

# 冻融循环作用对黑土有效磷含量变化的影响

范昊明, 靳 丽, 周丽丽, 黄东浩

(沈阳农业大学 水利学院, 辽宁沈阳 110866)

**摘 要:** [目的] 分析冻融循环作用和土壤含水率对土壤磷素的有效性产生的影响, 为控制农业非点源污染、明确冻土区土壤的磷素循环过程和准确评估区域的磷素收支提供依据。[方法] 以东北黑土为研究对象, 研究冻融次数、土壤含水率和土壤有效磷背景值对黑土有效磷含量的影响。采用室内模拟冻融循环的方法, 冻融循环次数为 30 次, 冻融温差为  $-10\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 监测冻融条件下黑土有效磷含量的变化。[结果] 随着冻融循环次数的增加, 它对有效磷含量的影响逐渐下降, 至 20~30 次循环中不具有显著性影响, 有效磷背景值的影响在 5~20 和 20~30 次循环中占主导地位; 在 0~30 次冻融循环中, 有效磷含量的变化表现出双峰型曲线特征, 相邻冻融循环次数有效磷含量的变化大多具有显著性差异, 变化由剧烈到平缓; 土壤含水率越高, 有效磷含量变化越剧烈; 土壤有效磷背景值越高, 有效磷含量越稳定。[结论] 冻融循环次数、土壤含水率、土壤有效磷背景值 3 个控制因子对有效磷含量的影响程度随冻融循环次数的增加而变化。

**关键词:** 冻融作用; 黑土; 有效磷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0018-05

中图分类号: S157.4; X144

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.011

## Influence of Freezing and Thawing on Available Phosphorus Content of Black Soil

FAN Haoming, JIN li, ZHOU Lili, HUANG Donghao

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the influence of the freezing and thawing action and soil water content on soil available phosphorus in order to provide the basis for controlling agricultural non-point source pollution, confirming the phosphorus cycle process of soil in permafrost region, and assessing regional balance of the accurate phosphorus further. [Methods] Black soil in northeast China was sampled to quantify the effects of variable freeze-thaw cycles (FTCs), soil water ( $W$ ) contents and contents of background available phosphorus (APb) on AP content. Soil samples were conducted to indoor simulated experiment with a maximum FTCs of 30 times and controlled temperature between  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [Results] The effects of FTC decreased and no significant differences were found when FTCs fell between 20 and 30, while the APb content was the prominent factor during 5 to 20 and 20 to 30 cycles. During the whole 30 FTCs, soil AP content variation showed a characteristics of bimodal distribution. Meanwhile AP contents between adjacent FTCs showed significantly difference, the amount of which changed moderately with increase of FTCs changes in AP content were larger with a higher  $W$  content, and more stable with a higher APb content. [Conclusion] It showed that the impact of the three factors, FTC,  $W$  content and APb content, on AP content varied as the number of FTCs increased.

**Keywords:** freeze-thaw cycles; black soil; available phosphorus

土壤有效磷是生态系统中磷素的重要组成部分, 其变化受温度、水分、施肥管理等自然和人为因素影响。东北黑土区每年 3—5 月间日温差较大, 温度变化不稳定, 常在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  上下波动, 土壤夜间有较浅的冻结层, 白天处于消融状态, 季节性冻融交替明显, 作用时间长, 冻融作用对土壤磷素的迁移和转化具有很大

影响。Freppaz 等<sup>[1]</sup>研究了冻融作用对冬季高山土壤磷素的影响, 试验结果显示, 经单一冻融循环, 在高含水率(30%)情况下, 土壤中的总磷和水溶性有机磷都有增加, 而反复的冻融作用, 没有使这 2 种磷再随着含水量的升高而显著增加。Fitzhugh 等<sup>[2]</sup>在美国 Hubbard Brook 森林生态站 2 a 野外试验的结果表

收稿日期: 2014-04-30

修回日期: 2014-05-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融条件下东北黑土磷素流失动力机制研究(41101256)”, “东北黑土区垄作农田融雪侵蚀过程中氮磷迁移转化机制研究”(41471225); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013074)

第一作者: 范昊明(1972—), 男(汉族), 吉林省白山市人, 博士, 教授, 主要从事流域侵蚀、产沙与水土保持规划研究。E-mail: fanhaoming@163.com。

通信作者: 周丽丽(1979—), 女(汉族), 黑龙江省宾县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: zhoulilia@163.com。

明,土壤的冻融过程加速养分流失,降低磷素等营养物质的植物利用,从而影响生态系统生产力,促进地表水的富营养化。Marianne 等<sup>[3]</sup>研究表明种植覆盖作物来控制土壤中氮的流失以及控制土壤侵蚀,会增加径流中磷分的损失,并且随着冻融循环次数的增加而增加。周旺明等<sup>[4]</sup>通过研究发现,与对照试验相比,冻融处理淋溶液中的总磷(TP)和磷酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ )质量浓度分别提高了 12.5%和 18.37%。以上研究结果不同程度的反映出,反复的冻融作用会通过改变土壤的物理性质及化学性质使土壤中磷素的含量发生变化,而冻融循环次数、含水率是其中重要的影响因素。

目前,关于冻融循环作用对土壤磷素迁移转化的影响,国内外研究较少。本文以黑土为研究对象,通过人工室内模拟冻融循环试验,研究冻融循环次数(FTC)、土壤含水率(W)、土壤有效磷背景值(APb)

3个控制因子对土壤有效磷含量的影响,为控制农业非点源污染提供依据,将有助于明确冻土区土壤的磷素循环过程和准确评估区域的磷素收支情况。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤

试验土壤为黑土,取自黑龙江省北安市二井镇( $126^{\circ}33'E, 48^{\circ}21'N$ ),属寒温带大陆性季风气候,年降水量 500~600 mm,年平均气温 1.24℃,1月最冷,平均气温-23.6℃。每年10月中旬到次年4月中旬,全区日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 。春季3—5月间,日温差较大,温度常在 $0^{\circ}\text{C}$ 上下波动,土壤的冻融交替频繁。试验用土为农田0—20 cm的表层土壤,土壤运至实验室后过5 mm $\times$ 5 mm筛,除去土壤中的植物残体、石砾。黑土的基本理化性状见表1。

表1 黑土的基本理化性状

| 土样 | 容重/<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | pH 值 | 有机质/<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 饱和质量<br>含水率/% | 有效磷/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 全磷/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 有效氮/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 速效钾/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|----|--|------|---|---------------|--|---|--|--|
| 黑土 | 0.90                                     | 5.85 | 65.89                                     | 55.76         | 20.94                                      | 902.20                                    | 284  | 112  |

### 1.2 样品培养

首先,配置不同浓度的 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 溶液,用喷壶均匀的喷洒到土壤表面,配置成有效磷含量为20,40,60,80,100,120 mg/kg,质量含水率为20%的土壤样品,每个有效磷背景值土样均配置5个重复,将土壤分别装在长、宽、高为30 cm $\times$ 10 cm $\times$ 12 cm的实验槽中,并使土壤达到试验设计容重 $0.9\text{ g}/\text{cm}^3$ 。然后,将蒸馏水均匀喷洒于土壤表面,控制质量含水率分别为20%,30%,40%,50%,60%。最后,在实验槽上覆盖保鲜膜以防止冻融过程中的水分蒸发,常温下培养48 h,使磷素吸收稳定,然后将土壤样品放置在冻融循环仪中,设定 $-10^{\circ}\text{C}$ 条件下冻结12 h, $7^{\circ}\text{C}$ 条件下融化12 h,冻融循环仪可以连续快速的控制温度的上升和下降。

### 1.3 测定方法与统计分析

在冻融循环0,1,2,3,5,10,15,20,30次时取土样,土样在室内阴凉处风干,研磨后过100目筛,用 $0.5\text{ mol/L NaHCO}_3$ 法测定土壤中的有效磷,所有测

定皆重复3次。采用SPSS 19.0软件对数据进行统计分析,采用方差分析(One-way ANOVA)比较各因素对有效磷含量的影响。数据处理采用差值法,即有效磷含量为每1次冻融循环与0次冻融循环的差值。

## 2 结果与分析

### 2.1 方差分析结果

如表2所示,3个影响因子对有效磷含量的影响随着冻融循环次数的增加而变化。在0~30次循环中,土壤有效磷背景值(APb)对有效磷含量的影响最大,其次为冻融循环次数和含水率。0~5次循环中,冻融循环次数的影响程度远远大于有效磷背景值和含水率,3种因子都达到显著性影响。在5~20次循环中,冻融循环次数的影响逐渐减小,有效磷背景值的影响达到最大。20~30次循环中,冻融循环次数的影响继续下降,有效磷背景值的影响程度远远大于冻融循环次数和含水率。含水率对有效磷的影响较为稳定,在0~5和5~20次循环中影响最小。

表2 有效磷变化量的方差统计分析

| 冻融循环次数 | 冻融循环次数(FTC) |       | 含水率(W) |       | 有效磷背景值(APb) |       |
|--------|-------------|-------|--------|-------|-------------|-------|
|        | F           | p     | F      | p     | F           | p     |
| 0~30   | 16.575      | 0.000 | 7.933  | 0.000 | 25.647      | 0.000 |
| 0~5    | 20.516      | 0.000 | 5.032  | 0.001 | 6.610       | 0.000 |
| 5~20   | 13.463      | 0.000 | 6.660  | 0.000 | 21.924      | 0.000 |
| 20~30  | 1.440       | 0.242 | 4.278  | 0.009 | 13.154      | 0.000 |

注:F代表F检验统计量,p为统计显著性, $p<0.05$ 存在显著性差异。

## 2.2 冻融循环次数对有效磷含量变化的影响

根据表 3 得出,30 次循环中相邻冻融循环处理有效磷含量的变化大多具有显著性差异。在 0~30 次循环中,各土壤有效磷含量的变化表现出双峰型曲线特征,交替出现两次谷值和两次峰值,在 0~5 次循环中有效磷含量变化剧烈,第 1 次循环后有效磷含量显著下降,下降幅度为 0~2.2 mg/kg,出现第一次谷

值,第 2 次循环后迅速上升,在 3~5 次循环中出现第一次峰值。

在 5~20 次循环中,有效磷含量的变化相对平缓,表现为先下降再上升再下降,在 10 次循环左右出现第二个谷值,在 15 次循环左右出现第二次峰值。20~30 次循环间,有效磷含量较稳定,30 次循环后,大多数土壤有效磷含量低于未冻土。

表 3 含水率为 20%~60% 的土壤 30 次循环中土壤有效磷含量的变化

| 循环次数 | 含水率/<br>% | 土壤有效磷含量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |                       |                      |                        |                       |                      |
|------|-----------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
|      |           | 20                             | 40                    | 60                   | 80                     | 100                   | 120                  |
| 0    |           | 0.000 <sup>Aa</sup>            | 0.000 <sup>Bb</sup>   | 0.000 <sup>Bb</sup>  | 0.000 <sup>Bb</sup>    | 0.000 <sup>Bb</sup>   | 0.000 <sup>Cc</sup>  |
| 1    |           | -1.604 <sup>Fg</sup>           | -0.761 <sup>Dd</sup>  | -2.132 <sup>li</sup> | -1.368 <sup>Gg</sup>   | -1.057 <sup>Dd</sup>  | -1.498 <sup>Fg</sup> |
| 2    |           | -1.253 <sup>Dd</sup>           | -0.378 <sup>Cc</sup>  | -1.059 <sup>Ee</sup> | -0.875 <sup>Ee</sup>   | -1.252 <sup>De</sup>  | -0.345 <sup>De</sup> |
| 3    |           | -0.130 <sup>Cc</sup>           | 0.256 <sup>Aa</sup>   | -0.260 <sup>Cc</sup> | -0.250 <sup>Cc</sup>   | 0.421 <sup>Aa</sup>   | 0.956 <sup>Aa</sup>  |
| 5    | 20        | -0.0520 <sup>Bb</sup>          | -1.153 <sup>Ff</sup>  | 0.135 <sup>Aa</sup>  | 0.240 <sup>Aa</sup>    | -1.174 <sup>Dde</sup> | 0.191 <sup>Bb</sup>  |
| 10   |           | -2.650 <sup>Gh</sup>           | -2.477 <sup>Hh</sup>  | -1.368 <sup>Ff</sup> | -0.970 <sup>EeFf</sup> | -1.629 <sup>Ef</sup>  | -0.263 <sup>De</sup> |
| 15   |           | -1.270 <sup>De</sup>           | -0.981 <sup>Ee</sup>  | -0.613 <sup>Dd</sup> | -0.259 <sup>Cc</sup>   | -0.214 <sup>Cc</sup>  | 1.039 <sup>Aa</sup>  |
| 20   |           | -1.508 <sup>Ef</sup>           | -1.642 <sup>Gg</sup>  | -1.604 <sup>Gg</sup> | -0.676 <sup>Dd</sup>   | -1.064 <sup>Dd</sup>  | -0.094 <sup>Cd</sup> |
| 30   |           | -1.502 <sup>Ef</sup>           | -2.889 <sup>li</sup>  | -1.759 <sup>Hh</sup> | -1.085 <sup>Ff</sup>   | -1.223 <sup>De</sup>  | -0.587 <sup>Ef</sup> |
| 0    |           | 0.000 <sup>Aa</sup>            | 0.000 <sup>Aa</sup>   | 0.000 <sup>Bb</sup>  | 0.000 <sup>Aa</sup>    | 0.000 <sup>Gg</sup>   | 0.000 <sup>Ee</sup>  |
| 1    |           | -1.997 <sup>Hh</sup>           | -1.897 <sup>Ee</sup>  | -0.643 <sup>Cc</sup> | -2.079 <sup>Gg</sup>   | -0.490 <sup>li</sup>  | -1.110 <sup>Gg</sup> |
| 2    |           | -1.881 <sup>Gg</sup>           | -2.445 <sup>Gg</sup>  | -1.268 <sup>Ee</sup> | -1.878 <sup>Ff</sup>   | 0.395 <sup>Ff</sup>   | 0.080 <sup>DEd</sup> |
| 3    |           | -0.265 <sup>Bb</sup>           | -1.897 <sup>Ee</sup>  | -1.388 <sup>Ef</sup> | -0.776 <sup>Cc</sup>   | 1.570 <sup>Bb</sup>   | 0.659 <sup>Cc</sup>  |
| 5    | 30        | -0.641 <sup>Cc</sup>           | -2.276 <sup>Ff</sup>  | -0.613 <sup>Cc</sup> | -1.248 <sup>Dd</sup>   | 0.622 <sup>Ee</sup>   | 0.117 <sup>Dd</sup>  |
| 10   |           | -1.264 <sup>Ee</sup>           | -1.259 <sup>Dd</sup>  | -1.672 <sup>Fg</sup> | -2.646 <sup>Hh</sup>   | -0.269 <sup>Hh</sup>  | -0.231 <sup>Ff</sup> |
| 15   |           | -1.006 <sup>Dd</sup>           | -0.171 <sup>Bb</sup>  | 0.642 <sup>Aa</sup>  | -0.128 <sup>Bb</sup>   | 1.879 <sup>Aa</sup>   | 1.405 <sup>Aa</sup>  |
| 20   |           | -1.263 <sup>Ee</sup>           | -0.524 <sup>Cc</sup>  | -1.001 <sup>Dd</sup> | -1.638 <sup>Ee</sup>   | 1.165 <sup>Dd</sup>   | 0.741 <sup>Bb</sup>  |
| 30   |           | -1.488 <sup>Ff</sup>           | -1.236 <sup>Dd</sup>  | -0.668 <sup>Cc</sup> | -1.655 <sup>Ee</sup>   | 1.370 <sup>Cc</sup>   | 0.0155 <sup>Ee</sup> |
| 0    |           | 0.000 <sup>Dd</sup>            | 0.000 <sup>Ee</sup>   | 0.000 <sup>Ee</sup>  | 0.000 <sup>Cc</sup>    | 0.000 <sup>Gg</sup>   | 0.000 <sup>Aa</sup>  |
| 1    |           | -1.152 <sup>Gg</sup>           | -1.110 <sup>Hh</sup>  | -1.031 <sup>Gg</sup> | -1.625 <sup>Gg</sup>   | -1.261 <sup>Hh</sup>  | -1.262 <sup>Dd</sup> |
| 2    |           | -0.633 <sup>Ff</sup>           | 0.495 <sup>Cc</sup>   | 0.533 <sup>Cc</sup>  | -1.391 <sup>Ff</sup>   | 0.489 <sup>Ff</sup>   | -1.021 <sup>Cc</sup> |
| 3    |           | 1.125 <sup>Aa</sup>            | 1.158 <sup>Aa</sup>   | 1.265 <sup>Aa</sup>  | 0.868 <sup>Aa</sup>    | 1.529 <sup>Bb</sup>   | -0.237 <sup>Bb</sup> |
| 5    | 40        | 0.616 <sup>Bb</sup>            | -0.370 <sup>Ff</sup>  | 0.871 <sup>Bb</sup>  | 0.365 <sup>Bb</sup>    | 1.032 <sup>Dd</sup>   | -2.382 <sup>Gg</sup> |
| 10   |           | -0.136 <sup>Ee</sup>           | -1.277 <sup>li</sup>  | -1.149 <sup>Gh</sup> | -1.263 <sup>Ee</sup>   | 0.002 <sup>Gg</sup>   | -2.309 <sup>Gg</sup> |
| 15   |           | 1.132 <sup>Aa</sup>            | 0.746 <sup>Bb</sup>   | -0.139 <sup>Ff</sup> | -0.866 <sup>Dd</sup>   | 1.874 <sup>Aa</sup>   | -1.505 <sup>Ee</sup> |
| 20   |           | 0.126 <sup>Cc</sup>            | 0.140 <sup>Dd</sup>   | 0.942 <sup>Bb</sup>  | -1.385 <sup>Ff</sup>   | 1.244 <sup>Cc</sup>   | -2.382 <sup>Gg</sup> |
| 30   |           | -0.104 <sup>Ee</sup>           | -0.985 <sup>Gg</sup>  | 0.151 <sup>Dd</sup>  | -1.729 <sup>Hh</sup>   | 0.771 <sup>Ee</sup>   | -2.036 <sup>Ff</sup> |
| 0    |           | 0.000 <sup>Aa</sup>            | 0.000 <sup>Aa</sup>   | 0.000 <sup>Ee</sup>  | 0.000 <sup>Bb</sup>    | 0.000 <sup>Hh</sup>   | 0.000 <sup>Gh</sup>  |
| 1    |           | -3.745 <sup>Ff</sup>           | -2.962 <sup>De</sup>  | -0.229 <sup>Ff</sup> | -3.191 <sup>Hh</sup>   | -0.719 <sup>li</sup>  | -0.744 <sup>Hi</sup> |
| 2    |           | -0.503 <sup>Bb</sup>           | -3.971 <sup>Gh</sup>  | -0.984 <sup>Hh</sup> | -3.223 <sup>Hh</sup>   | 0.632 <sup>Ee</sup>   | 0.624 <sup>Ee</sup>  |
| 3    |           | -3.111 <sup>Dd</sup>           | -2.515 <sup>Cc</sup>  | -0.236 <sup>Ff</sup> | -1.601 <sup>Ff</sup>   | 1.483 <sup>Cc</sup>   | 1.502 <sup>Cc</sup>  |
| 5    | 50        | -3.870 <sup>Gg</sup>           | -3.281 <sup>EFf</sup> | 0.986 <sup>Cc</sup>  | -1.758 <sup>Gg</sup>   | 1.880 <sup>Bb</sup>   | 1.883 <sup>Bb</sup>  |
| 10   |           | -1.350 <sup>Cc</sup>           | -3.371 <sup>Fg</sup>  | -0.613 <sup>Gg</sup> | -1.341 <sup>Ee</sup>   | 1.129 <sup>Dd</sup>   | 1.142 <sup>Dd</sup>  |
| 15   |           | -3.077 <sup>Dd</sup>           | -2.003 <sup>Bb</sup>  | 2.205 <sup>Aa</sup>  | 0.618 <sup>Aa</sup>    | 2.023 <sup>Aa</sup>   | 2.029 <sup>Aa</sup>  |
| 20   |           | -3.370 <sup>Ee</sup>           | -3.238 <sup>Ef</sup>  | 1.475 <sup>Bb</sup>  | -0.236 <sup>Cc</sup>   | 0.384 <sup>Ff</sup>   | 0.389 <sup>Ff</sup>  |
| 30   |           | -3.971 <sup>Hh</sup>           | -2.871 <sup>Dd</sup>  | 0.881 <sup>Dd</sup>  | -0.619 <sup>Dd</sup>   | 0.244 <sup>Gg</sup>   | 0.259 <sup>Fg</sup>  |
| 0    |           | 0.000 <sup>Aa</sup>            | 0.000 <sup>Aa</sup>   | 0.000 <sup>Bb</sup>  | 0.000 <sup>Aa</sup>    | 0.000 <sup>Cc</sup>   | 0.000 <sup>Aa</sup>  |
| 1    |           | -3.214 <sup>Ff</sup>           | -1.257 <sup>Cc</sup>  | -2.720 <sup>Hh</sup> | -1.148 <sup>Ee</sup>   | -1.142 <sup>Hh</sup>  | -2.138 <sup>Gg</sup> |
| 2    |           | -1.357 <sup>Cc</sup>           | -2.627 <sup>Gg</sup>  | -1.844 <sup>Ee</sup> | -0.475 <sup>Cc</sup>   | -0.243 <sup>Ee</sup>  | -1.617 <sup>Ee</sup> |
| 3    |           | -0.236 <sup>Bb</sup>           | -1.873 <sup>Ee</sup>  | -0.603 <sup>Dd</sup> | -0.230 <sup>Bb</sup>   | 0.239 <sup>Bb</sup>   | -0.763 <sup>Cc</sup> |
| 5    | 60        | -2.716 <sup>Ee</sup>           | -0.481 <sup>Bb</sup>  | -2.006 <sup>Ff</sup> | -1.758 <sup>Gh</sup>   | -0.159 <sup>DEd</sup> | -1.745 <sup>Ff</sup> |
| 10   |           | -4.002 <sup>Gg</sup>           | -2.255 <sup>Ff</sup>  | -2.127 <sup>Gg</sup> | -1.010 <sup>Dd</sup>   | -0.654 <sup>Gg</sup>  | -0.347 <sup>Bb</sup> |
| 15   |           | -2.375 <sup>Dd</sup>           | -1.685 <sup>Dd</sup>  | 0.510 <sup>Aa</sup>  | -0.227 <sup>Bb</sup>   | 1.128 <sup>Aa</sup>   | -1.366 <sup>Dd</sup> |
| 20   |           | -3.967 <sup>Gg</sup>           | -3.109 <sup>Hh</sup>  | -0.355 <sup>Cc</sup> | -1.457 <sup>Fg</sup>   | -0.370 <sup>Ff</sup>  | -2.118 <sup>Gg</sup> |
| 30   |           | -4.347 <sup>Hh</sup>           | -3.554 <sup>li</sup>  | -0.607 <sup>Dd</sup> | -1.238 <sup>Ef</sup>   | -0.129 <sup>Dd</sup>  | -2.119 <sup>Gg</sup> |

注:同列不同小写字母表示显著性差异( $p < 0.05$ );同列不同大写字母代表显著性差异( $p < 0.01$ );有效磷变化量为土壤每次循环与 0 次循环的差值,正值表示增加,负值表示减少。

有效磷含量在 0~5 次循环中变化剧烈,在 1 次循环后显著下降,2 次循环后逐渐升高,这与王风等<sup>[5]</sup>的研究结果相似,即黑土的有效磷含量在 -10℃ 和 -20℃ 条件下,2 次循环后显著增加 ( $p > 0.05$ )。在 0~5 次循环中,冻融循环次数对有效磷含量的影响占主导地位,冻融循环作用使土壤温度变化速率、通气性及土壤水分等土壤性质发生突发性改变,微生物的活动暂时受到影响,土壤有机质分解和矿化过程受到抑制,因此有效磷含量在第一次循环后显著下降。本试验用土为黑龙江省北安市耕地边的多年黑土,每年春秋两季频繁经受冻融循环作用,土壤中微生物对冻融循环作用的适应性较强,随着残余微生物对冻融循环作用的逐步适应,利用并消耗从已死亡的细菌中释放出来的有机质,其活性迅速恢复,且前 2 次的冻融循环作用激发了对有机质最大的矿化速率<sup>[6-7]</sup>,因此 3~5 次循环中,有效磷含量迅速增加并达到峰值。

5~20 次循环中,有效磷的含量表现为先下降再升高再下降的过程,在循环 10~15 次时出现第二次峰值,这期间的变化主要与土壤团聚体有关。有研究认为<sup>[8]</sup>,开始的几次冻融循环作用,土壤中少量水溶性粘结剂的沉淀使团聚体稳定性增加,随后由于冰晶的形成压缩周围的团聚体并产生断裂面,这种减弱过程的持续发生使团聚体稳定性下降。Edwards 等<sup>[9]</sup>的研究也得出,土壤冻融 15 次后,团聚体含量整体表现为降低趋势。团聚体作为土壤的养料库,随着其逐渐破碎,土壤中有机质的相对含量增加,有机质起着氮、磷、钾载体的作用,且作为微生物生长繁殖必不可少的重要的能量物质,微生物的分解能力增强,有效磷含量增加。15 次循环后,从团聚体中释放出的可溶性有机质含量下降,而土壤中原有的有机质却在不断的被活着的微生物利用分解,随着有机质含量的减少,微生物的分解速率减慢,有效磷含量下降。

在 20~30 次循环中,冻融循环次数的影响程度持续下降。土壤性质稳定,土壤溶液中的养分元素与有机质、微生物体之间保持平衡,即有机态养分的矿化和矿化产物的同化固定保持平衡<sup>[10]</sup>,因此大部分土壤有效磷含量基本稳定。

### 2.3 含水率对有效磷含量变化的影响

如表 3 所示,含水率为 20%,30%,40% 的土壤,有效磷含量的变化规律相同,而含水率为 50% 和 60% 的土壤,变化的总体规律不明显,尤其含水率为 50% 的土壤,各土壤有效磷含量的第一次谷值、第一次峰值、第二次谷值和第二次峰值均出现在不同的循环次数中,且有效磷含量的波动幅度较大。含水率为 20%,30%,40%,50%,60% 的土壤,有效磷的最大变

化幅度平均为 2.376,1.993,1.616,3.002,2.607 mg/kg,且含水率为 60% 的土壤,除有效磷背景值为 120 mg/kg,冻融循环 20~30 次有效磷的变化无显著性差异外,其余相邻冻融循环次数间有效磷的变化量均存在显著性差异。可见,含水率越高,有效磷含量的波动幅度越大,高含水率土壤的有效磷含量在冻融循环过程中变化较剧烈。

土壤冻融作用的本质是土体内水分体积的变化引起的土壤性质的变化,所以冻融作用对土壤的影响与含水率有密切联系。在 0~30 次循环中,含水率对有效磷含量达到显著性影响,在 5~20 次循环中的影响程度最大,有研究表明,因为初始的冻融循环作用可以加强团聚体的稳定性,而 5 次循环后,团聚体的稳定性下降<sup>[8-9]</sup>,冰晶膨胀的破碎作用在团聚体稳定性下降过程中起到促进作用,并且含水率对团聚体的影响大于冻融循环作用。在冻融循环过程中,团聚体的稳定性与土壤的初始含水率成反比,接近饱和的含水率对团聚体的破碎能力最强,冻融循环作用使土壤发生反复的膨胀与收缩效应,造成土壤层相互之间的不断挤压,随着含水率的升高,这种挤压对土壤团聚体的破坏作用不断增强。由于冻结过程中土壤结构变化存在不均匀性,受冰晶在气孔中扩张破坏颗粒与颗粒之间的连接而被破坏的团聚体和由于受周围破碎团聚体的挤压而受收缩作用保护的团聚体同时存在于土壤中,含水率越高,受膨胀作用破坏的团聚体和受收缩作用保护的团聚体含量变化越剧烈,团聚体内释放出的有机质含量不稳定,微生物的矿化速率受环境和有机质含量的影响变化较大,因此有效磷含量变化不稳定。

### 2.4 有效磷背景值对有效磷含量变化的影响

如表 3 所示,有效磷背景值为 80,100,120 mg/kg 的土壤,相邻冻融循环次数有效磷具有更多的无显著性差异的变化量或者含量变化幅度较小。有效磷背景值为 20,40,60,80,100,120 mg/kg 的土壤,有效磷的平均变化幅度分别为 5.492,5.118,4.967,4.086,3.568,3.998 mg/kg,可见,有效磷背景值高的土壤有效磷含量较稳定。

有效磷背景值在 0~30 次循环中达到了显著性影响,在 5~20 和 20~30 次循环中影响程度最大。有效磷背景值通过影响土壤中有机质的含量来影响团聚体的稳定性,稳定的团聚体内微生物的活性和分解速率受冻融循环作用影响较小,有效磷含量较稳定。耕地黑土中有机肥含量较高,在试验初期  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  的配施下,有利于土壤中有机质的积累,并且增加的有机质以易氧化的有机质为主<sup>[11-12]</sup>,有机质

可以刺激微生物产生黏结剂,且作为微生物生命活动的能源物质,在微生物作用下分解,释放腐蚀酸等物质,粘结土壤颗粒,形成土壤团聚体,真菌和放线菌还可以产生菌丝,缠绕、固定土壤团粒结构<sup>[13]</sup>,而大团聚体内包含了更多新形成的有机质,经过冻融循环后,可以为微生物提供了更充足的能量,有利于其在环境变化后快速适应及生长恢复,土壤的各种功能恢复也快<sup>[14]</sup>,由此可见,微生物对团聚体的粘结作用与团聚体对有机质的保护作用之间具有相互促进的关系,因而冻融循环作用对有效磷含量高的土壤物理性质及生物化学性质的影响较小,磷素的分解和固定速率较为稳定,含量变化较平缓。

### 3 结论

(1) 冻融循环次数(FTC)、含水率(W)、有效磷背景值(APb)对黑土有效磷含量的影响随冻融循环次数的增加而变化,冻融循环次数(FTC)在 0~5 次循环中对有效磷含量的影响最大,5 次循环后逐渐下降,含水率(W)在 5~20 和 20~30 次循环中影响最大。

(2) 在 0~30 次冻融循环中,有效磷含量的变化均表现为双峰型曲线,相邻冻融循环处理有效磷含量的变化量大多具有显著性差异,有效磷含量变化由剧烈到平缓,在 0~5 次循环中变化剧烈,5~20 次循环中相对平缓,20~30 次循环中变化较小。

(3) 土壤含水率越高,有效磷含量的波动幅度越大,高含水率土壤的有效磷含量在冻融循环过程中变化较剧烈。

(4) 土壤有效磷背景值越高,冻融循环过程中有效磷含量越稳定。

气候变化将造成中高纬度地区春季解冻期冻融循环次数的增多,在此背景下,研究冻融作用对磷素变化的影响机制对明确生态系统中磷素的循环规律、准确预测区域磷素收支情况、指导农业生产和预防非点源污染具有重要意义。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1):247-255.
- [2] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, et al. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 215-238.
- [3] Bechmann M E, Kleinman P J A, Sharpley A N, et al. Freeze-thaw effects on phosphorus loss in runoff from manured and catch-cropped soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(6):2301-2309.
- [4] 周旺明,王金达,刘景双,等. 冻融及枯落物对湿地土壤淋溶液的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(10): 927-932.
- [5] 王风,朱岩,陈思,等. 冻融循环对典型地带土壤速效氮磷及酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 118-123.
- [6] Goodroad L L, Keeney D R. Nitrous oxide emissions from soils during thawing[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1984, 64(2):187-194.
- [7] Burton D L, Beauchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1):115-122.
- [8] Lehrsch G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5):1401-1406.
- [9] Edwards L M. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1991, 42(2):193-204.
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 202-203.
- [11] 王伯仁,徐明岗,文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 97-100.
- [12] 马俊永,李科江,曹彩云,等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2):236-241.
- [13] Winsome T, McCool J G. Changes in chemistry and aggregation of a California forest soil worked by the earthworm *Argilophilus papillifer* Eisen[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13):1677-1687.
- [14] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(8):1061-1066.