

黄土丘陵区不同生长年限刺槐林土壤无机磷的变化规律

苏少华¹, 刘合满¹, 董丽娜¹, 张晋爱³, 张兴昌^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 朔州职业技术学院, 山西 朔州 036002)

摘 要: 利用时空互代法, 在野外调查和室内分析的基础上, 探讨了生长 2、16、24、27、30 和 43 a(恢复年限)刺槐林土壤无机磷的变化规律。结果表明: 随年限延长, 刺槐林地土壤全磷和无机磷含量呈减少之趋势, 除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 表现为明显的下降趋势外, 其他无机磷组分均随恢复年限的延长呈总体增加趋势; 不同恢复年限内, 刺槐林地土壤无机磷组分含量和比例有如下顺序: $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。

关键词: 年限; 无机磷; 刺槐

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)03-0171-05

黄土丘陵区地形破碎, 土壤质地疏松, 自然植被破坏严重, 是我国主要水土流失区之一。恢复植被除能有效保持水土, 减少土壤侵蚀外, 还可通过土壤—植物复合系统的功能改善提高土壤质量。刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.) 根系发达, 具根瘤, 有较强的抗旱、耐盐碱能力, 已成为黄土高原地区主要的水土保持树种之一^[1]。

土壤磷以有机态和无机态磷存在, 无机磷占土壤总磷量的 60%~80%, 是植物所需磷的主要来源^[2]。目前对黄土高原地区刺槐林的研究多集中在土壤水分方面^[3,4], 而从植被恢复方面研究刺槐林对土壤无机磷的组成变化影响的还比较少。采用时空替代法, 对安塞纸坊沟小流域种植年限(植被恢复年限即为刺槐生长年限)分别为 2、16、24、27、30 a 和 43 a 时间序列刺槐林地土壤无机磷组成进行对比研究, 试图从无机磷含量与分布的角度, 阐明植被恢复年限对土壤无机磷消长的影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

在陕西安塞县纸坊沟小流域, 在调查和访问农户的基础上, 确定 2、16、24、27、30 和 43 a(时间序列)的刺槐地, 选取坡长、坡度和坡向相近的坡面采集, 在坡面的中部坡位采集 0~20 cm 土样(10 点混合)。将土样晾干, 去掉根系及枯落物, 过 20 目与 60 目土筛, 待测。

1.2 采样区概况

安塞县沿河湾镇纸坊沟流域位于距安塞县城西南 20 km 处, 处黄土高原腹地。属于黄土丘陵沟壑区第二副区, 水土流失严重, 是延河支流杏子河下游的一级支沟。地处东经 109°13'46"~109°16'03", 北纬 36°42'42"~36°46'28", 流域面积 8.27 km², 为暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡地区, 年平均温度为 9.3℃, 年平均降雨量为 542.5 mm, 主要集中在 6~9 月, 年水面蒸发量 1 486.7 mm, 无霜期 157~194 d。黄绵土为该流域的主要土壤类型, 质地均一, 土层深厚, 土质疏松, 保水能力较弱, 抗旱性能较差。

1.3 分析方法

采用文献^[5]的方法进行土壤农业化学常规分析, 不同生长年限刺槐林立地状况见表 1。土壤含水量、速效磷和全磷分别采用烘干法、Olsen 比色法和酸溶—钼锑抗测定。无机磷各组分采用蒋博藩—顾益初^[6]无机磷形态分级体系, 将土壤有机磷分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (NaHCO_3 溶性磷)、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ (NH_4OAc 溶性磷)、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (H_2SO_4 溶性磷)、 Fe-P (NaOH — Na_2CO_3 溶性磷)、 Al-P (NH_4F 溶性磷)和 O-P (闭蓄态磷)。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限刺槐林地土壤全磷、速效磷变化
无机磷是土壤全磷的重要组成部分, 且有一部

分是可溶性的,与土壤速效磷关系密切。退耕还林后,原来开放或半开放的农田生态系统物质循环结构体系转变为人工生态系统的封闭或半封闭物质循环结构体系,再无外界施入磷素补充,随生长年限的延长,刺槐生长不断吸收土壤中的磷素并在体内积累,土壤中磷库持续消耗而呈总体下降趋势($r^2=0.64$)。如图 1 所示刺槐生长从 2~42 a 间,土壤全磷含量降低 10.29%。

在刺槐生长幼龄期(25 a 前),吸收土壤养分较多,归还到土壤的枯枝落叶和营养物质较少,水土流失相对较强,土壤可溶性养分流失较多,土壤速效磷

含量有所减少(图 2);到了中龄近熟期(25~30 a),刺槐生长旺盛,覆盖度增大,归还物质增多,水土流失减弱,养分损失减少,而且每年大量的枯枝落叶包含营养元素重新返回到生态系统中,为系统的养分补给和改善提供了一定的物质来源,因此速效磷含量在 30a 左右处达到最大;成熟林后期(30 a 后),刺槐林进入衰败阶段,速效磷含量又有所减少,这与薛菱^[7]等的研究一致。速效磷是植物可以直接吸收利用的磷素,占土壤全磷含量不足 1%,土壤速效磷的变化并不会导致土壤全磷剧烈波动。

表 1 不同样地刺槐的立地状况
Table 1 Growth conditions of *Robinia* various sample plot

恢复年限 Age (a)	坡向 Direction	坡度(°) Slope	覆盖度(%) Coverage	土壤 pH Soil pH	土壤类型 Soil tapes
2	半阳坡 Semi-sunny slope	19	—	8.54	黄绵土 Huang Mian soil
16	阳坡 Sunny slope	20	45	8.53	黄绵土 Huang Mian soil
24	阳坡 Sunny slope	25	60	8.48	黄绵土 Huang Mian soil
27	阳坡 Sunny slope	25	50	8.51	黄绵土 Huang Mian soil
30	半阳坡 Semi-sunny slope	22	80	8.38	黄绵土 Huang Mian soil
43	阳坡 Sunny slope	20	25	8.50	黄绵土 Huang Mian soil

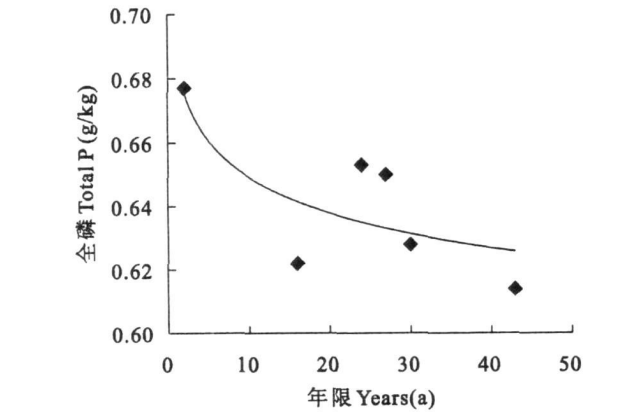


图 1 不同年限土壤全磷含量变化
Fig.1 Content of total P in different ages

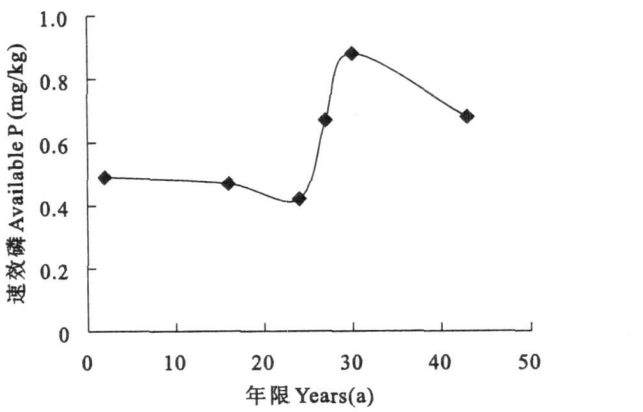


图 2 不同年限土壤速效磷含量变化
Fig.2 Content of available P in different ages

2.2 不同恢复年限刺槐林地土壤无机磷变化

2.2.1 恢复年限与无机磷的关系 无机磷是全磷的重要组成部分,它的变化势必会影响到总体磷库的变化,由表 2 可知,无机磷与全磷呈正相关但达不到显著水平,无机磷含量直接影响全磷含量;土壤无机磷与速效磷呈负相关也达不到显著水平,无机磷的含量的变化对速效磷含量未构成直接的影响;土壤速效磷和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 均呈显著的正相关关系,在刺槐生长年限里, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 对速效磷的影响较大,均是可被植物吸收利用

的有效磷源,这与黄运湘^[8]的研究一致; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 均呈极显著的正相关,与速效磷呈正相关但不显著,表明 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Fe-P 潜在磷源,在刺槐生长过程中持续向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Fe-P 转化, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为间接的有效磷源,即迟效磷。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 呈显著负相关,与 Al-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈负相关但不显著,说明在刺槐整个生长年限里, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 很难向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 和 Al-P 转化,在植物整个生长过程中均为无效磷源。

恢复年限与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和无机磷总量呈极显著的

负相关,随刺槐生长年限的延长,Ca₁₀-P 和无机磷总量逐渐减少;恢复年限与 Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P 和 Al-P 均呈正相关,随刺槐生长年限的延长,土

壤中 Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P 和 Al-P 的含量逐渐增加。

表 2 不同年限下土壤各无机磷形态与速效磷的关系 (n=6)
Table 2 The correlation of inorganic P fraction and available P

项目 Item	恢复年限 Age (a)	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	Al-P	无机 P Inorganic P	速效磷 Available P
Ca ₂ -P	0.5679							
Ca ₈ -P	0.6124	0.9620**						
Ca ₁₀ -P	-0.9285**	-0.7212	-0.8135*					
Fe-P	0.7633	0.8195*	0.8830*	-0.8897*				
Al-P	0.2391	0.8357*	0.7866	-0.4326	0.7582			
无机磷 Inorganic P	-0.9162**	-0.3572	-0.4792	0.8881*	-0.6086	0.02313		
速效磷 Available P	0.5754	0.8130*	0.7502	-0.6164	0.8629*	0.8775*	-0.2532	
全磷 Total P	-0.7206	-0.4972	-0.5327	0.7814	-0.6606	-0.3242	0.7425	-0.4249

2.2.2 不同恢复年限刺槐林地土壤无机磷总量变化 植物能从土壤中直接吸收利用的磷主要是无机态,在刺槐生长过程中,土壤中的无机磷被持续的吸收利用,再加上有机磷矿化缓慢,因此随恢复年限的延长,土壤中无机磷含量呈线性下降($R^2=0.8751$) (图 3)。恢复年限对无机磷所占全磷比例影响不

大,在刺槐整个生长年限里,无机磷始终占土壤全磷 65%以上(图 4)。土壤全磷和无机磷含量都随刺槐生长年限的延长呈减小趋势,无机磷占全磷比例并没有太大的变化,基本持平在 70%的,这与来璐等人^[9]的研究结论一致。

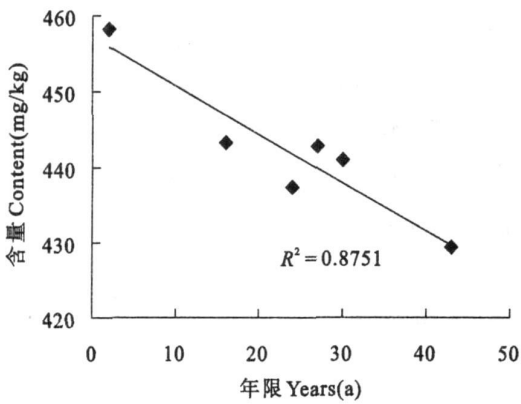


图 3 不同年限无机磷含量

Fig. 3 Content of inorganic P in different ages

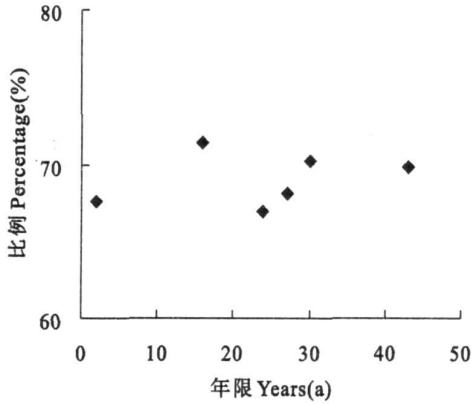


图 4 不同年限无机磷占全磷比例

Fig. 4 Percentage of inorganic P in different ages

2.2.3 不同恢复年限刺槐林地土壤无机磷组分变化 由表 3 可知,在刺槐生长年限内土壤无机磷主要以溶解性很低的钙磷形式存在,溶解性强的磷酸盐含量很低,表明石灰性土壤中磷素主要以溶解性很低的磷酸钙盐形式存在,而有效性较高的 Fe-P、Al-P、Ca₂-P 较少,这和刘世亮等人^[10]的研究相一致。在刺槐生长年限内,无机磷各组分含量都保持以下顺序:Ca₁₀-P>Ca₈-P>Fe-P>Al-P>Ca₂-P。

Ca-P 是无机磷的主要形态,其含量高于其它组分,尤其是 Ca₁₀-P,在无机磷中所占比例最高。随刺槐生长年限的延长,土壤 Ca₁₀-P 呈明显下降趋势,在刺槐幼龄期(25 a 前)呈线性下降趋势,在刺槐生长的中龄近熟期(25~30 a),含量有轻微回升,在成熟林后期(30 a 后)达到最小值。Ca₁₀-P 与 Σ Ca-p 和无机磷呈现极显著的正相关关系(表 2),Ca₁₀-P 含量的降低直接导致 Σ Ca-p 和无机磷含量的降低,在刺槐生长 42 a 内呈下降趋势,土壤

$\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\Sigma\text{Ca-P}$ 和无机磷含量分别下降了 9.6%、8.0%和 6.3%。

土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 在刺槐生长 2~27 a 期间, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量略有变化且幅度较小, 在 27~30 a 期间急剧上升, 并达到最大值, 30~43 a 期间含量又有较大回落。 Fe-P 、 Al-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最小, 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 变化趋势相似。

土壤 Fe-P 、 Al-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 在刺槐生长年限内, 含量的总体变化趋势是在刺槐生长幼

龄期变化不大, 中龄近熟期上升, 成熟林后期又有所下降。 Fe-P 、 Al-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 均是活性磷源, 为速效磷的直接来源(表 2), 与植物的生长状况关系密切, 因此 Fe-P 、 Al-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和速效磷的变化趋势基本一致。

试验样地土壤为石灰性土壤, 风化程度高, 闭蓄态磷其与土壤结合紧密, 外有氧化物包被, 检测比较困难, 因此 O-P 均在检测限以下, 与鲁如坤^[11]研究一致。

表 3 不同年限土壤无机磷组分含量变化差异 ($\alpha=0.05$)

Table 3 Contents of inorganic phosphorus fractionation of the soils of different ages

年限 Age (a)	无机磷组分 Inorganic P fractionation(mg/kg)						无机磷 Inorganic P (mg/kg)
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	$\Sigma\text{Ca-P}$	Fe-P	Al-P	
2	3.8 _{bc}	14.5 _b	424.1 _a	442.4 _a	9.5 _e	6.3 _b	458.2 _a
16	3.3 _c	14.2 _b	407.7 _{ab}	425.2 _{bc}	12.1 _d	6 _{bc}	443.3 _b
24	3.2 _b	15.1 _b	400 _{ab}	418.3 _{cd}	12.7 _c	5.1 _d	436.1 _b
27	3.3 _c	13.6 _b	407.7 _{ab}	424.6 _b	13 _c	6.0 _d	443.6 _b
30	5.8 _a	19.8 _a	387.7 _b	413.3 _d	19 _a	8.7 _a	441.0 _b
43	5.4 _a	18.3 _a	383.5 _b	407.2 _e	15.7 _b	6.5 _b	429.4 _c

2.2.4 不同恢复年限刺槐林地土壤无机磷组分比例变化 由表 4 可知, 在刺槐的 42 a 生长年限内, 无机磷各组分比例大小都保持以下顺序: $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。 Ca-P 占无机磷绝大多数比例, 其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例最大, 始终占 85%以上的比例, 并且随恢复年限的延长总体呈下降趋势; 在刺槐幼龄期, 其比例基本保持在 91%左右; 中龄近熟期比例迅速下降到 87.91%, 达到最

低值; 成熟林后期又稍有回升。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 比例的变化趋势较为一致, 幼龄期变化不大, 中龄近熟期间急剧上升, 成熟林后期又稍有回落。 且 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的比例随年限延长的变化趋势在中后期与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 相反。 在刺槐中龄近熟期, 无机磷各组分不管是含量还是比例都有较大的变化, 刺槐生长的近熟期生长最旺盛, 无机磷各组分在此期间变化较大。

表 4 不同年限土壤无机磷组分比例变化 (%)

Table 4 Percentage of inorganic phosphorus fractionation of the soils of different ages

年限 Age (a)	占无机磷比例 Percentage					
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	$\Sigma\text{Ca-P}$	Fe-P	Al-P
2	0.83	3.16	92.56	96.55	2.07	1.37
16	0.74	3.20	91.97	95.92	2.73	1.35
24	0.96	3.45	91.45	95.86	2.90	1.23
27	0.75	3.07	92.07	95.89	2.94	1.17
30	1.32	4.49	87.91	93.72	4.31	1.97
43	1.26	4.26	89.31	94.83	3.66	1.51

3 结 论

黄土丘陵区以刺槐进行植被恢复的过程中, 随恢复年限的延长, 土壤全磷含量明显下降, 速效磷含量在刺槐生长前期呈下降趋势, 在中期显著升高, 在后期又有所回落; 土壤无机磷总量呈明显线性下降

趋势。无机磷形态以 Ca-P 为主, 各组分含量及其比例关系不随恢复年限延长而变化, 保持稳定的顺序: $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$, O-P 均在检测限以下; 随恢复年限的延长, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈现显著下降趋势, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 在刺槐生长前期变化不大, 中期显著上升, 后期有

所回落。相关性分析结果显示恢复年限只与土壤无机磷总量和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量关系密切,达到极显著负相关水平,与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈正相关但不显著。

黄土高原的地形、植被、气候、人为活动、水土流失等因素使得土壤无机磷变化更加复杂。在采样时,尽管避免了气候、土壤、植被、人为活动等因素对试验的影响,但是地块之间的养分差异、地形地貌的影响加上退耕年限不是均匀递增,成为本试验的不足之处。本试验仍需野外长期定位试验进行佐证。

参 考 文 献:

[1] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用[J]. 林业科技开发, 2002, (5): 11—13.
[2] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
[3] 赵 忠, 成向荣, 薛文鹏, 等. 黄土高原不同水分生态区刺槐细

根垂直分布的差异[J]. 林业科学, 2006, 42(11): 1—6.
[4] 单长卷, 梁宗锁. 黄土高原刺槐人工林根系分布与土壤水分的关系[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(1): 19—21.
[5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 175.
[6] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101—102.
[7] 薛 菱, 刘国彬, 戴全厚, 等. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia* L.) 土壤微生物量演变特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 909—917.
[8] 黄运湘, 张杨珠, 邹应斌, 等. 湖南省双季稻田土壤无机磷形态的分级研究[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(2): 90—94.
[9] 来 璐, 郝明德, 彭令发. 长期施肥对黄土高原旱地土壤无机磷空间分布的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 76—78.
[10] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 等. 不同磷源在石灰性土壤中的供磷能力及形态转化[J]. 河南农业大学报, 2002, 36(4): 370—373.
[11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 175.

Changes of inorganic phosphorus in the soils covered
with *Robinia Pseudoacacia*
with different growing period of in the loess hilly area

SU Shao-hua¹, LIU He-man¹, DONG Li-na¹, ZHANG Jin-ai³, ZHANG Xing-chang^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Yangling, Shaanxi 712100; 3. Shuozhou Vocational and Technical College, Shuozhou, Shanxi 036002, China)

Abstract: The time-space substitute method was used to discuss the changes of inorganic phosphorous in the woodlands covered with *Robinia pseudoacacia* of 2, 16, 24, 27, 30 and 43 years of growing period respectively on the basis of field investigation and laboratory analysis. The results indicate that with the extension of growing period, both the contents of total amount of total-phosphorous and inorganic phosphorous in the woodland covered with *Robinia pseudoacacia* decreased, and the content of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ showed significant decrease, on the contrary, other inorganic phosphorus fraction increased; while in the soils that covered with *Robinia pseudoacacia* of different growing period, the content and proportion of inorganic phosphorous fraction maintained following order as: $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$.

Keywords: growing period; inorganic phosphorous; *Robinia pseudoacacia*