植物营养与肥料学报 2013,19(6):1393-1402
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0613

植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量变化的影响

王晟强,郑子成,李廷轩*
(四川农业大学资源环境学院,四川成都 611130)

摘要: 采用野外调查和室内分析相结合的方法,研究了植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量变化的影响。结果表明,1)土壤团聚体速效钾含量随粒径的减小先升高后降低,在0.5～0.25 mm粒径中较高,为38.52～70.32 mg/kg;全磷、全钾和碱解氮含量在各粒径中分布较均匀,其变异系数分别为2.77%～11.58%、0.82%～3.72%和5.98%～10.62%;而全氮和有效磷含量则集中在 <0.25 mm粒径的团聚体中,分别为0.40～0.98 g/kg和8.53～29.32 mg/kg。2)随着植茶年限的增加,各粒径团聚体全氮、碱解氮、全磷和有效磷含量逐渐升高,而速效钾含量则有所降低,全钾含量变化不明显。3)不同粒径土壤团聚体对土壤氮、磷、钾含量的贡献率有45%～72%来自>5 mm的团聚体,随着植茶年限的增加,>5 mm的团聚体对土壤养分的贡献率先升高后降低,在植茶23年和31年时较高,为60%～72%。不同粒径团聚体对土壤氮、磷、钾的保持和供应能力存在明显差异,长期植茶有利于土壤团聚体全氮、碱解氮、全磷和有效磷的积累,但速效钾含量却逐年降低,故在茶园的生产管理中,需平衡施用氮、钾肥,植茶23年后应增施有机肥料,以促进土壤大团聚体含量的增加,提高茶园土壤的保肥和供肥能力。

关键词: 植茶年限;土壤团聚体;氮;磷;钾
中图分类号: S152.4;S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)06-1393-10

Effects of ages of tea plantations on changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates

WANG Sheng-qiang, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan*
(*College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China*)

Abstract: Through field investigation and laboratory analysis, effects of ages of tea plantations on changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates were studied. Results show that the contents of soil available K are increased first and then decreased with the increase of particle sizes of soil aggregates, and higher values which are from 38.52 to 70.32 mg/kg are found in 0.5-0.25 mm particle size. The distributions of total P and total K and available N are relatively even in soil aggregates of all particle sizes, and their coefficients of variation are 2.77%-11.58%, 0.82%-3.72% and 5.98%-10.62% separately. However, the contents of total N and available P are increased with decrease of particle sizes of the soil aggregates, and higher values(0.40-0.98 g/kg and 8.53-29.32 mg/kg) are found in <0.25 mm particle size. Along with rising ages of the tea plantations the contents of total N and total P and available N and P present increasing trends in soil aggregates of all particle sizes. However, the contents of available K display decreasing trends, and the contents of total K show no significant changes. The contribution rates of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates(>5 mm) are 45%-72%. Along with rising ages of the tea plantations, the contribution rates of >5 mm aggregates nutrient contents present increasing first and then decreasing trends, and higher values are found in tea plantations with ages of 23 and 31 years(60%-72%). The nitrogen, phosphorus and potassium retaining capacities and supplying capacities are significantly different in soil aggregates with different particle sizes. Long-term cultivation of tea is beneficial to soil aggregates total N and P and available N and P accumulations. However, the contents of

收稿日期: 2013-03-28 **接受日期:** 2013-06-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(40901138);四川省2012年度学术和技术带头人培养资金;四川省科技厅项目(2010JY0083)资助。
作者简介: 王晟强(1989—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事土壤生态环境研究。E-mail: wsq_sicau@163.com
* 通信作者 Tel: 028-87118722, E-mail: litinx@263.net

available K are decreased year by year, and the contribution rates of >5 mm aggregates nutrient contents are found to be higher in tea plantations with ages of 23 and 31 years, and declined somewhat afterwards. Therefore, in management of tea gardens, it is essential to adopt balanced application of nitrogen and potassium fertilizers, and in tea plantations which are older than 23 years, to use organic manure in addition, so as to promote the increase of soil aggregates content and improve the capacity of tea garden soil fertilizer conservation and fertilizer supply.

Key words: tea plantation age; soil aggregates; nitrogen; phosphorus; potassium

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元,是形成土壤良好结构的物质基础,对土壤物理、化学和生物学性质具有重要影响[1]。土壤氮、磷、钾是植被生长和植被恢复的主要影响因子[2],是土壤肥力的重要组成部分,也是评价土壤肥力水平的重要指标[3]。不同粒径团聚体对土壤氮、磷、钾的保持和供应能力不同[4-6],了解土壤氮、磷、钾含量在团聚体中的分布状况,对调控土壤肥力和增加土壤养分储量具有重要意义。郑子成等[4]研究显示,不同土地利用方式下土壤团聚体养分含量分布及转化特征存在明显差异。孙天聪等[6]发现长期施肥对土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量在团聚体中的分布有较大影响,并认为5～2 mm团聚体是土壤全氮和硝态氮的主要载体。王岩等[7]研究表明,不同类型土壤磷含量在团聚体中的分布受土壤酸碱性影响较大,在酸性土壤中主要分布在较小粒径中,而在石灰性土壤中则主要积累在较大粒径部分。Hinds等[8]发现,不同粒径团聚体与土壤磷或肥料磷的作用机制可能不同,从而影响土壤磷的有效性及植物对磷的吸收利用。杨振明等[9]研究表明,土壤不同形态钾的含量、有效性及其转化与土壤矿物组成密切相关,而各粒径团聚体含钾矿物组成及含量存在较大差异,导致不同粒径团聚体对土壤供钾能力的贡献不同。目前,关于不同土地利用方式、土壤类型和施肥处理下土壤氮、磷、钾含量在团聚体中的变化研究较多,但在土壤熟化过程中各粒径土壤大量元素含量的动态演变特征还鲜见报道。

茶树(*Camelliasinensis*)属山茶科山茶属,为多年生常绿木本植物,是我国重要的经济作物之一。统计表明,2012年我国茶园面积达238×10^4 hm^2,且有逐年扩大的趋势。在茶园土壤生态系统中,由于茶园的施肥管理、茶树凋落物归还土壤以及根系分泌物等原因,随着植茶年限的增加,茶园土壤钙、镁等盐基离子和微量元素含量有所降低[10-11],而铝、氟和多酚类物质则逐渐积累[12-13]。但就目前而言,在长期植茶过程中,土壤团聚体氮、磷、钾含量变化情况如何,仍不清楚。因此,本文以植茶土壤为研究对象,探讨植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量变化的影响,旨在了解在植茶过程中土壤肥力的演变规律,以期为制订科学合理的茶园土壤管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中峰万亩生态茶园隶属于四川省雅安市名山县,该区域属亚热带季风气候区,年均温15.4℃,无霜期294 d,年降水量约1500 mm,6～9月降水量占全年的72.6%。区域内原始地带性植被为亚热带常绿阔叶林,出露地层为中生代以后的沉积岩,地貌以丘陵台地为主,土壤类型为第四纪老冲积物发育而成的黄壤。目前,研究区主要以老川茶、福鼎大白、名山白毫和名山特早芽等品种为主。其中老川茶从20世纪50年代一直种植至今(其余品种均为引进),形成了具有一定规模不同种植年限的老川茶园。

老川茶园施肥情况为:1)基肥施猪圈肥15000 kg/hm^2,K_2SO_4型复合肥(质量比N:P_2O_5:K_2O = 20:8:8)750 kg/hm^2,在10月中旬,沿树冠边缘垂直下方开沟,依次施入复合肥、猪圈肥,最后覆土。2)追肥为一年追肥3次,春茶追肥时间为2月中旬,施复合肥1500 kg/hm^2,尿素600 kg/hm^2;夏茶追肥时间为5月下旬,施复合肥750 kg/hm^2,尿素300 kg/hm^2;秋茶追肥时间为7月下旬,施复合肥750 kg/hm^2,尿素300 kg/hm^2。追肥位置与基肥相同。

1.2 土样采集与处理

在野外调查的基础上,根据不同植茶年限茶园的地质条件和施肥情况等进行综合考虑,选择成土母质相同、地块位置相对集中且施肥情况相似的植茶年限分别为16年(16 a)、23年(23 a)、31年(31 a)和53年(53 a)的老川茶园土壤为采样对象。在各植茶年限茶园中布设5个典型样方(15 m×15 m),每一样方内按"S"形设置5个采样点,具体采样点设在树冠边缘垂直下方,并分0—20 cm和20—40 cm两个层次采集原状土样,尽量避免挤压,以保

持原状土壤结构。将采集的原状土样在室内自然风干,沿自然结构轻轻掰成直径约 1cm 的小土块,除去植物残体、小石块和蚯蚓等,采用干筛法[14]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。供试土壤基本理化性质和团聚体组成分别见表 1 和表 2。

表 1　供试土壤基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of tasted soils

项目 Item	0—20 cm				20—40 cm			
	16 a	23 a	31 a	53 a	16 a	23 a	31 a	53 a
pH	4.19	4.15	4.13	3.97	4.31	4.30	4.27	4.13
有机质 Organic matter(g/kg)	25.88	30.39	32.84	33.93	14.00	15.41	20.74	21.33
全氮 Total N(g/kg)	0.62	0.62	0.68	0.80	0.39	0.34	0.45	0.51
碱解氮 Available N(mg/kg)	35.97	38.49	42.11	47.22	24.25	24.82	27.23	29.19
全磷 Total P(g/kg)	0.56	0.64	0.70	0.71	0.39	0.41	0.42	0.44
有效磷 Available P(mg/kg)	18.99	19.12	22.49	23.66	4.33	4.52	6.49	7.68
全钾 Total K(g/kg)	16.32	16.02	15.21	15.19	15.94	15.51	14.79	14.55
速效钾 Available K(mg/kg)	59.74	49.11	49.63	39.90	48.53	43.61	43.45	35.45
砂粒 Sand(%)	35.01	36.42	35.78	34.37	35.13	36.87	36.12	35.31
粉粒 Silt (%)	30.94	30.71	30.72	31.01	30.85	30.34	30.60	30.88
粘粒 Clay(%)	34.05	32.87	33.50	34.62	34.02	32.79	33.28	33.81

表 2　供试土壤团聚体组成

Table 2　Composition of tasted soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体质量百分含量 Mass percentage of soil aggregates(%)					
		>5 mm	5 ～2 mm	2 ～1 mm	1 ～0.5 mm	0.5 ～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	49.93	23.25	7.56	10.69	4.41	4.17
	23	70.43	18.07	3.93	4.35	1.51	1.71
	31	64.74	18.89	4.72	6.14	2.44	3.06
	53	57.37	22.84	5.59	8.00	3.07	3.14
20—40	16	57.31	19.65	6.28	9.99	3.62	3.15
	23	74.74	15.08	3.49	4.00	1.27	1.42
	31	69.29	16.73	3.84	5.30	2.12	2.72
	53	57.66	21.23	5.95	8.39	3.16	3.60

1.3　测定项目及方法

土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾含量和颗粒组成(国际制)均采用常规方法测定[15]。

1.4　数据处理

各粒径团聚体对土壤养分含量的贡献率可通过下列公式[16]进行计算:

团聚体对土壤养分含量的贡献率 = 该团聚体中养分含量 × 该团聚体含量/土壤中养分含量 ×100%。

试验数据采用 DPS(11.0) 和 EXCEL(2007) 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 植茶年限对土壤团聚体氮含量变化的影响

2.1.1 植茶年限对土壤团聚体全氮含量变化的影响

由表3可知,土壤团聚体全氮含量随粒径的减小而升高,其中<0.25 mm粒径团聚体的全氮含量是>5 mm粒径的1.13～1.49倍,表明小粒径团聚体具有较强的吸附和保持土壤氮素的能力。因为土壤团聚体粒径越小,比表面积越大,对有机碳的吸附能力就越强。正是由于小粒径团聚体固持碳的作用,导致有机无机胶体紧密结合,不易被微生物分解释放[17],从而使有机碳在小粒径团聚体中积累[18]。除主要受有机碳影响外,不同粒径团聚体对NH_4^+的吸附能力也有差异,徐阳春等[19]研究表明,土壤团聚体粒径越小,对NH_4^+的吸附量就越多,从而使小粒径团聚体全氮含量较高。在0—20 cm土层,植茶16 a的土壤除5～2 mm粒径团聚体外,其他粒径全氮含量均较低,且显著低于植茶23 a的土壤;植茶23 a土壤中5～2 mm、2～1 mm和0.5～0.25 mm粒径的团聚体中全氮含量显著低于植茶31 a;植茶31 a土壤中>5 mm和<0.25 mm粒径团聚体中全氮含量显著低于植茶53 a。可见,随着植茶年限的增加,各粒径团聚体全氮含量逐渐升高。根据调查,当地茶农长期施用有机肥,同时有修剪枝叶归还土壤的习惯,从而使茶园土壤有机质逐年积累(表1),这在一定程度上也提高了土壤全氮含量。20—40 cm土层,随着植茶年限的增加,各粒径团聚体全氮含量的变化规律与0—20 cm土层相似,只是在不同土层之间表现出0—20 cm土层各粒径团聚体全氮含量比20—40 cm土层高,这主要是茶农定期施肥和茶树凋落物归还土壤的缘故。

表3 植茶年限对土壤团聚体全氮含量变化的影响

Table 3 Effect of tea plantation age on change of total N contents in soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体全氮含量 Total N content in soil aggregates (g/kg)					
		>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	0.55 eC	0.72 bB	0.59 deC	0.61 cdC	0.66 bcC	0.82 aC
	23	0.61 dB	0.59 dC	0.68 cB	0.78 bB	0.75 bB	0.91 aAB
	31	0.60 dB	0.80 cA	0.86 bA	0.82 bcAB	0.91 aA	0.86 bBC
	53	0.76 cA	0.84 bcA	0.82 bcA	0.86 bA	0.90 abA	0.98 aA
20—40	16	0.38 bBC	0.39 abB	0.41 abB	0.40 abBC	0.37 bC	0.43 aC
	23	0.33 bC	0.37 abB	0.37 abB	0.37 abC	0.38 aC	0.40 aC
	31	0.43 dAB	0.50 cA	0.55 aA	0.48 cB	0.51 bcB	0.53 abB
	53	0.48 cA	0.48 cA	0.58 bA	0.59 bA	0.63 abA	0.70 aA

注(Note):同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level;同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

2.1.2 植茶年限对土壤团聚体碱解氮含量变化的影响 由表4可以看出,土壤碱解氮含量较均匀地分布在各粒径团聚体中,其变异系数为5.98%～10.62%,表明土壤团聚体碱解氮含量受粒径变化的影响较小。0—20 cm土层,植茶16 a的土壤2～1 mm和1～0.5 mm粒径团聚体中碱解氮含量显著低于植茶23 a;植茶23 a的土壤>5 mm、1～0.5 mm、0.5～0.25 mm和<0.25 mm粒径团聚体中碱解氮含量与植茶31 a差异不明显;植茶31 a土壤>5 mm和2～1 mm粒径的团聚体中碱解氮含量显著低于植茶53 a。由于当地茶农长期偏施尿素,导致各粒径团聚体碱解氮含量逐年升高,但不同粒径碱解氮含量变幅存在明显差异。随着植茶年限的增加,>5 mm、5～2 mm、2～1 mm和1～0.5 mm粒径团聚体碱解氮含量明显升高,其中>5 mm粒径增幅最大(36.86%),而0.5～0.25 mm和<0.25 mm粒径团聚体碱解氮含量变化则不明显,表明大粒径团聚体碱解氮含量对茶树连作的响应较为敏感,其

表 4　植茶年限对土壤团聚体碱解氮含量变化的影响

Table 4　Effect of tea plantation age on change of available N contents in soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体碱解氮含量 Available N content in soil aggregates (mg/kg)					
		>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	36.60 bcC	32.05 cB	38.13 abC	35.82 bcB	42.36 aA	39.11 abA
	23	38.64 abBC	34.80 bB	44.80 aB	43.95 aA	39.67 abA	41.76 aA
	31	42.72 aB	41.74 aA	36.89 bC	43.05 aA	45.36 aA	36.60 bA
	53	50.09 aA	41.07 bA	47.95 aA	48.18 aA	40.89 bA	41.78 bA
20—40	16	24.07 aB	23.45 aA	26.07 aA	25.62 aA	22.43 aB	25.74 aAB
	23	24.60 abB	23.18 bA	28.49 abA	29.93 aA	26.29 abAB	29.01 aA
	31	27.72 abAB	23.99 bA	25.76 abA	32.11 aA	29.62 abA	26.18 abAB
	53	30.91 aA	28.24 abA	23.29 bA	27.05 abA	26.27 abAB	23.89 bB

注(Note): 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level; 同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

中 0—20 cm 土层比 20—40 cm 土层表现更明显。与全氮相似,不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒径团聚体碱解氮含量均高于 20—40 cm 土层。

2.2　植茶年限对土壤团聚体磷含量变化的影响

2.2.1 植茶年限对土壤团聚体全磷含量变化的影响

表 5 显示,土壤全磷含量较均匀地分布在各粒径团聚体中,其变异系数为 2.77%～11.58%,表明土壤团聚体全磷含量受粒径变化的影响较小。0—20 cm 土层,植茶 16 a 的土壤 5～2 mm、2～1 mm、1～0.5 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中全磷含量显著低于植茶 23 a;植茶 23 a 土壤在 >5 mm 和 0.5～0.25 mm 粒径团聚体中全磷含量显著低于植茶 31 a;而植茶 31 a 土壤在 0.5～0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中全磷含量则显著高于植茶 53 a。随着植茶年限的增加, >5 mm、5～2 mm、2～1 mm 和 1～0.5 mm 粒径团聚体全磷含量逐渐升高,而 0.5～0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体全磷含量则先升高后降低,且均在植茶 31 a 土壤中显著高于植茶 53 a。根据调查,当地茶农施入的磷肥以磷酸一铵($NH_4H_2PO_4$)为主。在酸性条件下,茶园土壤中的 Fe^{3+}、Al^{3+} 浓度较高且活性较强,能与磷酸根离子结合形成磷酸铁和磷酸铝[20],由于茶园土壤有较强的固磷能力以及磷在土壤中移动性微弱[21],从而导致各粒径团聚体全磷含量逐年升高,但植茶 31 a 后, 0.5～0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中全磷含量明显降低,表明植茶年限的增加有利于大粒径团聚体中全磷的积累,但长期植茶也会导致小粒径团聚体对全磷的吸附和保持能力减弱。20—40 cm 土层,随着植茶年限的增加,各粒径团聚体全磷含量的变化规律与 0—20 cm 土层相似。不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒径团聚体全磷含量要明显高于 20—40 cm 土层。

2.2.2 植茶年限对土壤团聚体有效磷含量变化的影响

土壤有效磷含量在各粒径团聚体中的分布存在一定差异(表 6)。总体而言,在 <0.25 mm 粒径团聚体中有效磷含量较高,表明小粒径团聚体具有较强的磷素供应能力。Rubek 等[22]研究表明,土壤细颗粒吸附的有效磷多于粗颗粒,文倩等[23]也发现小粒径团聚体含有更多的有效磷,与本研究的结果相似。这可能是因为小粒径团聚体含有较多的粘粒矿物及铁、铝氧化物[24],其对磷素的强烈吸附作用导致有效磷在小粒径团聚体中积累。0—20 cm 土层,植茶 16 a 和 23 a 在各粒径团聚体中有效磷含量较低且差异不显著;植茶 23 a 土壤中 >5 mm、1～0.5 mm、0.5～0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体中有效磷含量显著低于植茶 31 a;植茶 31 a 土壤中在 2～1 mm 粒径中有效磷含量显著低于植茶 53 a。随着植茶年限的增加,各粒径团聚体有效磷含量逐渐升高,其中 >5 mm、5～2 mm 和 2～1 mm 粒径团聚体有效磷含量的增幅分别为 32.30%、18.25% 和

表5 植茶年限对土壤团聚体全磷含量变化的影响

Table 5 Effect of tea plantation age on change of total P contents in soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体全磷含量 Total P content in soil aggregates(g/kg)					
		>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	0.58 aB	0.49 bB	0.60 aB	0.55 abB	0.57 aC	0.61 aC
	23	0.64 aB	0.61 aA	0.68 aA	0.66 aA	0.62 aBC	0.69 aAB
	31	0.71 aA	0.67 bA	0.70 abA	0.69 abA	0.72 aA	0.72 aA
	53	0.74 aA	0.69 abA	0.65 bAB	0.66 bA	0.63 bB	0.64 bBC
20—40	16	0.39 aB	0.38 abAB	0.31 bB	0.41 aA	0.42 aAB	0.44 aA
	23	0.41 bcB	0.36 cB	0.42 bA	0.45 abA	0.46 abA	0.48 aA
	31	0.42 abAB	0.44 aA	0.39 bA	0.39 bA	0.44 aAB	0.45 aA
	53	0.46 aA	0.40 cAB	0.37 cA	0.40 cA	0.41 bcB	0.45 abA

注(Note)：同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level；同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

表6 植茶年限对土壤团聚体有效磷含量变化的影响

Table 6 Effect of tea plantation age on change of available P contents in soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体有效磷含量 Available P content in soil aggregates (mg/kg)					
		>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	17.99 cB	18.96 bcB	17.18 cB	21.01 bBC	23.67 aBC	23.93 aB
	23	18.43 cB	21.21 bAB	17.72 cB	19.70 bcC	21.97 bC	24.78 aB
	31	21.77 cdA	23.90 bcA	19.97 dB	22.74 cdAB	27.10 abA	29.32 aA
	53	23.80 bcA	22.42 cAB	23.32 bcA	24.10 bcA	24.97 bAB	28.39 aA
20—40	16	3.47 dB	3.72 dC	5.33 cC	7.22 bB	7.82 abC	8.53 aC
	23	3.63 cB	5.65 bBC	8.65 aB	9.62 aA	9.49 aAB	10.27 aBC
	31	5.57 dAB	7.62 cdAB	7.81 cB	10.02 bA	9.30 bcBC	12.56 aA
	53	6.63 bA	7.96 bA	10.36 aA	9.67 aA	10.89 aA	10.82 aAB

注(Note)：同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level；同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

35.74%，而1～0.5 mm、0.5～0.25 mm和<0.25 mm粒径的增幅分别为14.71%、5.49%和18.64%，表明大粒径团聚体有效磷含量受植茶年限的影响较大。由于长期施用有机肥，有机肥本身含有一定数量的磷，且以有机磷为主，这部分磷易于分解释放；同时，茶园土壤有机质逐年积累(表1)，有机质含有大量“-COOH”和“-OH”，这些基团能与土壤中的活性铁、铝螯合，减少磷被固定[25]，从而使土壤有效磷含量逐年升高。其中，20—40 cm土层也具有相似的变化规律且各粒径团聚体有效磷含量要明显低于0—20 cm土层。

2.3 植茶年限对土壤团聚体钾含量变化的影响

2.3.1 植茶年限对土壤团聚体全钾含量变化的影响

从表7可以看出，土壤全钾含量在各粒径团聚体中的分布较均匀，其变异系数仅为0.82%～3.72%，表明土壤团聚体全钾含量受粒径变化的影

响较小。0—20 cm 土层, >5 mm 和 5 ～2 mm 粒径团聚体中全钾含量逐年降低,且均在植茶 23 a 的土壤中显著高于植茶 31 a;而在 2 ～1 mm、1 ～0.5 mm、0.5 ～0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径的团聚体中全钾含量受植茶年限的影响较小。随着植茶年限的增加,茶树对钾的吸收改变着土壤速效钾和缓效钾间的平衡关系,促进矿物钾向缓效钾及缓效钾向速效钾的转换;同时,茶园土壤逐年酸化(表 1),土壤中的氢离子与粘土矿物层间钾进行代换[26]及茶树根系分泌的较多有机酸[27],对土壤矿物钾有较强的风化分解能力,使其逐步分解被茶树吸收利用,最终导致各粒径团聚体全钾含量有所降低,但变化甚微,其中 20—40 cm 土层也具有相似的变化规律。由于生物积累和常年施肥,使不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒径团聚体全钾含量高于 20—40 cm 土层,但差异并不明显,表明茶园土壤全钾含量主要由土壤母质决定。

表 7　植茶年限对土壤团聚体全钾含量变化的影响

Table 7　Effect of tea plantation age on change of total K contents in soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体全钾含量 Total K content in soil aggregates (g/kg)					
		>5 mm	5 ～2 mm	2 ～1 mm	1 ～0.5 mm	0.5 ～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	16.42 abA	16.27 abA	15.86 bcA	16.49 aAB	15.56 cA	16.22 abA
	23	15.96 abA	16.15 abA	15.84 bA	16.69 aA	15.80 bA	15.80 bAB
	31	15.22 aB	15.27 aB	15.40 aAB	15.31 aAB	15.10 aAB	14.84 aC
	53	15.02 bcB	15.40 bB	14.96 bcB	16.15 aB	14.66 cB	15.11 bcBC
20—40	16	15.99 aA	15.89 aA	15.87 aA	15.72 aA	15.87 aA	15.63 aA
	23	15.50 aB	15.52 aA	15.63 aA	15.33 aB	15.86 aA	15.82 aA
	31	14.66 bC	15.00 abB	15.25 aB	15.41 aAB	15.17 abB	15.32 aB
	53	14.17 dD	14.83 bcdB	15.63 aA	14.79 cdC	15.43 abcB	15.49 abA

注(Note): 同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level; 同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达 5% 显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

2.3.2 植茶年限对土壤团聚体速效钾含量变化的影响　土壤团聚体速效钾含量随粒径的减小先升高后降低(表 8),在 0.5 ～0.25 mm 粒径的团聚体中较高,为 38.52 ～70.32 mg/kg,这与石箭华等[5]在滇中对不同植物群落土壤的研究结果相似,表明该粒径团聚体对土壤钾的供应能力较强。0—20 cm 土层,植茶 16 a 土壤中 >0.25 mm 各粒径团聚体中速效钾含量较高,且显著高于植茶 23 a 的土壤;植茶 23 a 土壤中 >5 mm 和 2 ～1 mm 粒径中速效钾含量与植茶 31 a 差异不明显;植茶 31 a 土壤各粒径团聚体中速效钾含量显著高于植茶 53 a。可见,随着植茶年限的增加,各粒径团聚体速效钾含量逐渐降低。这可能是因为随着茶树的生长,茶树对土壤钾素需求量增大,虽然可以通过凋落物的分解为土壤积累一定量钾素,但仍较难满足茶树生长的需求,从而使茶园土壤团聚体速效钾含量逐年降低;同时,由于当地茶农长期偏施尿素,尿素在酸性条件下水解生成较多的 NH_4^+[28],造成土壤中 K^+ 和 NH_4^+ 不平衡,过量的 NH_4^+ 与 K^+ 竞争吸附点位,加剧了土壤 K^+ 的淋失,其中 0—20 cm 土层比 20—40 cm 土层表现更明显。故在茶园管理中,需平衡施用氮、钾肥。不同植茶年限 0—20 cm 土层各粒径团聚体速效钾含量高于 20—40 cm 土层。这主要是因为植茶过程中不断施入钾肥,同时,茶树凋落物和植物残体分解易于释放钾元素,使钾的周转较快[29];此外下层土壤速效钾还可以通过植物循环向上转移[30]。

2.4　各粒径团聚体对土壤养分含量的贡献率

土壤中各粒径团聚体的含量以及不同粒径团聚体的养分含量可详细地反映各粒径团聚体对土壤养分含量的贡献率。由表 9 可知,不同粒径团聚体对土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾含量的贡献率表现为 >5 mm >5 ～2 mm >1 ～

表8 植茶年限对土壤团聚体速效钾含量变化的影响

Table 8 Effect of tea plantation age on change of available K contents in soil aggregates

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体速效钾含量 Available K content in soil aggregates (mg/kg)					
		>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
0—20	16	60.42 bcA	55.29 dA	59.85 cA	62.26 bA	70.32 aA	57.18 dA
	23	47.99 cB	51.78 bB	49.33 bcB	49.42 bcC	57.49 aC	58.41 aA
	31	49.64 cB	45.55 dC	48.58 cdB	56.46 bB	63.37 aB	53.27 bcB
	53	38.38 cC	41.37 bcD	40.40 bcC	41.88 bcD	46.86 aD	44.10 abC
20—40	16	44.68 dA	53.59 bA	48.67 cA	54.84 bA	59.50 aA	52.43 bA
	23	42.10 cA	48.62 abB	46.72 bcA	46.12 bcB	51.71 aB	47.42 abB
	31	43.57 bcA	43.32 bcC	45.67 bAB	40.70 cdC	53.16 aB	37.32 dC
	53	33.72 dB	37.70 bcD	41.80 aB	36.08 bcdD	38.52 abC	34.17 cdC

注(Note)：同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level；同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

表9 各粒径团聚体对土壤养分含量的贡献率

Table 9 The contribution rates of aggregates fractions to soil nutrient

土壤层次 Soil layer (cm)	植茶年限 Tea plantation age (a)	土壤团聚体对土壤养分含量的贡献率(%) The contribution rates of aggregates fractions to soil nutrient					
		>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
全氮 Total N	16	50.38 aC	23.54 bA	6.97 cdA	10.46 cA	4.08 dA	4.57 dA
	23	70.60 aA	16.76 bB	4.03 cC	4.92 cD	1.63 dC	2.06 dB
	31	61.52 aB	20.36 bAB	5.29 cdB	6.50 cC	2.79 dB	3.55 cdA
	53	54.48 aC	21.97 bA	6.29 dA	9.17 cB	3.72 eA	4.38 eA
碱解氮 Available N	16	52.98 aC	19.59 bA	7.30 dA	10.45 cA	4.19 eA	3.92 eA
	23	71.21 aA	14.99 bB	4.21 cC	4.84 cD	1.44 dC	1.71 dC
	31	67.01 aA	16.46 bB	3.80 cdC	6.15 cC	2.40 dB	2.60 dB
	53	60.03 aB	19.85 bA	5.16 dB	7.84 cB	2.74 eB	2.80 eB
全磷 Total P	16	53.83 aD	19.55 bAB	6.49 dA	10.38 cA	4.13 dA	4.04 dA
	23	71.89 aA	15.11 bC	3.83 cdB	4.42 cD	1.44 dD	1.72 cdC
	31	66.25 aB	17.47 bBC	4.04 cdB	5.37 cC	2.29 dC	2.99 dB
	53	59.41 aC	20.48 bA	5.03 dAB	7.45 cB	2.83 eB	3.20 eB
有效磷 Available P	16	45.83 aC	19.77 bA	7.19 dA	14.02 cA	5.89 dA	5.70 dA
	23	62.91 aA	19.17 bA	5.07 cdBC	6.42 cB	2.19 dC	2.65 dC
	31	60.07 aA	19.53 bA	4.30 dC	7.06 cB	2.90 dC	4.56 dB
	53	52.91 aB	21.43 bA	6.70 cdAB	9.21 cB	3.84 dB	4.32 dB
全钾 Total K	16	53.07 aC	21.08 bA	6.69 dA	10.17 cA	3.81 dA	3.59 dA
	23	71.24 aA	16.44 bB	3.63 cdB	4.18 cD	1.38 dD	1.53 dC
	31	65.52 aB	17.70 bB	4.29 cdB	5.81 cC	2.23 dC	2.87 dB
	53	55.29 aC	22.12 bA	5.94 dA	8.48 cB	3.15 eB	3.43 eAB
速效钾 Available K	16	50.79 aB	21.32 bA	6.85 dA	11.05 cA	4.72 eA	3.68 eA
	23	69.34 aA	17.67 bB	3.77 cdB	4.26 cD	1.62 eD	1.74 deC
	31	66.04 aA	16.73 bB	4.23 cdB	5.86 cC	2.77 dC	2.78 dB
	53	54.18 aB	22.73 bA	6.27 dA	8.34 cB	3.50 eB	3.39 eAB

注(Note)：同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in same row mean significant differences between soil aggregates at the 5% level；同列数据后不同大写字母表示不同年限团聚体间差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significant differences between in aggregates of different tea plantations ages at the 5% level.

0.5 mm >2～1 mm >(<0.25 mm) > 0.5～0.25 mm 团聚体。其中, 45%～72%的贡献率来自于 > 5 mm 的团聚体,其次是5～2 mm 团聚体,占 14%～24%;而2～1 mm、1～0.5 mm、0.5～0.25 mm 和 <0.25 mm 团聚体对土壤养分含量的贡献率都比较少,共占 10.70%～32.80%。在 >5 mm 的团聚体中土壤养分含量相对较低,但由于土壤中该粒径团聚体含量占绝对优势,因此,它的贡献率才显示出较高值。由此可见,土壤团聚体对土壤养分含量的贡献率与团聚体含量高度相关。

随着植茶年限的增加, >5 mm 团聚体对土壤养分含量的贡献率先升高后降低,在植茶 23 a 和 31 a 的土壤中较高,为 60%～72%,而其他粒径团聚体则呈相反的变化趋势。可见,在植茶 23 a 与植茶 31 a 之间某一段时间发生转折,即茶园土壤 >5 mm 团聚体开始向 <5 mm 的团聚体演变,土壤结构开始趋于破坏,导致 >5 mm 团聚体对土壤养分含量的贡献率逐年下降。

3 结论

土壤团聚体速效钾含量随粒径的减小先升高后降低,全磷、全钾和碱解氮含量在各粒径中分布较均匀,而全氮和有效磷含量则随粒径的减小而升高。表明不同粒径团聚体对土壤氮、磷、钾的保持和供应能力存在明显差异。

随着植茶年限的增加,各粒径团聚体全氮、碱解氮、全磷和有效磷含量逐渐升高,而速效钾含量则有所降低,全钾含量变化不明显。表明长期植茶有利于土壤团聚体全氮、碱解氮、全磷和有效磷的积累,但速效钾含量却逐年降低。故在茶园土壤的管理中,需平衡施用氮、钾肥,从而减少土壤速效钾的淋失。

土壤团聚体对土壤氮、磷、钾含量的贡献率有 45%～72%来自 >5 mm 团聚体,这与 >5 mm 团聚体含量高度相关。随着植茶年限的增加, >5 mm 团聚体对土壤养分含量的贡献率在植茶 23 a 和 31 a 较高,其后有所降低,而其他粒径团聚体的变化规律则相反。故植茶 23 a 后应增施有机肥料,以促进土壤大团聚体含量的增加,提高茶园土壤的保肥和供肥能力。

参 考 文 献:

[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 W, Hu T X, Wang J Y *et al*. Study on fractal features of soil aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration in southern Sichuan Province[J]. J. Plant Ecol., 2007, 31(1): 56-65.

[2] 白占国, 万国江. 贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究[J]. 水土保持学报, 1998, 4(1): 1-7.
Bai Z G, Wan G J. Study on watershed erosion rate and its environmental effects in Guizhou karst region[J]. J. Soil Water Conserv., 1998, 4(1): 1-7.

[3] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 202-205.
Luo D Q, Bai J, Xie D T. Research on evaluation norm and method of soil fertility[J]. Soil Environ. Sci., 2002, 11(2): 202-205.

[4] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 170-174.
Zheng Z C, He S Q, Wang Y D *et al*. Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use[J]. J. Soil Water Conserv., 2010, 24(3): 170-174.

[5] 石箭华, 孟广涛, 李品荣, 等. 滇中不同植物群落土壤团聚体组成及养分特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 183-187.
Shi J H, Meng G T, Li P R *et al*. Characteristics and distribution of nutrients in soil aggregates under different plant communities in central Yunnan[J]. J. Soil Water Conserv., 2011, 25(4): 183-187.

[6] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1841-1848.
Sun T C, Li S Q, Shao M A *et al*. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(9): 1841-1848.

[7] 王岩, 杨振明, 沈其荣. 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 85-94.
Wang Y, Yang Z M, Shen Q R. Distribution of C, N, P and K in different particle size fractions of soil and availability of N in each fraction[J]. Acta Pedol. Sin., 2000, 37(1): 85-94.

[8] Hinds A A, Lowe L E. Distribution of carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur in particle-size separates from Gleysolic soils[J]. Can. J. Soil. Sci., 1980, 60: 783-786.

[9] 杨振明, 闫飞, 韩丽梅, 等. 我国主要土壤不同粒级的矿物组成及供钾特点[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 163-167.
Yang Z M, Yan F, Han L M *et al*. Mineral composition and K supply in particle-size fractions of typical soils in China[J]. Chin. J. Soil Sci., 1999, 30(4): 163-167.

[10] 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 W Y, Ruan J Y, Lin Z *et al*. The major nutritional limiting factors in tea soil and development of tea speciality fertilizer series[J]. J. Tea Sci., 2002, 22(1): 70-74.

[11] 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 Y L, Wang G, Luo D *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]. Chin. J. Eco-Agric., 2011, 19(3): 676-681.

[12] 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 R X, Huang X. Biogeochemical cycle of aluminium and fluorine in tea garden soil system and its relationship to soil acidification[J]. Acta Pedol. Sin., 1991, 28(3): 229-236.

[13] 俞慎，何振立，陈国潮，黄昌勇. 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 S, He Z L, Chen G C, Huang C Y. Soil chemical characteristics and their impacts on soil microflora in the root layer of tea plants with different cultivating ages[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(3): 433-439.

[14] 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.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.
Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[16] 邱莉萍，张兴昌，张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报，2009，26(2)：364-372.
Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in loess plateau soil aggregates after long-term fertilization[J]. Acta Ecol. Sin., 2009, 26(2): 364-372.

[17] Arrouays D, Vion I, Kiein J L. Spatial analysis and modeling of topsoil carbon storage in temperate forest humic loamy soils of France[J]. Soil. Sci., 1995, 159: 191-198.

[18] 刘敏英. 植茶年限对土壤团聚体组成及其有机碳组分影响[D]. 成都：四川农业大学硕士学位论文，2012.
Liu M Y. Effect of planting-year of tea on composition of soil aggregate and fractions of organic carbon [D]. Chengdu: Ms thesis, Sichuan Agricultural University, 2012.

[19] 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C、N、P含量与分配的影响[J]. 中国农业科学，2000，33(5)：65-71.
Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes[J]. Sci. Agric. Sin., 2000, 33(5): 65-71.

[20] 吴洵. 茶园土壤管理与施肥技术(第2版)[M]. 北京：金盾出版社，2009.
Wu X. Tea garden soil management and fertilization technology (2nd ed.)[M]. Beijing: JinDun Press, 2009.

[21] 刘晓利，何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. 土壤，2009，41(1)：84-89.
Liu X L, He Y Q. Water-stable aggregates and nutrients in red soil under different reclamation years[J]. Soils, 2009, 41(1): 84-89.

[22] Rubek G H, Guggengerger G, Zech W, Christensen B T. Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 1123-1132.

[23] 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 Q, Zhao X R, Zhang S M *et al*. Distribution characterisitics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(2): 327-332.

[24] 郭万伟，肖和艾，吴金水，等. 红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点[J]. 土壤学报，2009，46(1)：85-92.
Guo W W, Xiao H A, Wu J S *et al*. Distribution of phosphorus in water-stable aggregates in upland and paddy red earths [J]. Acta Pedol. Sin., 2009, 46(1): 85-92.

[25] 刘恩科，赵秉强，胡昌浩，等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(5)：789-794.
Liu E K, Zhao B Q, Hu C H *et al*. Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 789-794.

[26] 潘大伟，梁成华，杜立宇. 土壤含钾矿物的释钾研究进展[J]. 土壤通报，2005，36(2)：254-258.
Pan D W, Liang C H, Du L Y. Progress in research on potassium release from K-beared minerals in soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(2): 254-258.

[27] Song S K, Huang P M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 52: 383-390.

[28] 石锦芹，丁瑞兴，刘友兆，孙玉华. 尿素和茶树落叶对土壤的酸化作用[J]. 茶叶科学，1999，19(1)：7-12.
Shi J Q, Ding R X, Liu Y Z, Sun Y H. Acidification of soil by urea and fallen tea leaves[J]. J. Tea Sci., 1999, 19(1): 7-12.

[29] 杨玉盛，郭剑芬，陈银秀，等. 福建柏和杉木人工林凋落物分解及养分动态的比较[J]. 林业科学，2004，40(3)：19-25.
Yang Y S, Guo J F, Chen Y X *et al*. Comparatively study on litter decomposition and nutrient dynamics between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*[J]. Sci. Silv. Sin., 2004, 40(3): 19-25.

[30] Wang J, Fu B J, Qiu Y, Chen L D. Soil nutrients in relation to land use and slope position in the semi-arid small watershed on loess plateau in China[J]. J. Arid. Environ., 2001, 48: 537-550.