

不同开垦年限农田黑土磷素形态及数量变化^①

谷思玉¹, 王宁娟¹, 陈 渊², 胡 洋¹, 聂艳龙¹, 刘晓冰^{2*}

(1 东北农业大学, 哈尔滨 150030; 2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘 要: 试验研究了黑龙江省不同经纬度不同开垦年限的 4 个地区农田黑土磷素形态分布及数量变化。结果表明: 随开垦年限增加的农田黑土, 全磷逐渐升高; 有机磷含量呈先升高再降低的趋势; 速效磷、Al-P、Fe-P、Ca-P 呈先降低再升高的趋势; O-P 变化不显著; 无机磷各组分的绝对变化量排序为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P; 变化强度为 Fe-P>Ca-P>O-P>Al-P。对于开垦年限均为 100~150 年的侵蚀程度不同的双城和宾县农田黑土, 宾县侵蚀区黑土全磷、Al-P、Fe-P、O-P、有机磷含量高于双城非侵蚀区黑土; 速效磷、Ca-P 非侵蚀区高于侵蚀区; 黑土由非侵蚀到侵蚀无机磷各组分的绝对变化量排序为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P; 变化强度为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P。黑土的速效磷、有机磷与全磷之间存在极显著的相关性; 无机磷中的 Ca-P、Al-P、O-P 是有效的磷源。

关键词: 黑土; 开垦年限; 磷素; 空间分布特征

中图分类号: S158.1

黑土被称为世界上最肥沃的土壤, 它在农业、环境保护等方面都具有很高的研究价值^[1]。我国黑土区位于东北松辽流域, 主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古 4 省(区), 其中黑龙江省面积为 45.25 万 km², 占我国黑土总面积的 44%^[2]。但是, 目前东北黑土区已经出现水土流失、黑土退化等问题, 水土流失是黑土地生态退化的主因, 目前, 黑龙江省水土流失面积占总面积的 34%^[3]。有关研究显示, 黑土退化显著表现方式有: 黑土侵蚀、黑土贫瘠化、黑土的荒漠化和盐渍化^[4]。黑土退化成为制约东北地区农业可持续发展的主要因素^[5]。磷是植物生长发育必需的三大营养元素之一, 植物生长发育过程中所需要的磷主要来自土壤和肥料而肥料磷施入土壤后经一系列的化学、物理化学或生物化学过程, 转化为磷酸盐并迅速为土壤矿物吸附固定或为微生物固持, 使其在当季作物的利用率仅为 5%~20%, 加上作物的后效, 一般也不超过 25%, 绝大多数磷肥以无效态存在于土壤中^[6-7], 我国约 1/3~1/2 的耕地土壤缺磷(缺乏植物可利用的磷)^[8]。磷素通常被认为在土壤中不容易移动, 但在最近 10 年已有报道指出, 当磷素超过饱和吸附点时易产生磷素淋洗, 且过量磷肥投入和不合理的灌溉方式, 极大地增加了磷素的淋失风险^[9]。有研究表明,

在开垦后的短期内, 土壤有机质含量迅速下降, 土壤全磷含量也随之降低, 速效磷含量会有所上升。随着开垦时间的增长, 加之连年施用磷肥, 土壤磷的数量、形态及其有效性必然会发生较大的变化^[10]。目前, 针对黑龙江省不同开垦年限且开垦年限跨度较大、退化程度不同黑土磷素变化规律研究甚少, 因此, 本试验选择了黑龙江省开垦年限为 40~150 年的 4 个地区的农田黑土作为研究对象, 研究开垦年限对农田黑土磷素肥力特征的影响, 探讨不同开垦年限磷素在土壤中的动态变化, 为优化农田黑土磷素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

本试验根据前期已完成的典型黑土带调查和土壤退化研究积累, 按照黑土开垦年限和有机碳下降程度划分的退化 4 个阶段, 在黑龙江省典型黑土带上选取代表着退化初级阶段黑龙江省北安市、退化发展阶段黑龙江省海伦市、退化动态平衡阶段的黑龙江省双城市(非侵蚀区)以及危机阶段黑龙江省宾县(侵蚀区)为研究区域。分别选取各区域农田黑土作为研究对象。典型黑土区成土母质比较单纯, 主要有 3 种: 第

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171229)、黑龙江省回国基金项目(LC201021)和黑龙江省自然基金面上项目(C200902)资助。

* 通讯作者(liuxb@neigae.ac.cn)

作者简介: 谷思玉(1964—), 女, 黑龙江肇源人, 教授, 主要研究方向为土壤肥力与修复。E-mail: gusiyu777@163.com

三纪砂粒黏土层、第四纪砂粒黏土层、第四纪全新世砂粒黏土层，其中以第 2 种分布面积最广^[11]。每个样地采集 5 个点的 0~20 cm 土层样品。采样点概况见表 1。

表 1 采样地概况
Table 1 The description of sampling sites

项目	北安市	海伦市	双城市	宾县
采样时间	2010 年 5 月	2010 年 5 月	2010 年 5 月	2011 年 5 月
经纬度	48.25°N, 126.49°E	47.47°N, 126.98°E	45.39°N, 126.32°E	45.76°N, 127.49°E
全市总面积(km ²)	7 126	4 667	3 112	3 861.5
耕地面积(km ²)	2 333	2 727	1 900	1 640
气温带	寒温带	中温带	中温带	中温带
气候	大陆性季风气候	大陆性季风气候	大陆性季风气候	大陆性季风气候
年降水量(mm)	500~700	500~600	410~520	550~600
年日照时数(h)	2 624	2 600~2 800	2 582	2 707
2002 年农田土壤有机质含量(g/kg)	67.7	45.0	28.7	26.5
开垦后种植方式	垄作，一年一熟， 麦豆米轮作	垄作，一年一熟， 豆米轮作	垄作，一年一熟， 玉米连作	垄作，一年一熟， 豆米轮作
前茬作物	大豆	大豆	玉米	大豆、玉米
开垦年限(a)	40~60	80~100	100~150(非侵蚀区)	100~150(侵蚀区)

北安市：城郊乡地处松嫩平原向小兴安岭过渡的中间地带，东部为小兴安岭低山区，中西部为丘陵漫岗区，地势总趋势为东高西低，基本地势是东北向西南倾斜。海伦市：海伦市位于黑龙江省中部，地处小兴安岭山地向松嫩平原的过渡地带，地势从东北到西南由丘陵、高平原、河阶地、河漫滩依次呈阶梯型逐渐降低，地形地貌复杂，具有漫川漫岗、坡缓坡长、岗川交错、岗洼相间等特点^[12]。双城市：双城市地处松嫩平原东部高平原腹地，自东北向西南倾斜，境内无高山、丘陵，地势平坦，平均海拔高度在 160~180 m。地形坡降比小于 1.7%。地貌按成因类型与形态特征分类，属剥蚀堆积高平原。表层由黄土状粉质黏土构成，其下部为冲湖积层^[13]。宾县：自然概貌为“五山半水四分半田”；张广才岭支麓余脉延伸全县，地势为南高北低，南部山地呈条状沿东南县境延伸，中部为丘陵地带，北部沿江为河谷平原区。

1.2 测定项目及方法

土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮，钼锑抗比色法^[14]测定；土壤速效磷采用 Olsen 法^[14]测定；土壤无机磷分组采用 Chang 和 Jackson 无机磷组分分析法^[15-16]，将土壤无机磷分为 4 种形态分别是 Al-P、Fe-P、O-P(闭蓄态磷)以及 Ca-P；土壤有机磷采用灼烧法测定^[14]。每个样品测定样均 3 次重复。

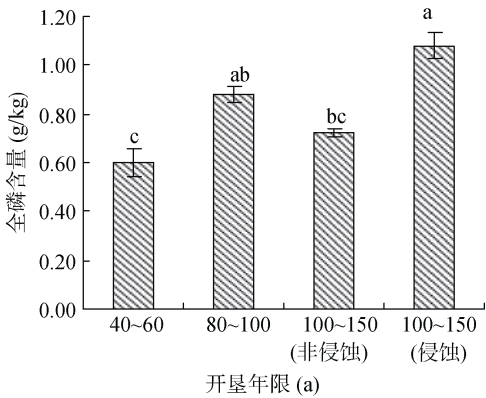
1.3 数据分析

数据处理采用 Excel 2003 和 DPS 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同开垦年限农田黑土全磷、速效磷、有机磷的变化

2.1.1 不同开垦年限农田黑土全磷的变化 土壤全磷量即磷的总储量，包括有机磷和无机磷两大类。土壤中的磷素大部分是以迟效性状态存在，因此土壤全磷含量并不能作为土壤磷素供应的指标，全磷含量高时并不意味着磷素供应充足，而全磷含量低于某一水平时，却可能意味着磷素供应不足。不同开垦年限黑土全磷变化见图 1，结果表明：随开垦年限的增加黑土全磷含量大体呈升高趋势，开垦 100~150 年的



(图中小写字母不同表示不同开垦年限黑土全磷含量差异达到 $P<0.05$ 差异水平，下同类同)

图 1 不同开垦年限黑土全磷含量变化

Fig. 1 Changes of total-P content in black soils from different cultivation years

非侵蚀区黑土全磷含量呈不显著降低的趋势,降低的原因可能是受磷素自身化学性质影响,磷素在土壤中移动性较差,但是长期使用磷肥和大量灌水仍然会导致表层磷素向下层淋失^[17],开垦 40~60 年与开垦 80~100 年的黑土全磷含量差异显著。开垦年限 100~150 年的宾县黑土,其全磷含量最高,达 1.08 g/kg,比开垦 40~60 年的北安黑土全磷增加了 81.1%,且与开垦年限相同的双城黑土差异达到显著,增加了 51.5%。这可能是由于 20 世纪 80 年代以来,我国农业大量施用化肥,因此随着开垦年限的增加,全磷大量积累。

2.1.2 不同开垦年限农田黑土速效磷的变化 土壤速效磷是指能为当季作物吸收利用的磷,它的含量是土壤磷素供应的指标,了解速效磷的供应状况,对施肥有着直接的指导意义。由图 2 可知,速效磷随开垦年限增加呈“V”字型变化,即先降低,后升高,速效磷含量最低为 26.71 mg/kg,最高为黑土退化动态平衡的海伦市,为 45.3 mg/kg。而开垦年限均为 100~150 年的双城市 and 宾县的农田黑土,则侵蚀区的速效磷低于非侵蚀区,降低了 28.7%。各地区黑土速效磷差异均不显著。通过黑土全磷与速效磷的分析,可以看出,虽然随着开垦年限的增加黑土全磷含量显著升高,但速效磷变化却不显著,这说明施入土壤的大量磷素在土壤中以无效态储备起来。由此可见,如何提高农田黑土磷素的有效性是十分重要的。

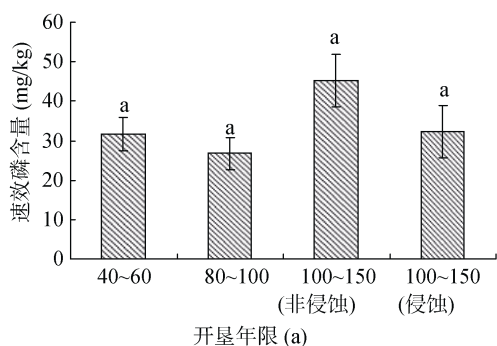


图 2 不同开垦年限黑土速效磷含量变化

Fig. 2 Changes of available-P in black soils from different cultivation years

2.1.3 不同开垦年限农田黑土有机磷的变化 有机磷在土壤磷库中占相当大的比例。从世界范围的土壤看,有机磷在土壤中的比重大约占 15%~80%。我国大部分土壤有机磷占土壤全磷的 20%~40%,且有逐年增加的趋势。有资料显示,土壤有机磷含量因土壤母质、土壤类型、土壤特性、土壤质地、植被类型、气候季节变化及土地管理措施而不同。一般认为,母质全磷量高,其土壤有机磷含量就高;母质全磷量低,

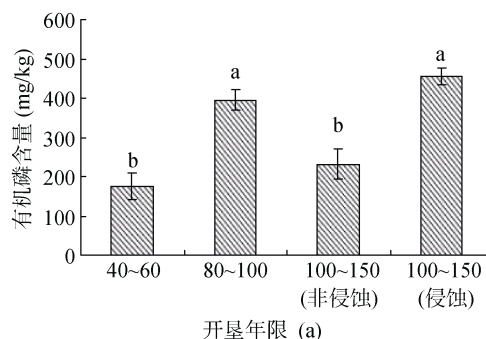


图 3 不同开垦年限黑土有机磷含量变化

Fig. 3 Changes of organic-P in black soils from different cultivation years

其土壤有机磷含量就低^[18]。由图 3 可知,黑土有机磷含量随开垦年限的增加以开垦 80~100 年的海伦区为分界点呈先升高再降低的趋势,而开垦年限 100~150 年的宾县黑土区,其有机磷含量高于开垦年限 80~100 年海伦区,含量达 456.04 mg/kg。通过差异性分析,可以看出,开垦 40~60 年、开垦 80~100、开垦 100~150 年(非侵蚀)的黑土有机磷含量变化差异显著。开垦 100~150 年(侵蚀)与开垦 100~150 年(非侵蚀)的黑土有机磷含量差异也显著,但与开垦 80~100 年的黑土有机磷差异不显著。有机磷占全磷的百分比分别为:29.2%、44.9%、32.3%、42.2%。可以看出开垦 80~100 年与开垦 100~150 年的农田黑土其有机磷所占全磷的比例明显升高。一般来说,随着气温升高、雨量增加,土壤有机磷的含量增加,开垦 100~150 年的双城市农田黑土,其有机磷占全磷的比例较低,可能是由于双城市较其他地区降雨量略低造成的。本试验结果显示,黑土全磷与有机磷的变化趋势基本相同,可见二者可能存在一定的相关性。

2.1.4 不同开垦年限农田黑土全磷与速效磷、有机磷的相关性分析 随着全磷在土壤中大量积累,而利用率却很低现状日益严重,研究黑土全磷与速效磷之间的转化也成为重点,而作为土壤磷库的重要组成部分,土壤有机磷对土壤肥力和植物营养也有着重要的影响,其对植物的作用也受到越来越多的关注。土壤有机磷经过矿化分解而转化为有效态磷,然后供给植物吸收利用。在无机磷含量较低的土壤上,有机磷的矿化更成为植物吸收磷素的重要来源。因此,为了更深入地探讨三者之间的关系,利用相关性分析研究了供试农田黑土全磷与速效磷、有机磷之间的相关性,相关系数分别达到 0.254 4* (显著直线正相关)和 0.804 5** (极显著直线正相关),说明通过土地的开垦、长期施肥,黑土全磷可以直接或间接地影响速效磷与有机磷的含量。

2.2 不同开垦年限农田黑土无机磷组分的变化

土壤无机态磷种类较多,成分复杂,各形态无机磷都对作物的磷营养起着十分重要的作用,磷肥的当季利用低,其原因是施入土壤的磷肥很快转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 等形态无机磷^[19],不同形态磷酸盐的有效性差异很大^[20]。因此,本文从黑土中各形态无机磷的含量、相对含量以及不同开垦年限对各形态无机磷影响的强度进行较全面的分析,从而为供试农田黑土磷素的有效性研究提供依据。

对供试农田黑土无机磷进行分组测定,经测定供试黑土的 pH 均介于 5.82 ~ 6.63,属于偏酸性到中性土壤,因此测定时采用 Chang 和 Jackson^[15-16]无机磷分组法将无机磷分成 4 组:① NH_4F 浸提出的 Al-P (磷酸铝盐);② NaOH 浸提出的 Fe-P (磷酸铁盐);③柠檬酸钠和连二亚硫酸钠溶液浸提出的 O-P (闭蓄态磷);④ H_2SO_4 浸提出的 Ca-P (包括氟磷石灰)^[21]。

2.2.1 不同开垦年限农田黑土无机磷各组分含量的变化 (1) Al-P 与 Fe-P 的变化。对于酸性土壤, Fe-P 和 Al-P 是土壤有效磷的主要来源。在石灰性土壤中, Al-P 是一种相当有效的磷源^[22]。供试黑土的 Al-P 含量介于 43.06 ~ 96.30 mg/kg, Fe-P 含量介于 41.61 ~ 136.17 mg/kg(图 4)。由图 4 可知,农田黑土 Al-P 、 Fe-P 含量随开垦年限增加含量均呈先降低再升高的趋势;对于开垦年限相同的两地区黑土,侵蚀区高于非侵蚀区。开垦年限 40 ~ 60 年与 80 ~ 100 年 Al-P 含量差异不显著, Fe-P 含量差异显著;开垦年限相同的两地区黑土, Al-P 含量差异不显著, Fe-P 含量差异显著。

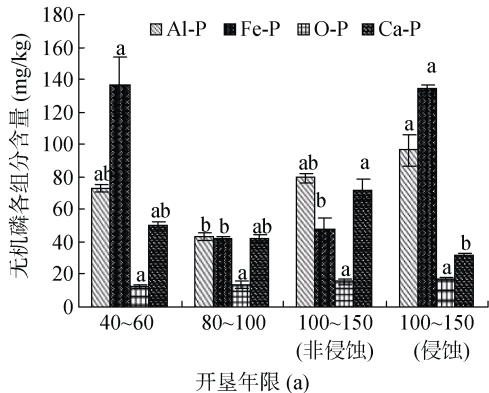


图 4 不同开垦年限黑土无机磷各组分含量变化
Fig. 4 Changes of various inorganic-P fractions in black soils from different cultivation years

(2) O-P 的变化。 O-P 在短时期内不易被作物吸收利用,是作物的潜在磷源^[22]。由图 4 可以看出,黑土 O-P 含量随开垦年限的增加而升高,但差异不显著,这说明,黑土 O-P 含量受开垦年限影响较小,随

黑土开垦年限增加,其含量几乎不变。含量介于 12.53 ~ 17.04 mg/kg。

(3) Ca-P 的变化。通过测定分析,4 个地区农田黑土 Ca-P 含量介于 31.89 ~ 72.19 mg/kg。由图 4 可知,黑土 Ca-P 含量随开垦年限增加含量呈“V”字型变化趋势,即开垦 40 ~ 60 年到开垦 80 ~ 100 年含量降低,而开垦 80 ~ 100 年到开垦 100 ~ 150 年(非侵蚀区)含量升高,这与黑土 Al-P 、 Fe-P 含量变化趋势相同,变化差异不显著。但与 Al-P 、 Fe-P 含量变化不同的是,开垦年限相同的两地,侵蚀区较非侵蚀区呈显著降低的趋势。这可能是由于宾县多为坡耕地,且坡度较大,水土流失严重,使得 Ca-P 大量流失。

2.2.2 不同开垦年限农田黑土中各形态无机磷相对含量 土壤中各无机磷形态的含量及比例均不相同,有研究表明,石灰性土壤中的无机磷以 Ca-P 为主^[23],而对于酸性土壤而言,无机磷则以 Fe-P 、 O-P 为主体^[24]。各形态无机磷对土壤中速效磷的贡献能力也不相同,因此了解各形态无机磷相对含量是十分必要的。

本试验中 4 个地区农田黑土各形态无机磷相对含量如图 5 所示,由图可得到 4 个地区农田黑土无机磷各组分含量排序情况如表 2。

结合供试黑土的 pH 分析, pH 较小的黑土(北安市、宾县), Ca-P 含量较少,只占无机磷总量的 18.31%

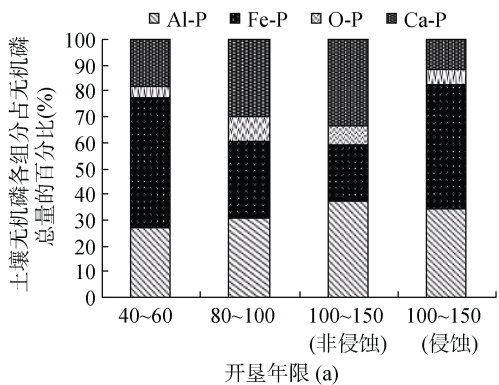


图 5 不同开垦年限黑土无机磷形态相对百分比

Fig. 5 Percentage of various inorganic-P fractions in total inorganic-P in black soils of different cultivation years

表 2 不同开垦年限黑土无机磷各组分含量排序情况

Table 2 Order of various inorganic-P fractions in black soils from different cultivation years

地区	开垦年限(a)	无机磷各组分含量排序
北安市	40 ~ 60	$\text{O-P} < \text{Ca-P} < \text{Al-P} < \text{Fe-P}$
海伦市	80 ~ 100	$\text{O-P} < \text{Fe-P} < \text{Ca-P} < \text{Al-P}$
双城市	100 ~ 150(非侵蚀)	$\text{O-P} < \text{Fe-P} < \text{Ca-P} < \text{Al-P}$
宾县	100 ~ 150(侵蚀)	$\text{O-P} < \text{Ca-P} < \text{Al-P} < \text{Fe-P}$

和 11.42%，Al-P 和 Fe-P 含量较多，且 Fe-P 最多，占无机磷总量的 50.12% 和 47.98%；pH 较大的黑土（海伦市、双城市），Ca-P 含量高于 Fe-P，低于 Al-P，其中，Al-P 含量占无机磷总量的 30.72% 和 36.91%，Ca-P 含量占无机磷总量的 30.00%~33.58%。这说明，黑土无机磷各组分含量受 pH 影响较大。在偏酸性土壤中 Fe-P 占比例最大，在北方偏中性土壤中，则 Ca-P 和 Al-P 占比例最大。

2.2.3 不同开垦年限对农田黑土无机磷各组分影响的强度 由图 4 分别计算无机磷各组分的变化强度，对于不同开垦年限农田黑土，即由开垦 40~60 年的北安黑土到开垦 100~150 年（非侵蚀区）的双城农田黑土，除 Fe-P 含量降低外，其他各组分含量均升高，各组分的绝对变化量排序为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P；变化的强度为 Fe-P>Ca-P>O-P>Al-P。对于开垦年限相同的侵蚀区与非侵蚀区农田黑土，即开垦年限均为 100~150 年的双城区（非侵蚀区）与宾县区（侵蚀区）黑土，除 Ca-P 含量降低外，其他各组分含量均升高，而各组分的绝对变化量排序为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P；变化的强度为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P。

这说明，农田黑土开垦年限及退化程度对无机磷中 Fe-P、Ca-P 影响较大，其变化的强度可达 45.11%~180.57%；对 O-P、Al-P 影响较小，变化强度仅为 8.36%~25.26%。

2.3 不同开垦年限黑土各磷素相关分析

不同形态的磷，其有效性有很大的差异，影响土壤磷素转化和有效性的因素十分复杂，凡是影响土壤中磷素化学过程的各种因素都会影响土壤不同形态磷之间的转化及其对植物的有效性，这些因素包括土壤理化性质、环境因子（温度、水分）、气候条件和种植方式等^[25]。根据前文所述，为进一步探讨磷素的有效性，本文利用相关性分析研究了供试农田黑土各形态磷素与速效磷之间的关系，如表 3 所示。由表 3 可知，有机磷、Fe-P 与速效磷之间无相关关系，而无机磷中的 Ca-P、Al-P、O-P 与无机磷都呈极显著的对数相关关系。这说明，在本试验中，供试黑土的 Ca-P、Al-P、O-P 在不同程度上都可以被 NaHCO₃ 溶液浸提

表 3 不同开垦年限黑土中有机磷、无机磷各形态与速效磷间的相关系数

Table 3 The correlation coefficients between organic-P, various inorganic-P fractions and available-P in black soil from different cultivation years

	有机磷	Ca-P	Al-P	Fe-P	O-P
不同开垦年限黑土速效磷	0.187 6	0.632 0**	0.682 0**	0.284 3	0.567 9**

注：n=40，r_{0.05}=0.304，r_{0.01}=0.393。

出来，是有效的磷源，而有机磷和 Fe-P 活性较差，不易被浸提出来。

3 讨论

王瑞等^[26]研究表明，土壤总磷库与无机磷库都随耕种年限的延长而呈增加的趋势；土壤有机磷库先随开垦年限的增加而减少，但在 50 年左右又开始呈上升趋势；辛刚等^[10]研究表明，开垦后黑土全磷含量无明显规律性变化，但土壤有效磷数量显著上升，在土壤磷的组分上，土壤有机磷数量显著下降，而土壤无机磷明显升高。这与本试验的结果部分不同，可能与开垦年限、地理位置、气温、降水、母质、施肥等条件有关。

王艳玲等^[27]对吉林省黑土进行了无机磷形态组成的研究，利用相关分析和通径分析相结合的方法，研究比较了各无机磷形态对有效磷的相对重要性，结果为：Ca₂-P>Al-P>Fe-P>Ca₈-P>O-P>Ca₁₀-P。本试验的部分结果与此相同，可以看出，黑土中 Al-P 和 Ca-P 都是非常有效的磷源，而本试验中 O-P 也是有效磷源之一，这与王艳玲的研究不符，可能是由于土壤理化性质、环境因子（温度、水分）、气候条件和种植方式等不同造成的。通过本试验无机磷的分析可以看出各形态无机磷的组成是相对稳定的，通过土地开垦，各形态的无机磷可以直接或间接地影响土壤中有效磷的含量。

相关资料显示土壤中的磷素已经由 20 世纪 70 年代前严重亏缺逐渐转变为平衡或略有盈余^[28]。而磷素在土壤中的大量累积既造成了磷肥的大量浪费，也导致农田径流中磷浓度提高，对环境也会造成威胁。高妍等^[29]研究表明，长期超量施肥导致蔬菜保护地土壤磷素过度积累。单艳红等^[30]的研究表明，土壤长期过量的磷肥（包括化肥和有机肥）投入导致土壤磷素水平的提高，从而加大了土壤磷素流失的风险，也加大了磷的淋溶渗漏趋势，对周围水体的质量构成威胁。本试验中全磷随开垦年限的增加而大量积累，而有效磷的变化却不显著，也说明了这一点。原因是近些年磷肥施用过量，而磷肥的利用率低，因此今后对于农田黑土应重视和提倡平衡施肥，控制土壤磷的积累，将研究的重点放在如何提高磷素的有效性才是关键所在。

4 结论

农田黑土随开垦年限增加，全磷逐渐升高；有机磷含量呈先升高再降低的趋势；速效磷、Al-P、Fe-P、

Ca-P 呈先降低再升高的趋势;O-P 变化不显著;无机磷各组分的绝对变化量排序为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P;变化强度为 Fe-P>Ca-P>O-P>Al-P。对于开垦年限均为 100~150 年的侵蚀程度不同的双城和宾县农田黑土,宾县侵蚀区黑土全磷、Al-P、Fe-P、O-P、有机磷含量高于双城非侵蚀区黑土;速效磷、Ca-P 非侵蚀区高于侵蚀区;黑土由非侵蚀到侵蚀无机磷各组分的绝对变化量排序为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P,变化强度为 Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P。供试黑土的速效磷、有机磷与全磷之间存在极显著的相关性,无机磷中的 Ca-P、Al-P、O-P 是有效的磷源。因此,无机磷各形态间的相互转化会直接影响磷肥的后效和利用率,今后在磷肥施用过程中,应进一步改进磷肥施用技术,例如,无机肥与有机肥、生物肥配施等,以增加磷肥的有效性,避免无效磷在土壤中过量积累造成环境的污染。

参考文献:

- [1] 龚子同. 黑土生金——从俄罗斯治理黑土的经验教训看我国黑土的利用[J]. 科学新闻, 2003: 4
- [2] 刘巍, 吕亚泉. 中国黑土地退化成因及生态修复学研究[J]. 东北水利水电, 2006, 24(1): 59-61
- [3] 王小兵, 吴元元, 邓玲. 东北黑土区黑土退化防治与保护研究[J]. 资源与产业, 2008, 10(3): 81-83
- [4] 徐晓斌. 东北黑土退化研究现状及展望[J]. 西部探矿工程, 2008(8): 54-56
- [5] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1): 17-19
- [6] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, 36(1): 104-111
- [7] Stephen M. Phosphate rock. U.S. geological survey[J]. Mineral Commodity Summaries, 2007, 1: 120-121
- [8] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 220-227
- [9] Martina P, Wolf-Anno B, Andeas B. Mineral-nitrogen and phosphorus leaching from vegetable gardens in Niamey, Niger[J]. Plant Nutr. Soil Sci., 2011: 47-55, 174
- [10] 辛刚, 关连珠, 汪景宽. 不同开垦年限黑土磷素的形态与数量变化[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 425-428
- [11] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70
- [12] 钟志红, 李跃彬, 潘春华. 海伦市丘陵区水土流失危害与成因分析[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(5): 151
- [13] 杜超. 双城市地下水资源评价及可持续利用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008
- [14] 史瑞和. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980
- [15] Chang SC, Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science., 1957, 84(1): 133-144
- [16] Petersen GW, Corey RB. A modified Chang and Jackson procedure for routine fraction of inorganic soil phosphates[J]. Soil Sci. Soc. Am Proc., 1966, 30(3): 563-565
- [17] Borling K, Barberis E, Otabbong E. Impact of long-term inorganic phosphorous fertilization on accumulation, sorption and release of phosphorus in five Swedish soil profiles[J]. Nutrient Cycling in Agro-ecosystems, 2004, 69: 11-21
- [18] 赵少华, 宇万太, 张璐, 沈善敏, 马强. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2 189-2 194
- [19] 沈兵松, 张鼎华. 酸性土壤无机磷研究进展[J]. 福建林业科技, 2005, 32(1): 75-78
- [20] 刘建玲, 李仁岗. 栗钙土中磷肥转化及效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(3): 206-211
- [21] 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷有效性的研究[J]. 土壤, 1992, 24(1): 61-64
- [22] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤的形态分布及其有效性[J]. 土壤, 1992, 9(1): 80-85
- [23] 张淑茗, 于淑芳. 石灰性土壤中磷形态和有效性的研究[J]. 土壤肥料, 1992(3): 1-4
- [24] 龚子同. 华中亚热带土壤[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1983
- [25] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响研究[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260-268
- [26] 王瑞, 李晓忠, 周志宇, 秦彧, 姜文清, 田发益, 陈菊兰. 西藏不同年限耕地土壤磷素分级研究[J]. 草业科学, 2010, 27(11): 13-20
- [27] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 蔡洪光. 黑土无机磷形态及其有效性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 86-89
- [28] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-7
- [29] 高妍, 姜佰文, 刘大森, 王春宏, 张迪, 刘学生. 不同种植年限黑土型蔬菜保护地磷素状况的研究[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 121-126
- [30] 单艳红, 杨林章, 沈明星, 王建国, 陆长婴, 吴彤东. 长期不同施肥处理水稻土壤磷素在剖面的分布与移动[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 970-976

Changes of Phosphorus Contents and Forms in Black Soils from Different Cultivation Years

GU Si-yu¹, WANG Ning-juan¹, CHEN Yuan², HU Yang¹, NIE Yan-long¹, LIU Xiao-bing^{2*}

(1 *Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*; 2 *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China*)

Abstract: Phosphorus forms of black soils from different cultivation years in four regions of Heilongjiang Province were investigated in this paper. Results showed that with the increase in cultivation years the total-P content increased, and the content of organic phosphorus increased initially and decreased afterwards. However, the content of available-P, Al-P, Fe-P, Ca-P decreased first and then increased, while O-P content changed slightly. The order of various inorganic-P fractions was Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P; and their change intensity was in the order of Fe-P>Ca-P>O-P>Al-P. For black soils under same cultivation year differing in erosion severity in Shuangcheng and Binxian counties, the contents of total-P, Al-P, Fe-P, O-P in eroded Binxian area were higher than those of non-eroded Shuangcheng area, and the contents of available-P and Ca-P in non-eroded area were greater than those of eroded area. From non-eroded area to eroded area, the change of various inorganic-P fractions was in the order of Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P while the change intensity was in the order of Fe-P>Ca-P>Al-P>O-P. A significant correlation among organic-P, available-P and total-P was found. Ca-P, Al-P and O-P were effective sources of available phosphorus in these black soils.

Key words: Black soil, Cultivation years, Phosphorus, Space distribution