

不同植茶年限土壤团聚体全铝和交换态铝的分布特征

殷佳丽, 郑子成*, 李廷轩

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:为阐明土壤团聚体全铝和交换态铝含量对植茶年限的响应特征, 给茶园科学管理提供理论依据, 采用野外实地调查和室内分析相结合的方法, 以植茶 16、23、31、53 a 的土壤为研究对象, 开展不同植茶年限土壤团聚体全铝和交换态铝的分布特征研究。结果表明: 土壤全铝和交换态铝含量均随粒径的减小而升高, 且主要分布于<0.25 mm 粒径团聚体, 分别为 86.11~98.35 g·kg⁻¹ 和 62.78~228.85 mg·kg⁻¹; 随植茶年限的延长, 各粒径团聚体全铝含量逐渐降低; 但交换态铝含量有所升高, 且在植茶 23 a 后增幅较大; 不同植茶年限土壤团聚体交换态铝表聚现象明显; 不同粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的保持和供应能力存在明显差异, 全铝和交换态铝有向小粒径团聚体富集的趋势; 土壤团聚体对全铝和交换态铝的贡献率分别有 49%~79% 和 44%~73% 来自>5 mm 粒径团聚体, 且在植茶 23 a 时最高。因此, 应注意植茶 23 a 后 0~20 cm 土层交换态铝含量的变化。

关键词: 植茶年限; 土壤团聚体; 全铝; 交换态铝

中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2015)05-0891-06 doi:10.11654/jaes.2015.05.011

Distribution of Total and Exchangeable Aluminum in Soil Aggregates Under Different Tea-Planting Years

YIN Jia-li, ZHENG Zi-cheng*, LI Ting-xuan

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: To clarify the effect of tea-planting years on total and exchangeable aluminum in soil aggregates, content of total and exchangeable aluminum in soil aggregates under different tea-planting years (16, 23, 31 and 53 years) was measured. Results showed that: The content of total and exchangeable aluminum increased with decreasing particle sizes of soil aggregates. Higher content of total and exchangeable aluminum was found in <0.25 mm aggregates, ranging from 86.11 to 98.35 g·kg⁻¹ and 62.78 to 228.85 mg·kg⁻¹, respectively. With increasing number of tea-planting years, total aluminum decreased in all soil aggregates. However, the content of exchangeable aluminum increased over planting years and such increase became greater in soils with tea planting older than 23 years. Exchangeable aluminum obviously accumulated in surface soil aggregates. Different sizes of soil aggregates had different retaining and supplying capacity of total aluminum and exchangeable aluminum, which tended to be greater in smaller aggregates. The contribution of different size aggregates to soil total aluminum and exchangeable aluminum were greater in >5 mm than in other aggregates, with 49%~79% and 44%~73%, respectively. They increased initially and decreased then with tea-planting years, with the maximum values found at 23 years of tea planting. Therefore, it is critical to pay attention to the content of exchangeable aluminum in tea soils (0~20 cm) with older than 23 years.

Keywords: tea planting year; soil aggregate; total aluminum; exchangeable aluminum

茶树为多年生常绿木本植物, 不仅是我国重要的经济作物之一, 也是典型高富集铝的木本植物, 且铝主要分布于茶树叶部^[1]。茶叶含铝量取决于易被茶树吸收的土壤活性铝含量^[2], 由于土壤交换态铝占活性

铝比例较高, 可在一定程度上代表植物可有效利用的那部分铝^[3]。交换态铝也是决定土壤交换性酸度和 pH 值的关键性因素^[4], 然而不合理施肥和环境日益恶化等原因致使我国茶园土壤日趋酸化, 导致土壤铝被大量活化为交换态铝^[5], 增加茶叶铝含量^[6], 进而增加老年痴呆^[7]、肾衰竭^[8]等疾病的患病风险。此外, 全铝作为土壤各形态铝的主要来源, 不仅影响土壤交换态铝含量, 也影响土壤的吸附和团聚体的形成^[9]。可见, 研究茶园土壤全铝和交换态铝含量显得尤为重要。

土壤团聚体作为土壤结构最基本的单元, 是形成

收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901138); 四川省学术和技术带头人培养资金项目(2012); 四川农业大学学科双支计划项目(2014)

作者简介: 殷佳丽(1991—), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态环境研究。E-mail: yjl_sicau@163.com

* **通信作者:** 郑子成 E-mail: zichengzheng@aliyun.com

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^[10-11]。不同粒径的团聚体对铝的吸附能力差异较大,故影响铝的生物有效性和土壤化学行为^[12]。由于茶园大量施用化肥、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,土壤 pH 值逐渐下降,势必引起土壤铝的变化^[13],进而影响到茶园生态安全。目前,虽已有植茶年限对土壤铝分布影响的报道^[14],但缺乏团聚体尺度上的研究。因此,本文以不同植茶年限土壤为研究对象,探讨植茶过程中土壤团聚体全铝和交换态铝的分布特征,阐明土壤团聚体全铝和交换态铝含量对植茶年限的响应特征,以期为茶叶安全生产与茶园土壤持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中峰万亩生态茶园位于四川省雅安市名山区中峰乡。该区域属亚热带季风气候,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%,年降水 pH 均值 4.92,酸雨频率均值 54.5%。区域内原始地带性植被为亚热带常绿阔叶林,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(其余均为引进品种),并随着 20 世纪 90 年代退耕还林(茶)工程的实施,形成了一定规模且较为集中的老川茶园,20 世纪末已成为四川农业大学教学科研园区之一。

老川茶园施肥方式分为基肥和追肥。基肥施猪圈肥 15 000 kg·hm⁻²,K₂SO₄ 型复合肥(质量比 N:P₂O₅:K₂O=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。追肥为一年 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;夏茶与秋茶追肥时间分别为 5 月下旬和 7 月下旬,同为施复合肥 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

在野外实地调查的基础上,根据不同年限茶园的地质条件和施肥情况等综合考虑,选择成土母质相同、地形、施肥以及管理措施等因素均较为一致的植茶年限为 16 a、23 a、31 a 和 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,

将这 5 点土样混合作为一次重复,每一茶园 5 次重复,0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别采集原状土样,避免大力挤压,以尽量保持土壤原状结构。将采集的原状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。一部分磨碎后测定其基本理化性质(表 1);另一部分采用干筛法^[15]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,其组成见表 2。

表 1 不同植茶年限土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tea garden soils

项目	0~20 cm 土层				20~40 cm 土层			
	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
全铝/g·kg ⁻¹	88.33	83.14	81.49	79.85	94.63	88.90	88.65	86.38
交换态铝/ mg·kg ⁻¹	120.17	130.81	159.90	173.31	43.34	68.82	102.62	115.41

表 2 不同植茶年限土壤团聚体组成

Table 2 Size distribution of soil aggregates under different tea-planting years

土层/ cm	植茶 年限/a	不同粒径土壤团聚体质量百分含量/%					
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0~20	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

全铝采用硝酸-盐酸(体积比 3:1)微波消解-铝试剂比色法^[16]。交换态铝采用 1 mol·L⁻¹ MgCl₂(pH 7.0)溶液浸提,铝试剂比色法测定^[17]。

1.4 数据处理

贡献率(%)=[某粒径团聚体铝含量×该粒径团聚体含量(%)]/全土铝含量×100^[18]

式中“铝含量”为全铝或交换态铝含量。采用 DPS (11.0)和 Excel(2007)软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同植茶年限土壤团聚体全铝的分布特征

由表 3 可知,0~20 cm 土层,植茶 16 a 土壤各粒

表 3 不同植茶年限土壤团聚体全铝含量分布特征

Table 3 Content of total aluminum in soil aggregates under different tea-planting years

土层/cm	植茶年限/a	不同粒径土壤团聚体全铝含量/g·kg ⁻¹					
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0~20	16	86.99aA	88.26aA	88.78aA	91.54aA	91.78aA	91.86aA
	23	82.34bB	82.64bB	85.37bA	90.95aA	89.52aA	90.69aA
	31	79.91cB	80.45cB	86.00bA	90.68aA	89.08abA	90.17aA
	53	78.38cB	79.58bcB	81.19abcB	85.61aB	85.15abB	86.11aB
20~40	16	93.74bA	95.56abA	96.61abA	95.02bA	95.88abA	98.35aA
	23	87.65bB	92.17aAB	93.00aB	93.04aAB	93.25aA	94.42aB
	31	87.08bB	91.89abAB	92.17aB	92.10aAB	92.56aA	94.00aB
	53	83.82bB	88.97aB	90.43aB	90.35aB	90.53aA	92.73aB

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 5%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 5%显著水平。下同。

Note: Different lowercase letters in the same row mean significant difference between soil aggregates at the 5% levels and different uppercase letters in the same column mean significant difference between different tea-planting years at the 5% levels. The same as below.

径团聚体全铝含量无显著差异,其他年限土壤<1 mm 各粒径团聚体全铝含量均显著高于>5 mm 粒径团聚体。20~40 cm 土层,植茶 16 a 土壤>5 mm 粒径团聚体全铝含量小于其他粒径,且显著低于<0.25 mm 粒径团聚体;其他年限土壤<2 mm 粒径团聚体全铝含量无显著差异,但显著高于>5 mm 粒径团聚体。这表明土壤全铝主要分布在较小粒径团聚体中,且植茶年限越长,团聚体之间全铝含量差异越大。

随植茶年限的延长,0~20 cm 土层中各粒径团聚体全铝含量逐渐降低。在 20~40 cm 土层,除 0.5~0.25 mm 粒径团聚体全铝含量随植茶年限无显著变化,其他粒径团聚体植茶 16 a 土壤全铝含量均显著高于植茶 53 a。从土层上看,各植茶年限 0~20 cm 土层各粒径团聚体全铝含量均低于 20~40 cm 土层。

2.2 不同植茶年限土壤团聚体交换态铝的分布特征

由表 4 可知,0~20 cm 土层中土壤交换态铝主要分布于<0.25 mm 粒径团聚体,是>5 mm 粒径的 1.40~

1.88 倍。在 20~40 cm 土层,植茶 16 a 土壤 1~0.5 mm 粒径团聚体交换态铝含量大于其他粒径,且显著高于>2 mm 各粒径团聚体;其他年限土壤团聚体交换态铝含量随粒径减小而升高。表明交换态铝趋于向较小粒径团聚体富集,且最终存于<0.25 mm 粒径团聚体。

随植茶年限的延长,0~20 cm 土层中各粒径团聚体交换态铝含量逐渐升高,且植茶 53 a 土壤显著高于植茶 16 a 和 23 a 土壤。在 20~40 cm 土层,各粒径团聚体交换态铝含量的变化规律与 0~20 cm 土层相似,且总体上表现出 0~20 cm 土层各粒径团聚体交换态铝含量高于 20~40 cm 土层。这表明土壤交换态铝具有较强的表聚性,与研究区长期施用化肥、茶树凋落物归还土壤以及酸雨作用密切相关。

2.3 土壤铝与团聚体铝的关系

由表 5 和表 6 可知,各粒径团聚体全铝含量均与土壤全铝含量呈正相关,均已达极显著水平,且>5 mm 粒径团聚体的 R^2 接近 0.99。各粒径团聚体交换

表 4 不同植茶年限土壤团聚体交换态铝含量分布特征

Table 4 Content of exchangeable aluminum in soil aggregates under different tea planting years

土层/cm	植茶年限/a	不同粒径土壤团聚体交换态铝含量/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	16	106.83cD	107.03cD	152.74bB	154.28bD	156.40bD	168.14aC
	23	124.14dC	125.30dC	157.71cB	184.48bC	188.84bC	213.81aB
	31	152.40dB	153.60dB	177.95cA	197.46bB	209.73aB	215.01aB
	53	163.95dA	167.14dA	184.89cA	207.03bA	227.80aA	228.85aA
20~40	16	33.45eD	42.57dC	69.92abC	72.36aD	61.15cD	62.78bcD
	23	67.36cC	69.35cB	89.27bB	98.40aC	97.58abC	101.69aC
	31	93.67dB	106.04cA	139.47bA	141.80bB	142.96abB	149.81aB
	53	102.72dA	109.29dA	147.02cA	153.22bcA	157.80bA	177.53aA

表 5 土壤全铝与各粒径团聚体全铝的关系

Table 5 Relationship between soil total aluminum and aggregate total aluminum

土壤团聚体粒径	回归方程	R^2
>5 mm	$y=0.966\ 0x+4.319$	$R^2=0.988\ 4^{**}$
5~2 mm	$y=0.783\ 0x+17.960$	$R^2=0.935\ 6^{**}$
2~1 mm	$y=0.929\ 4x+3.527$	$R^2=0.909\ 6^{**}$
1~0.5 mm	$y=1.537\ 8x-53.763$	$R^2=0.754\ 7^{**}$
0.5~0.25 mm	$y=1.431\ 3x-43.785$	$R^2=0.922\ 5^{**}$
<0.25 mm	$y=1.272\ 8x-31.049$	$R^2=0.907\ 1^{**}$

注: y 表示土壤铝含量, x 表示该粒径团聚体铝含量; * 和 ** 分别表示差异达显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 水平。下同。

Note: y stands for soil aluminum and x stands for aggregate aluminum. * and ** significant at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below.

表 6 土壤交换态铝与各粒径团聚体交换态铝的关系

Table 6 Relationship between soil exchangeable aluminum and aggregate exchangeable aluminum

土壤团聚体粒径	回归方程	R^2
>5 mm	$y=1.009\ 9x+7.683$	$R^2=0.992\ 7^{**}$
5~2 mm	$y=1.055\ 9x-1.895$	$R^2=0.988\ 6^{**}$
2~1 mm	$y=1.050\ 2x-32.592$	$R^2=0.964\ 5^{**}$
1~0.5 mm	$y=0.910\ 1x-23.245$	$R^2=0.977\ 4^{**}$
0.5~0.25 mm	$y=0.773\ 0x-5.733$	$R^2=0.989\ 0^{**}$
<0.25 mm	$y=0.722\ 1x-4.636$	$R^2=0.947\ 2^{**}$

态铝含量与土壤交换态铝含量也呈极显著正相关, >5 mm、5~2 mm 和 0.5~0.25 mm 粒径团聚体的 R^2 分别高达 0.992 7、0.988 6 和 0.989 0。

2.4 团聚体对土壤全铝和交换态铝的贡献率

由表 7 和表 8 可知, 各粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的贡献率均随粒径减小而降低, 且 >5 mm 粒径团聚体贡献率远大于其他粒径, 分别占到 49.17%~

表 7 各粒径团聚体对土壤全铝的贡献率

Table 7 Contribution percentages of aggregate aluminum to soil total aluminum

土层/ cm	植茶 年限/a	贡献率/%					
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0~20	16	49.17aD	23.23bA	7.60dA	11.08cA	4.58eA	4.34eA
	23	69.75aA	17.96bB	4.04cD	4.76cD	1.63dD	1.87dD
	31	63.49aB	18.65bB	4.98dC	6.83cC	2.67eC	3.39eB
	53	56.31aC	22.76bA	5.68dB	8.58cB	3.27eB	3.39eC
20~40	16	60.82aC	21.26bB	6.87dA	10.75cA	3.93eA	3.51eB
	23	78.79aA	16.72bD	3.90cD	4.48cD	1.42dD	1.61dD
	31	74.04aB	18.86bC	4.34cdC	5.99cC	2.41dC	3.14dC
	53	60.53aC	23.66bA	6.74dB	9.49cB	3.58eB	4.18eA

表 8 各粒径团聚体对土壤交换态铝的贡献率

Table 8 Contribution percentages of aggregate exchangeable aluminum to soil exchangeable aluminum

土层/ cm	植茶 年限/a	贡献率/%					
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0~20	16	44.39aD	20.71bB	9.61dA	13.72cA	5.74eA	5.83eA
	23	66.84aA	17.31bC	4.74cdD	6.13cD	2.18eD	2.80deC
	31	61.70aB	18.15bC	5.25dC	7.58cC	3.20eC	4.11deB
	53	54.27aC	22.03bA	5.96dB	9.56cB	4.04eB	4.15eB
20~40	16	44.23aD	19.30bA	10.13cA	16.68bA	5.11dA	4.56dB
	23	73.15aA	15.20bC	4.53cdD	5.72cD	1.80eD	2.10deD
	31	63.25aB	17.29bB	5.22dC	7.32cC	2.95eC	3.97deC
	53	51.32aC	20.10bA	7.58dB	11.14cB	4.32eB	5.54eA

78.79%和 44.23%~73.15%;其次是 5~2 mm 粒径团聚体, 贡献率显著高于 2~1 mm 和 1~0.5 mm 粒径团聚体;0.5~0.25 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体的贡献率无显著差异, 但均显著低于其他粒径。随植茶年限的延长, >5 mm 粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的贡献率均先升高后降低, 且在植茶 23 a 时显著高于其他年限, 而其他粒径团聚体则呈相反趋势。这主要是因为随着植茶年限的延长, 茶园土壤>5 mm 粒径团聚体会向<5 mm 粒径团聚体演变, 土壤结构逐渐破坏, 故在植茶 23 a 后>5 mm 粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的贡献率呈持续下降趋势。

3 讨论

3.1 团聚体对土壤全铝和交换态铝累积的影响

较小粒径团聚体土壤全铝和交换态铝含量较高, 表明小粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的固持能力较强。这是因为土壤团聚体粒径越小, 比表面积越大, 能提供更多的吸附位点, 有利于铝的富集^[19]。此外, 土壤有机质含有大量官能团, 如腐殖质中的酚羟基、羧基、羰基等, 可通过络合或螯合作用专性吸附金属离子, 从而增强土壤铝的固持能力^[20]。前期研究表明, 研究区土壤有机质含量随粒径减小而升高^[21], 也可能是土壤铝向小粒径团聚体富集的原因。尽管小粒径团聚体全铝和交换态铝含量较高, 但由于小粒径团聚体百分含量较低, 其对土壤全铝和交换态铝的贡献率也较低, 而>5 mm 粒径团聚体的贡献率远高于其他粒径也是由于百分含量较高的缘故, 因而该粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的贡献率远高于其他粒径, 分别占到 49.17%~78.79%和 44.23%~73.15%。此外, >5 mm 粒径团聚体全铝含量与土壤全铝含量呈极显著

正相关, R^2 接近 0.99, 表明土壤全铝的积累主要受 >5 mm 粒径团聚体全铝含量增加的影响; 各粒径团聚体交换态铝与土壤交换态铝均关系密切, 尤以 >5 mm、 $5\sim 2$ mm 和 $0.5\sim 0.25$ mm 粒径团聚体较为突出, 其 R^2 分别高达 0.992 7、0.988 6 和 0.989 0, 说明土壤交换态铝含量的增加主要受这三种粒径团聚体交换态铝含量增加的影响。因此, 土壤全铝和交换态铝含量的增加主要依赖于 >5 mm 团聚体中全铝和交换态铝含量的增加, >5 mm 粒径团聚体使研究区土壤全铝和交换态铝易于累积。

3.2 植茶年限对土壤团聚体全铝和交换态铝分布的影响

各粒径团聚体全铝含量在植茶 16 a 时较高, 且显著高于植茶 53 a 土壤, 表明长期植茶会消耗土壤中的铝, 降低土壤全铝含量。就整个茶园系统而言, 铝的收入主要来自降水和降尘, 而研究区周围无大型工厂, 故降水和降尘中铝的含量可忽略不计^[22-23]; 茶树作为典型高富集铝的植物, 且铝大多分布于叶部, 通过采摘茶叶每年可带走大量的铝^[24], 加上部分铝会随径流流失, 整个系统处于单向不平衡循环, 故土壤团聚体全铝含量随植茶年限延长将逐渐降低。

交换态铝在土壤 pH 值低于 5.0 时易溶出, 难溶性铝逐渐向其转变; 而当 pH 值小于 4.0~4.5 时, 土壤将由质子缓冲体系转向铝缓冲体系, 土壤交换态铝含量将大幅升高^[25]。本研究表明, 随植茶年限延长, 土壤各粒径团聚体交换态铝含量逐渐升高, 说明长期植茶会增加土壤交换态铝含量, 与苏有健等研究结果相似^[26]。这主要是因茶园长期偏施尿素, 而尿素水解产生的 NH_4^+ 可通过硝化细菌的作用转化为硝酸盐或亚硝酸盐, 同时伴随大量 H^+ 的产生, 导致土壤 pH 值降低^[27]。加之当地降水 pH 值较低且酸雨频率较高, 导致茶园土壤 pH 值逐渐下降 (表 1), 从而增加土壤交换态铝含量^[28]。此外, 由于较大粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝累积作用较强, 且 >1 mm 粒径团聚体交换态铝含量在植茶 23 a 后增加幅度较大, 使植茶 23 a 后土壤交换态铝含量增幅较大。

4 结论

土壤全铝和交换态铝含量均随粒径的减小而升高, 不同粒径团聚体对土壤全铝和交换态铝的保持和供应能力存在明显差异, 且全铝和交换态铝均有向小粒径团聚体富集的趋势。

随植茶年限延长, 各粒径团聚体全铝含量逐渐降

低, 而交换态铝含量有所升高, 且植茶 23 a 后增幅较大。此外, $0\sim 20$ cm 土层交换态铝含量高于 $20\sim 40$ cm 土层。长期植茶会持续消耗土壤中的铝, 但有利于土壤交换态铝累积, 且交换态铝表聚现象明显。在茶园管理上, 应注意植茶 23 a 后 $0\sim 20$ cm 土层交换态铝含量变化, 采用适当方法降低土壤铝活性, 从而指导茶叶安全生产和茶园土壤保护。

>5 mm 粒径团聚体全铝和交换态铝含量的贡献率均远高于其他粒径, 且团聚体全铝和交换态铝与土壤全铝和交换态铝均呈极显著正相关, 本研究区土壤全铝和交换态铝累积主要取决于 >5 mm 粒径团聚体。

参考文献:

- [1] Gao H J, Zhao Q, Zhang X C, et al. Localization of fluoride and aluminum in subcellular fractions of tea leaves and roots[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(10): 2313-2319.
- [2] Alekseeva T, Alekseev A, Xu R K, et al. Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in Eastern China[J]. *Environmental geochemistry and health*, 2011, 33(2): 137-148.
- [3] 任继鹏, 张逸, 钱诚, 等. 南方酸性森林土壤中铝的形态分布与活化机理[J]. 环境化学, 2011, 30(6): 1131-1135.
REN Ji-peng, ZHANG Yi, QIAN Cheng, et al. Fraction distribution and release mechanism of aluminum in acidic forest soils of Southern China [J]. *Environmental chemistry*, 2011, 30(6): 1131-1135.
- [4] 吴甫成, 彭世良, 王晓燕, 等. 酸沉降影响下近 20 年来衡山土壤酸化研究[J]. 土壤学报, 2005, 3(2): 219-224.
WU Fu-cheng, PENG Shi-liang, WANG Xiao-yan, et al. Soil acidification caused by acid precipitation in MT. Hengshan over last 20 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 3(2): 219-224.
- [5] 张倩, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型茶园土壤酸化趋势及其制约因素研究[J]. 土壤, 2011, 43(5): 751-757.
ZHANG Qian, ZONG Liang-gang, CAO Dan, et al. Study on soil acidification and its restrictive factors of typical tea garden in Jiangsu Province [J]. *Soils*, 2011, 43(5): 751-757.
- [6] 段小华, 邓泽元, 胡小飞, 等. 模拟酸雨和外源铝对茶树铝及一些营养元素吸收积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1936-1942.
DUAN Xiao-hua, DENG Ze-yuan, HU Xiao-fei, et al. Effects of simulated acid rain and exogenous Al on assimilation and accumulation of Al and some nutrition elements of tea plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1936-1942.
- [7] Kawahara M, Kato-Negishi M. Link between aluminum and the pathogenesis of Alzheimer's disease: The integration of the aluminum and amyloid cascade hypotheses[J]. *International Journal of Alzheimer's disease*, 2011, 10: 1-17.
- [8] EL-kenawy A E, Osman H E, Eldin H D, et al. Role of propolis (bee glue) in improving histopathological changes of the kidney of rat treated with aluminum chloride[J]. *Environmental Toxicology*, 2013, 29(9):

- 1000–1010.
- [9] 杨建国, 安韶山, 郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 72–75.
YANG Jian-guo, AN Shao-shan, ZHENG Fen-li. Characteristics of soil water-stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in Ningxia loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 72–75.
- [10] Yousefi M, Hajabbasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1): 57–61.
- [11] Kravchenko A, Chun H C, Mazer M, et al. Relationships between intra-aggregate pore structures and distributions of *Escherichia coli* within soil macro-aggregates[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 63(2): 134–142.
- [12] 夏建国, 何芳芳, 罗婉. 蒙山茶园土壤组分对铝的吸附解吸动力学特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 358–366.
XIA Jian-guo, HE Fang-fang, LUO Wan. Effect of kinetics characteristics of aluminum adsorption-desorption by component of tea garden soil in Mengshan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2): 358–366.
- [13] Kinraide T. Toxicity factors in acidic forest soils: Attempts to evaluate separately the toxic effects of excessive Al^{3+} and H^{+} and insufficient Ca^{2+} and Mg^{2+} upon root elongation[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(2): 323–333.
- [14] 刘少坤, 周卫军, 苗霄霖, 等. 茶树根际土壤铝形态演变规律及其影响因素[J]. 土壤, 2014, 46(5): 881–885.
LIU Shao-kun, ZHOU Wei-jun, MIAO Xiao-lin, et al. Evolution of aluminum forms and its effect factors in tea rhizospheric soil[J]. *Soils*, 2014, 46(5): 881–885.
- [15] 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.
- [16] 刘灵芝, 邓全道, 许光, 等. 微波消解样品-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定锰矿中铝、镁、磷[J]. 理化检验(化学分册), 2012, 47(11): 1283–1285.
LIU Ling-zhi, DENG Quan-dao, XU Guang, et al. ICP-AES determination of aluminum, magnesium and phosphorus in manganese ores with microwave assisted sample digestion[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2012, 47(11): 1283–1285.
- [17] Xie Z L, Chen Z, Sun W T, et al. Distribution of aluminum and fluoride in tea plant and soil of tea garden in central and southwest China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(4): 376–382.
- [18] 杨华, 龙健, 李兆君, 等. 土地利用方式对红枫湖入湖流域土壤团聚体磷含量及其形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2214–2220.
YANG Hua, LONG Jian, LI Zhao-jun, et al. Effects of land use types on phosphorus forms and their contents in soil aggregates in watershed of Hongfeng Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2214–2220.
- [19] An S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2010, 81(3): 226–233.
- [20] 夏建国, 何芳芳, 罗婉, 等. 蒙山茶园土壤组分去除有机质和游离氧化铁后对铝吸附解吸特征的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 125–132.
XIA Jian-guo, HE Fang-fang, LUO Wan, et al. Effect of removal of soil organic matter and free iron oxide of soil component on characteristics of aluminum adsorption-desorption from tea garden in Mengshan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 125–132.
- [21] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6326–6336.
LI Wei, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in different tea plantation age[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6326–6336.
- [22] 丁瑞兴, 黄骁. 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 Rui-xing, 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.
- [23] Likens G E. Biogeochemistry of a forested ecosystem[M]. New York: Springer Science & Business, 2013.
- [24] Xie Z M, Ye Z H, Wong M H. Distribution characteristics of fluoride and aluminum in soil profiles of an abandoned tea plantation and their uptake by six woody species[J]. *Environment International*, 2001, 26(5): 341–346.
- [25] Samac D A, Tesfaye M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils: A review[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2003, 75(3): 189–207.
- [26] 苏有健, 廖万有, 王烨军, 等. 皖南茶园土壤活性铝形态分布与土壤pH和植茶年限的关系[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 721–728.
SU You-jian, LIAO Wan-you, WANG Ye-jun, et al. Influences of soil pH and cultivation years on active aluminum species distribution from tea soils in Southern Anhui, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 721–728.
- [27] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 465–472.
ZHANG Yong-chun, WANG Ji-dong, SHEN Ming-xing, et al. Effects of long-term fertilization on soil acidification in Taihu Lake region, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 465–472.
- [28] 曾清如, 廖柏寒, 蒋朝辉, 等. 施用尿素因其红壤pH及铝活性的短期变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 249–252.
ZENG Qing-ru, LIAO Bo-han, JIANG Zhao-hui, et al. Short-term changes of pH value and Al activity in acid soils after urea fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 249–252.