤无机磷库(Residual-P 或 HCl-Pi)。本研究中,不同热裂解温度制备的稻壳生物质炭添加入土壤后,土壤磷库形态及数量的相应变化与前人对生物质炭自身磷素形态与结构的研究结果可相互印证。

本研究结果还显示,等磷量不同有机物料添加对土壤各无机磷组分的提升效果均显著高于等磷量无机磷肥添加处理($P<0.05$);且油菜秸秆添加处理与400 °C稻壳生物质炭添加处理,培养期间未发现有物料磷素的显著释放,但相应土壤各无机磷组分及Residual-P组分均有显著提升。这可能与土壤有机质的激发效应有关。根据土壤有机质激发效应的“氮矿化理论”^[36],外源碳的输入促进微生物的增长,微生物对氮的需求增加,促使其矿化分解土壤原有有机质以获取氮素。外源有机物料较高的C/N比,易导致土壤微生物处于“氮饥饿”状态,更易增加土壤有机质的激发强度^[37-38]。有研究表明,红壤性水稻土中添加秸秆生物质炭,可引起土壤碳的正激发;而不同性质的土壤中秸秆直接添加,均有土壤碳的正激发效应^[39]。本研究中,外源有机物料的添加并未配施外源氮,且油菜秸秆及400 °C稻壳生物质炭均有相对高的C/N比,强烈的激发效应促使土壤原有有机质矿化的同时,伴随有机磷向无机磷的转化,从而提升土壤各无机磷库。

土壤微生物是调节有机磷与无机磷转化的关键因素。Hedley等^[17]在65年未施肥的小麦-小麦-休闲轮作土壤上,监测到土壤磷素的输出耗竭主要源于Residual-P与土壤有机磷库,作物根际pH降低溶解部分Residual-P、微生物对可溶性无机磷的生物固定及微生物量磷与土壤本底有机磷的矿化,是土壤Residual-P和有机磷库不断耗竭输出供应作物磷素的主要机制;通过外源纤维素与无机磷肥的添加培养试验,再次验证了微生物在土壤各形态磷素再分配上的重要作用。Salas等^[14]的研究也表明,真菌在还田有机物料分解、物料磷的生物固定及土壤磷素有效性上有重要贡献。本研究中,外源有机物料的添加显著提升了土壤conHCl-P_o,而土壤有机磷与无机磷组分在培养期间的动态变化似乎有延时相反趋势,微生物在其中的作用及调节机制有待于进一步研究。

4 结 论

紫云英秸秆相对低的C/P比及较高的磷含量,其添加入土壤腐解后,有最高的磷素释放率;对土壤无机磷与有机磷均有最优的提升效果。油菜秸秆,因其较高的C/P比及相对低的磷含量,腐解率低,磷素释放不明显,以提升土壤有机磷效果较好。稻壳生物质炭在热裂解制备过程中,有机磷降解,无机磷及Residual-P不断生成,其添加入土壤后,以提升土壤Residual-P和无机磷效果显著,尤其是700 °C稻壳生物质炭添加处理;400 °C稻壳生物质炭添加仍能一定程度上提升土壤有机磷。

就土壤磷组分而言,外源磷的添加,均以提升土壤Residual-P组分为主,其提升率最高;在土壤各无机磷组分中,外源有机物料添加均以HCl-Pi组分提升率最高,而等磷量无机磷肥添加,以Resin-Pi组分提升率最高,HCl-Pi组分次之。外源磷的添加能显著提升土壤磷素有效性;有机物料添加对土壤磷素有效性的提升效果均显著优于等磷量无机磷肥添加。农业生产中,相对于其他有机物料,紫云英等绿肥作物还田,在土壤磷素有效性及土壤供磷能力提升方面有明显优势。

土壤颗粒有机质分离法用于分离土壤与秸秆腐解残余物以监测秸秆腐解动态,经本试验验证及物料回收率数据来看,此法在技术上可行,但后续仍需更多的研究加以对比验证。

致谢:江西省教育厅科技计划项目(GJJ150398)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] KOCHIAN L.Plant nutrition:rooting for more phosphorus[J].Nature,2012,488:466-467.
- [2] GILBERT N.The disappearing nutrient:phosphate-based fertilizers have helped spur agricultural gains in the past century,but the world may soon run out of them.Natasha Gilbert investigates the potential phosphate crisis[J].Nature,2009,461:716-719.
- [3] 曾莉,张鑫,张水清,等.不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J].植物营养与肥料学报,2020,26(9):1565-1577.
ZENG L,ZHANG X,ZHANG S Q,et al.Characteristics of decomposition,nutrient release and structure change of wheat straw in a fluvo-aquic soil under different nitrogen application rates[J].Journal of plant nutrition and fertilizers,2020,26(9):1565-1577.
- [4] 田平,姜英,孙悦,等.不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(1):100-108.
TIAN P,JIANG Y,SUN Y,et al.Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents[J].

- Chinese journal of eco-agriculture, 2019, 27(1): 100-108.
- [5] 龚振平, 邓乃榛, 宋秋来, 等. 基于长期定位试验的松嫩平原还田玉米秸秆腐解特征研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 139-145.
GONG Z P, DENG N Z, SONG Q L, et al. Decomposing characteristics of maize straw returning in Songnen Plain in long-time located experiment [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering (transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 139-145.
- [6] 黄婷苗, 王朝辉, 侯仰毅, 等. 施氮对关中还田玉米秸秆腐解和养分释放特征的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2261-2268.
HUANG T M, WANG Z H, HOU Y Y, et al. Effects of nitrogen application on decomposition and nutrient release of returned maize straw in Guanzhong Plain, Northwest China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2017, 28(7): 2261-2268.
- [7] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1206-1217.
LI C M, WANG X Y, SUN B. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions [J]. Acta pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1206-1217.
- [8] TALGRE L, LAURINGSO E, ROOSTALU H, et al. Phosphorus and potassium release during decomposition of roots and shoots of green manure crops [J]. Biological agriculture and horticulture, 2014, 30(4): 264-271.
- [9] LUPWAYI N Z, CLAYTON G W, O'DONOVAN J T, et al. Phosphorus release during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage [J]. Soil and tillage research, 2007, 95: 231-239.
- [10] 赵晶晶, 郭颖, 陈欣, 等. 有机物料对土壤有机磷组分及其矿化进程的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 740-744.
ZHAO J J, GUO Y, CHEN X, et al. Influences of organic materials on organic phosphorus fractions and mineralization processes in soils [J]. Soils, 2006, 38(6): 740-744.
- [11] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 440-443.
WANG X M, HOU Y L. Effects of organic matter addition on the characteristics of phosphate adsorption and forms of phosphorus in a calcareous soil [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2004, 24(3): 440-443.
- [12] 王旭东, 李祖荫, 张一平. 不同有机物料施入土壤后的磷素转化及其供磷能力的差异[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 113-115.
WANG X D, LI Z Y, ZANG Y P. Organic amendments affect phosphorus transformation and soil phosphorus availability [J]. Chinese journal of soil science, 1998, 29(3): 113-115.
- [13] 李增强, 王建红, 张贤. 绿肥腐解及养分释放过程研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 8-16.
LI Z Q, WANG J H, ZHANG X. A review on the research of decomposition and nutrients release of green manure [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2017, (4): 8-16.
- [14] SALAS A M, ELLIOTT E T, WESTFALL D G, et al. The role of particulate organic matter in phosphorus cycling [J]. Soil science society of America journal, 2003, 67: 181-189.
- [15] HA K, MARSCHNER P, BÜNEMANN E K. Dynamics of C, N, P and microbial community composition in particulate soil organic matter during residue decomposition [J]. Plant and soil, 2007, 303: 253-264.
- [16] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. Soil science society of America journal, 1992, 56: 777-783.
- [17] HEDLEY M J, STEWART J W, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil science society of America journal, 1982, 46: 970-976.
- [18] TIESSEN H, MOIR J O. Characterization of available P by sequential extraction [A] // Carter M R. Soil sampling and methods of analysis [C]. Boca Raton: Puldiser Lewis, 1993. 75-86.
- [19] 王晓锋, 刘婷婷, 龚小杰, 等. 三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征研究[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1-15.
WANG X F, LIU T T, GONG X J, et al. Phosphorus forms in rhizosphere soils of four typical plants in the littoral Zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta ecologica sinic, 2020, 40(4): 1-15.
- [20] 金欣, 姚珊, BATBAYAR JAVKHLAN, 等. 冬小麦 - 夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1660-1671.
JIN X, YAO S, BATBAYAR J, et al. Response of wheat yield and soil phosphorus fractions to long-term fertilization under rainfed winter wheat-summer fallow cropping system [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2018, 24(6): 1660-1671.
- [21] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期有机无机肥配施提高黑土磷含量和活化系数[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):

- 1679-1688.
- WANG Q, ZHAN X Y, ZHANG S X, et al. Increment of soil phosphorus pool and activation coefficient through long-term combination of NPK fertilizers with manures in black soil[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2018, 24(6): 1679-1688.
- [22] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 等. 亚热带不同植被类型土壤磷组分特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2156-2162.
- ZENG X M, FAN Y X, LIN K M, et al. Characteristics of soil phosphorus fractions of different vegetation types in subtropical forests and their driving factors[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2018, 29(7): 2156-2162.
- [23] YAN X, WEI Z, HONG Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources[J]. *Geoderma*, 2017, 295: 80-85.
- [24] MAROKO J, BURESH R J, SMITHSON P C. Soil phosphorus fractions in unfertilized fallow-maize systems on two tropical soils[J]. *Soil science society of America journal*, 1999, 63: 320-326.
- [25] 熊毅. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 208-209.
- XIONG Y. *Soils in China*[M]. Beijing: Science Press, 1987: 208-209.
- [26] 陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 451-457.
- CHEN L J, JIANG Y J, WANG H T, et al. Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 451-457.
- [27] SHI Y, ZIADI N, MESSIGA A J, et al. Changes in soil phosphorus fractions for a long-term corn-soybean rotation with tillage and phosphorus fertilization[J]. *Soil science society of America journal*, 2013, 77: 1402-1412.
- [28] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(3): 100-104.
- SONG L, HAN S, LU J W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of different proportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field[J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2015(3): 100-104.
- [29] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有有机物料腐解特征的整合分析[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 16-27.
- WANG J Z, LU C A, ZHANG W J, et al. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: a meta-analysis[J]. *Acta pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 16-27.
- [30] HAVLIN J L, BEATON J D, TISDALE S L, et al. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*[M]. 7th ed. NJ: Pearson prentice hall upper saddle river, 2005.
- [31] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, (11): 2189-2194.
- ZHAO S H, YU W T, ZHANG L, et al. Research advance in soil organic phosphorus[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2004, (11): 2189-2194.
- [32] GLASER B, LEHR V. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis[J]. *Scientific reports*, 2019: 1-9.
- [33] CHRISTEL W, BRUUN S, MAGID J, et al. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment[J]. *Bioresource technology*, 2014, 169: 543-551.
- [34] DAI L, LI H, TAN F, et al. Biochar: a potential route for recycling of phosphorus in agricultural residues[J]. *GCB bioenergy*, 2016: 1-8.
- [35] XU G, ZHANG Y, SHAO H, et al. Pyrolysis temperature affects phosphorus transformation in biochar: chemical fractionation and (31)P NMR analysis[J]. *The science of the total environment*, 2016, 569-570: 65-72.
- [36] CRAINE J M, MORROW C, FIERER N. Microbial nitrogen limitation increases decomposition[J]. *Ecology*, 2007, 88(8): 2105-2113.
- [37] KUZYAKOV Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil biology and biochemistry*, 2010, 42: 1363-1371.
- [38] WILD B, LI J, PIHLBLAD J, et al. Decoupling of priming and microbial N mining during a short-term soil incubation[J]. *Soil biology and biochemistry*, 2019, 129: 71-79.
- [39] 刘本娟, 谢祖彬, 刘琦, 等. 生物质炭引起的土壤碳激发效应与土壤理化特性的相关性[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 343-353.
- LIU B J, XIE Z B, LIU Q, et al. Correlation between biochar-induced carb on priming effect in soils and soil physiochemical properties[J]. *Soils*, 2021, 53(2): 343-353.