

三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化

秦胜金^{1,2}, 刘景双^{1*}, 王国平¹, 周旺明^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:利用 Hedley 磷(P)分级方法, 比较研究三江平原不同土地利用方式(天然湿地、旱田、水田、弃耕地、人工林地)下土壤 P 形态变化. 结果表明, 不同土地利用方式下土壤总磷(TP)含量表现为: 湿地 > 林地 > 旱田 > 弃耕地 > 水田. 农田土壤的无机磷(TP_i)占 TP 比重显著高于湿地, 有机磷比重则为湿地高于农田, 且水田土壤有机磷(TP_o)比重最小, 弃耕地和林地之间差别很小. 不同土地利用方式土壤活性无机磷含量差异较小, Resin-P 含量约为 32 ~ 36.3 mg·kg⁻¹, NaHCO₃-P_i 含量为 33.77 ~ 50.42 mg·kg⁻¹; 农田土壤 NaOH-P_i 和 C.HCl-P_i 含量高于湿地土壤, 特别是水田中 NaOH-P_i 达 152.4 mg·kg⁻¹, 湿地土壤中 D.HCl-P_i 含量高于农田达 84.3 mg·kg⁻¹, 弃耕地和林地介于二者之间, 表明弃耕后土壤 P 的恢复有向天然湿地的状况发展的趋势. 开垦使湿地所有形态有机磷含量和比重都大幅下降, 其稳定态有机磷 C.HCl-P_o 下降幅度最大, 其在旱田和水田土壤中含量分别仅为湿地中的 25.96% 和 19.26%; 弃耕地有机磷含量比重均有增加, 但是速度十分缓慢, 湿地开垦后土壤 P 的恢复需要很长时间. 不同土地利用方式下土壤 P 形态存在显著的差异.

关键词: 土壤磷形态; 土地利用方式; 三江平原

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2777-06

Phosphorus Fractions Under Different Land Uses in Sanjiang Plain

QIN Sheng-jin^{1,2}, LIU Jing-shuang¹, WANG Guo-ping¹, ZHOU Wang-ming^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Five land-uses type (soybean-field, rice-field, abandoned cultivation, artificial forest, natural wetland) were obtained before planting and soil P fractions were determined by a modified Hedley fraction method. The result showed that the content of total P (TP) in natural wetland was higher than other soil. While the proportion of total inorganic P (TP_i) in TP of farm land soil was higher than that of wetland. Adversely, the proportion of total organic P (TP_o) was higher in wetland and least in rice-field. There was no obvious difference between that of abandoned field and artificial forest. The values of labile inorganic phosphorus (labile P_i) under different land-uses were similar. The contents of Resin-P and NaHCO₃-P_i varied at a range of 32 ~ 36.3 mg·kg⁻¹ and 33.77 ~ 50.42 mg·kg⁻¹, respectively. The contents of NaOH-P_i and C.HCl-P_i in farmland were higher than those of wetland, especially in rice-field which was 152.4 mg·kg⁻¹. But for D.HCl-P_i, the content was higher in wetland with the value of 84.3 mg·kg⁻¹, and the contents of NaOH-P_i, C.HCl-P_i and D.HCl-P_i in abandoned field and artificial forest were in the middle of the above two land use patterns, which indicated that the restoration of soil P in abandoned farmland tended to approach the level of natural wetland. The value and percentage of P_o was decreased greatly with the reclamation of wetland, and the decrease of C.HCl-P_o was the most significant in all forms of organic P, and its values in soybean-field and rice-field were only 25.96% and 19.26% of that in wetland. As the time went by the content of P_o in abandoned arable land increased with very slow speed, which indicated that the restoration of wetland after reclamation would need a long time. The distribution of soil P in different P fractions has significant difference for the land-use change in Sanjiang plain.

Key words: phosphorus fraction; change of land-use; Sanjiang plain

三江平原湿地位于黑龙江省东部, 是中国面积最大的淡水沼泽湿地. 但发展到 2000 年, 湿地已由 1954 年的绝对优势景观转变为劣势景观, 耕地上升为优势景观, 林地面积逐渐减少, 土地覆被格局演化为: 旱地 > 林地 > 湿地 > 水田 > 草地 > 水域 > 居民用地^[1], 湿地面积由 20 世纪 40 年代的占全区总面积的 49.08% 减少到了 20 世纪末的仅占 7.7%^[2]. 土地利用方式的变化造成了元素(如 N、P、K 等)循环过程以及形态组成的变化^[3]. 目前已有针对湿地开垦后土壤 C、N、S 及重金属等变化的研究^[4-7], 但有

关土壤 P 的变化, 特别是 P 形态变化的研究鲜见. P 是初级生产力的重要影响因素, 同时土壤 P 的输出也是造成非点源污染的主要原因, 因此, 探讨湿地开垦后不同利用方式对土壤 P 迁移转化过程的影响有重要意义. 土壤不同形态 P 之间相互转化直接影响

收稿日期: 2007-01-29; 修订日期: 2007-05-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-309); 国家自然科学基金项目(90211003)

作者简介: 秦胜金(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境生态与生物地球化学, E-mail: qinshengjin@neigae.ac.cn; qsj8219@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: liujingshuang@mail.neigae.ac.cn

着 P 的迁移^[8],但传统土壤 P 的测试方法不能定量分析无机和有机磷库的变化^[9],土壤 P 的 Hedley 分级方法是按照 P 形态间转化的地球化学梯度,将由粗到细土壤颗粒中的 P 分为不同形态,这些 P 的形态具有不同的化学特征或包含于不同有机质中^[10],可以定量研究土壤中不同形态 P 之间的转化.一些国外学者已经利用该方法对多种土壤进行了分析,而有关三江平原土壤 P 方面的研究报道极少^[11],尤其是针对湿地在人类活动干扰下,不同土地利用方式中土壤 P 的研究更为欠缺.本研究采用修正的 Hedley 分级方法探讨三江平原湿地土地利用方式的变化对土壤 P 形态的影响,评价土地利用方式下土壤 P 形态的变化趋势及其可能的环境影响,结果对湿地管理保护等有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本研究区域位于三江平原别拉洪河与浓江河河间地带(E133°31',N47°35'),分布有大面积的沼泽湿地并且有几十年的开垦历史,海拔高度 55.4~57.9 m,属北温带湿润大陆性季风气候,区内天然湿地主要有常年积水沼泽和季节性积水沼泽,主要湿地植被有毛果苔草(*Carex lasiocapa*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)和小叶章(*Doyeuxia angustifolia*)等.除湿地外区内主要分布有水田、旱田、人工林地等土地利用类型,农田主要由沼泽湿地和沼泽化草甸垦殖而成,主要种植的作物为大豆和水稻.

1.2 采样及分析测定方法

2006 年 5 月初(开始施肥耕种前)在区域内选取 5 种代表性的土地利用类型(旱地、水田、弃耕地、林地、沼泽化湿草甸)进行样品采集.其中旱田和水田分别为开垦 8 a 的大豆地和水稻田,弃耕地为耕作 10 a 后弃耕 8 a 的旱田.采集各种土地利用类型表层 0~20 cm 土壤,每种类型随机布设 3 个样点,每个点(点与点间隔不小于 10 m)周围取 10 个土壤样品混合为一个土样.土壤样品采集后放入聚乙烯袋中,密封以防止样品污染.样品在室温下自然风干,过 2 mm 筛后密封保存备用.

土壤 P 的分级采用经修正的 Hedley 等^[12]提出的分级方法进行测定,即采用连续提取方法,逐级加入离子交换树脂、0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液、0.1 mol/L 的 NaOH 溶液、稀盐酸、浓盐酸提取出土壤中稳定性由弱到强的各级无机磷和有机磷.最后浸提的残留土壤经高温消解测定残留磷(Residual-P)^[11].其中 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液、0.1 mol/L 的 NaOH 溶液和浓盐酸浸提的 P 又分为有机态和无机态两部分.

测试土壤基本理化性质见表 1.土壤 pH 值采用 pH 计在 V(水):m(风干土)=2.5:1 条件下测定,有机质采用重铬酸钾-硫酸(K₂Cr₂O₇-H₂SO₄)氧化法测定.土壤粒级测定采用激光粒度仪(LS13 320, Beckman Coulter 公司,美国),方法为:用 100 mL 烧杯称取 0.1 g 左右的样品,加入 30 mL 左右的蒸馏水,用超声波清洗仪振荡 20 min,进行样品预处理,使样品彻底分散,然后将处理好的样品用激光粒度仪测

表 1 不同土地利用方式下土壤粒级、有机碳和 pH 变化

Table 1 Properties of soil under different land uses					
项目	旱田	水田	弃耕地	林地	湿地
粘粒(<0.002mm)/%	20.69	— ¹⁾	21.93	19.46	18.98
粉(砂)粒(0.002~0.05mm)/%	78.26	—	76.65	78.91	79.44
砂粒(0.05~2 mm)/%	1.045	—	1.42	1.63	1.58
有机碳/g•kg ⁻¹	31.68	26.14	25.53	34.77	45.68
pH	5.39	5.82	5.01	5.42	6.11

1)表示该值缺失

定,其测量范围 0.1~2 000 μm,测量误差 <1%.

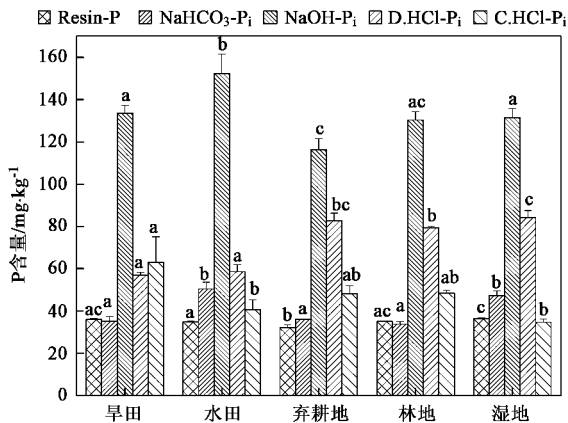
2 结果与讨论

2.1 无机磷形态含量

Hedley 分级方法将土壤无机磷分为 5 种形态,其中 Resin-P 和 NaHCO₃-P_i 为活性无机磷,NaOH-P_i 为中等活性的无机磷,HCl 浸提的无机磷为较稳定

和稳定无机磷形态(D.HCl-P_i, C.HCl-P_i).所研究各土壤中 Resin-P 和 NaHCO₃-P_i 含量都较低,如图 1 所示,Resin-P 含量约为 32.00~36.30 mg•kg⁻¹,NaHCO₃-P_i 含量为 33.77~50.42 mg•kg⁻¹.Resin-P 含量在各土壤间差别较小,NaHCO₃-P_i 含量在水田和天然湿地中显著高于其他土壤,分别达到 50.42 mg•kg⁻¹和 47.27 mg•kg⁻¹,并且水田和天然湿地土

壤中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量高于其 Resin-P 含量,其他 3 种土壤类型的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量与 Resin-P 相差不大. Resin-P 是与土壤溶液 P 处于平衡状态的土壤固相无机磷,其含量变化与不同形态 P 库之间的相互转化密切相关^[13]; $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 主要为吸附在土壤颗粒表面活性较强的 P 组分,淹水可使土壤表面的电荷发生变化从而导致 P 的吸附^[14],水田和湿地土壤含水量较大形成的还原条件,有利于 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 的积累.



同一 P 形态标示不同字母代表不同土地

利用方式间差异显著 ($p < 0.05$)

图 1 不同土地利用方式下土壤无机磷含量

Fig. 1 Content of inorganic P under different land uses

中等活性无机磷 NaOH-P_i 含量在所有研究土壤中均远高于其他无机磷类型,含量约为 $116.25 \sim 152.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 不同土地利用方式土壤 NaOH-P_i 含量有显著差异(如图 1),农田土壤含量高于其他土壤,尤其以水田显著高于其他土壤,含量达 $152.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NaOH-P_i 含量较高与土壤中的 Fe、Al 离子含量有关,因为 NaOH 浸提无机磷主要是被土壤 Fe、Al 氧化物吸附的 $\text{P}^{[12]}$,已有研究也表明三江平原土壤中 NaOH-P_i 含量较高,并与土壤 Fe、Al 离子含量呈显著相关^[11],加上天然湿地开垦后长期施肥也会造成土壤 P 的积累,导致农田中的 NaOH-P_i 含量较高;水田淹水过程可使土壤中的 Fe 离子转化为吸附能力很强的无定形 $\text{Fe}^{[14]}$,促进了土壤中 NaOH-P_i 含量的增加.

D.HCl-P_i 在各土壤中含量相对变化与 NaOH-P_i 相反,为农田土壤含量较低,而弃耕地、林地和天然湿地中的含量较高,并且弃耕地与后 2 种土壤中含量差异均不显著,表明农田中该 P 形态可能是作物有效磷的重要来源之一; C.HCl-P_i 含量在旱田中最

高,为 $63.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水田、湿地中含量较低且与旱田有显著差异,湿地含量最低为 $34.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,林地和弃耕地含量中等,表明开垦后的土壤 C.HCl-P_i 含量呈升高趋势,但其变化在很大程度上还受土壤水分条件的影响.

2.2 有机磷含量和残留磷(Residual-P)的变化

Hedley 分级方法的有机磷形态包括: $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 、 NaOH-P_o 和 C.HCl-P_o. 其中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 主要指易于矿化的可溶有机磷, NaOH-P_o 由腐殖酸和褐菌素等组成, C.HCl-P_o 主要是一些化学性质十分稳定的有机磷^[11].

由图 2 可知,不同土地利用方式下的土壤有机磷含量也有显著差异,尤其湿地土壤与其他土壤差异较大. 各土壤的有机磷中均以 C.HCl-P_o 含量最低,但湿地土壤的含量相对高于其他土壤,含量为 $70.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约是其他土壤的 3.41 ~ 5.19 倍,其他 4 种土壤含量在 $13.58 \sim 20.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 所有土壤有机磷都是 NaOH-P_o 含量最高,约为 $180.15 \sim 317.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并且仍以湿地土壤中 NaOH-P_o 含量最高,约为其他土壤的 1.56 ~ 1.76 倍. 湿地土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 含量也高于其它土壤,各土壤中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 含量约为 $27.89 \sim 95.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,湿地土壤含量是其他土壤的 1.69 ~ 3.44 倍. 总体来说,湿地的各有机磷含量均明显高于其他土壤,比较湿地以外的其它 4 种土壤, NaOH-P_o 、C.HCl-P_o 含量在湿地以外的 4 种土壤中差别不大,只有 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 在水田中的含量低于其他没有积水的土壤,这可能是水田耕作过程中的干湿交替过程可能对土壤有机磷的矿化有一定的促进作用以及农田排水输出的结果.

Residual-P 含量在几种土壤类型间差异不大,含量在 $96.50 \sim 65.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,天然湿地土壤含量要低于其他土壤类型约为 $65.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,旱田和林地的含量相对较高,湿地开垦后对 Residual-P 的积累有一定促进作用.

2.3 土壤 TP 及 TP 结构组成

由表 2 可知研究区域天然湿地 TP 含量约为 $882.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较开垦后的其他土壤类型高约 $204.40 \sim 229.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,由图 3 可看出这种差异主要是湿地开垦后有机磷含量的下降造成的;在除湿地外的 4 种土地利用类型中,林地 TP 含量最高,为 $678.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水田含量最低,这可能与水田耕作过程中的排水造成养分输出有关^[15];从图 3 可知湿地土壤以有机磷为主,有机磷占 TP 的 54.8%,而其

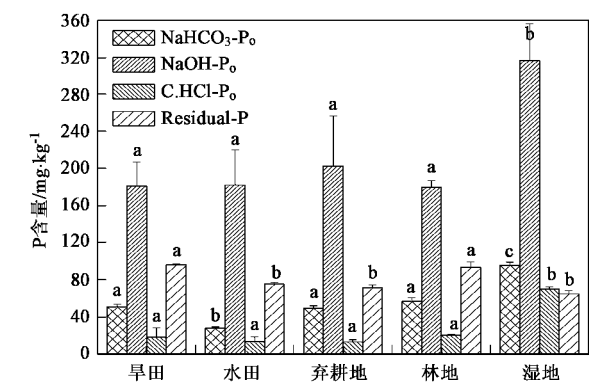


图2 不同土地利用方式下土壤有机磷(P₀)含量
Fig.2 Contents of P₀ under different land uses

他土壤中无机磷比重高于有机磷,湿地的开垦造成了土壤有机磷比重迅速下降,当退耕后土壤有机磷有所恢复,弃耕草地有机磷占TP的比重仅次于天然湿地,其有机磷比重分别比旱田和水田高3.4%和5.5%,也高于林地2.6%,Chen等^[16]对草地及与其相邻的人工林地对比研究中也发现,草地的有机磷要高于林地,而且林地的TP、无机磷和微生物磷均高于草地,林地中的微生物活性强养分循环速率较快.但本研究中林地TP虽高于弃耕草地,但无机磷

反比弃耕地略低,这可能是由于林地植被对P的积累量要远远大于弃耕后恢复的禾本植被.无机磷占TP比重在湿地土壤中最小,其他土壤间差别不大,比较而言以水田无机磷比重所占最大,同时水田的有机磷含量比重最小而无机磷比重最高,这主要是因为水田田间管理方式下,土壤的干湿交替过程促进了有机磷的矿化,而降低了有机磷的比例.

由表2也可以看出,土壤无机磷以中等活性(NaOH-P_i)和稳定态无机磷(C.HCl-P_i)上的差别最大,主要表现为:在湿地土壤中其占TP比重最小,湿地的C.HCl-P_i相对其他土地利用类型所占比重值仅为其他土壤的41.5%~60.9%,远低于开垦后的土壤,说明开垦在一定程度上使稳定形态的无机磷增加;对除湿地外的土壤类型进行比较,NaOH-P_i在农田中比重最高,而D.HCl-P_i在弃耕地和林地中较高.所有土壤类型都是NaOH-P_i占TP比例最高,尤其是在水田中占到了23.9%,其次为HCl浸提的无机磷形态.湿地土壤各有机磷形态所占比重都高于其他土壤,不同土壤都以NaOH-P₀形态所占比例最大,其次为NaHCO₃-P₀,Residual-P在旱田和林地中比重较其他土壤大,天然湿地比重最小,也说明了开垦后土壤P向更为稳定的形态转化.

表2 土壤TP含量及各形态P占TP比重/%
Table 2 Content of TP and the proportion of phosphorus fractions in TP/%

类型	TP /mg·kg ⁻¹	Resin-P	NaHCO ₃ -P _i	NaOH-P _i	D.HCl-P _i	C.HCl-P _i	NaHCO ₃ -P ₀	NaOH-P ₀	C.HCl-P ₀	Residual-P
旱田	671.9	5.4	5.2	19.9	8.5	9.4	7.6	27.0	2.7	14.4
水田	636.5	5.5	7.9	23.9	9.2	6.4	4.4	28.7	2.1	11.9
弃耕地	652.65	4.9	5.5	17.8	12.7	7.4	7.6	31.1	2.0	11.0
林地	678.10	5.2	5.0	19.2	11.7	7.1	8.4	26.6	3.1	13.8
湿地	882.50	4.1	5.4	14.9	9.6	3.9	10.9	35.9	8.0	7.4

3 讨论

三江平原近几十年土地利用方式有很大改变,天然湿地被开垦为耕地是50 a来主要的土地利用方式^[1],从而改变土壤P循环过程,最终表现为各形态P库的变化.

活性无机磷含量在不同利用方式的土壤中变化不大,这与其本身的受土壤固-液P平衡控制的特征有关;中等活性无机磷(NaOH-P_i)在农田中含量和比重较高,D.HCl-P_i含量在农田土壤中较低,无机磷的这种差别主要与不同土壤的植被、施肥及田间管理的差异有关.施肥和收获过程对土壤P收支平衡的

影响促进了土壤中不同形态P素之间的转化,从而改变了土壤不同形态P的含量.残留P肥在土壤中积累的形态受土壤类型、种植方式及气候条件的影响.大多研究表明P肥施入后转化为NaOH-P_i.在与本研究相似的粉砂壤上的研究表明,在农田中残留的P肥通常转化为NaOH-P_i,同时NaOH-P_i也是植物有效磷的重要来源^[17];当所施P肥不足以满足植物吸收时,有效磷来源于有机磷和NaOH-P_i^[18].由此可以看出,由于NaOH-P_i是重要的土壤有效磷的源和汇,施肥可能造成土壤NaOH-P_i含量升高,加上三江平原湿地土壤本身P含量较高,更易导致农田土壤中NaOH-P_i含量的增加.但本研究中其增加的幅

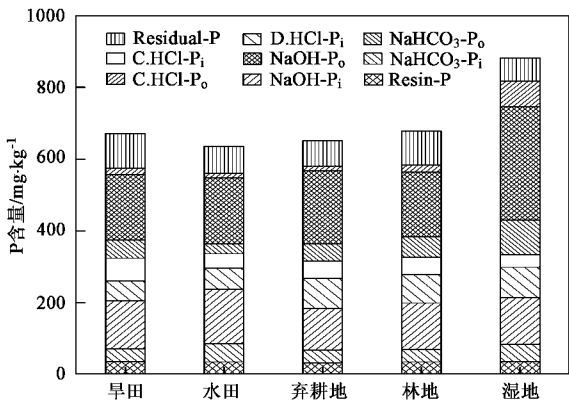


图3 不同土地利用方式下土壤磷(P)组成

Fig.3 Structure of soil P under different land uses

度并不大,这和研究区域施肥方式有重要的关系,所研究农田施肥方式为每年施加 70% 的尿素和 30% 的 N、P、K 复合肥,合计施氮肥约 $150.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而 P 肥仅 $14.72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (数据来自当地土肥站),总体来讲 P 肥施用较少,低于大多农田 P 肥施用量,作物生长利用以及向活性无机磷的转化造成其含量上升不多,并且这可能也是本区农田稳定态的无机磷 D.HCl-P_i 含量降低的原因,因为 D.HCl-P_i 和 C.HCl-P_i 主要是与 Ca 结合的不易溶的 P 形态,在其他土壤研究中发现不同施肥处理下的土壤中与 Ca 结合的 P 形态随着耕作年限的增加含量趋于下降,并认为这一部分 P 也有较高的有效性^[21];在温带土壤上进行的研究也发现 NaOH-P_o 、HCl 浸提的磷及 Residual-P 也是 P 肥在土壤中转化积累的重要形态^[20],因此造成了开垦后稳定性高的 C.HCl-P_i 的含量微升,而 D.HCl-P_i 含量降低。

弃耕后土壤不同形态无机磷变化不同,Kolawole 等^[21]实验表明休耕土壤活性 P 明显高于持续耕作土壤,持续耕作土壤其稳定态 P 含量要高于休耕土壤.本研究中弃耕和林地无机磷形态除活性无机磷外,其 NaOH-P_i 含量最低,HCl 浸提无机磷含量中等,从各形态的比重变化也可看出这 2 种土壤中无机磷水平处于农田和湿地中间的位置,说明弃耕地和林地土壤 P 的恢复过程不是单一的上升或下降,而是趋向于原有湿地状况的恢复。

湿地开垦对有机磷的影响很大,所有的有机磷形态含量在开垦后都明显下降.三江平原天然湿地有机磷含量很高,开垦初期通常都进行了烧荒而加快了有机磷矿化过程^[22],农田较天然湿地有机质输入量大大减少,而土壤有机质分解速率和侵蚀作用

却增强,必然导致土壤中有有机碳含量不断减少,由图 4 有机碳和有机磷含量之间在一定程度上呈显著的正相关关系($p < 0.05$)表明,土壤有机碳可以作为表征土壤有机磷含量水平的指标之一.辛刚等^[23]对不同开垦年限黑土的研究也表明有机磷和有机碳有极显著线性相关关系,以往研究还发现湿地开垦导致土壤有机碳呈指数下降^[24],可知随开垦时间延长土壤的有机磷可能会持续下降.水田的管理方式使土壤更容易受侵蚀,随着灌溉和烤田期的排水,P 可随着水体和排水中的土壤颗粒流失,研究表明农田径流中的 P 大部分以颗粒态为主(73% ~ 99%)^[25],所以农田排水可带走大量易被侵蚀的细粒粘土矿物和土壤有机质,这些物质本身含 P 量较高并能吸持大量 P,其侵蚀过程也就造成了土壤 P 的大量流失,大多数研究者还认为土壤有机磷在淹水或土壤水分条件大的情况下矿化速率更快,这也是水田的各有机磷形态低于旱地的重要原因^[26];弃耕地、林地 NaOH-P_o 含量比农田稍高,表明扰动停止后土壤有机磷逐步恢复,但是过程十分缓慢.P 肥在农田中逐渐积累可能是造成开垦后土壤 Residual-P 含量升高的原因,Residual-P 和稳定态无机磷 C.HCl-P_i 在受到开垦影响的土壤中含量上升表明开垦促进了 P 在土壤中的固定。

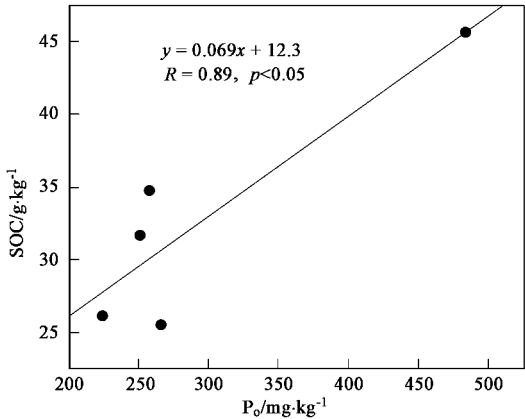


图4 不同土地利用方式下土壤有机磷(P_o)和土壤有机碳(SOC)的关系

Fig.4 Correlation between P_o and SOC under different land uses

4 结论

(1)不同土地利用方式土壤各无机磷形态间差异显著,其中活性无机磷含量差异最小,无机磷形态中 NaOH-P_i 所占比重最大,并和 D.HCl-P_i 都是土壤有效磷主要的源和汇;农田中 NaOH-P_i 和 C.HCl-P_i

含量最高,湿地中最低,D. HCl-P_i 与此相反,林地和弃耕地之间的差异较小,不同土地利用方式间差异主要受农田施肥和土壤水分状况的影响,弃耕地和林地中无机磷形态含量和比重的变化基本是趋向恢复到原有湿地状况。

(2)湿地土地利用方式改变后各有机磷组分含量均大幅下降,其中稳定态有机磷 C. HCl-P_o 在各土壤 P 库所占比重最小但降幅最大. 弃耕后土壤有机磷略有恢复,但十分缓慢。

(3)改变湿地土地利用方式后土壤 TP、 TP_i 下降, TP_i 含量变化不大,但 TP_i 占 TP 比重明显上升. 各类土壤中水田土壤 TP_o 的比重降幅最大,同时 TP_i 的比重增加最多;林地 TP_o 降低幅度最小;表明农田中的管理和利用方式可影响有机磷的输出和矿化,弃耕地中有机磷缓慢恢复,林地具有较高有机磷水平;土壤 Residual-P 含量在开垦后升高,开垦可造成 P 以稳定的形态在土壤中积累。

参考文献:

- [1] 侯伟,匡文慧,张树文,等. 近 50 年来三江平原北部土地利用/土地覆被变化及生态效应分析[J]. 生态环境, 2006, **15** (4): 752 ~ 756.
- [2] 阎敏华,邓伟,马学慧. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化[J]. 地理科学, 2001, **56**(2): 159 ~ 169.
- [3] Soon Y K, Arshad M A. Effects of cropping systems on nitrogen, phosphorus and potassium forms and soil organic carbon in a Gray Luvisol[J]. Biol Fertil Soils, 1996, **22**(1-2): 184 ~ 190.
- [4] 宋长春,王毅勇,阎百兴,等. 沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态[J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 150 ~ 154.
- [5] 杨继松,于君宝,刘景双,等. 自然沼泽湿地开垦前后土壤中微量元素含量的变化[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, **21** (3): 374 ~ 379.
- [6] 郝庆菊,王起超,王跃思,等. 开垦利用对三江平原湿地土壤硫含量的影响[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(5): 614 ~ 618.
- [7] 刘汝海,王起超,王艳,等. 小叶章湿地开垦后汞和有机质的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(6): 647 ~ 650.
- [8] Subba R A, Sammi R K, Takkar P N. Phosphorus management-a key to boost productivity of soybean-wheat cropping system on swell-shrink soils[J]. Fert News, 1995, **40**: 87 ~ 95.
- [9] Michel A B, Pedro A S. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin [J]. Plant and Soil, 1996, **184**(1): 23 ~ 31.
- [10] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [A]. In: Stewart B A. Advances in soil science[C]. New York: Springer Verlag, 1992. 1 ~ 90.
- [11] Wang G P, Liu J S, Wang J D, et al. Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China) [J]. Geoderma, 2006, **132**: 59 ~ 74.
- [12] Hedley M J, Stewart W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil Sci Soc Am J, 1982, **46**: 970 ~ 976.
- [13] 向万胜,黄敏,李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. 植物营养与肥料科学, 2004, **10**(6): 663 ~ 667.
- [14] 高超,张桃林,吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, **22**(4): 67 ~ 72.
- [15] 高超,朱继业,朱建国,等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25** (11): 1543 ~ 1549.
- [16] Chen C R, Condon L M, Davis M R, et al. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand [J]. For Ecol Manag, 2003, **177**: 539 ~ 577.
- [17] Motavalli P P, Miles R J. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications [J]. Biol Fertil Soils, 2002, **36**: 35 ~ 42.
- [18] Guo F, Yost R S, Hue N V, et al. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, **64**: 1681 ~ 1689.
- [19] 向阳春,马艳梅,田秀平. 长期耕作施肥对白浆土磷组分及其有效性的影响[J]. 作物学报, 2005, **31**(1): 48 ~ 52.
- [20] Aulakh M S, Kabba B S, Baddesha H S, et al. Crop yields and phosphorus fertilizer transformations after 25 years of applications to a subtropical soil under groundnut-based cropping systems[J]. Field Crops Res, 2003, **83**: 283 ~ 296.
- [21] Kolawole G O, Tian G, Tijani-eniola H. Effects of Fallow Duration on soil Phosphorus Fractions and Crop P Uptake under Natural Regrowth and Planted *Pueraria phaseoloides* Fallow Systems in Southwestern Nigeria[J]. Expl Agric, 2005, **41**: 51 ~ 68.
- [22] 商丽娜,吴正方,杨青,等. 火烧对三江平原湿地土壤养分状况的影响[J]. 湿地科学, 2004, **2**(1): 54 ~ 60.
- [23] 辛刚,关连珠,汪景宽. 不同开垦年限黑土磷素的形态和数量变化[J]. 土壤通报, 2002, **33**(6): 425 ~ 428.
- [24] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Tillage effects on soil carbon fractions in the Sanjiang Plain, Northeast China. [J]. Soil & Tillage Research, 2006, **93** (1): 102 ~ 108.
- [25] 杨金玲,张甘霖,张华,等. 亚热带丘陵流域不同土地利用系统磷素径流输出特征[J]. 环境科学, 2002, **23**(5): 36 ~ 41.
- [26] 赵少华,宇万太,张璐. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(11): 2189 ~ 2194.