

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 4 - 000 - 10

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000243

退耕植茶地土壤团聚体中有机磷组分分布特征

吴 雯, 郑子成* 李廷轩

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘 要: 有机磷是土壤磷库的重要组成部分, 其活性大小与土壤供磷能力密切相关。采用野外调查与室内分析相结合的方法, 以四川雅安市名山区中峰乡退耕植茶地(2-3 年、9-10 年、16-17 年)为研究对象, 选取邻近撂荒地作为对照, 探讨了退耕植茶地土壤团聚体中有机磷组分的分布特征。结果表明: 随着退耕植茶年限的延长, <0.25 mm 粒径团聚体活性有机磷含量增加; 退耕植茶 16-17 年各粒径中等稳性有机磷显著低于其它退耕年限, 中等活性有机磷含量在退耕植茶 9-10 年最高, 含量在 99.20-313.29 mg/kg 之间。与撂荒地相比, 退耕植茶 9-10 年后土壤团聚体中等活性有机磷含量显著增加; 而退耕植茶 16-17 年土壤团聚体中等稳性有机磷含量显著降低。活性有机磷、中等活性有机磷主要分布于小粒径团聚体中; 高稳性有机磷主要分布于 >5 mm 和 5-2 mm 粒径团聚体; 中等稳性有机磷在退耕植茶地中主要分布于 5-2 mm、0.5-0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体, 而在撂荒地中分布较为均匀。对各有机磷组分贡献率最大均为 >5 mm 粒径团聚体, 占 33.49% - 74.96%。随着退耕植茶年限的延长, >5 mm 粒径团聚体贡献率逐渐增加。不同粒径团聚体对有机磷组分的保持能力具有明显差异, 退耕植茶后土壤团聚体中等活性有机磷含量增加, 且逐渐呈现活性较低的有机磷形态向活性较高的磷形态转化趋势。

关键词: 退耕植茶; 土壤团聚体; 有机磷组分; 贡献率

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 影响着土壤的物理、化学及生物学特性^[1], 是土壤养分稳定和保护的载体^[2-3]。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均有着重要的影响。针对无机磷含量较低的土壤, 有机磷的矿化成为植物吸收磷素的重要来源, 有机磷含量高低和活性大小对土壤的供磷作用备受关注。根据 Bowman 和 Cole^[4]的分级方法, 有机磷可分为活性有机磷、中等活性有机磷、中等稳性有机磷和高稳性有机磷。各形态有机磷对植物有效性不同^[5-6], 但各形态间可以相互转化, 且处于动态平衡。以往对有机磷组

分的研究表明, 在有机磷各形态之间, 中等活性有机磷和中稳性有机磷是土壤有机磷中最活跃而且数量相对较大的组分, 活性有机磷与速效磷间关系密切^[4-7]。张鼎华^[8]等对赤红壤、红壤、紫色土和黄壤的研究发现, 各类土壤有机磷组分与有效磷相关性表现为: 活性有机磷 > 中等活性有机磷 > 中等稳性有机磷 > 高稳性有机磷。陈立新^[9]研究表明, 根际土壤有机磷总量、活性有机磷含量、中等稳性有机磷含量和高稳性有机磷含量随林龄递增而降低, 到成熟林时有所恢复。张春霞^[10]等发现各种年限的苜蓿(*Medicago*) 地中有机磷各组分的含量均表现为

收稿日期(Received date): 2016-09-08; 改回日期(Accepted date): 2017-03-18

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40901138); 四川省科技支撑项目(2013N20044)。[National Natural Science Foundation of China (40901138); Sichuan Science and Technology Support Project (2013N20044)]。

作者简介(Biography): 吴雯(1992-), 女, 贵州安顺人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤生态[Wu Wen (1992-), female, born in Anshun, Guizhou Province, M. Sc. candidate, research on soil ecology] E-mail: wuwen0629@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 郑子成(1976-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 土壤生态与水土保持[Zheng Zicheng (1976-), male, Ph. D., professor, research on soil ecology and soil and water conservation] E-mail: zichengzheng@aliyun.com

中等稳性有机磷 > 中等活性有机磷 > 高稳性有机磷 > 活性有机磷。不同粒径团聚体对磷的保护作用存在差异, 细颗粒物含有更多的活性有机磷和易矿化的有机磷^[11]; 砂姜黑土中有机磷主要存在于 < 0.005 mm 粒径中, 不同有机磷组分含量随粒径的减小而增大^[12]; 徐阳春^[13-14] 等研究发现 < 0.05 mm 粒径中的有机磷含量较高; 文倩^[7] 等研究发现中等稳性有机磷和高稳性有机磷在 > 2 mm 粒径中的含量高于小团聚体, 活性有机磷和中等活性有机磷在 > 2 mm 和 < 0.5 mm 粒径中含量均较高。综上可知种植年限与团聚体粒径对土壤有机磷的变化均有一定的影响。关于土壤有机磷的变化大多数研究多集中在农田生态系统和森林生态系统上, 对于茶园的研究甚少。茶树 (*Camellia sinensis*) 作为一种多年生常绿作物, 由于根系吸收特性、根系分泌物及茶园施肥管理的特殊性, 在区域内可形成独特的茶园生态系统。

自 20 世纪 90 年代长江上游实施退耕还林工程以来, 名山区中峰乡根据其地理条件和自然资源特点, 形成了以退耕植茶为主的退耕模式。由于施肥、凋落物归还土壤以及根系分泌物等原因, 随着退耕植茶年限的延长, 土壤铝、氟和多酚类物质逐渐积累^[15-18], 而钙、镁等盐基离子和微量元素含量则有所降低^[19-20]。已有研究结果表明长期植茶有利于土壤团聚体全磷和有效磷的积累, 全磷的分布受粒径的影响小, 分布较为均匀, 而速效磷则主要分布在小粒径团聚体中^[21], 造成全磷与有效磷分布不一致的原因可能与其磷形态的分布状况有关, 但尚未对磷组分分布特征进行深入探讨。本研究以雅安市名山区中峰乡典型退耕植茶地为研究对象, 开展不同退耕植茶年限土壤团聚体中有机磷组分分布及变化特征方面的研究, 从土壤团聚体角度揭示有机磷组分对退耕植茶的响应特征, 为退耕植茶措施的实施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区隶属于雅安市名山区中峰乡, 位于四川盆地西缘。属于典型的低山丘陵区, 气候为亚热带季风性湿润气候, 年均温 15.4 °C, 无霜期 294 d。年

降雨量 1500 mm 左右且集中在 6-9 月, 约占全年的 72.6%。土壤类型为第四纪老冲积物发育而成的黄壤, 区域内原始地带性植被为亚热带常绿阔叶林。自实施退耕植茶模式以来, 茶园成为了该研究区内的主要土地利用方式。随着良种茶的引进, 目前, 研究区内的茶树品种主要以福鼎大白、名山白毫、名山特早芽等为主, 从 20 世纪 90 年代至今, 已形成一定规模的退耕植茶地。其中品质高、效益好的福鼎大白茶已成为该区的主栽品种。

茶树的种植密度为 75 000-90 000 株·hm⁻², 大行距为 150 ± 15 cm, 小行距为 35 ± 15 cm, 双行单株错株条植, 株距 16 ± 4 cm。茶园的施肥情况为基肥 (猪圈肥) 15 000 kg·hm⁻²、菜籽饼肥 3000 kg·hm⁻² 以及 K₂SO₄ 型复合肥 (N:P₂O₅:K₂O = 20:8:8) 675 kg·hm⁻², 在 10 月中旬, 沿树冠边缘垂直下方开沟, 依次加入复合肥、猪圈肥和菜籽饼肥, 最后覆土, 并于次年 2 月中旬、5 月下旬和 8 月上旬进行追肥, 分别施用复合肥 1000 kg·hm⁻² 和尿素 500 kg·hm⁻², 位置与基肥相同。

1.2 土样采集

在野外实地调查的基础上, 根据不同退耕植茶地的地质、地貌、地形等条件和施肥情况等进行综合考虑, 选择地块位置较为集中、成土母质相同、施肥管理及地形等因素相对一致的退耕 2-3 年 (RT2-3)、9-10 年 (RT9-10)、16-17 年 (RT16-17) 的福鼎大白茶园为采样对象, 并以邻近撂荒地作为对照 (CK)。样地基本情况见表 1。

在各样地中按“品”字形设置 5 个典型样方 (15 m × 15 m), 样方间距约 15 m, 在每一样方内按“S”形设置 5 个采样点, 将这五点土样混合作为一次重复, 每一样地采 5 次重复。分 0-20 cm 和 20-40 cm 土层采样, 采样点设在树冠边缘垂直下方, 土样尽量避免挤压, 保持土壤结构不被破坏。同时, 采集各样地混合土样, 用于土壤理化性质等指标的测定。将采集的土样沿自然结构轻轻掰成直径约 1 cm 的小土块, 除去小石块和动植物残体, 在室内自然风干, 采用沙维诺夫干筛法^[22] 分离出 > 5 mm、5-2 mm、2-1 mm、1-0.5 mm、0.5-0.25 mm 和 < 0.25 mm 共 6 级团聚体。供试土壤基本理性质和团聚体组成分别见表 2、表 3。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Description of the sampling plots

代码	样地	退耕年限 (a)	海拔 (m)	面积 (hm ²)	植被 类型	凋落物质量 (g·m ⁻²)	茶树覆盖率 (%)	茶树高度 (m)	胸径 (cm)	冠幅 (m)
CK	撂荒地	0	740	≈0.20	棕叶狗尾草	-	-	-	-	-
RT2-3	茶园	2-3	742	≈0.41	茶树	96.11	25	0.45	7	0.50-0.60
RT9-10	茶园	9-10	742	≈0.75	茶树、蕨	259.56	65	0.65	11	0.70-0.80
RT16-17	茶园	16-17	742	≈0.67	茶树、零星杉木	364.22	65	0.70	12	0.75-0.85

表2 各样地土壤基本性质

Tab. 2 Basic physical and chemical properties of soil in each sampling plot

土层 (cm)	样地 代码	全磷 (g·kg ⁻¹)	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	pH	活性 有机磷 (mg·kg ⁻¹)	中等活性 有机磷 (mg·kg ⁻¹)	中等稳性 有机磷 (mg·kg ⁻¹)	高稳性 有机磷 (mg·kg ⁻¹)
0-20	CK	0.45 C	10.5 C	4.47	4.09 AB	144.30 C	31.22 B	29.12 A
	RT2-3	0.35 C	4.4 D	4.24	3.02 B	133.29 D	32.81 AB	28.69 A
	RT9-10	0.78 A	36.3 B	3.97	4.76 A	268.80 A	36.75 A	29.98 A
	RT16-17	1.20 B	50.5 A	3.79	4.02 AB	155.04 B	5.98 C	28.14 A
20-40	CK	0.26 AB	3.8 C	5.30	2.64 A	69.08 C	38.11 A	21.40 A
	RT2-3	0.24 B	3.8 C	4.29	2.07 A	78.66 B	22.49 B	20.99 A
	RT9-10	0.26 AB	7.00 B	4.08	2.65 A	99.80 A	13.57 C	24.64 A
	RT16-17	0.36 A	15.6 A	4.17	3.30 A	68.95 C	6.33 D	23.97 A

注: 同列数据后不同大写字母表示不同年限间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表3 供试土壤团聚体组成

Tab. 3 Composition of tasted soil aggregates

土层 (cm)	样地代码	团聚体百分含量 (%)					
		>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	<0.25 mm
0-20	CK	45.26 aB	23.66 bA	8.04 cdA	12.3 cA	5.28 dA	5.46 dA
	RT2-3	47.28 aB	23.72 bA	8.75 cA	11.28 cA	4.97 dA	3.98 dA
	RT9-10	63.04 aA	20.07 bA	5.81 cB	5.89 cB	2.30 dB	2.09 dB
	RT16-17	69.95 aA	14.26 bB	2.44 cC	2.78 cB	1.55 cB	1.46 cB
20-40	CK	47.14 aC	28.51 bA	8.70 cA	9.44 cA	3.07 dA	2.64 dA
	RT2-3	52.02 aBC	26.40 bB	3.98 cB	7.43 cA	2.64 cAB	1.52 cB
	RT9-10	67.41 aAB	19.00 bB	4.65 cB	3.71 cB	0.97 cBC	0.99 cB
	RT16-17	68.87 aA	20.70 bB	4.24 cB	3.85 cB	0.88 dC	0.80 dB

注: 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平, 同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

1.3 测定项目及方法

(1) 土壤基本理化性质采用鲁如坤^[23]的方法: 全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法, 有效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH8.5 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法, pH 采用电位法测定(土水比 1:2.5)。

(2) 有机磷组分采用 Bowman 和 Cole^[4] 的有机磷分级方法: 活性有机磷为 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 提取的有机磷; 中等活性有机磷为 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 提取的有机磷; 中等稳性有机磷为能溶于 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 在 pH 为 1.0–1.8 的条件下不发生沉淀但难为植物吸收的磷—富里酸磷; 高稳性为能溶于 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 在 pH 为 1.0–1.8 的条件下发生沉淀又难为植物吸收的磷—胡敏酸磷。

1.4 数据分析

各粒径团聚体质量百分含量(%)

$$= \frac{\text{各粒径团聚体含量}}{\text{土壤样品总质量}} \times 100$$

团聚体对土壤磷组分的贡献率(%) =

$$\frac{\text{该粒级团聚体中磷组分含量} \times \text{该团聚体含量}}{\text{全土磷组分含量}} \times 100$$

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理, DPS v7.05 软件进行统计分析, LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 退耕植茶地土壤团聚体中有机磷组分分布特征

2.1.1 活性有机磷分布特征

活性有机磷是指易矿化又易被植物吸收利用的

组分, 主要是核酸磷脂类和核糖类化合物, 其有效性高。由表 4 可知, 随着退耕植茶年限的延长, 0–20 cm 土层, >5 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体活性有机磷含量逐渐增加, 其余粒径变化不明显; 20–40 cm 土层, 5–2 mm、2–1 mm、0.5–0.25 mm、<0.25 mm 粒径团聚体均在 RT16–17 时活性有机磷含量有所增加, 显著高于 RT2–3, 其余粒径变化较小。表明 RT16–17 土壤活性有机磷含量有所增加, 土壤磷素肥力状况有所提升。

0–20 cm 土层活性有机磷含量较 20–40 cm 土层高。两个土层下活性有机磷均主要分布在 <1 mm 粒径团聚体中, 显著高于其他粒径团聚体, 表明小粒径团聚体中磷的有效性更高。

与对照相比, 0–20 cm 土层, RT2–3 土壤 >5 mm、<0.25 mm 粒径团聚体活性有机磷含量降低, RT9–10 土壤 >5 mm、5–2 mm 及 RT16–17 土壤 5–2 mm 粒径团聚体活性有机磷含量增加, 其余粒径活性有机磷含量与对照差异不显著。20–40 cm 土层, 与对照相比, RT2–3 土壤 <0.25 mm 粒径团聚体活性有机磷含量降低, RT9–10 土壤 1–0.5 mm 以及 RT16–17 土壤 5–2 mm、2–1 mm 粒径团聚体活性有机磷含量增加, 其余粒径活性有机磷含量与对照差异较小。

2.1.2 中等活性有机磷分布特征

中等活性有机磷是指能溶于 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 而较易矿化又较易被植物吸收的组分。主要是指植酸钙、镁等化合物。由表 5 可知, 随着退耕植茶年限的延长, RT9–10 中等活性有机磷含量显著高于 RT2–3 和 RT16–17。

表 4 不同退耕植茶年限土壤团聚体活性有机磷的分布特征

Tab. 4 Characteristic of labile organic phosphorus distributed in aggregates of soil in different periods of returning farmland to tea

土层 (cm)	样地 代码	土壤团聚体活性有机磷含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					
		>5 mm	5–2 mm	2–1 mm	1–0.5 mm	0.5–0.25 mm	<0.25 mm
0–20	CK	3.58 bB	2.81 bB	4.02 bA	6.57 aA	6.03 aAB	6.48 aAB
	RT2–3	1.83 cC	3.49 bAB	3.28 bA	5.48 aA	4.60 aB	4.74 aC
	RT9–10	4.77 bA	4.35 bA	4.40 bA	6.17 aA	6.17 aAB	6.00 aB
	RT16–17	4.07 bAB	4.61 bA	4.81 bA	6.65 aA	7.08 aA	7.31 aA
20–40	CK	2.44 cA	2.42 cBC	2.21 cB	3.54 bB	4.57 aAB	5.11 aAB
	RT2–3	2.32 cA	1.37 bC	2.26 bB	3.57 aAB	3.58 aB	3.15 aC
	RT9–10	2.42 bA	3.40 bAB	2.53 bB	4.42 aA	4.45 aAB	4.60 aB
	RT16–17	3.05 cA	3.87 bcA	3.45 bcA	4.11 bAB	5.32 aA	5.64 aA

注: 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平, 同列数据后不同大写字母表示不同年限间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

表5 不同退耕植茶年限土壤团聚体中等活性有机磷的分布特征

Tab.5 Characteristic of moderate labile organic phosphorus distributed in aggregates of soil in different periods of returning farmland to tea

土层 (cm)	样地 代码	土壤团聚体中等活性有机磷含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					
		>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	<0.25 mm
0-20	CK	139.80 bC	132.84 bC	117.15 cC	170.98 aC	179.47 aC	177.11 aC
	RT2-3	120.72 cBC	133.85 bcC	139.49 bcBC	152.14 abD	178.05 abC	157.22 aD
	RT9-10	268.77 dA	258.54 eA	298.62 bA	287.39 cA	291.39 bcA	313.29 aA
	RT16-17	162.14 cB	164.85 cB	172.5 bcB	197.53 bB	266.63 aB	294.61 aB
20-40	CK	62.08 dC	72.93 cC	72.59 cB	73.46 cC	86.24 bC	118.35 aB
	RT2-3	82.89 bcB	81.94 cB	80.40 cB	88.66 bcB	91.97 bB	111.36 aBC
	RT9-10	99.20 bA	109.28 bA	114.86 bA	110.82 bA	133.59 aA	144.08 aA
	RT16-17	67.99 bC	71.44 bC	66.55 bB	79.32 bBC	77.90 bD	97.80 aC

注: 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平, 同列数据后不同大写字母表示不同年限间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

0-20 cm 土层各粒径团聚体中等活性有机磷含量高于 20-40 cm 土层。两个土层下各样地中均表现为随着粒径的减小中等活性有机磷含量逐渐增加, 表明中等活性有机磷主要富集于小粒径团聚体中。

对照与 RT2-3 中等活性有机磷含量差异不显著, RT9-10、RT16-17 各粒径中等活性有机磷含量均较对照显著增加, RT9-10 和 RT16-17 土壤磷素肥力水平较对照好。

2.1.3 中等稳性有机磷分布特征

中等稳性有机磷指与富里酸结合的有机磷, 其有效性较低。由表 6 可知, 随着退耕植茶年限的延长, RT2-3 和 RT9-10 差异不明显, RT16-17 时中等稳性有机磷含量最低, 显著低于 RT2-3 和 RT9-10。表明 RT16-17 有效性较低的中等稳性

有机磷矿化为活性较高的有机磷形态, 使土壤肥力有所提高。

退耕植茶地 0-20 cm 土层各粒径团聚体中等稳性有机磷含量高于 20-40 cm 土层。对照地中等稳性有机磷分布较为均匀, 随粒径的变化不大; 而退耕植茶地中, 中等稳性有机磷主要分布于 5-2 mm、0.5-0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中。

0-20 cm 土层, RT2-3 与对照差异不显著, RT9-10 除 >5 mm 粒径团聚体中等稳性有机磷含量增加外, 其余粒径与对照差异不显著, 而 RT16-17 各粒径中等稳性有机磷含量则显著低于对照; 20-40 cm 土层, 各退耕植茶地除 RT2-3 5-2 mm 粒径团聚体外, 其余粒径团聚体中等稳性有机磷含量均较对照低。

表6 不同退耕植茶年限土壤团聚体中等稳性有机磷的分布特征

Tab.6 Characteristic of moderate resistant organic phosphorus distributed in aggregates of soil in different periods of returning farmland to tea

土层 (cm) Soil layer	样地代码 Sites	土壤团聚体中等稳性有机磷含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					
		>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	<0.25 mm
0-20	CK	24.78 bB	38.85 abA	28.65 abA	35.12 abAB	27.21 abAB	44.00 aA
	RT2-3	29.27 bAB	40.44 aA	26.43 bA	29.20 bB	41.75 aA	39.99 aA
	RT9-10	34.04 dA	41.63 abA	30.17 eA	36.53 cAB	43.46 aA	40.56 bA
	RT16-17	3.70 eC	23.00 aB	13.16 cA	7.22 dC	24.05 aB	18.42 bB
20-40	CK	36.12 aA	41.46 aA	38.31 aA	39.28 aA	46.68 aA	41.39 aA
	RT2-3	20.61 bB	31.55 aAB	20.47 bB	17.73 bB	30.99 aB	32.63 aB
	RT9-10	10.82 dC	22.31 bBC	16.31 cC	17.55 bcB	33.01 aB	30.78 aB
	RT16-17	2.19 dD	17.48 aC	9.29 cD	13.29 bB	18.83 aC	17.25 aC

注: 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平, 同列数据后不同大写字母表示不同年限间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.1.4 高稳性有机磷分布特征

高稳性有机磷是指与胡敏酸结合的有机磷,其稳定性高,难以被植物吸收利用。由表7可知,随着退耕植茶年限的延长,各粒径高稳性有机磷含量差异不显著。

0-20 cm 土层各粒径团聚体高稳性有机磷含量高于20-40 cm 土层。各样地高稳性有机磷主要分布于>5 mm 和5-2 mm 粒径团聚体中,显著高于其他粒径,大粒径团聚体中稳定性高的有机磷含量更多。

除0-20 cm 土层0.5-0.25 mm 粒径团聚体中高稳性有机磷含量较对照降低外,其余各粒径团聚体高稳性有机磷含量与对照均差异不显著。

2.2 各粒径团聚体对有机磷组分的贡献率

土壤中各粒径团聚体的含量以及不同粒径团聚体中有机磷组分含量可详细地反映各粒径团聚体对土壤有机磷组分含量的贡献率。由表8可知,随着退耕植茶年限的延长,>5 mm 粒径团聚体活性有机磷贡献率、中等活性有机磷贡献率和高稳性有机磷贡献率逐渐增加,这主要与其>5 mm 粒径团聚体含量增加有关,而>5 mm 粒径团聚体中等稳性有机磷贡献率先增加后降低,这主要是由于RT16-17 中稳性有机磷含量降低,1-0.5 mm 粒径团聚体活性有机磷贡献率降低,5-2 mm 和1-0.5 mm 粒径团聚体中活性有机磷贡献率及高稳性有机磷贡献率降低。不同粒径团聚体对活性有机磷、中等活性有机磷、中等稳性有机磷及高稳性有机磷的贡献率均以>5 mm 粒径团聚体为主。RT9-10 年后,

33.49% -74.96% 的有机磷来自于>5 mm 的团聚体,其次为5-2 mm 粒径团聚体,占18.34% -48.13%,显著高于其它粒径团聚体,>5 mm 的团聚体活性有机磷和中等活性有机磷含量相对较低,但由于土壤中该粒径团聚体含量占绝对优势,因此,它的贡献率显示出较高值。由此可见,土壤团聚体对土壤有机磷组分的贡献率与团聚体含量高度相关。

与对照相比,RT9-10 和 RT16-17 土壤>5 mm 粒径团聚体活性有机磷贡献率和中等活性有机磷增加,1-0.5 mm 粒径团聚体活性有机磷贡献率降低,5-2 mm 和1-0.5 mm 粒径团聚体中等活性有机磷贡献率降低;RT16-17 土壤>5 mm 和1-0.5 mm 粒径团聚体中等稳性有机磷贡献率降低;>5 mm 粒径团聚体高稳性有机磷贡献率增加,RT9-10 和 RT16-17 土壤5-2 mm、2-1 mm、1-0.5 mm 粒径团聚体高稳性有机磷贡献率降低。

3 讨论

3.1 退耕植茶对土壤有机磷组分的影响

随着退耕植茶年限的延长,RT16-17 各粒径团聚体的中等活性有机磷和中等稳性有机磷含量均有所降低,表明退耕植茶可降低中等活性有机磷和中等稳性有机磷的含量,使其转化为有效性更高的形态供给茶树吸收利用,这是由于随着退耕植茶年限的延长,茶树根系分泌的有机酸含量逐渐增多^[17],中等活性有机磷主要是植酸钙、植酸镁化合物,有机酸作为配体与金属阳离子形成配合物或螯合物,从

表7 不同退耕植茶年限土壤团聚体高稳性有机磷的分布特征

Tab.7 Characteristic of resistant organic phosphorus distributed in aggregates of soil in different periods of returning farmland to tea

土层(cm) Soil layer	样地代码 Sites	土壤团聚体高稳性有机磷含量(mg·kg ⁻¹)					
		>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	<0.25 mm
0-20	CK	31.46 aA	32.40 aA	24.21 bcA	21.89 cA	24.91 bA	23.17 bcA
	RT2-3	31.55 aA	31.91 aA	21.75 bB	21.18 bA	21.55 bB	21.15 bA
	RT9-10	31.99 aA	31.02 aA	23.53 bAB	22.36 bcA	20.46 bcB	20.98 cA
	RT16-17	31.51 aA	30.05 aA	22.03 bAB	22.32 bA	21.77 bB	22.09 bA
20-40	CK	23.49 aA	22.84 aA	16.87 bB	15.66 bAB	14.51 bA	16.13 bA
	RT2-3	23.78 aA	22.84 aA	18.85 bA	16.14 bcA	14.87 cA	16.58 bcA
	RT9-10	27.03 aA	24.83 aA	17.89 bAB	15.39 bAB	15.31 bA	15.85 bA
	RT16-17	24.92 aA	25.38 aA	18.12 bAB	14.24 cB	13.70 cA	14.90 cA

注:同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平,同列数据后不同大写字母表示不同年限间差异达显著水平($P < 0.05$)。

表8 各粒径团聚体对有机磷组分的贡献率

Tab. 8 Contribution rates of aggregates fractions to soil organic phosphorus fractions

有机磷形态	样地代码 Sites	贡献率 Contribution rates(%)					
		>5 mm	5-2 mm	2-1 mm	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	<0.25 mm
活性有机磷	CK	41.59 aB	21.19 bA	7.58 cA	16.21 bA	6.55 cA	6.88 cA
	RT2-3	43.54 aB	22.48 bA	6.93 dA	16.69 cA	6.08 dA	4.28 dA
	RT9-10	62.38 aA	21.33 bA	4.90 cA	6.91 cB	2.30 cA	2.18 cA
	RT16-17	67.22 aA	20.33 bA	3.68 cA	4.69 cB	2.07 cA	2.01 cA
中等活性有机磷	CK	44.90 aC	25.46 bA	7.59 cdA	11.81 cA	4.83 dA	5.26 dA
	RT2-3	48.69 aC	25.66 bA	6.20 cdA	10.25 cA	4.86 dA	3.42 dA
	RT9-10	63.54 aB	20.06 bB	6.12 cA	5.59 cB	1.97 cA	2.07 cA
	RT16-17	70.32 aA	18.34 bB	3.38 cA	3.99 cB	1.83 cA	1.94 cA
中等稳性有机磷	CK	40.30 aB	30.23 bBC	8.06 cdA	11.79 cA	4.47 dA	5.16 dA
	RT2-3	44.62 aB	33.13 bB	5.34 cdA	8.41 cAB	4.98 cdA	3.52 dA
	RT9-10	56.79 aA	27.63 bC	5.53 cA	5.11 cB	2.55 cA	2.38 cA
	RT16-17	33.49 bC	48.13 aA	5.80 cA	5.72 cB	3.77 cA	3.09 cA
高稳性有机磷	CK	50.31 aD	28.38 bA	6.77 cA	8.08 cA	3.30 dA	3.17 dA
	RT2-3	55.46 aC	27.56 bA	5.10 cdAB	7.02 cA	2.80 deA	2.06 eA
	RT9-10	70.60 aB	19.95 bB	3.97 cAB	3.35 cB	1.09 cA	1.05 cA
	RT16-17	74.96 aA	18.57 bB	2.56 cB	2.24 cB	0.85 cA	0.82 cA

注: 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平, 同列数据后不同大写字母表示不同年限间差异达显著水平($P < 0.05$)。

而降低阳离子的浓度而释放出有效态磷,且 RT16-17 土壤大团聚体含量增多(表 3),大团聚体结构疏松,通气良好,为微生物创造了良好的生存条件,在根系分泌物和微生物的作用下,中等活性有机磷和中等稳性有机磷矿化为有效态磷供给茶树生长。活性有机磷与中等活性有机磷与土壤速效磷的关系密切,具有较高的生物有效性,中等稳性有机磷在一定条件下可逐渐释放^[7,24-25]。土壤有机磷在土壤微生物和土壤酶的作用下可矿化分解为植物易吸收利用的有效态磷,在无机磷含量较低的土壤上,土壤有机磷的矿化成为植物吸收磷素的重要来源。

与对照相比,高稳性有机磷变化不大,这主要是由于高稳性有机磷较为稳定,难以矿化被茶树吸收利用;RT9-10、RT16-17 中等活性有机磷含量显著增加,RT16-17 中等稳性有机磷含量显著降低,说明退耕植茶在一定程度上可以提高中等活性有机磷含量。

土壤有机磷有效性是一个复杂的问题,它与土壤供磷能力密切相关。各形态有机磷对植物有效性不同^[5-6],但各形态之间可以相互转化。四种组分中,活性有机磷含量最低,介于 1.83-7.31 mg/kg

之间,中等活性有机磷含量最高,中等稳性有机磷和高稳性有机磷含量差异不大。这与陈立新^[9]对落叶松人工林不同发育阶段的研究结果为中等稳性有机磷 > 中等活性有机磷 > 高稳性有机磷 > 活性有机磷、曹娟^[26]对不同年龄杉木人工林土壤有机磷组分的研究中,中等活性有机磷和中等稳性有机磷相对含量较大,其次是活性有机磷和高稳性有机磷和赵均嵘^[27]对杉木林不同生态系统有机磷各组分比例为中等活性有机磷 > 中等稳性有机磷 > 高稳性有机磷 > 活性有机磷的研究结果不一致,这可能与土壤类型和环境条件的差异有关。

3.2 土壤团聚体中有机磷组分分布特征

活性有机磷与中等活性有机磷与土壤有效磷的关系密切,本试验表明小团聚体中含有更多的有效性高的有机磷形态,大团聚体中含有更多的稳定态有机磷,小团聚体中磷的有效性更高。本研究中,活性有机磷、中等活性有机磷均在小粒径团聚体中含量较多,活性有机磷含量在 <1 mm 粒径团聚体中的含量显著高于其他粒径团聚体,中等活性有机磷含量随着粒径的减小逐渐增加。活性有机磷与中等活性有机磷与土壤速效磷的关系密切,Rubek^[11]的研

究表明土壤细颗粒吸附的速效磷多于粗颗粒,粘粒还含有较多高活性和易矿化的有机磷; Gupta^[28]发现小团聚体含有更多的速效磷和活性较高的有机磷,文倩^[7]等也发现活性有机磷随着粒径的减小其相对含量增大,与本研究结果相似。中等活性有机磷主要是植酸钙、植酸镁化合物,其小粒径团聚体中含量较多原因与小粒径中含有较多的 Ca^{2+} 有关,前期研究表明土壤交换性 Ca^{2+} 含量随着粒径的减小而增加,而 Mg^{2+} 离子的分布则较为均匀^[29]。对照中,中等稳性有机磷分布较为均匀,随粒径的变化不大。退耕植茶地中,中等稳性有机磷在 5-2 mm 粒径团聚体中含量较多,高稳性有机磷主要分布在 >5 mm 和 5-2 mm 粒径团聚体中,表明大团聚体中含有更多的稳定态有机磷,文倩等^[7]研究发现中等稳性有机磷和高稳性有机磷在 >2 mm 大团聚体中的含量高于小团聚体,与本研究结果相似。本研究中,中等稳性有机磷在 <0.5 mm 粒径团聚体中的含量也较多,这与该粒径中富里酸的含量有关,中等稳性有机磷主要指与富里酸结合的有机磷。

土壤中各粒径团聚体的含量以及不同粒径团聚体的有机磷组分含量可详细地反映各粒径团聚体对土壤有机磷组分含量的贡献率。对总有机磷贡献率大的团聚体均为 >5 mm 粒径团聚体,RT9-10 年后 33.49% - 74.96% 的有机磷来自于 >5 mm 的团聚体,其次为 5-2 mm 粒径团聚体,占 18.34% - 48.13%,显著高于其它粒径团聚体,>5 mm 的团聚体活性有机磷和中等活性有机磷含量相对较低,但由于土壤中该粒径团聚体含量占绝对优势,因此,它的贡献率显示出较高值。由此可见,土壤团聚体对土壤有机磷组分的贡献率与团聚体含量高度相关。随着退耕植茶年限的延长,>5 mm 粒径团聚体活性有机磷贡献率、中等活性有机磷贡献率和高稳性有机磷贡献率逐渐增加,这主要与其 >5 mm 粒径团聚体含量增加有关,而 >5 mm 粒径团聚体中等稳性有机磷贡献率先增加后降低,RT16-17 中等稳性有机磷贡献率低于 RT9-10,这主要是由于 RT16-17 中稳性有机磷含量降低。

4 结 论

退耕植茶可降低中等活性有机磷和中等稳性有机磷的含量,退耕植茶措施的实施有助于土壤磷素

肥力的提高。随着退耕植茶年限的延长,有效性低的有机磷形态可矿化为有效性较高的形态。

不同粒径团聚体对有机磷组分的保持能力具有较大差异,活性有机磷、中等活性有机磷主要分布于小粒径团聚体中,中等稳性有机磷在撂荒地中分布均匀,在退耕植茶地中主要分布于 5-2 mm 和 <0.5 mm 粒径团聚体中,高稳性有机磷在 >2 mm 粒径团聚体中含量最高,大团聚体中含有更多的稳定态有机磷,小团聚体中含有更多的有效性更高的有机磷形态。

土壤团聚体对各有机磷组分的贡献率有 33.49% - 74.96% 来自于 >5 mm 粒径团聚体,这与 >5 mm 粒径团聚体的含量有关,由此可见,土壤团聚体对土壤有机磷组分的贡献率与团聚体含量高度相关。

参考文献 (References)

- [1] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构的分形特征 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 56-65 [GONG Wei, HU Tingxing, WANG Jingyan, et al. Study on fractal features of soil aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration in southern Sichuan Province [J]. Journal of Plant Ecology 2007, 31(1): 56-65]
- [2] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447-555 [LIU Zhongliang, YU Wantai. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture 2011, 19(2): 56-65]
- [3] 张曼夏, 季猛, 季伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 598-604 [ZHANG Manxia, JI Meng, LI Wei, et al. Effect of land use patterns on soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology 2013, 19(4): 598-604]
- [4] Bowman A, Cole C V. An exploratory method for fraction of organic phosphorus grassland [J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95-101
- [5] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 713-720 [ZHANG Bing, FANG Fang, CHEN Youpeng, et al. Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2012, 32(3): 713-720]
- [6] Yang J C, Wang Z G, Zhou B J, et al. Inorganic phosphorus fractionation and its translocation dynamics in a low-P soil [J]. Journal of Environmental Radioactivity 2012, 112(5): 64-69
- [7] 文倩, 赵小蓉, 张书美, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 327-332 [WEN Qian, ZHAO Xiaorong, ZHANG Shumei, et al. Distribution

- characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in Semi-arid area [J]. *Scientia Agricultura Sinica* 2005, **38**(2): 327 - 332]
- [8]张鼎华,涂传进,沈兵松,等. 福建山地几种主要土类土壤磷的研究 [J]. *林业科学* 2008, **44**(8): 29 - 36 [ZHANG Dinghua, TU Chuanjin, SHEN Pingsong, et al. Phosphorus status of main soil groups in Fujian Mountainous Regions [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(8): 29 - 36]
- [9]陈立新. 落叶松土壤有机磷形态与林木生长量的关系 [J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(12): 2157 - 2161 [CHEN Lixin. Relationship between soil organic phosphorus forms in larch plantations and tree growth [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2003, **14**(12): 2157 - 2161]
- [10]张春霞,郝明德,李丽霞. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤碳、氮、磷组分的变化 [J]. *草地学报*, 2015, **13**(1): 66 - 70 [ZHANG Chunxia, HAO Mingde, LI Lixia. Soil composition of carbon, nitrogen and phosphorus after successive years of alfalfa planting in the Gullies of the Loess Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica* 2015, **13**(1): 66 - 70]
- [11]Rubek G H, Guggengerger G, Zech W, et al. Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(5): 1123 - 1132
- [12]孙华,熊德祥. 鲁南沙姜黑土及其有机无机复合体的有机磷研究 [J]. *土壤通报*, 1998, **29**(2): 61 - 64 [SUN Hua, XIONG Dexiang. Study on dark soil and its organic P in organic and inorganic compound in southern Shandong [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, **29**(2): 61 - 64]
- [13]徐阳春,沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中N、P、K含量与分配的影响 [J]. *中国农业科学* 2000, **33**(5): 1 - 7 [XU Yangchun, SHEN Qirong. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, **33**(5): 1 - 7]
- [14]徐阳春,沈其荣,茆泽圣. 长期施用有机物料对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响 [J]. *土壤学报*, 2003, **40**(4): 593 - 598 [XU Yangchun, SHEN Qirong, MAO Zesheng. Influence of long-term application of fertilization on the contents and distribution of forms of organic P in soil and soil particle-sizes [J]. *Acta Pedologica Sinica* 2003, **40**(4): 593 - 598]
- [15]丁瑞兴,黄晓. 茶园-土壤系统铝和氟的生物地球化学循环及其对土壤酸化的影响 [J]. *土壤学报*, 1991, **28**(3): 229 - 236 [DING Ruixing, HUANG Xiao. Biogeochemical cycle of aluminium and fluorine in tea garden soil system and its relationship to soil acidification [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, **28**(3): 229 - 236]
- [16]俞慎,何振立,陈国潮,等. 不同树龄茶树根层土壤化学特性及其对微生物区系和数量的影响 [J]. *土壤学报*, 2003, **40**(3): 433 - 439 [YU Shen, HE Zhenli, CHEN Guochao, et al. Soil chemical characteristics and their impacts on soil microflora in the root layer of tea plans with different cultivating ages [J]. *Acta Pedologica Sinica* 2003, **40**(3): 433 - 439]
- [17]殷佳丽,郑子成,李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体全氟和水溶态氟的分布特征 [J]. *农业环境科学学报* 2015, **34**(9): 1754 - 1760 [YIN Jiali, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan. Distribution of total fluoride and water-soluble fluoride in soil aggregates under tea plantation of different Years [J]. *Journal of Agro-Environment Science* 2015, **34**(9): 1754 - 1760]
- [18]殷佳丽,郑子成,李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体全铝和交换态铝的分布特征 [J]. *农业环境科学学报* 2015, **34**(5): 891 - 896 [YIN Jiali, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan. Distribution of total and exchangeable aluminum in soil aggregates under different tea-planting years [J]. *Journal of Agro-Environment Science* 2015, **34**(5): 891 - 896]
- [19]韩文炎,阮建云,林智,等. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制 [J]. *茶叶科学* 2002, **22**(1): 70 - 74 [HAN Wenyan, RUAN Jianyun, LIN Zhi, et al. The major nutritional limiting factors in tea soils and development of tea speciality fertilizer series [J]. *Journal of Tea Science* 2002, **22**(1): 70 - 74]
- [20]郭雅玲,王果,罗丹,等. 福建铁观音茶园土壤中铅、镉、砷、铬、汞、铜、氟的环境质量现状分析 [J]. *中国生态农业学报* 2011, **19**(3): 676 - 681 [GUO Yalin, WANG Guo, LUO Dan, et al. Evaluation on the environmental quality about lead, cadmium, arsenic, chromium, mercury, copper and fluorine in the soils of Tieguanyin tea plantation in Fujian Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 2011, **19**(3): 676 - 681]
- [21]王晟强,郑子成,李廷轩. 植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量变化的影响 [J]. *植物营养与肥科学报* 2013, **19**(6): 1393 - 1402 [WANG Shenqiang, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan. Effects of ages of tea plantations on changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* 2013, **19**(6): 1393 - 1402]
- [22]中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. [Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. The soil physical and chemical analysis manual [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978]
- [23]鲁如坤. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. [LU Rukun. Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press 2000]
- [24]赵吴琼,李菊梅,徐明岗,等. 长期不同施肥下灰漠土有机磷组分的变化 [J]. *生态环境* 2007, **16**(2): 569 - 572 [ZHAO Wuqiong, LI Jumei, XU Minggang, et al. Changes of organic phosphor componentes in grey desert soil under long-term different fertilization [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(2): 569 - 572]
- [25]史静,张誉方,张乃明,等. 长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响 [J]. *土壤学报* 2014, **51**(2): 351 - 359 [SHI Jing, ZHANG Yufang, ZHANG Naiming, et al. Effects of long-term

- fertilization on forms and availability of phosphorus in Mountain Red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica* 2014 **51**(2):351-359]
- [26]曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 不同年龄杉木人工林土壤有机磷的形态特征 [J]. *土壤通报*, 2016, **47**(3): 681-687 [CAO Juan, YAN Wende, XIANG Wenhua, et al. Characteristics of soil organic phosphorus in different aged stands of Chinese fir plantations [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(3): 681-687]
- [27]赵均嵘. 杉木林生态系统转换对土壤磷形态的影响及其机制 [D]. 福州: 福建农林大学, 2012 [ZHAO Junrong. The influence of Chinese fir ecosystem conversion on the soil phosphorus forms and its mechanism [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012]
- [28]Gupta V, Germida J J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **20**(6): 777-786
- [29]王晟强, 郑子成, 李廷轩, 等. 植茶年限对土壤团聚体中交换性盐基离子分布的影响 [J]. *土壤学报*, 2013, **50**(4): 99-106 [WANG Shengqiang, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan, et al. Effects of age of tea plantation on distribution of exchangeable base cations in soil aggregates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(4): 99-106]

Characteristics of Organic Phosphorus Fractions within Soil Aggregates in Soils Returned from Farmland to Tea

WU Wen, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan

(College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Organic phosphorus is an important part of soil phosphorus pools. The activity of organic phosphorus is closely related to the ability of supplying phosphorus by soil. Field investigation and laboratory analysis were combined to investigate the organic phosphorus fraction characteristics within soil aggregates, which were returned from farmland to tea and located in Zhongfeng Township, Mingshan County, Ya'an, Sichuan Province with different ages (2-3, 9-10 and 16-17 years old), in response to the returning of farmland to tea, with the control of nearby abandoned land. The results showed that the content of labile organic phosphorus within aggregate at the particle size of <0.25 mm increased with the increasing ages. The moderate resistant organic phosphorus within each particle size of soil aggregates with ages of 16-17 years was significantly lower than that in aggregate fractions of other ages. The highest content of moderate labile organic phosphorus was observed in aggregate fractions of 9-10 years, ranging from 99.20 to 313.29 mg/kg. The contents of moderate labile organic phosphorus in aggregate fractions returned from farmland to tea with ages of 9-10 years and 16-17 years were significantly higher than those in the abandoned land. However, the moderate resistant organic phosphorus in aggregate fractions returned from farmland to tea with ages of 16-17 years was significantly lower than that in the abandoned land. For the distribution of organic phosphorus, the labile organic phosphorus was mainly noticed in aggregate at the particle size of <1 mm. The content of moderate labile organic phosphorus in aggregate fractions increased with the decreasing particle sizes. The resistant organic phosphorus mainly existed in >5 mm and 5-2 mm particle size of aggregates. The moderate resistant organic phosphorus mainly existed in 5-2 mm, 0.5-0.25 mm and <0.25 mm particle size in soil aggregate fractions returned from farmland to tea and was well distributed in the abandoned land. The particle size of >5 mm accounted most to the organic phosphorus fractions, ranging from 33.49% to 74.96%. The contribution rates of aggregates at the particle size of >5 mm increased with the increasing ages. These results demonstrated that the distribution of organic phosphorus fractions varied greatly in different particle size of soil aggregates. The content of moderate labile organic phosphorus increased after returning from farmland to tea. With the increasing ages, the organic phosphorus in soil aggregate fractions was transformed to fractions with higher activities.

Key words: Returning farmland to tea; soil aggregates; organic phosphorus fractions; contribution rate