大沽河流域农田土壤磷有效性及全磷淋失影响因素试验

李利霞，武桂芝，于宗民，刘耀辉

(青岛理工大学环境与市政工程学院,山东 青岛 266520)

摘要： 以青岛市大沽河流域砂壤、河潮土、砂姜土 3 种农田土壤为研究对象，开展室内土柱试验，研究土壤 pH、温度、含水率等理化性质与生物炭和氮肥配施对土壤有效磷(Olsen—P)和全磷(TP)淋失的影响，以期为提高农田土壤磷素有效性、减少全磷淋失提供参考依据。结果表明：3 种土壤的 pH 在偏中性或弱碱性时磷素有效性最高，pH 偏酸性时，土壤全磷淋失量较大；3 种土壤不同土层中的 Olsen—P 含量随含水率的增加表现为不同的变化规律；3 种土壤的磷素有效性均随温度的升高逐渐增大，全磷淋失量随温度的升高逐渐降低；生物炭和氮肥配施(T1～T7)处理下均能够有效提高土壤磷素有效性，作用效果依次为生物炭和氮肥联合施加＞单加生物炭＞单加氮肥，当氮肥和生物炭比例为 2∶1 时，土壤磷素有效性最高。生物炭与氮肥联合施加对土壤全磷淋失的抑制效果优于单独施加生物炭，氮肥对全磷淋失的抑制效果不明显。

关键词： 土壤；全磷；有效磷；淋失；生物炭

中图分类号：X53 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)02-0337-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.043

Experimental Study on Influencing Factors Affecting Phosphorus Availability and Total Phosphorus Leaching in Farmland Soil in Dagu River Basin

LI Lixia, WU Guizhi, YU Zongmin, LIU Yaohui

(*School of Environmental and Municipal Engineering*, *Qingdao University of Technology*, *Qingdao*, *Shandong* 266520)

Abstract: Taking sandy soil, fluvo-aquic soil and Shajiang soil in Dagu River Basin of Qingdao as research objects, the indoor soil column experiments was carried out to study the effects of soil temperature, pH, water content and other physical and chemical properties and combined application of biochar and nitrogen fertilizer on leaching of soil available phosphorus (Olsen—P) and total phosphorus (TP), so as to provide reference basis for improving soil phosphorus availability and reducing total phosphorus leaching. The results showed that the soil phosphorus availability was the highest when the pH was neutral or weakly alkaline, and the total phosphorus leaching loss was larger when the pH was weakly acidic. The Olsen—P content in different soil layers of the three soils showed different changes with the increasing of water content. The phosphorus availability of the three soils increased gradually with the increasing of temperature, while the leaching loss of total phosphorus decreased with the increasing of temperature. The combined application of biochar and nitrogen fertilizer (T1～T7) could effectively improve the availability of soil phosphorus, and the effect followed the order of combined application of biochar and nitrogen fertilizer＞single addition of biochar＞single addition of nitrogen. When the ratio of nitrogen fertilizer to biochar was 2∶1, the availability of soil phosphorus was the highest. The inhibition effect of biochar combined with nitrogen fertilizer on soil total phosphorus leaching was better than that of biochar alone, and the inhibition effect of nitrogen fertilizer on soil total phosphorus leaching was not obvious.

Keywords: soil; total phosphorus; available phosphorus; leaching; biochar

大沽河位于胶东半岛，是青岛市的重要饮用水水源地，大沽河流域也是青岛市重要的粮食、蔬菜、水果基地[1]。为了使农作物获得高产，常年大量施用化肥导致大沽河流域农田土壤酸化，大部分施入的磷素易

收稿日期：2021-10-06
资助项目：青岛市公共领域科技支撑计划项目“大沽河流域蔬菜生产化肥面源污染头控制技术研究与示范”(14-2-3-53-nsh)
第一作者：李利霞(1995—)，女，山西朔州人，硕士，主要从事土壤、地下水污染防治研究。E-mail：1637294146@qq.com
通信作者：武桂芝(1974—)，女，河南商丘人，博士，副教授，主要从事水环境数学模拟、地下水污染防治研究。E-mail：guizhiwu701@163.com

被土壤中的铁、铝、钙氧化物及黏土矿物等固定为难溶性的磷酸盐,从而导致土壤全磷含量较高的情况下有效磷缺乏,磷素利用率低[2-4]。随着施磷量提高以及磷肥不断投入,土壤中的磷素含量逐渐由亏转为盈,导致土壤磷素大量累积[5-6],土壤中盈余的磷素可通过地表径流、侵蚀、淋溶的途径迁移到水环境中,造成水体富营养化[7]。因此,对于提高农田土壤磷素有效性、减少土壤磷素淋失的研究对提高农作物磷肥利用率、降低农民的生产成本、减少因磷素淋失造成的磷面源污染具有一定的意义[8-11]。土壤中 Olsen—P 是能够被植物根系直接吸收的磷的主要形态[12-13],向土壤中施肥可以提高土壤磷素的有效性。周婕等[14]研究发现,施加有机肥和磷肥能有效提高土壤 Olsen—P 含量;郭玉冰[15]研究发现,有机肥对土壤有效磷积累的贡献率大于磷肥;朱婧等[16]研究了生物炭和沸石联合施用对潮土有效性的影响发现,生物炭的含量和比例是影响潮土中磷素有效性的重要因素;占亚楠等[17]整合分析了生物炭对土壤有效磷的影响发现,无论什么试验条件,添加生物炭均能使土壤有效磷含量显著提高;张博凯等[18]研究了不用有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)对矿区复垦土壤 Olsen—P 含量的影响。农田土壤磷的淋失风险主要受土壤磷素库容大小、形态转化及有效性的影响[19]。有研究[20]指出,$CaCl_2$—P 可用以表征土壤磷素流失风险。根据土壤 Olsen—P 与 $CaCl_2$—P 含量之间的关系,借助土壤 Olsen—P 含量进行土壤磷淋失风险评价是目前主要的研究手段。代银分等[21]研究了秸秆生物炭对施有机肥土壤磷流失的影响;尹俊慧等[22]研究了不同类型生物炭混施对土壤磷素淋失的影响;Recena 等[23]进行了小麦和向日葵轮作的磷饥饿试验,研究了土壤特质对 Olsen—P 阈值的影响。而对不同类型的农田土壤在单一理化性质影响下磷素有效性和全磷淋失的研究鲜有报道。本文以大沽河沿岸3种农田土壤为研究对象,通过室内土柱试验,探究温度、pH、含水率、氮肥和生物炭配施等因素对大沽河沿岸3种农田土壤有效磷和全磷淋失的影响,为提高农田土壤磷素有效性、减少全磷淋失和磷素面源污染提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集

2020年9月4日,结合前期调查,沿青岛市大沽河下游干流与支流共布置了3个采样点,选取3种典型土壤(砂壤、河潮土、砂姜土)作为供试土壤。土样采集时沿着土壤剖面自上而下分层采样,土壤层次分别为0—20,20—40,40—60 cm,将采集的土样剔除杂质后置于聚乙烯瓶内保存备用。供试土壤基本性质见表1。

表1 供试土壤基本性质

土壤类型	土层深度/cm	pH	含水率/%	氧化还原电位/mV	有效磷/($mg\cdot kg^{-1}$)	全磷/($mg\cdot kg^{-1}$)
砂壤	0—20	5.8	5	0.87	84.4	95.5
	20—40	6.2	5	0.77	31.0	52.7
	40—60	6.3	5	0.65	26.0	28.1
河潮土	0—20	5.2	11	−0.32	77.6	97.8
	20—40	5.3	10	−0.25	31.0	56.6
	40—60	5.7	10	−0.22	25.5	43.9
砂姜土	0—20	5.3	8	0.95	76.5	78.0
	20—40	5.4	7	0.86	26.6	47.6
	40—60	5.4	8	0.79	12.2	23.6

1.2 试验装置

试验同时采用3个土柱,每个柱子装有不同类型的土壤。试验土柱高72 cm、内径12 cm,材质为有机玻璃,为防止试验过程中水沿内壁直接流下产生优先流,内壁采用磨砂面。

土柱上端敞口,填充完土壤后在顶部设置布水板,使入渗水流均匀,中间布设3个土壤取样口,取样口直径为2 cm,分别距离土柱上端10,30,50 cm,土柱底部铺设1层粒径大约为2~3 cm石子,并在石子上面铺设1层孔径为1 mm的纱网将土壤与石子分隔。土柱底端预留1个出水孔,出水孔处安装出水软管以便收集淋滤液。试验过程中取样口用橡胶塞封闭。试验装置见图1。

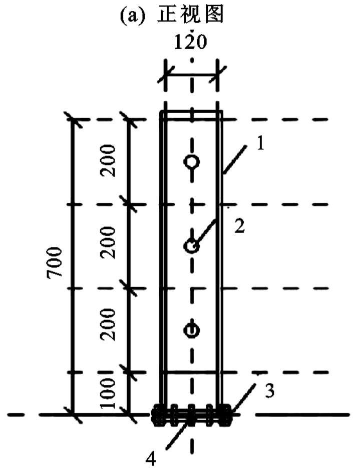
1.3 试验方法

1.3.1 土壤理化性质单因素试验

(1)pH:分别向3个试验土柱加入配置好的 NaOH 和 HCl 溶液调节土壤 pH,从取样口取土样测定其 pH 并记录,24 h 后取土样检测有效磷含量;同样按照上述方法调节土壤 pH,土壤 pH 调节分为5个处理过程,分别记为 P1、P2、P3、P4、P5。其中 P1 为加酸处理,P2 不做处理,P3~P5 为加碱处理,且加碱的量依次增多,然后用蠕动泵向土柱内加纯净水,在出水口处收集淋滤液,3 h 后检测其全磷含量。

(2)含水率:调节蠕动泵输出功率5%,10%向土

柱内加入纯净水,用湿度仪测定土壤实际含水率,24 h 后取土样检测有效磷含量。



注:1 为有机玻璃;2 为取样孔;3 为法兰底座;4 为出水口。

图 1 试验装置示意

(3)温度:在土柱外层包裹电热毯,通过调节电热毯的挡位来控制土柱温度,24 h 后取土样检测有效磷含量;同样按照上述方法调节土柱温度,然后用蠕动泵向土柱内加纯净水,在出水口处收集淋滤液,3 h 后检测其全磷含量。

每个影响因素设置 1 组对照试验。

1.3.2 *生物炭和氮肥配施试验* 每种类型的土样试验分别设置 8 个处理,即 T0～T7,3 个土柱生物炭和氮肥的施加情况见表 2。试验所施加的肥料皆一次性施入。其中 T0 为对照组,不进行施肥处理。土壤每个处理设置 3 个重复,施肥 24 h 后取土壤样品检测其有效磷含量。全磷淋失检测前期处理与有效磷检测方案一致,然后调节蠕动泵向土柱内加纯净水,在出水口处收集淋滤液,3 h 后检测其全磷含量。

1.4 测定方法

土壤 pH:称取 10.0 g 土壤样品于 500 mL 烧杯中,以水土比 2.5∶1 浸提,放置在磁力搅拌器上搅拌 1 h后静置约 30 min,用 pH 计测定。

有效磷(Olsen—P):采用 $NaHCO_3$ 浸提－钼蓝比色法(HJ 704—2014),取 2.5 g 试样于 150 mL 具塞锥形瓶中,加入 50.0 mL 浓度为 0.5 mol/L 的浸提剂,于恒温反复振荡器上振荡 30 min,振荡频率为 180 r/min,过滤,取 10 mL 滤液于 50 mL 容量瓶中,用钼蓝比色法测定。

表 2 不同处理的施肥情况

处理	施肥种类	施用量/g/个	
		尿素	生物炭
T0	无	0	0
T1	氮肥	30	0
T2	氮肥	60	0
T3	氮肥	90	0
T4	氮肥＋生物炭	30	30
T5	氮肥＋生物炭	60	30
T6	氮肥＋生物炭	90	30
T7	生物炭	0	30

全磷(TP):采用钼酸氨分光光度法(GB 11893—89),量取 25 mL 淋滤液于 50 mL 具塞刻度管中采用过硫酸钾法进行消解后,用钼酸氨分光光度法测定。

含水率:采用 SMAWS016 型湿度测 32 定仪测定。

2 结果与分析

2.1 pH 对土壤有效磷及全磷淋失的影响

pH 对土壤中 Olsen—P 含量的影响见图 2。3 种土壤表层土壤(0—20 cm)的 Olsen—P 等浓度线比中层土壤(20—40 cm)的等浓度线更密集,表明浅层土壤中 Olsen—P 的变化幅度比深层土壤大,且 Olsen—P 随土层深度增加降低明显。随着 pH 的增大,砂壤中 Olsen—P 含量表现为先升高后降低。表层土壤 pH 为 6.5 和 8.2 时,Olsen—P 出现 2 个极大值,Olsen—P 最大值为 102.4 mg/kg。表明弱碱或弱酸性条件下,土壤中的 Olsen—P 含量较高。河潮土有效磷含量等浓度图变化趋势与砂壤一致。河潮土表层土壤(0—20 cm)在 pH 为 8.0 时,Olsen—P 含量最大,为 98.1 mg/kg,与砂壤相比,河潮土中各土层 Olsen—P 最大值出现的位置更偏碱性。砂姜土 Olsen—P 含量的等浓度线的变化趋势砂壤一致,pH 在 6.5～8.2 磷素有效性较高。

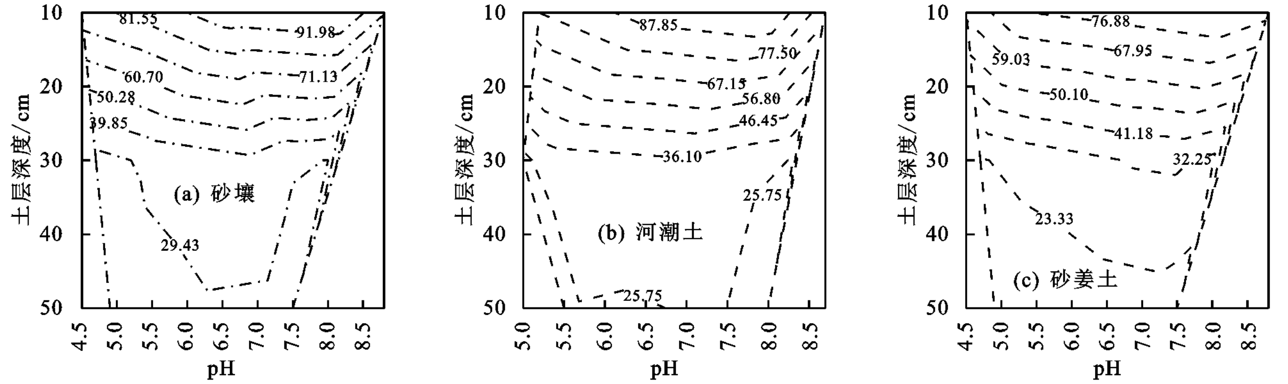


图 2 不同 pH 下土壤的 Olsen—P 含量变化

由图 3 可知，相对于砂壤和河潮土，砂姜土的全磷淋失最为严重。在 P1 处理下，全磷淋失量最大，为 1.05 mg/L，P2 处理下，全磷淋失量最小，为 0.97 mg/L。在 P3～P5 处理下，随碱量的增加，砂姜土中的全磷淋失没有明显变化。砂壤全磷淋失量稍大于河潮土，在 P1 处理下，全磷淋失同样最为严重。在 P3～P5 处理下，全磷淋失量随碱量的增大呈先降低后增高趋势，在 P3 处理下全磷淋失量最小。河潮土与砂壤的全磷淋失规律类似，但 P3～P5 处理下，全磷淋失量随碱量的增加先升高后降低。表明在加酸处理时，土壤全磷淋失更为严重，加碱处理时，不同土质表现出不同的变化趋势。

2.2　含水率对土壤有效磷的影响

由图 4 可知，砂壤表层土壤（0—20 cm）中有效磷含量随含水率增加而升高，含水率＞10％时，砂壤中 Olsen—P 含量增大幅度减小，最大值为 102 mg/kg，比对照组增加 30.5％；中层土壤（20—40 cm）中，当含水率提高 40％和 80％，Olsen—P 含量分别提高 10.2％和 17.3％，深层土壤（40—60 cm）中 Olsen—P 含量更容易随含水率提高而增加。河潮土表层土壤的 Olsen—P 含量随含水率的增加表现为先升高后降低。当含水率为 16％时，Olsen—P 含量最大，为 75.2 mg/kg，比对照组增加 19％。中、下层土壤随着含水率提高，磷素有效性持续增大。砂姜土表层土壤（0—20 cm）的 Olsen—P 随含水率的变化规律不同于砂壤和河潮土，随含水率提高，砂姜土的 Olsen—P 含量不断增大，最高值为 100.4 mg/kg，比对照组增加 39％，变化幅度大于砂壤和河潮土，表明砂姜土中磷素有效性对含水率的变化更加敏感。中、下层土壤砂姜土 Olsen—P 含量的变化趋势与砂壤和河潮土一致。

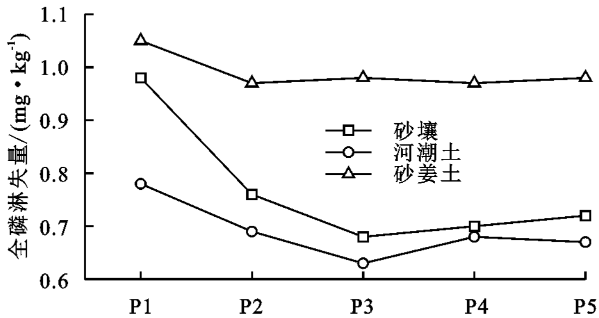


图 3　不同 pH 下土壤的全磷淋失量

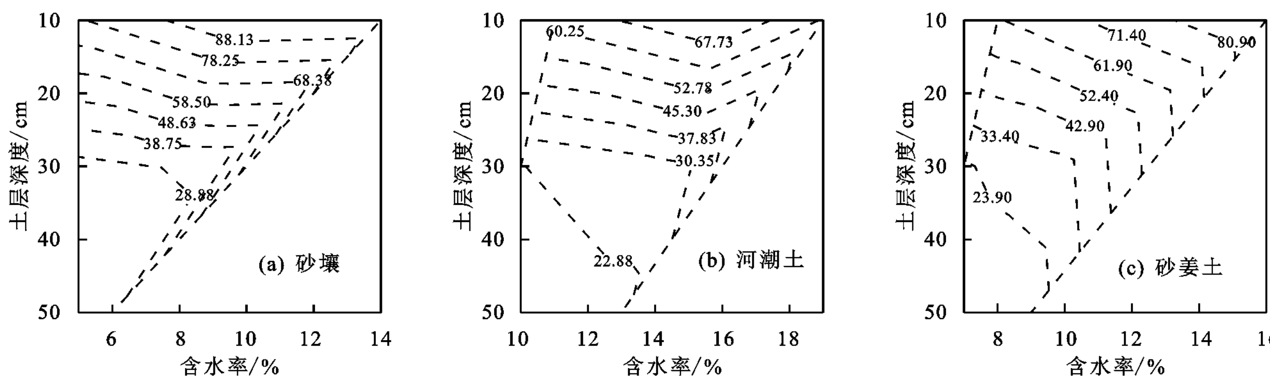


图 4　不同含水率下土壤的 Olsen—P 含量变化

2.3　温度对土壤有效磷及全磷淋失的影响

由图 5 可知，随着温度的提高，砂壤各土层磷素有效性均有所增加。可能是因为温度提高，增强土壤中微生物的活性，促进土壤中有效磷的转化。26 ℃条件下，表层土壤（0—20 cm）Olsen—P 含量最大，为 88.2 mg/kg。河潮土与砂姜土的有效磷随温度的变化趋势与砂壤一致，在 26 ℃时磷素有效性达到最大。

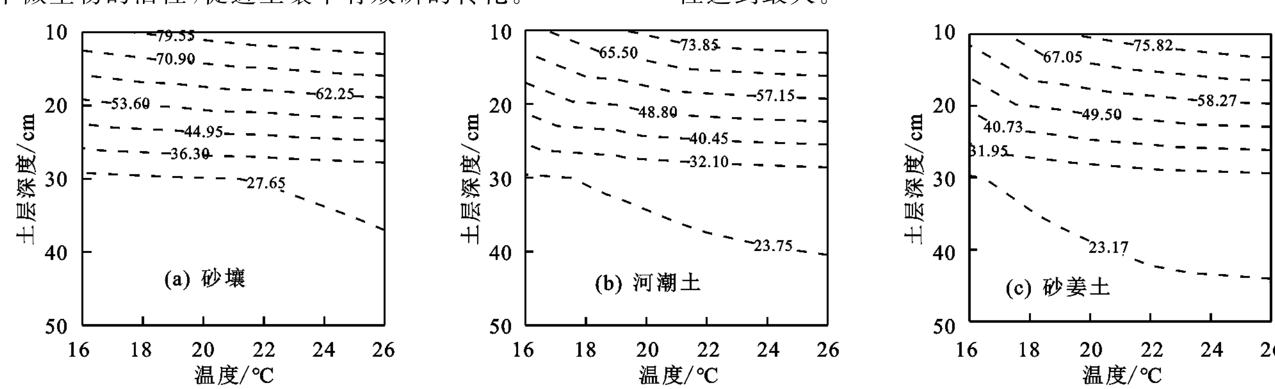


图 5　不同温度下土壤的 Olsen—P 含量变化

由图 6 可知，河潮土的全磷淋失量最小，且随温度的升高，全磷淋失量逐渐减小。砂壤与砂姜土全磷淋失规律与河潮土类似。但在 19 ℃时，砂姜土中的全磷淋失量下降幅度明显大于河潮土，一方面可能与

砂姜土土质有关，另一方面可能是因为对照组试验时间与本次试验存在一定时间差，土壤性质发生改变，所以在改变温度条件下全磷淋失量降低的幅度较大。

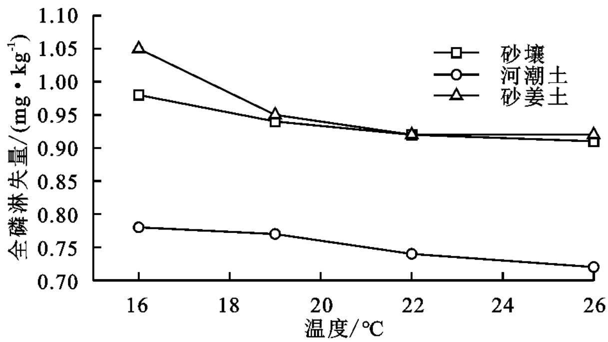


图 6　不同温度下土壤的全磷淋失量

2.4　生物炭与氮肥配施对土壤有效磷的影响

由图 7 可知，表层土壤(0—20m)中，T0～T7 处理下，3 种土壤的 Olsen—P 的变化规律相同，即 T0 处理下的 Olsen—P 含量最低。T1～T3 处理下，3 种土壤的 Olsen—P 含量随着施氮量的增加逐渐升高，T4～T6 处理下，3 种土壤中的 Olsen—P 含量均高于 T1～T3 处理，且随着氮肥和生物炭施加比例的增加呈现上升的趋势。相对于 T0 处理，T4～T6 处理下，砂壤 Olsen—P 含量分别提高 7.5%，9.8%，10.1%，河潮土分别提高 11.5%，13.7%，14.7%，砂姜土分别提高 14.6%，16.7%，17.7%。T7 处理下的 Olsen—P 含量介于 T1～T3 和 T4～T6 处理。说明单独施加氮肥、单独施加生物炭与氮肥和生物碳配施均会提高土壤磷素有效性，生物炭和氮肥配施对提高土壤 Olsen—P 含量的效果更显著。

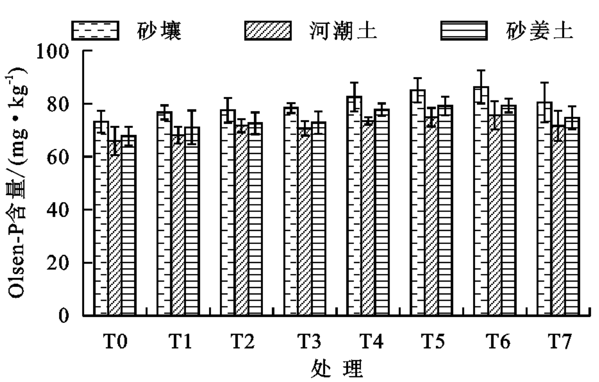


图 7　表层土壤的 Olsen－P 含量变化

由图 8 可知，中层土壤(20—40 cm)中，3 种土壤 T0 处理下的 Olsen—P 含量依然最低，且砂壤＞砂姜土＞河潮土。T1～T3 处理下，砂壤中 Olsen—P 含量随氮肥施加量的增加逐渐减小，T4～T6 处理下砂壤中 Olsen—P 含量随氮肥和生物炭施加比例的增大先升高后降低，而河潮土和砂姜土在 T1～T3 处理和 T4～T6 处理均表现出相反的变化趋势。T7 处理下，砂壤、河潮土、砂姜土中 Olsen—P 含量分别增加 5.2%，5.8%，8.5%，高于单独施加氮肥，低于生物炭和氮肥配施处理。

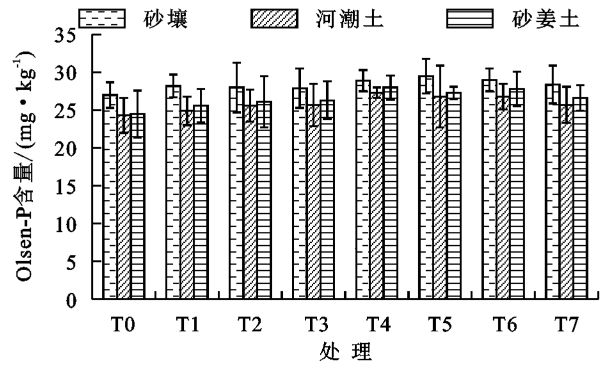


图 8　中层土壤的 Olsen－P 含量变化

由图 9 可知，深层土壤(40—60 cm)中，T1～T3 处理下 3 种土壤的 Olsen—P 随氮肥的增加先升高后降低，说明少量的氮肥促进土壤中有效磷的转化，但超过一定的阈值后则不再起作用。T4～T6 处理下，3 种土壤的 Olsen—P 含量仍然高于 T1～T3 处理，T7 处理介于 T1～T3 处理和 T4～T6 处理之间。

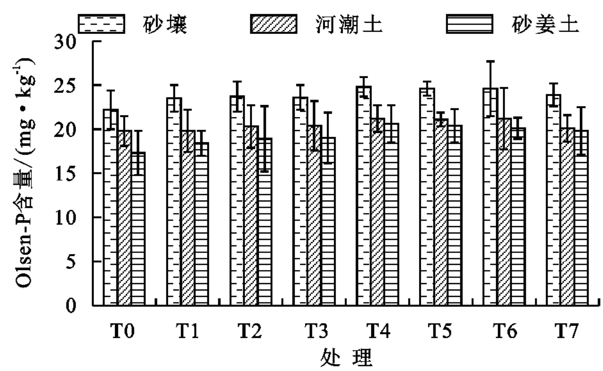


图 9　深层土壤的 Olsen－P 含量变化

2.5　生物炭和氮肥配施对土壤全磷淋失的影响

由图 10 可知，3 种土壤中砂姜土中全磷的淋失量最大，为 0.89 mg/L，砂壤和河潮土的全磷淋失量分别为 0.72，0.68 mg/L。T1～T3 处理下，砂壤中全磷淋失量分别为 0.70，0.71，0.71 mg/L，变化不明显，河潮土全磷淋失量分别为 0.63，0.62，0.61 mg/L，砂姜土全磷淋失量为 0.89，0.88，0.90 mg/L，表明单独施加氮肥基本不会影响砂壤中的全磷淋失，对河潮土全磷的淋失有一定的抑制作用，但不明显，对砂姜土不仅不能抑制全磷淋失，还会增加磷素的淋失风险。T7 处理下，砂壤、河潮土、砂姜土全磷淋失量分别降低 8.3%，11.8%，19.1%，说明单独施加生物炭可以有效抑制土壤中全磷的淋失，且生物炭对不同土壤全磷淋失的抑制效果也不同。T4、T5、T6 处理下，砂壤全磷淋失量随生物炭含量的增加分别降低 9.7%，13.9%，11.1%，河潮土分别降低 14.7%，16.2%，13.2%，砂姜土分别降低 32.6%，31.5%，32.6%，表明生物炭和氮肥联合施用对抑制土壤磷素淋失的效果

更加显著。因此,T1～T7 处理下对土壤全磷淋失的抑制效果为生物炭和氮肥联合施加＞单独施加生物炭＞单独施加氮肥。

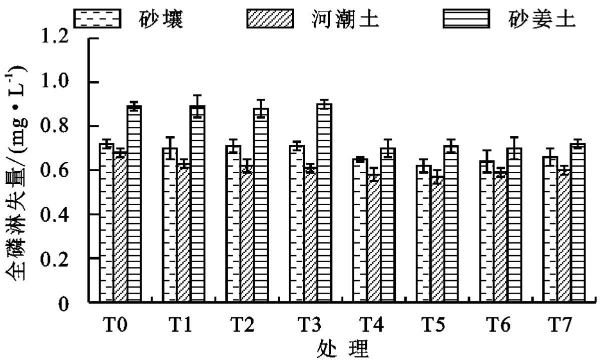


图 10 氮肥和生物炭配施作用下土壤的全磷淋失量

3 讨 论

3.1 土壤理化性质对土壤磷有效性及全磷淋失的影响

土壤有效磷与全磷含量的变化是由土壤 pH、含水率、温度等因子共同作用的结果,且各变化因子存在复杂的交互作用[24]。有研究[25]表明,土壤 pH 能够影响土壤磷元素的化学形态,是影响磷循环的主要环境因子。在低 pH 的酸性土壤中,磷酸盐易于被土壤中大量的 Fe、Al、Mn 氧化物表面吸附或被土壤中游离的铝离子沉淀,从而导致土壤磷素有效性低。在高 pH 的碱性或石灰性土壤中,磷酸根易与土壤中的 Ca^{2+} 形成沉淀。在中性土壤中,土壤中的磷酸盐易于被 Fe、Al、Mn 的水化氧化物吸附。本试验结果表明,将土壤 pH 调节至偏中性时,土壤中的 Olsen—P 含量较高,pH 偏酸性时,土壤磷素有效性较低,全磷淋失量较大。也有研究[26]表明,温度升高降低植物磷含量,提高磷元素吸收效率,植物 Olsen—P 含量增加。通过增加土壤温度改变微生物生物量,刺激土壤磷酸酶活性,加速土壤磷循环,从而提高土壤 Olsen—P 含量[24]。Yang 等[26]研究青藏高原冻土区高山莎草叶片对增温的响应发现,适度的增温降低叶片磷浓度,更大程度的增温增加根系磷浓度,提高磷元素吸收效率,与本文的结论基本一致。而 Ren 等[27]在荒漠草地研究干、湿年份养分吸收对增温的响应发现,在湿润年份,增温显著提高土壤和植物体的磷含量;在干旱年则没有影响,说明土壤磷素有效性除温度影响外还受到土壤水分影响;何园球等[28]的研究结果表明,红壤 Olsen—P 含量基本上随红壤水分含量增加而提高,这与本文研究结果相同。因此,在农作物的种植中,可以通过改变土壤条件,如在酸性土壤中施用碱度较高的有机肥,中和土壤酸碱度,增强土壤缓冲酸化的能力;升温和增加土壤水分也会促进农作物对土壤中 Olsen—P 的吸收,以提高土壤磷肥利用率。

3.2 生物炭和氮肥配施对土壤磷有效性及全磷淋失的影响

有研究[29]表明,生物炭和氮肥与改善土壤肥力、提高作物产量及提高土壤磷素有效性密切相关。生物炭为植物和土壤微生物提供营养物质和能量,改善土壤结构,促进土壤磷素循环,提高土壤有效磷含量,抑制土壤磷素淋失。一方面由于生物炭中含有的元素 Ca、Mg、K 等溶于水中,提高土壤的盐基饱和度,从而影响土壤的酸碱度;另一方面,生物炭对磷具有明显的吸附作用,生物炭中的有机质对磷的封存减小其淋失的风险[30]。施用氮肥也是提高作物产量的关键措施之一,然而大量施氮不仅容易造成土壤硝酸盐积累,导致土壤质量退化,还影响作物对其他元素的吸收性能[31]。本试验中,与 T0 处理相比,T1～T7 处理均会提高土壤中的 Olsen—P 含量,抑制土壤全磷淋失。但在 T1～T3 处理下,3 种土壤的中层和深层土壤中 Olsen－P 含量随施氮量的增加表现为不同变化趋势,表明少量的氮肥会促进土壤中有效磷的转化,但超过一定的阈值后不再与土壤有效磷有明显的相关性,甚至会增加磷素淋失的风险。这与朱浩宇等[32]对紫色土坡耕地磷素流失定点观察中得到的结论一致。出现这种变化的原因一方面与土壤性质有关,另一方面也可能是氮肥过量施加,导致土壤中 H^{+} 含量增加,从而对 Olsen—P 含量的增加产生削弱作用[33]。因此,在农作物种植中,施加磷肥之后,可以采用氮肥和生物碳配施的措施来改善和提高农田土壤的磷素有效性,降低农田土壤全磷的淋失作用,从而提高农作物对磷肥的利用率。

4 结 论

(1)土壤理化性质如 pH、含水率、温度等均会直接或间接影响土壤的磷素有效性和全磷淋失,且不同土壤对土壤理化性质变化的响应不同,3 种土壤中,砂姜土对 pH、含水率、温度的变化更为敏感。

(2)单独施加生物炭或生物炭与氮肥配施都能提高土壤磷素有效性,但生物炭与氮肥联合施用的效果更加明显。当生物炭和氮肥的比例为 2∶1 时,土壤 Olsen—P 含量最大,磷素有效性最高。生物炭与氮肥联合施加对土壤全磷淋失的抑制效果优于单独施加生物炭,氮肥对全磷淋失的抑制效果不明显。

参考文献:

[1] 刘贯群,周书玉,黄修东,等.多种方法识别青岛大沽河平原区地下水硝酸盐污染来源[J].环境科学学报,2017,37(1):347-356.

[2] 吴蔚君,徐云连,邢素林,等.生物炭对土壤氮磷转化和

流失的影响[J].农学学报，2018，8(9)：20-26.
[3] 王敏，刘石磊，张帅，等.腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J].农业资源与环境学报，2020，37(2)：209-215.
[4] 刘玉学，唐旭，杨生茂，等.生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J].植物营养与肥料学报，2016，22(6)：1690-1695.
[5] 刘娟，张乃明，张淑香.潮土磷素累积流失风险及环境阈值[J].农业工程学报，2020，36(20)：8-16.
[6] 郭胜利，张树兰，党廷辉，等.褐土区农田土壤氮磷淋溶特征及其管理措施[J].中国生态农业学报(中英文)，2021，29(1)：163-175.
[7] 刘岩峰，崔冠楠，白鑫宇，等.广西武鸣河流域非点源氮磷污染特征及源解析[J].中国环境科学：2021，41(6)：2821-2830.
[8] 李芳柏，徐仁扣，谭文峰，等.新时代土壤化学前沿进展与展望[J].土壤学报，2020，57(5)：1088-1104.
[9] 卢慧宇，杜文婷，张弘弢，等.水肥管理及生物炭施用对作物产量和磷效率及磷淋失的影响[J].中国生态农业学报(中英文)，2021，29(1)：187-196.
[10] 刘钦普.中国化肥面源污染环境风险时空变化[J].农业环境科学学报，2017，36(7)：1247-1253.
[11] 刘力，刘蒙泰，陈浩.中型水库磷污染成因及污染控制技术方案分析[J].环境科学导刊，2021，40(2)：23-27.
[12] 赵楚，盛茂银，白义鑫，等.喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤氮磷有效性及其环境影响因子[J].应用生态学报，2021，32(4)：1383-1392.
[13] 章爱群，贺立源，赵会娥，等.有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J].生态学报，2009，29(8)：4061-4069.
[14] 周婕，赵跃，刘继培，等.有机肥配合减施磷肥对甜椒产量、品质及土壤有效磷含量的影响[J].中国瓜菜，2020，33(7)：61-63.
[15] 郭玉冰.长期施用磷肥、有机肥对菜地土壤有机磷形态及相关性质的影响[D].河北 保定：河北农业大学，2020.
[16] 朱婧，白玉超，王宗抗，等.稻壳炭和沸石对赤红壤和潮土磷有效性的影响[J].中国农学通报，2020，36(29)：93-99.
[17] 占亚楠，王智，孟亚利.生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析[J].应用生态学报，2020，31(4)：1185-1193.
[18] 张博凯，郝鲜俊，高文俊，等.不同有机肥及用量对矿区复垦土壤有效磷含量及供磷特性的影响[J].水土保持学报，2021，35(2)：271-278.
[19] 汪玉，袁佳慧，陈浩，等.太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J/OL].土壤学报，2022，DOI：10.11766/trxb202012160696.
[20] 别婧雅.北方两种作物体系下土壤磷库特征及磷素淋失风险评价[D].陕西 杨凌：西北农林科技大学，2020.
[21] 代银分，李永梅，李丽，等.秸秆生物炭对施猪粪有机肥土壤磷流失及白菜产量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版)，2016，36(11)：793-799.
[22] 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.
[23] Recena R，Diaz I，Del Campillo M C，et al. Calculation of threshold Olsen P values for fertilizer response from soil properties[J]. Agronomy for Sustainable Development，2016，36(4)：1-8.
[24] 吴金凤，刘鞠善，李梓萌，等.草地土壤磷循环及其对全球变化的响应[J].中国草地学报，2021，43(6)：102-111.
[25] 赵琼，曾德慧.陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J].植物生态学报，2005，29(1)：153-163.
[26] Yang Y，Wang G，Klanderud K，et al. Responses in leaf functional traits and resource allocation of a dominant alpine sedge (*Kobresia pygmaea*) to climate warming in the Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region[J].Plant and Soil，2011，349(1/2)：377-387.
[27] Ren H Y，Kang J，Yuan Z Y，et al. Responses of nutrient resorption to warming and nitrogen fertilization in contrasting wet and dry years in a desert grassland[J].Plant and Soil，2018，432：65-73.
[28] 何园球，樊剑波，李成亮，等.水稻旱作下土壤水分状况和施用磷肥对红壤有效磷含量的影响[J].土壤学报，2011，48(6)：1196-1202.
[29] 杜雪，王海燕.中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J/OL].世界林业研究. https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2021.0068.y.
[30] 赵楚，盛茂银，白义鑫，等.喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤氮磷有效性及其环境影响因子[J].应用生态学报，2021，32(4)：1-13.
[31] 王秋君，郭德杰，马艳.连续施用有机肥下设施土壤碳氮磷化学计量学特征及其与土壤有效磷的关系[J].江苏农业学报，2021，37(4)：893-901.
[32] 朱浩宇，贾安都，王子芳，等.化肥减量对紫色土坡耕地磷素流失的影响[J].中国环境科学，2021，41(1)：342-352.
[33] 毛妍婷，刘宏斌，陈安强，等.长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J].生态环境学报，2020，29(9)：1784-1791.