

冻融条件下黑土无机磷分级及有效性研究^①

乔思宇, 周丽丽*, 范昊明, 贾燕锋, 武敏

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 土壤无机磷是生态系统中磷素的重要组成部分, 而冻融作用是土壤无机磷赋存形态与转化的重要影响因素。本研究以黑土为试验土壤, 在室内模拟冻融环境, 研究冻融前后黑土无机磷各组分含量变化及其有效性。结果表明: 冻融后无机磷各组分绝对含量总体呈现增加的趋势; 冻融前后相对含量没有表现出明显差异, 均呈现出 O-P>Fe-P>Al-P>Ca-P; 相关分析和通径分析结果显示, Al-P、Fe-P 为有效磷源, 并且直接影响有效磷含量, 而 O-P、Ca-P 与 Al-P 有较大的通径链系数, 即 O-P、Ca-P 通过 Al-P 间接影响有效磷含量; 冻融循环条件下 Olsen-P(Y)与有效磷源 Al-P(X₁)、Fe-P(X₂)间呈线性关系。

关键词: 冻融循环; 黑土; 无机磷; 分级; 有效性

中图分类号: S153; S157.4

冻融作用是指气候的日、年和多年变化导致特定区域地球表层一定范围内土壤的冻结和融化作用^[1-2]。冻融作用对土壤养分的迁移和转化具有很大影响^[3], 而且冬季冻融作用时间的长短和冻融循环次数也直接影响土壤有效养分的供应, 进而影响农作物的种植和生长^[4]。土壤中磷肥当季利用率一般只有 10% ~ 25%, 其余的则以不同形态的磷酸化合物积累在土壤中。土壤中的无机磷是土壤磷素富集在土壤表层的主要形式, 也是植物营养的主要来源^[5]。因此, 磷素在土壤中的化学行为和存在形态, 以及对作物的有效性一直受到人们的广泛关注^[6-7]。黑土是我国东北地区主要的耕作土壤, 含有大量的有机质, 土壤孔隙度高, 偏酸性^[8], 未耕垦的黑土全磷含量较高, 其中约 40% 为无机磷。在无机磷含量低的土壤中有有机磷只有经过矿化为无机磷酸盐才能被植物所利用, 而无机磷的可给性与磷素的组成有关, 在一定条件下, 各种形态的无机磷可以相互转化^[9-10]。土壤温度、水分、气候条件和耕垦年限等因素均会影响土壤无机磷形态及其有效性, 其中, 季节性

冻融作用是我国东北黑土区的主要气候特点, 也是黑土无机磷形态发生变化的原因之一。我国黑土分布区, 土壤冻土层深厚、冻结时间长, 春季频繁的冻融交替主要发生在土壤表层^[11-12], 而冻融作用可改变土壤结构和含水量分布, 促进有机质矿化, 进而造成土壤中营养物质的流失^[13]。本文采用室内模拟冻融环境的方法, 研究冻融条件下黑土无机磷各组分含量变化规律及其有效性, 为东北黑土区耕作土壤合理施肥、提高磷肥利用率以及冻融期土壤侵蚀和磷素迁移提供理论依据。

1 材料与方法

试验土壤取自黑龙江省北安市二井镇(126°33'E, 48°21'N), 该地区是典型的黑土区, 也是我国东北重要的产粮区。本研究取土时间为 2011 年 10 月, 农作物已经收割完毕, 黑土取自农田边 0 ~ 20 cm 的表层土壤。土壤运回后过 5 mm 筛, 将土壤中的碎石、植物残体等杂物去除, 于室内通风阴凉处自然风干, 其基本理化性质见表 1。

表 1 供试黑土基本理化性质
Table 1 The physical and chemical properties of the black soil tested

土壤	体积质量 (g/cm ³)	pH	有机质 (g/kg)	饱和含水率 (%)	有效磷 (mg/kg)	全磷 (mg/kg)	有效氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
黑土	0.9	5.85	65.89	55.76	20.94	902.20	284	112

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101256、41471225)和辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2014054)资助。

* 通讯作者(zhoulilia@163.com)

作者简介: 乔思宇(1990—), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与磷素迁移研究。E-mail: 18740022995@163.com

1.1 土样的制备

将风干的黑土分别配置成有效磷含量为 20、40、60、80、100、120 mg/kg 和质量含水率为 20%、30%、40%、50%、60% 的土样。试验用水为去离子水,速效磷含量的配置采用土壤表面均匀喷洒 KH_2PO_4 溶液的方法。将配置好的土样置于 30 cm × 20 cm × 10 cm 的试验槽中,然后分批放置在冻融循环仪中进行冻融试验。在东北黑土区,春季解冻期表层土壤夜晚冻结,白天消融。春分白昼等长,可认为是春季解冻期的开始,据此将冻融循环设定为冻结 12 h 和融解 12 h,一次冻融循环为 24 h。根据东北春季解冻期多年平均日较差,选取其有代表性的 $-10 \sim 7^\circ\text{C}$ 为试验控制温差。鉴于东北黑土地地区土壤冻结层深厚,季节性冻层较为明显、春季解冻期持续的时间较长等特点,本研究将冻融循环次数设定为 30 次,在 0、1、2、3、5、10、15、20、30 次循环后分别取样测定其无机磷各组分含量。冻融试验开始于 2012 年 5 月,无机磷分级测定于 2014 年 4 月完成。

1.2 测定方法

土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 溶液浸提法,土壤无机磷分级采用 Chang-Jackson 无机磷分级方法^[14]。无机磷各形态绝对含量增值的计算方法为, $\Delta = a_i - a_0$ 。其中, a_i 为 1、2、3、5、10、15、20、30 次冻融循环后测得的无机磷各形态绝对含量,单位为 mg/kg; a_0 为未冻融时土壤无机磷各形态绝对含量,单位为 mg/kg。

2 结果与讨论

2.1 冻融前后黑土无机磷各组分含量变化与方差分析

采用单变量多因素方差分析方法研究 3 个控制

变量与各形态无机磷含量、无机磷总量(TIP)之间的关系,结果见表 2。由表 2 可知,有效磷背景值(APb)和冻融循环次数(FTC)对无机磷总量和 O-P(闭蓄态磷)影响极显著,含水率(W)表现为不显著,其中有效磷背景值的影响占主导地位, F 值分别为 76.992 和 48.128。对于 Al-P(磷酸铝盐),有效磷背景值的影响程度远远超过冻融循环次数和含水率,其 F 值为 102.239。3 个控制变量对 Fe-P(磷酸铁盐)和 Ca-P(磷酸钙盐)影响均极显著,含水率的影响仅次于有效磷背景值占第二位。可见,有效磷背景值是影响冻融条件下无机磷各形态绝对含量和无机磷总量的主要因素。

在无机磷含量分析中,有效磷背景值的影响明显占有绝对优势,因此,需要进一步分析 3 个控制变量对各形态无机磷绝对含量增值的影响,结果见表 2。与上述各形态无机磷含量分析比较,有效磷背景值(APb)的影响明显减小,冻融循环次数(FTC)的影响增强,含水率(W)除对 $\Delta\text{O-P}$ 的影响减小外,其他也均表现为增强。总体而言,冻融循环次数(FTC)是影响 $\Delta\text{Al-P}$ 、 $\Delta\text{O-P}$ 、 $\Delta\text{Ca-P}$ 和 ΔTIP 变化的主要因素,含水率(W)是影响 $\Delta\text{Fe-P}$ 的主要因素。

本研究有效磷背景值设计为 20 ~ 120 mg/kg 的 6 个水平,而有效磷施入土壤后被迅速固定,且主要以无机磷的形式存在,因此,在冻融循环过程中有效磷背景值直接影响黑土无机磷各形态绝对含量,且表现为各水平差异极显著。冻融循环作用可以改变土壤的理化性质,对土壤具有结构性的破坏,土壤团聚体和微生物活性会发生改变从而更加有利于土壤磷素的释放,因此,对于各形态无机磷绝对含量增值的影响冻融循环次数(FTC)各水平差异极显著。含水率直接影响土壤的冻结状态和无机磷存在环境,由于 Fe-P 与水分显著相关^[15],因此含水率(W)是 $\Delta\text{Fe-P}$ 变化的主要原因。

表 2 无机磷总量、各形态含量及其绝对含量增值的方差分析

Table 2 Contents of various forms and total inorganic phosphorus and ANOVA statistics of the increase in their absolute contents

无机磷	APb		FTC		W	
	F	P	F	P	F	P
Al-P	102.239	<0.01	1.153	0.328	1.006	0.405
Fe-P	17.012	<0.01	2.789	<0.01	6.825	<0.01
O-P	48.128	<0.01	4.872	<0.01	1.981	0.098
Ca-P	38.773	<0.01	3.346	<0.01	3.722	<0.01
TIP	76.992	<0.01	5.598	<0.01	1.495	0.204
$\Delta\text{Al-P}$	4.719	<0.01	6.089	<0.01	4.631	<0.01
$\Delta\text{Fe-P}$	4.150	<0.01	3.824	<0.01	9.892	<0.01
$\Delta\text{O-P}$	3.275	<0.01	15.040	<0.01	0.970	0.424
$\Delta\text{Ca-P}$	1.007	0.414	9.998	<0.01	5.163	<0.01
ΔTIP	3.002	0.012	24.083	<0.01	2.110	0.080

注: APb 表示有效磷背景值, FTC 表示冻融循环次数, W 表示含水率, Δ 为冻融循环后无机磷各形态绝对含量增值; F 代表 F 检验统计量, P 为统计显著性, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

冻融前后各形态无机磷的绝对含量增值和相对含量见表 3。冻融后无机磷各形态与冻融前相比绝对含量呈现不同程度的增加趋势,其中以 O-P 含量增加最多,平均为 31.70 mg/kg,在磷背景值为 80 mg/kg 时增加了 60.77 mg/kg。其余 3 种无机磷形态,Al-P 的增幅范围为 2.18~9.05 mg/kg,平均为 5.60 mg/kg;Ca-P 的增幅范围为-0.66~7.54 mg/kg,平均为 3.79 mg/kg;Fe-P 的增幅范围为-7.88~6.46 mg/kg,平均为 2.15 mg/kg。可见,冻融作用能促进土壤中无机磷的形成。

冻融前后无机磷各形态相对含量均以 O-P 占绝大多数,占无机磷总含量的 41.9%~56.0%,冻融前后平均含量分别为 50.2% 和 52.0%,增幅 1.8%;其次是 Fe-P,占无机磷总含量的 24.2%~38.8%,冻融前后平均含量分别为 30.7% 和 28.6%,减幅 2.2%;再次是 Al-P,占无机磷总含量的 11.5%~15.1%,冻融前后平均含量均为 12.9%;最后是 Ca-P,占无机磷总含量的 4.8%~8.0%,冻融前后平均含量分别为

6.2% 和 6.5%,增幅 0.3%。虽然冻融作用有助于土壤中无机磷酸盐的累积,但冻融前后无机磷各形态相对含量没有明显差异,均表现为 O-P>Fe-P>Al-P>Ca-P。非冻融条件下无机磷各形态相对含量测定结果与古思玉等^[16]的研究存在一定差异,这与黑土开垦年限以及长期的施肥过程相关。综上,无论是否发生冻融作用,供试土壤各无机磷形态之间均保持着相对稳定的比例。

黑土的成土母质多为黄土状沉积物,地表有较高的风化度,土壤偏酸性,存在大量游离氧化铁,很大一部分磷酸铁被氧化铁薄膜包裹成为闭蓄态磷,因此,黑土无机磷中 O-P 含量最高。O-P 只有在外界强烈的风化作用下磷素才能释放,而冻融作用没有使 O-P 释放磷素,相反在增施有效磷的情况下,O-P 增加最多。黑土风化程度较高,因此 Fe-P 相对较多,而 Ca-P 相对较少。冻融作用有利于 Al-P 的形成,特别是增施有效磷后,促进了更多的活性磷被铝固定,Al-P 绝对含量增加明显。

表 3 冻融前后无机磷各形态绝对含量增值和相对含量
Table 3 Changes of inorganic phosphorus content before and after freezing and thawing

APb (mg/kg)	计算参数	无机磷各形态				W	计算参数	无机磷各形态			
		Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P			Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P
20	<i>m</i>	2.18	5.58	2.64	6.27	20%	<i>m</i>	6.49	6.12	32.47	2.86
	FTC ₀	11.6	38.8	43.0	6.5		FTC ₀	13.0	32.9	48.7	5.5
	FTC ₃₀	11.5	38.6	41.9	8.0		FTC ₃₀	12.9	31.3	50.2	5.6
40	<i>m</i>	7.52	0.54	35.67	3.76	30%	<i>m</i>	2.2	-7.88	36.33	-0.66
	FTC ₀	12.6	30.5	51.8	5.0		FTC ₀	12.6	30.5	50.5	6.4
	FTC ₃₀	13.0	27.3	54.4	5.4		FTC ₃₀	12.4	27.1	54.6	5.8
60	<i>m</i>	6.47	6.46	17.83	2.91	40%	<i>m</i>	6.88	5.27	24.77	7.54
	FTC ₀	13.1	27.7	52.7	6.5		FTC ₀	14.0	30.1	49.5	6.4
	FTC ₃₀	13.6	27.4	52.4	6.7		FTC ₃₀	14.2	28.2	50.1	7.5
80	<i>m</i>	3.37	5.44	60.77	2.44	50%	<i>m</i>	6.22	3.8	50.64	4.29
	FTC ₀	15.1	26.6	51.8	6.5		FTC ₀	12.3	31.6	50.1	6.1
	FTC ₃₀	13.8	24.2	56.0	6.1		FTC ₃₀	12.0	28.2	53.4	6.3
100	<i>m</i>	9.05	-2.65	40.29	4.56	60%	<i>m</i>	6.21	3.46	14.31	4.9
	FTC ₀	12.7	30.4	52.1	4.8		FTC ₀	12.6	28.7	52.3	6.5
	FTC ₃₀	13.2	26.5	54.9	5.3		FTC ₃₀	13.0	27.9	51.9	7.3
120	<i>m</i>	5.02	-2.45	33.03	2.77						
	FTC ₀	12.3	30.4	49.8	7.6						
	FTC ₃₀	12.3	27.4	52.7	7.6						

注: APb 表示有效磷背景值, W 表示含水率, Δm 为 30 次冻融循环后无机磷各形态绝对含量增值, 单位为 mg/kg; FTC₀ 和 FTC₃₀ 分别为 0 次和 30 次冻融循环的相对含量, 单位为 %。

2.2 冻融循环后无机磷各组分与有效磷的相关分析
土壤有效磷含量常作为磷肥施用的重要指标之一, 而土壤中有有效磷主要来源于无机磷的转化。分析

各形态无机磷含量与 Olsne-P 的关系, 可以探索无机磷各组分的有效性。如表 4 所示, 经过冻融作用, 无机磷各组分与 Olsne-P 的相关性均显著, 其中 Al-P、Fe-P

表 4 黑土无机磷组分与 Olsen-P 间的相关关系
Table 4 The relationship between inorganic phosphorus fractions and Olsen-P in black soil

	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Olsen-P
Al-P	1	0.319**	0.559**	0.484**	0.471**
Fe-P		1	0.243**	0.208**	0.382**
O-P			1	0.305**	0.347**
Ca-P				1	0.352**
Olsen-P					1

注：**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

与 Olsen-P 的相关系数最高,其次是 Ca-P、O-P,不同形态无机磷的有效性顺序为 Al-P>Fe-P>Ca-P>O-P。因为 O-P 是 Fe_2O_3 胶膜所包被的磷酸铁以及磷酸铝,在非强烈的还原条件下很难释放出来,因此,在冻融条件下 Al-P、Fe-P、Ca-P 可以作为黑土的有效磷源,而 O-P 则是潜在磷源。不同组分无机磷之间的相关性也均显著,说明冻融作用对黑土中无机磷各组分的活性产生影响,可以为冻融地区研究土壤有效磷提供重要依据。

2.3 冻融循环后各组分无机磷与有效磷的通路分析

土壤有效磷和某一组分无机磷的相关性愈显著,说明该组分无机磷的有效性愈高,对有效磷的影响也就愈大^[17]。但是,影响土壤中无机磷各组分的因子比较多,而且无机磷各组分之间的影响也比较大,所以只考虑相关系数的做法不够充分。因此,结合相关分析,计算黑土无机磷各组分与 Olsen-P 间的通路系数与通路链系数(表 5),可得出无机磷各组分相对有效性。比较土壤中各组分无机磷对有效磷的通路系数大小,可以看出它们对有效磷的相对重要性依次为:Al-P($Py_1=0.275$)>Fe-P($Py_2=0.245$)>Ca-P($Py_4=0.179$)>O-P

($Py_3=0.088$),这与相关分析结果一致,即冻融作用下黑土中的 Al-P、Fe-P 对有效磷的直接影响最大,而 Ca-P、O-P 相对较小。由表 5 可知,O-P 主要是通过影响 Al-P 间接影响有效磷($Py_{3,31}=0.154$),而 Ca-P 不仅直接影响有效磷($Py_4=0.179$),还通过影响 Al-P 间接影响有效磷的含量($Py_{4,41}=0.133$)。

在相关分析中无机磷各组分与有效磷的相关性较高,但无法说明其直接或间接影响有效磷的程度。而通过分析通路链系数的大小可以明确无机磷各组分与有效磷之间是否存在直接关系,进一步分析通路系数可以判断无机磷各组分是通过哪一种无机磷形态间接影响有效磷。综合相关分析和通路分析可以看出,任何形态无机磷组分的变化都或多或少地影响到土壤有效磷的水平波动,而 Al-P 不仅其自身与有效磷的通路链系数最高,并且 Ca-P、O-P 和 Fe-P 通过 Al-P 影响有效磷的通路系数也较高,因此,可以判断 Al-P 是供试黑土有效磷的主要组分,冻融作用能促进土壤中 Al-P 的形成,从而有利于季节性冻融区土壤有效磷的累积与持续利用。

表 5 黑土无机磷各组分对 Olsen-P 的通路系数和通路链系数
Table 5 The path coefficients and path chain coefficients of inorganic phosphorus fractions and Olsen-P in black soil

$X_i \rightarrow X_j$	$X_i \rightarrow Y$				
	$X_1 \rightarrow Y$	$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	γ_{iy}
$X_1 \rightarrow$	0.275	0.078	0.049	0.087	0.471
$X_2 \rightarrow$	0.088	0.245	0.021	0.037	0.382
$X_3 \rightarrow$	0.154	0.060	0.088	0.055	0.347
$X_4 \rightarrow$	0.133	0.051	0.027	0.179	0.352

注:表中 X_1 为 Al-P, X_2 为 Fe-P, X_3 为 O-P, X_4 为 Ca-P, Y 为 Olsen-P;下同。

2.4 冻融循环前后各组分无机磷与有效磷的回归分析

在相关分析和通路分析基础上,对冻融循环前后黑土中无机磷各组分与有效磷进行逐步回归分析。在引入全部因子的情况下得出回归方程: $Y=0.201X_1+0.247X_2+0.013X_3+0.176X_4-17.578(r=0.552)$,可以看出 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 都与 Y 有直接作用,但是由于 X_3 所起的作用甚微,所以剔除因子 X_3 ,得出回归方程:

$Y=0.235X_1+0.253X_2+0.180X_4-17.466(r=0.547)$,可以看出 X_1 、 X_2 、 X_4 都对 Y 起着直接的作用,但 Ca-P 在供试土壤中含量少,所以剔除因子 X_4 ,得到回归方程: $Y=0.284X_1+0.262X_2-16.492(r=0.532)$,该方程得出了经过冻融循环后黑土无机磷 Al-P、Fe-P 与 Olsen-P 的相关关系。通过分析不同冻融循环次数条件下 Olsen-P 与 Al-P、Fe-P 的相关关系,得出如表 6 所列回归方程。

表 6 不同冻融循环次数条件下 Olsen-P 与 Al-P、Fe-P 之间的回归分析

Table 6 The regression analysis between Olsen-P and Al-P, Fe-P under different freeze-thaw cycles

冻融循环次数	回归方程	
FTC ₀	$Y=0.223 X_1+0.485 X_2-39.439$	$R^2=0.794$
FTC ₁	$Y=0.402 X_1+0.394 X_2-43.481$	$R^2=0.761$
FTC ₂	$Y=0.296 X_1+0.354 X_2-29.854$	$R^2=0.867$
FTC ₃	$Y=0.278 X_1+0.273 X_2-16.046$	$R^2=0.351$
FTC ₅	$Y=0.296 X_1+0.261 X_2-15.296$	$R^2=0.633$
FTC ₁₀	$Y=0.245 X_1+0.262 X_2-16.566$	$R^2=0.298$
FTC ₁₅	$Y=0.407 X_1+0.194 X_2-13.270$	$R^2=0.592$
FTC ₂₀	$Y=0.521 X_1+0.175 X_2-6.434$	$R^2=0.844$
FTC ₃₀	$Y=0.277 X_1+0.321 X_2-25.275$	$R^2=0.988$

注：FTC 表示冻融循环次数。

对表 6 中回归方程的各项系数进行曲线拟合,发现冻融循环次数对回归方程中 Al-P(X_1)、Fe-P(X_2)系数和常数项的影响呈二次多项式分布:

Al-P 系数: $a = 0.021X^2 + 0.228$ $R^2=0.923$;Fe-P 系数: $b = -0.028X^2 + 0.149$ $R^2=0.835$;常数项 $c = -0.104X^2 + 3.486X - 36.994$ $R^2=0.775$ 。

通过上述分析,可以得到: $Y = (0.021X^2 + 0.228)X_1 - (0.028X^2 - 0.149)X_2 - (0.104X^2 - 3.486X + 36.994)$; 式中: Y 代表有效磷含量, X 代表冻融循环次数, X_1 为 Al-P 的含量, X_2 为 Fe-P 的含量, a 代表 Al-P 的系数, b 代表 Fe-P 的系数, c 代表常数项。该式可以预测冻融条件下黑土有效磷的含量。

3 结论

冻融后黑土无机磷各形态的绝对含量较冻融前相比呈现增加趋势,其中以 O-P 的增幅为最大,其次是 Al-P,再次是 Ca-P,最后是 Fe-P。但无机磷各组分的相对含量没有呈现显著变化,均为 O-P>Fe-P>Al-P>Ca-P。有效磷背景值是影响冻融条件下无机磷各形态绝对含量和无机磷总量的主要因素,冻融循环次数(FTC)是影响 Δ Al-P、 Δ O-P、 Δ Ca-P 和 Δ TIP 变化的主要因素,含水率(W)是影响 Δ Fe-P 的主要因素。冻融作用虽影响了无机磷各组分的比例,但有效磷源并没有改变,冻融前后黑土无机磷各组分均与有效磷达到显著相关,不同形态无机磷对有效磷含量的影响贡献大小依次为: Al-P($P_{y1}=0.275$)>Fe-P($P_{y2}=0.245$)>Ca-P($P_{y4}=0.179$)>O-P($P_{y3}=0.088$), Al-P、Fe-P 是有效磷源。Olsen-P 与有效磷源 Al-P(X_1)、Fe-P(X_2)间的线性回归方程: $Y = aX_1 + bX_2 - c$, 冻融循环次数对回归

方程中 Al-P(X_1)、Fe-P(X_2)系数和常数项的影响呈二次多项式分布。

致谢: 感谢贾玉华老师对论文初稿提出的修改建议。

参考文献:

- [1] 杨金凤, 郑秀清, 孙明. 地表覆盖对季节性冻融土壤温度影响研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(3): 107-112
- [2] 王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2361-2366
- [3] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 50-54
- [4] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 87-95
- [5] McLaren T I, Simpson R J, McLaughlin M J, et al. An assessment of various measures of soil phosphorus and the net accumulation of phosphorus in fertilized soils under pasture[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178(3): 1-12
- [6] 程宪国, 王维敏. 麦秸翻压对土壤磷组分的影响[J]. 土壤通报, 1991, 22(6): 254-256
- [7] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58-66
- [8] 范昊明, 张瑞芳, 周丽丽, 等. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6): 48-53
- [9] 徐春阳, 沈其荣, 尹泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒径中有机磷含量与分配的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 593-598
- [10] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 130-144
- [11] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 46-51
- [12] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 298-302
- [13] 李贵圆, 范昊明. 冻融作用对农田磷素转化迁移影响研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 114-120
- [14] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science, 1957, 84: 133-144
- [15] 马志敏, 傅瓦利, 胡宁, 等. 三峡库区消落带土壤无机磷组分的变化及其对有效磷的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 107-111
- [16] 谷思玉, 王宁娟, 陈渊, 等. 不同开垦年限农田黑土磷素形态及数量变化[J]. 土壤, 2014, 46(4): 662-668
- [17] 张为政. 土壤磷组分的通径分析及其有效性[J]. 土壤学报, 1991, 28(4): 417-425

Classification and Efficiency of Inorganic Phosphorus in Black Soil Under Freezing and Thawing Conditions

QIAO Siyu, ZHOU Lili*, FAN Haoming, JIA Yanfeng, WU Min

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The freezing and thawing action is an important factor affecting the form and transformation of soil inorganic phosphorus, which is an essential element of ecosystem. In order to examine the changes of inorganic phosphorus fractions and their efficiency under freezing and thawing conditions, a black soil was selected, and the inorganic phosphorus fractions and their efficiency were measured with the method of Chang-Jackson under indoor simulation conditions. The results showed that the absolute contents of inorganic phosphorus fractions increased generally after freezing-thawing, while the relative content of inorganic phosphorus did not change significantly. The contents of inorganic phosphorus fractions followed the order: O-P>Fe-P>Al-P>Ca-P. Correlation analysis and path analysis indicated that Al-P and Fe-P were the available phosphorus source and affected the content of soil available phosphorus directly; while O-P, Ca-P and Al-P had larger coefficient of size chain, indicating that O-P and Ca-P indirectly affect the available phosphorus content through their interactions with Al-P. A good linear relationship was observed between Olsen-P(Y) and Al-P (X_1) and Fe-P (X_2).

Key words: Freezing-thawing cycles; Black soil; Inorganic phosphorus; Fractions; Efficiency