

三江平原湿地土壤磷形态转化动态

秦胜金<sup>1 2</sup>, 刘景双<sup>1</sup>, 王国平<sup>1</sup>, 王金达<sup>1</sup>

(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 100039)

摘要 :采用 Hedley 连续浸提法对三江平原湿地小叶章草甸土壤磷形态的季节动态进行研究 ,分析生长季土壤磷形态之间的相互转化及其可能的驱动机制。结果表明 :小叶章草甸土壤有机磷 (TP<sub>o</sub>) 总量高于无机磷 (TP<sub>i</sub>) ,NaOH 溶液浸提的无机磷 (NaOH-P<sub>i</sub>) 和有机磷形态 (NaOH-P<sub>o</sub>) 分别占总无机磷 (TP<sub>i</sub>) 和总有机磷 (TP<sub>o</sub>) 比重最大。各无机磷形态均有明显的季节变化 , Resin-P 和 Conc. HCl-P<sub>i</sub> 季节变异性大 ,生长结束后含量较初期降低 ,其他形态无机磷含量有不同程度的升高。有机磷组分中 NaOH-P<sub>o</sub> 的季节波动最明显 ,生长季末期较初期含量降低 ,其他有机磷形态和 Residual-P 生长季初、末期含量变化不大 ,波动也相对较小。TP、TP<sub>o</sub> 季节变化整体趋势相似 ,二者含量变化达到极显著相关。各无机磷形态变化主要受植物生长节律影响 ,水分、热量等环境条件也是磷的形态转化的重要驱动因子 ,并可能间接通过影响土壤动物、微生物等的活性推动土壤磷的循环。小叶章草甸土壤有机磷矿化释放的无机磷通常都首先被土壤金属氧化物固定 ,再经过无机磷之间的转化过程为生物利用 ,因此三江平原湿地土壤磷大量释放的可能性很小。

关键词 磷分级 季节动态 湿地土壤 三江平原

文章编号 :1000-0933 (2007) 09-3844-08 中图分类号 :Q141 Q178 S155 文献标识码 :A

Seasonal changes of soil phosphorus fractions under *Calamagrostis angustifolia* wetlands in Sanjiang Plain , China

QIN Sheng-Jin<sup>1 2</sup> , LIU Jing-Shuang<sup>1</sup> ,WANG Guo-Ping<sup>1</sup> ,WANG Jin-Da<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geography and Agricultural Ecology , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130012 , China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (9) 3844 ~ 3851.

**Abstract :** The seasonal dynamics of soil P fractions was determined in the Sanjiang plain marshes. The soil samples were taken from a depression marsh once or twice every month during the growth season and soil P fractions were determined by the modified Hedley fraction method in 2005. The study showed that P was mainly organically bound in the Sanjiang Plain wetlands. NaOH extractable organic P (NaOH-P<sub>o</sub>) and inorganic P (NaOH-P<sub>i</sub>) was the predominant form in total organic P (TP<sub>o</sub>) and total inorganic P (TP<sub>i</sub>); respectively. The content of Resin-P was highest at end of August and lowest at the early days of July ,seasonal dynamic of NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub> and NaOH-P<sub>i</sub> were similar to Resin-P. Dil. HCl-P<sub>i</sub> and Conc. HCl-P<sub>i</sub> had their highest and lowest value at the beginning of September and the initial stage of May. The variation coefficient of Resin-

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

收稿日期 :2006-07-25 ;修订日期 :2007-03-28

作者简介 :秦胜金 (1982 ~ ) ,女 ,内蒙古包头人 ,博士生 ,主要从事环境生态与生物地球化学研究。 E-mail : qinshengjin@ neigae. ac. cn ; qsj8219@ gmail. com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : liujingshuang@ mail. neigae. ac. cn

**Foundation item :** The project was financially supported by the Key Knowledge Innovation Project in the Environmental and Resource Field , Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-309) ; National Natural Science Foundation of China (No. 90211003)

**Received date** 2006-07-25 ; **Accepted date** 2007-03-28

**Biography :** QIN Sheng-Jin , Ph. D. candidate , mainly engaged in environmental ecology and biogeochemistry. E-mail : qinshengjin@ neigae. ac. cn ; qsj8219@ gmail. com

P and Conc. HCl- $P_i$  were higher than other  $P_i$  fractions , the level of them decreased from the beginning of growth season to the end of growth season , while the other  $P_i$  fractions increased in some degree. For organic phosphorus ( $P_o$ ) , the variation coefficient of NaOH- $P_o$  was highest in the  $P_o$  fractions , and NaOH- $P_o$  content reduced in the end of the growth season ,  $NaHCO_3$ - $P_o$  , Conc. HCl- $P_o$  and Residual-P had no obvious changes during this time. The concentration of TP and  $TP_o$  had significant correlation and the concentration of TP was similar to  $TP_o$ . The dynamic of P fractions , especially inorganic P forms are intensively affected by the plants , the change of their value go with the absorbing intensity of plants , especially Resin-P. The transformation of phosphorus is directly promoted and also indirectly improved by environmental factors (e. g. water and temperature ) with their effect on the biomass or activity of microorganism. The soil water content plays an important role in sorption and desorption of  $NaHCO_3$ - $P_i$  , NaOH- $P_i$  from soil. The biomass or activity of microorganism usually influences mineralization of organic P. The  $P_i$  which is released from mineralization of  $P_o$  is usually first absorbed by mineral oxide and then transform into other more active form for utilizing of plants or microbe.

**Key Words** : phosphorus fractions ; seasonal changes ; wetland soil ; Sanjiang Plain

磷是决定湿地生产力、结构、功能的关键要素<sup>[1]</sup> ,是湿地主要限制性因子之一<sup>[2,3]</sup>。磷在土壤中存在多种化学形态 ,不同形态磷的生物有效性不同 ,其养分循环的过程也存在差异 ,并在系统有效磷的供应中起着各自不同的作用 ,土壤磷形态的季节变化是磷的生物吸收过程和磷的矿化-固定过程的综合体现<sup>[4]</sup>。因此有必要针对土壤中磷的不同形态进行定量研究<sup>[5]</sup>。

Hedley 的分级方法将土壤磷按照对植物有效性的不同和转化特征不同进行分级<sup>[6,7]</sup> ,国外已利用该方法进行了一系列研究 ,国内采用此方法所做研究相对较少<sup>[8~12]</sup> ,而且目前关于国内外对土壤磷形态的研究更多集中在农田、草地和森林中<sup>[13~15]</sup> ,针对湿地所做的研究相对较少。三江平原湿地是我国最大的沼泽湿地集中、连片分布区 ,其各类湿地面积达  $8.35 \times 10^5 \text{ km}^2$  (2000 年)<sup>[16]</sup> ,目前对其土壤磷的研究还仅限于含量、分布水平上或者是在研究植物营养元素变化的同时对土壤总磷的季节变化做了一些相关研究<sup>[17,18]</sup>。而土壤中的总磷变化很难完全反映磷在环境中的转化的实质<sup>[9]</sup>。因此 ,本文利用 Hedley 磷素分级方法对三江平原湿地小叶章草甸土壤磷的季节变化进行了研究 ,以揭示生长季沼泽土壤磷形态变化规律及其相互转化机制。

1 材料与方法

1.1 实验区自然概况

三江平原位于黑龙江省东北部 ,是由黑龙江、松花江和乌苏里江冲积而成的低平原 ,总面积约为  $1.098 \times 10^5 \text{ km}^2$  ,是我国典型的沼泽分布区之一 ,也是我国淡水沼泽湿地集中、连片分布区之一。研究区选在三江平原具有代表性的别拉洪河与浓江河河间地带 (E133°31' ,N47°35' ) ,区内分布有大面积的天然沼泽湿地。海拔高度 55.4 ~ 57.9 m ,属北温带湿润大陆性季风气候 ,1 月份平均气温 -18 ~ -21 ℃ ,7 月份平均气温 21 ~ 22 ℃ ,年均温 1.6 ~ 1.9 ℃。冰冻期达 5 个月 ,最深冻深达 1.9 m。年降水量 565 ~ 600 mm ,60% 以上集中在 6 ~ 8 月份 ,年蒸发量 542.4 ~ 580 mm<sup>[9]</sup>。试验地点位于中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站以东 12km 的野外试验场进行。试验场内的地貌类型为三江平原沼泽发育最为普遍的碟形洼地 ,主要植被代表种有小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*)、毛果苔草 (*Carex. lasiocarpa*)、漂筏苔草 (*Carex. pseudocurica*)和乌拉苔草 (*Carex. meyeriana*)等。土壤类型依次为草甸沼泽土、腐殖质沼泽土和潜育白浆土。

1.2 样品采集

试验于 2005 年 5 月到 2005 年 10 月期间采样。每次在试验场内的典型草甸小叶章植被带随机选取 10 个样点用土钻采集土壤 ,采样深度为 10cm ,将采集的土壤混合均匀后带回 ,每月采集样品 1 ~ 2 次。混合土样风干过 2mm 筛 ,进行磷的分级测定。

1.3 分析方法与数据处理

土壤磷的分级采用经修正的 Hedley 等人 1982 年提出的分级方法进行测定。即采用连续提取的方法 ,逐

级加入离子交换树脂、0.5 mol/L 的  $\text{NaHCO}_3$  溶液、0.1 mol/L 的  $\text{NaOH}$  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高温消解测定残留磷 (Residual-P)<sup>[9]</sup>。其中 0.5 mol/L 的  $\text{NaHCO}_3$  溶液、0.1 mol/L 的  $\text{NaOH}$  溶液和浓盐酸浸提的形态又分为有机态和无机态两部分。

2 结果与分析

2.1 土壤无机磷形态季节动态

按照连续浸提法分级,将无机磷分为:Resin- $\text{P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaOH-P}_i$ 、 $\text{Dil. HCl-P}_i$  和  $\text{Conc. HCl-P}_i$ ,其生物有效性逐级降低。其中 Resin- $\text{P}$  是与土壤溶液处于平衡状态的土壤固相无机磷,它是充分有效的; $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 主要是吸附在土壤表面的磷,这两种无机磷形态是土壤中生物有效磷的主要部分<sup>[5]</sup>; $\text{NaOH-P}_i$ 则为通过化学吸附结合在铁铝氧化物表面的无机磷,属于中等活性的无机磷; $\text{Dil. HCl-P}_i$ 和  $\text{Conc. HCl-P}_i$ 形态是与钙结合的较为稳定的无机磷形态。

各无机磷的形态在土壤中的含量差别较大(图1),Resin- $\text{P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaOH-P}_i$ 、 $\text{Dil. HCl-P}_i$  和  $\text{Conc. HCl-P}_i$ 含量分别为 20.70 ~ 75.15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、25.20 ~ 64.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、92.85 ~ 159.98  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、50.25 ~ 96.00  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 37.95 ~ 127.25  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Resin- $\text{P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和  $\text{NaOH-P}_i$ 有相似的变化趋势,即其含量均在 7 月上旬左右达到最大值,8 月初为最低值。土壤  $\text{Dil. HCl-P}_i$ 含量在生长季的动态与 Resin- $\text{P}$  的变化基本相反, $\text{Dil. HCl-P}_i$ 和  $\text{Conc. HCl-P}_i$ 均在 8 月末 9 月初含量最高,而此时期其他形态的无机磷含量均处于较低值,二者最小值均出现在生长季初期。生长季末活性最强和最弱的无机磷 Resin- $\text{P}$  和  $\text{Conc. HCl-P}_i$ 含量较生长初时减少, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaOH-P}_i$ 、 $\text{Dil. HCl-P}_i$ 含量增加,其中  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 变化很小, $\text{Dil. HCl-P}_i$ 增量最大;比较各形态的变化程度 Resin- $\text{P}$  含量变异系数最大(表1),这可能是由于 Resin- $\text{P}$  活性强,易于受环境影响发生迁移,其次  $\text{Conc. HCl-P}_i$ 也表现为较大的波动性,其变异系数为 0.410 仅次于 Resin- $\text{P}$ ,表明 Resin- $\text{P}$  和  $\text{Conc. HCl-P}_i$ 在植物生长过程中可能都是重要的有效磷的来源,Resin- $\text{P}$  本身即为对植物完全有效的活性无机磷, $\text{Conc. HCl-P}_i$ 则可能通过与其它磷形态间的转化而间接为植物提供磷源。

2.2 土壤有机磷形态季节动态

用此方法得到的有机磷形态主要有  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 、 $\text{NaOH-P}_o$  和  $\text{Conc. HCl-P}_o$ 。其中  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 主要是易于矿化的可溶有机磷, $\text{NaOH-P}_o$ 由腐殖酸和褐菌素等有机磷组成, $\text{Conc. HCl-P}_o$ 主要是一些化学性质十分稳定的有机磷<sup>[9]</sup>。

植物生长过程中小叶章草甸土壤  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 、 $\text{NaOH-P}_o$  和  $\text{Conc. HCl-P}_o$ 含量的变化范围分别为:118.50 ~ 147.795  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、315.00 ~ 441.38  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.11 ~ 45.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中土壤  $\text{NaOH-P}_o$ 含量远远高于其他有机磷成分,说明研究区域土壤有机磷较稳定。植物生长结束时  $\text{NaOH-P}_o$ 含量比生长初期明显减少,其他有机磷组分生长季初、末期土壤含量的差异较小, $\text{Conc. HCl-P}_o$ 、 $\text{NaOH-P}_o$ 在 8 月初含量最高, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 则没有太大的变化,仅在 6 月下旬和 9 月初含量略有升高(图2)。比较各无机磷的变异程度发现  $\text{Conc. HCl-P}_o$ 的变异系数远远大于其他有机磷形态,达 0.794,而  $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 、 $\text{NaOH-P}_o$ 则相差不大,分别为 0.139 和 0.122(表1)。

2.3 土壤残留磷的季节动态

通过化学试剂浸提以上各形态磷以后,土壤样品中残余磷的部分为 Residual-P,它是土壤磷化学性质最稳定的磷形态。Residual-P 含量为(图2) 62.50 ~ 166.25  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Residual-P 的季节波动峰谷交替变化不明显,Residual-P 在 8 月初含量较高,达到 166.25  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

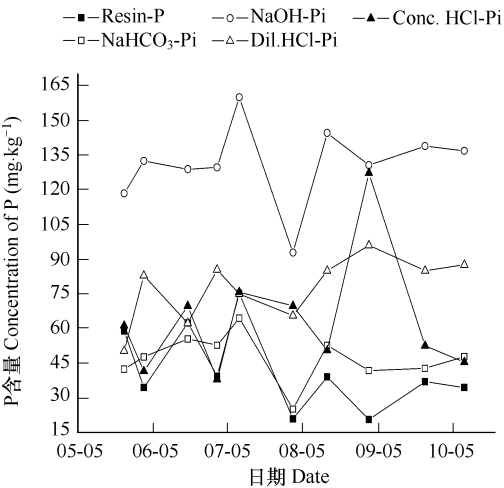


图1 小叶章草甸土壤无机磷季节动态  
Fig.1 Seasonal variation of different inorganic phosphorus (Pi) forms

表 1 草甸小叶章湿地土壤磷形态含量变异

Table 1 The seasonal change of different phosphorus fractions									
形态 Forms	Resin-P	NaHCO <sub>3</sub> -P <sub>i</sub>	NaOH-P <sub>i</sub>	Dil. HCl-P <sub>i</sub>	Conc. HCl-P <sub>i</sub>	NaHCO <sub>3</sub> -P <sub>o</sub>	NaOH-P <sub>o</sub>	Conc. HCl-P <sub>o</sub>	Residual-P
平均数 Mean value (mg·kg <sup>-1</sup> )	42.260	47.340	131.325	77.483	63.175	147.795	367.980	18.226	99.684
标准差 Standard error	17.798	10.469	17.453	14.025	25.917	20.532	44.912	14.467	26.695
变差系数 Coefficient of variation	0.421	0.221	0.133	0.181	0.410	0.139	0.122	0.794	0.268

表 2 小叶章湿地土壤磷形态占 TP 百分比相关系数矩阵

Table 2 Correlation matrix of phosphorus fractions in percentage of TP									
相关系数 Person Correlation									
	Resin-P	NaHCO <sub>3</sub> -P <sub>i</sub>	NaOH-P <sub>i</sub>	Dil. HCl-P <sub>i</sub>	Conc. HCl-P <sub>i</sub>	NaHCO <sub>3</sub> -P <sub>o</sub>	NaOH-P <sub>o</sub>	Conc. HCl-P <sub>o</sub>	Residual-P
Resin-P	1								
NaHCO <sub>3</sub> -P <sub>i</sub>	0.591	1							
NaOH-P <sub>i</sub>	0.251	0.836 **	1						
Dil. HCl-P <sub>i</sub>	-0.474	0.380	0.751 *	1					
Conc. HCl-P <sub>i</sub>	-0.358	-0.352	-0.229	0.031	1				
NaHCO <sub>3</sub> -P <sub>o</sub>	-0.361	-0.104	-0.263	0.118	0.453	1			
NaOH-P <sub>o</sub>	0.261	-0.258	-0.532	-0.725 *	-0.245	-0.244	1		
Conc. HCl-P <sub>o</sub>	0.620	-0.632	-0.803 **	-0.755 *	-0.294	-0.138	0.515	1	
Residual-P	-0.560	-0.780 **	-0.532	-0.092	-0.084	-0.133	-0.068	0.643 *	1

\* P=0.05 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.05 level ; \*\* P=0.01 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.01 level

2.4 土壤磷库动态

生长季小叶章草甸土壤 TP 含量为 1113.65 ~ 895.48 mg·kg<sup>-1</sup>, TP<sub>o</sub> 含量始终高于 TP<sub>i</sub>, 整个生长季 TP<sub>o</sub> 含量占 TP 约为 50% ~ 58%, 在生长季末时 TP<sub>o</sub> 所占比重略有降低, TP<sub>i</sub> 所占比重升高。TP、TP<sub>i</sub>、TP<sub>o</sub> 在生长季整体变化趋势有一定相似, 即 TP、TP<sub>i</sub> 和 TP<sub>o</sub> 均在 6 月中旬和 8 月底到 9 月初时含量较高, TP、TP<sub>i</sub> 7 月中旬以及 TP<sub>o</sub> 在 8 月初含量也较高, 这一结果与前人结果相似<sup>[17-20]</sup> (图 3)。TP 和 TP<sub>o</sub> 的最大和最小值分别出现在 6 月中旬和生长季末, TP<sub>i</sub> 的最大值在 7 月上旬而最小值出现在 8 月初。

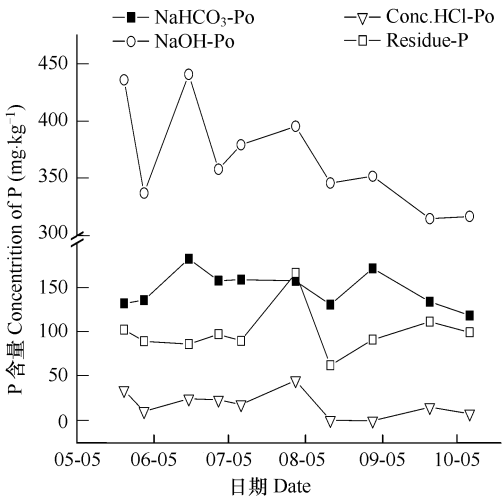


图 2 小叶章草甸土壤有机磷和 Residual-P 季节动态  
Fig. 2 Seasonal variation of different (P<sub>o</sub>) organic phosphorus forms and Residual-P

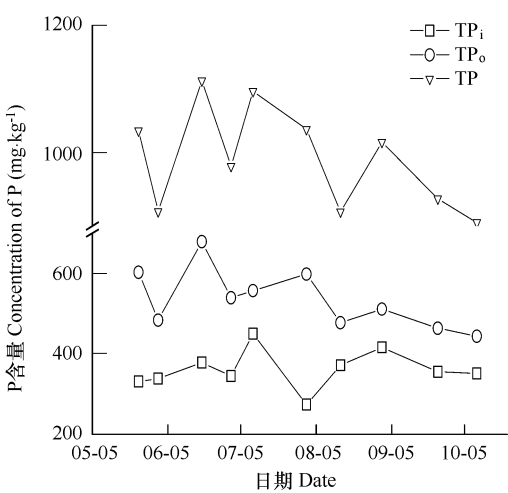


图 3 小叶章草甸土壤 TP<sub>i</sub>、TP<sub>o</sub>、TP 季节动态  
Fig. 3 Seasonal variation of TP<sub>i</sub> (total inorganic phosphorus), TP<sub>o</sub> (total organic phosphorus), TP (total phosphorus)

在生长季的各个时期,土壤中有机磷的含量均大于无机磷。有机磷对土壤 TP 的季节变化影响较大,二者成极显著相关 ( $P < 0.01$ )。TP 和  $TP_o$  由生长初期到末期含量有所减少, $TP_i$  的含量变化很小。

### 3 讨论

#### 3.1 磷形态季节变化驱动因子

生态系统磷素循环是由植物对磷的需求所拉动,由土壤有效磷的持续供应来维持的<sup>[21]</sup>。任何一个生态系统中植物吸收作用都是土壤中养分含量变化的重要控制因素。温带地区湿地植物吸收释放养分存在季节变化,春、夏季与秋、冬季有很大不同,植物在湿地养分循环中起着极其重要的作用<sup>[22]</sup>。小叶章一般于4月末5月初开始返青,约在6月末7月初和7月下旬出现两次生长高峰,7月下旬生物量达到最大,随后逐渐死亡至10月底基本枯死<sup>[23]</sup>。生长季生物可利用性较强的无机磷组分主要是随着植物的生长节律呈波动变化,当植物达到最大生物量时植物对磷的积累也最大,土壤易被利用的无机磷含量最低,之后植物进入衰亡阶段,含量开始逐步的回升。但大部分被植物吸收的磷转移到了其根系或保留在立枯物中,因此生长结束后 Resin-P 低于生长初期。Resin-P 季节动态变异性较大可能和其活性最强,在植物生长过程中最易受到植物的影响有关。

土壤环境的条件是影响土壤磷形态的重要因素。环境因子一方面直接影响磷的形态转化,另一方面,环境条件的改变通过间接影响土壤动物微生物的活性驱动着土壤磷素循环。

三江平原湿地小叶章草甸土壤为偏酸性土壤<sup>[24]</sup>。偏酸性土壤中,磷酸盐易被土壤中大量游离的 Fe、Al、Mn 氧化物表面吸附或为土壤中游离的大量铝离子所沉淀<sup>[21]</sup>。因此在植物生长期无机磷和有机磷组分中都以 NaOH 溶液浸提的磷形态含量最高。

土壤水分条件可以控制有机物的循环和矿物质的溶解-沉淀,从而影响土壤中各个形态磷的相对含量的大小<sup>[25-27]</sup>。 $NaHCO_3-P_i$  和  $NaOH-P_i$  主要是由土壤中被 Fe、Al 化合物吸附磷组成,很多研究已证实 Fe、Al 氧化物会随着水分的增加和还原作用的加强而减少,降低对磷的吸附作用<sup>[28]</sup>,使土壤中的磷活化。小叶章草甸在8月下旬土壤的含水量降至最低(图4),同时也有研究表明三江平原湿地分别在6月下旬7月初和8月下旬9月初时存在2个蒸腾量高峰<sup>[29]</sup>,这一时期的土壤尤其是表层土壤含水量相对较少,氧化作用强,有利于土壤中吸附体对磷的吸附, $NaHCO_3-P_i$  和  $NaOH-P_i$  这时含量较高。水分变化对土壤中磷的吸附体的影响也可能是造成 Dil. HCl- $P_i$  和 Conc. HCl- $P_i$  在9月初含量升高的一个重要原因<sup>[28]</sup>。对土壤含水量和土壤各磷形态进行相关分析都未达到显著相关,但其中  $NaOH-P_i$  ( $-0.657$ ;  $P = 0.229$ )、Dil. HCl- $P_i$  ( $-0.365$ ;  $P = 0.545$ ) 与土壤含水量的相关系数明显高于其他形态,这表明这些磷形态的季节变化除受水分影响还同时受其他因素如植物吸收等的影响,不同土壤水分条件下不同磷形态对植物的有效性也有所变化<sup>[12]</sup>,因此土壤磷形态在土壤中的相互转化是受多种因素共同作用的,但不同因素的相对重要值大小还需进一步探讨。

微生物作用也是土壤磷形态转化的重要驱动因子。土壤水分状况的季节变化是控制微生物生物量的主导因素<sup>[4]</sup>。生长季初期,气温逐步回升(图5),冻结土壤开始溶解,土壤冻融过程使土壤中的可利用水分迅速增加,根据杨继松<sup>①</sup>对本区域的研究这一环境条件的快速变化造成土壤微生物的大量死亡,微生物死亡将固定的磷释放出来,并且中等活性的有机磷在初春的时候也会因植物生长的需要而加速矿化释放无机磷<sup>[4,30]</sup>,因此土壤的  $NaHCO_3-P_i$  和  $NaOH-P_i$  在5月到6月初含量出现不同程度的增加。但同期 Resin-P 的含量没有增加,可能是由于植物正处于磷积累的高峰对磷的吸收较大的结果。本研究中土壤中等活性有机磷组分  $NaOH-P_o$  和  $NaHCO_3-P_o$  只有前者明显下降,这可能与上一年的立枯植物经过冬季的积雪的覆盖到次年春季才倒伏在地表,当经过春季融水导致形成的地表积水浸泡后,一些易溶的有机磷组分首先释放出来补充了  $NaHCO_3-P_o$  有关。

① 杨继松. 三江平原小叶章湿地系统有机碳动态研究. 博士学位论文. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2006

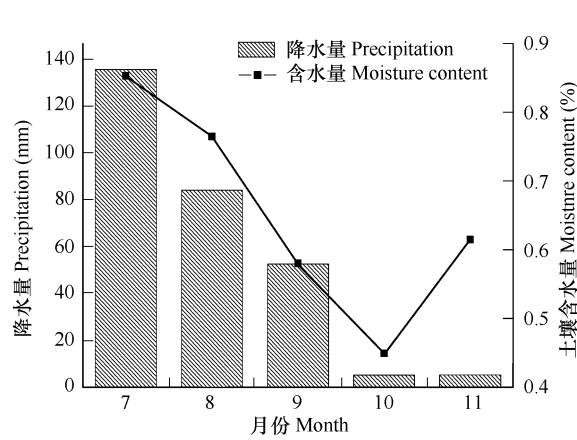


图4 生长季小叶章草甸降水量及土壤含水量变化

Fig. 4 Distribution of monthly rainfall and soil moisture contents during growth season in in *Deyeuxia angustiholal* wetland

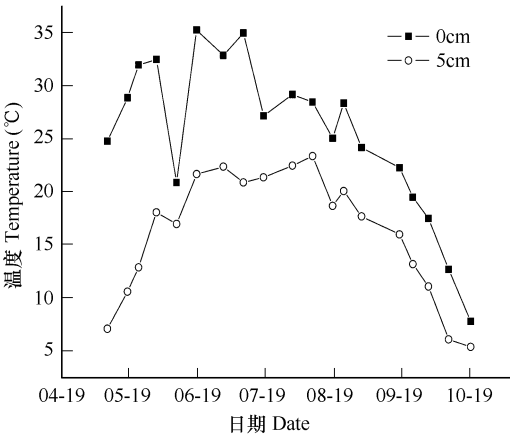


图5 生长季小叶章草甸 0 cm、5 cm 地温

Fig. 5 Changes in 0 cm and 5 cm of soil temperature during growth season in *Deyeuxia angustiholal* wetland

生长季土壤养分的变化也可以影响微生物的活性，进一步影响到有机磷的矿化。Conc. HCl-P<sub>o</sub>、NaOH-P<sub>o</sub>在8月初含量较高可能就是因为土壤中 Resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub>、NaOH-P<sub>i</sub>等易被利用的无机磷组分含量在8月初左右因植物生长达到高峰而大幅度减少，在一定程度上抑制了微生物的活性，使其对有机磷的矿化能力减弱。通过 TP<sub>i</sub>/TP<sub>o</sub>的比值也可看出(图6)，在整个生长季有机磷的稳定性总体呈现降低趋势，这主要是植物残体有机物在微生物作用下逐步被分解释放出无机磷的结果，在8月初 TP<sub>i</sub>/TP<sub>o</sub>比值急速降低，表明这时有机磷含量显著增加有机磷的稳定性较强，微生物矿物能力减弱可能是造成这一现象的重要原因。土壤中相当比例的微生物能促进植物难以利用的不溶性无机磷进入溶液<sup>[B1]</sup>，因此 Residual-P<sub>i</sub>在8月初出现峰值可能也是微生物活性的降低的结果。

3.2 土壤磷形态之间的相互转化

计算各形态磷占土壤 TP 的百分比，以各形态所占比例做相关分析发现 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub>与 Residual-P 成极显著负相关关系，由二者的季节变化的趋势也可以看出在5~10月间，二者在土壤中含量变化趋势相反，表明 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub>与 Residual-P 之间存在相互转化的过程。

生长季 NaOH-P<sub>i</sub>和 Conc. HCl-P<sub>o</sub>占 TP 的比例也为极显著负相关，同时其季节变化趋势表现为明显的相反趋势，因此植物生长过程中 Conc. HCl-P<sub>o</sub>矿化后可能首先被土壤中的铁、铝氧化物结合，然后再进一步释放。

Dil. HCl-P<sub>i</sub>与 NaOH-P<sub>o</sub>、Conc. HCl-P<sub>o</sub>均为显著负相关，并且季节变化也有明显的相反趋势，说明 NaOH-P<sub>o</sub>、Conc. HCl-P<sub>o</sub>与 Dil. HCl-P<sub>i</sub>在生长季也是相互转化的。这一结果与 Ann Fristedt<sup>①</sup>所得的结果基本相同。

4 结论

4.1 小叶章草甸土壤有机磷含量高于无机磷，无机磷和有机磷中又以 NaOH 溶液浸提组分所占比重最大，随

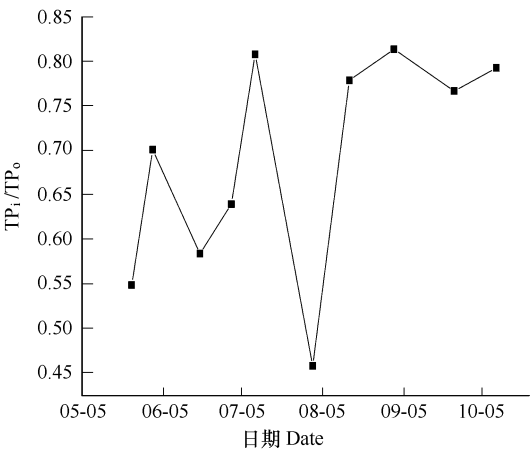


图6 小叶章草甸土壤 TP<sub>i</sub>/TP<sub>o</sub> 季节动态

Fig. 6 Seasonal variation of TP<sub>i</sub>/TP<sub>o</sub> ratio in *Deyeuxia angustiholal* wetland

① Ann Fristedt. Phosphorus Distribution, Forms and Dynamics of Riparian Zone Peat Wetland in Kristianstad district, Southern Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Master of Science Thesis, SE 750 07 UPPSALA, Sweden: 2004

着植物生长 ,不同形态磷的变化过程不同。

4.2 植物吸收作用是控制 Resin-P 等活性较高的磷形态变化的主要因素 ;土壤水分的变化对 NaOH-P<sub>i</sub>、D. HCl-P<sub>i</sub>和 Conc. HCl-P<sub>i</sub>的季节变化有重要作用。微生物数量和活性在土壤水分和养分条件的影响下控制着有机磷的矿化进而改变着无机磷的含量。

4.3 通过相关分析发现 ,NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub>与 Residual-P 之间、NaOH-P<sub>i</sub>和 Conc. HCl-P<sub>o</sub>之间还有 NaOH-P<sub>o</sub>、Conc. HCl-P<sub>o</sub>与 Dil. HCl-P<sub>i</sub>存在相互转化关系 ,表明小叶章草甸土壤有机磷矿化后大部分首先被土壤的铁、铝、钙矿物固定 ,然后再活化被植物利用 ,土壤对磷的固持能力较强 ,因此三江平原土壤虽然磷的含量很高 ,但是出现磷的大量释放的可能性不大。

References :

[1] Grunwald S , Corstanje R , Weinrich B E , *et al.* Spatial Patterns of Labile Forms of Phosphorus in a Subtropical Wetland. *Journal of Environmental Quality* , 2006 , 35 ( 1 ) 378 — 389.

[2] McCormick P V , Rawlik P S , Lurding K , *et al.* Periphyton-Water quality relationships along a nutrient gradient in the northern Florida Everglades. *Journal of the North American Benthological Society* , 1996 , 15 ( 4 ) 433 — 449.

[3] Noe G B , Childers D L , Jones R D. Phosphorus biogeochemistry and the impacts of phosphorus enrichment : Why is the Everglades so Unique ? *Ecosystems* , 2001 , 4 ( 7 ) 603 — 624.

[4] Chen C R , Condon L M , Davis M R , *et al.* Seasonal changes in soil phosphorus and associate microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *Forest Ecology and Management* , 2003 , 177 ( 1 ) 539 — 557.

[5] Nwoke O C , Vanlauwe B , Diels J , *et al.* Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West African savanna soils. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2003 , 100 ( 2 ) 285 — 294.

[6] Schmidt J P , Buol S W , Kamprath E J. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation : Fractionation analysis. *Soil Science Society of America Journal* , 1996 , 60 ( 4 ) 1168 — 1172.

[7] Cross A F , Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation : Applications to the biogeochemical cycles of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* , 1995 , 64 ( 3 ) 197 — 214.

[8] Beck M A , Elsenbeer H. Biogeochemical cycles of soil phosphorus in southern Alpine Spodosols. *Geoderma* , 1999 , 91 ( 3-4 ) 249 — 260.

[9] 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 ). *Geoderma* , 2006 , 132 ( 1-2 ) 59 — 74.

[10] Zhang M K. Evaluation phosphorus leachability in sand soils by means of soil P test. *Acta Pedologica Sinica* , 2004 , 41 ( 6 ) 996 — 1000.

[11] Zhang J L , Chen A G , Liu Z Q. Phosphorus Fractions and Availability in Rubber Plantation with different Tillage time. *Soil* , 2000 , 6 : 319 — 332.

[12] Yin J L , Zhou C L , Shen Q R. Availabilities of phosphorus in soil and rice plant under waterlogged and aerobic conditions. *Journal of Nanjing Agricultural University* 2002 , 25 ( 4 ) : 53 — 56.

[13] Guo F , Yost R S , Hue N V , *et al.* Changes in Phosphorus Fractions in Soils under Intensive Plant Growth. *Soil Science Society of America Journal* , 2000 , 64 : 1681 — 1689.

[14] Selles F , Kochhann R A , Denardin J E , *et al.* Distribution of phosphorus fraction in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil and Tillage Research* , 1997 , 44 ( 1 ) 23 — 34.

[15] Kuo S , Huang B , Bembek R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. *Biology and Fertility of Soils* , 2005 , 41 ( 2 ) 116 — 123.

[16] Li Y , Zhang Y Z , Zhang S W. The Land Pattern and Ecology of the Marsh Changes in the Sangjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica* , 2002 , 22 ( 6 ) : 667 — 682.

[17] He T R , Li X L , Yang D Y , *et al.* The P and K Concentration Characteristics and Their Effect Factors in the Meadow Albic Bleached Soil in Sanjiang Plain. *Environmental Science* , 2004 , 25 ( 1 ) : 133 — 137.

[18] Yang Y X , Wang S Y , He T R. Distribution characteristics and seasonal dynamics of phosphorus and potassium in wetland ecosystem in the Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2001 , 2 ( 4 ) : 522 — 526.

[19] Liu X T , Ma X H. Natural Environment Changes and Ecological Protection in the Sanjiang Plain. Beijing : Science Press , 2002.

[20] Wang S Y , Yang Y X. Study on Dynamics of Litter Decomposition and Seasonal Dynamics of Phosphorus in *Decomposed Residue* of *Deyeuxia angustifolia* in Sanjiang Plain. *Grassland of China* , 2000 , 6 : 6 — 10.

[21] Zhao Q , Zeng D H. Phosphorus Cycling in Terrestrial Ecosystems and its Controlling Factors. *Acta Phytocologica Sinica* , 2005 , 29 ( 1 ) : 153

— 16.

[22] Sánchez-carrillo S, Álvarez-cobelas M. Nutrient dynamics and eutrophication patterns in a semi-arid wetland :the Effects of Fluctuating Hydrology. Water , Air , and Soil Pollution ,2001 ,131 (1-4 ) 97 — 118.

[23] Sun Z G , Liu J S , Wang J D , *et al.* Biomass structure and nitrogen and phosphorus contents of *Calamagrostis angustifolia* populations in different communities of Sanjiang Plain. Chinese Journal of Applied Ecology ,2006 ,17 (2 ) 221 — 228.

[24] Song C C , Wang Y Y , Yan B X , *et al.* The Changes of the Soil Hydrothermal Condition and the Dynamics of C , N after the Mire Tillage. Environment Science ,2004 ,25 (3 ) :150 — 154.

[25] Sanyal S K , De Datta S K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. Advance in Soil Science ,1991 ,16 :1 — 120.

[26] Schlesinger W H. Biogeochemistry : An Analysis of Global Change. San Diego :Academic Press ,1997.

[27] Mello J W V , Barron V , Torrent J. Phosphorus and iron mobilization in flooded soils from Brazil. Soil Sci. ,1998 ,163 (2 ) :122 — 132.

[28] Miller A J ,Edward A G. Schuur ,Chadwick O A. Redox control of phosphorus pools in *Hawaiian montane* forest soils. Geoderma ,2001 ,102 (3 ) :19 — 237.

[29] Deng W , Luan Z Q , Hu J M , *et al.* Study on Water Flux in the Typical Wetlands of Sanjiang Plain. Wetland Science ,2005 ,3 (1 ) 32 — 36.

[30] Piao H C , Hong T T , Yuan Z T. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climate factor in soils from karts areas of southwest China. Biology and Fertility of Soils ,2000 30 294 — 297.

[31] Huang M , Wu J S , Huang Q Y , *et al.* Process in Research on Microbiological Action of Soil Phosphorus. Ecology and Environment ,2003 ,12 (3 ) 366 — 370.

参考文献：

[10] 章明奎. 应用土壤测试磷评估砂土中磷的可淋洗性. 土壤学报 ,2004 ,41 (6 ) :996 ~ 1000.

[11] 张教林 ,陈爱国 ,刘志秋. 定植 3 ,13 ,34 年热带胶园的土壤磷素形态变化和有效性研究. 土壤 ,2000 ,6 :319 ~ 332.

[12] 尹金来 ,周春霖 ,沈其荣 ,等. 水稻水作与旱作条件下土壤和植物磷素有效性的研究. 南京农业大学学报 2002 25 (4 ) 53 ~ 56.

[16] 李颖 ,张养贞 ,张树文. 三江平原沼泽湿地景观格局变化及其生态效应. 地理科学 2002 22 (6 ) 677 ~ 682.

[17] 何太蓉 ,李贤良 ,杨达源 ,等. 三江平原草甸白浆土 P、K 养分含量特征及影响因素. 环境科学 ,2004 ,25 (1 ) :133 ~ 137.

[18] 杨永兴 ,王世岩 ,何太蓉. 三江平原湿地生态系统 P、K 分布特征及季节动态研究. 应用生态学报 ,2001 ,2 (4 ) :522 ~ 526.

[19] 刘兴士 ,马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育. 北京 :科学出版社 ,2002.

[20] 王世岩 ,杨永兴. 三江平原小叶章枯落物分解动态及其分解残留物中磷素季节动态. 中国草地 ,2000 ,6 6 ~ 10.

[21] 赵 琼 ,曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. 植物生态学报 ,2005 29 (1 ) :153 ~ 16.

[23] 孙志高 ,刘景双 ,王金达 ,等. 三江平原不同群落小叶章种群生物量及氮、磷营养结构动态. 应用生态学报 ,2006 ,17 (2 ) 221 ~ 228.

[24] 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. 环境科学 ,2004 ,25 (3 ) :150 ~ 154.

[29] 邓伟 ,栾兆擎 ,胡金明 ,等. 三江平原典型沼泽湿地生态系统水分通量研究. 湿地科学 ,2005 ,3 (1 ) 32 ~ 36.

[31] 黄敏 ,吴金水 ,黄巧云 ,等. 土壤磷素微生物作用的研究进展. 生态环境 ,2003 ,12 (3 ) 366 ~ 370.