

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

段小华^{1,2}, 邓泽元¹, 胡小飞¹, 陈伏生¹, 黄媛¹

(1.南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047; 2.江西师范大学生命科学学院 江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 南昌 330022)

摘 要:采用盆栽方法,研究了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,以期为酸沉降区茶园管理提供资料。结果表明,随着外源铝浓度的增加,茶树根、茎和叶中铝含量增加,在适度浓度外源铝处理下,模拟酸雨促进茶树根、茎和叶对铝的吸收与积累,高酸高铝则抑制茶树各器官中铝的积累。外源铝促进茶树根、茎和叶对磷、铜和铁的吸收与积累,促进茶树茎和叶对钾的吸收与积累,对茶树根中钾含量没有明显的影响,外源铝抑制茶树根对钙、镁和锌的吸收与积累,但不影响它们在茶树中的运输,茎和叶中含量增加。模拟酸雨对茶树根和茎中磷含量没有明显影响,pH4.5 的模拟酸雨有利于茶叶磷的积累,模拟酸雨对茶树根、茎和叶中钾、钙、镁、铜和锌含量没有明显的影响。无外源铝处理下,模拟酸雨降低茶树根系中铁的含量,对茎和叶中铁含量没有明显影响,外源铝处理下,模拟酸雨明显降低茶树根、茎和叶中铁的含量,并且外源铝处理浓度越高,模拟酸雨对根、茎和叶中铁含量的降低幅度越大。

关键词:模拟酸雨;铝;茶树;营养元素;吸收积累

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)10-1936-07

Effects of Simulated Acid Rain and Exogenous Al on Assimilation and Accumulation of Al and Some Nutrition Elements of Tea Plants

DUAN Xiao-hua^{1,2}, DENG Ze-yuan¹, HU Xiao-fei¹, CHEN Fu-sheng¹, HUANG Yuan¹

(1.State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 2.Jiangxi Subtropical Plant Resource Protection and Utilization Key Laboratory, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: In order to provide valuable information to manage tea garden in acid deposition region, southern China, the assimilation and accumulation of Al and some nutritional elements in tea plant were studied using pot experiment treated with different pH acid rain (3.0, 4.5, 6.0) and exogenous Al (0, 0.5, 1.0 g·kg⁻¹ soil). The results showed that the content of aluminum in roots, shoots and leaves of tea plant increased with increasing dosages of Al treatment. Simulated acid rain increased Al accumulation in roots, shoots and leaves of tea plant under suitable Al treatment (0.5 g·kg⁻¹ soil), while the simulated acid rain at high acidity (pH3.0) and the aluminum at high dosages (1.0 g·kg⁻¹ soil) inhibited Al accumulation in tea plant. Exogenous Al promoted P, Cu and Fe accumulation in roots, shoots and leaves of tea plant and K accumulation in shoots and leaves, while had no obvious effects on K in roots of tea plant. Exogenous Al inhibited Ca, Mg and Zn accumulation in roots of tea plant, and had no obvious effects on their translocation in tea plant, thus these elements increased in the shoots and leaves of tea plant. Simulated acid rain had no apparent effects on P in roots and shoots, while simulated acid rain at pH4.5 increased P accumulation in tea leaves. Simulated acid rain had no apparent effects on K, Ca, Mg, Cu and Zn content in tea plant. Simulated acid rain decreased Fe accumulation in roots of tea plant, but had no obvious effects on shoots and leaves of tea plant without exogenous Al treatment. Under exogenous Al treatment, simulated acid rain obviously decreased Fe content in roots, shoots and leaves and the higher treatment dosages of exogenous Al,

收稿日期:2010-04-25

基金项目:中国博士后基金(20070421040);江西省教育科学研究基金(GJJ08055)

作者简介:段小华(1973—),男,江西吉安人,博士研究生,讲师,主要从事植物生理生态及污染生态学研究。E-mail:dxh815@163.com

通讯作者:邓泽元 E-mail:dengzy@ncu.edu.cn

the lower content of Fe in roots, shoots and leaves.

Keywords: simulated acid rain; aluminum; tea plant; nutrition element; assimilation and accumulation

铝是生态系统中离子循环最旺盛的元素之一,也是地壳中含量最为丰富的金属元素,通常以难溶性的硅酸盐或氧化铝形式存在。近年来,随着环境酸化问题的日益严重,特别是酸雨危害,加速了土壤酸化及铝的溶出,使土壤及有关环境中活性铝的数量明显上升^[1]。铝已被人们认为是酸性土壤中引起农作物减产、森林枯萎的重要原因之一^[1-2]。植物铝毒害的一个主要机制就是严重影响植物吸收和运输养分,导致植物营养亏缺或失衡^[3]。目前,有关铝对植物营养元素吸收影响的研究已有报道,但结论不尽相同,看法也不一致^[4-7]。茶树(*Camellia sinensis* L.)能在酸性土壤上生长良好,同时茶树属于耐铝及聚铝植物,茶叶中铝的平均质量分数为 $8.7\sim 23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有的甚至高达 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于一般粮食和饲料作物中铝的平均含量 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[8]。虽然茶树是一种铝富集植物早已为人们所认识,不过铝并非是人体所必需的。越来越多的报道认为,人体积累过多的铝会加速对钙和磷的排泄而使体内代谢失调^[9],还有人认为老年性痴呆是铝的毒性所致^[10]。茶树是世界三大饮料植物之一,因而茶树对铝的吸收、累积受到广泛关注。目前有关酸雨和铝对茶树铝及其他矿质营养吸收积累的研究主要局限于单因素的作用^[11-12],而在自然条件下,酸度的增加往往伴随着土壤中可溶性铝含量的增加,有关酸雨和铝双重作用对茶树铝及营养元素吸收积累的研究还未见报道。本文拟通过研究模拟酸雨和添加铝双重作用对茶树铝及其他营养元素吸收积累的影响,为酸沉降区构建优质安全茶园提供资料。

1 材料与方法

1.1 供试茶苗和土壤

茶苗为 1 年生茶树扦插苗,品种为福鼎大白,由江西省茶树良种繁育场提供,平均地径(距离地面 10 cm 处测量所得的树干直径)为 0.24 cm,平均苗高为 26 cm。土壤采自南昌大学前湖校区的红壤土,土壤采回后经风干、磨碎、过 1 mm 筛保存,供实验分析及植物栽培试验用。土壤基本理化性质:pH 5.4,有机质 $27.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,阳离子交换量(CEC) $11.24\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N $0.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效 P $1.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效 K $28.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 Al $130.92\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 实验方法

1.2.1 模拟酸雨的配制

模拟酸雨是按照南昌市 1996—2001 年酸雨中 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-$ (5:1)的平均含量,用浓硫酸和浓硝酸配制成酸原液,再用蒸馏水稀释成 pH 值为 3.0 和 4.5 的模拟酸雨原液,以蒸馏水与大气平衡后形成的溶液 pH=6.0 为对照。

1.2.2 茶苗培养及处理

取直径 25 cm、高度 30 cm 实验钵,每钵装入 5 kg 红壤土,土壤共设 $0, 0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 3 个铝水平(以纯铝计),以硫酸铝水溶液的形式加入,同时施入等量的基肥并与土壤混合均匀,加自来水至田间持水量为 70% 左右,培养稳定 2 周后在每个实验钵中移植大小一致的 1 年生茶树苗 3 棵。待苗成活后开始喷洒模拟酸雨处理,每个处理设 3 个重复。每周 1 次,1 次 100 mL(相当于降雨 $1\,000\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)。同时进行适当而一致的水肥管理(在水肥管理过程中,以控制溶液不从盆底渗出为度),如遇大风大雨天气用避雨大棚保护。处理 4 个月(从 2008 年 12 月 31 日到 2009 年 4 月 30 日收获)后按根、茎、叶分别收集,用蒸馏水冲洗干净,置于烘箱中 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 2~3 min, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 1.5 h,用研钵磨碎,过 1 mm 筛,供分析用。

1.2.3 测定方法

样品用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消化后,磷含量用磷钼蓝法测定^[13],铝及其他矿质元素用 Aanalyst700 原子吸收仪测定,铝用石墨炉原子吸收法测定,其他矿质元素含量用火焰原子吸收法测定。根据干物质计算出铝在植株不同器官中的分配。

1.2.4 数据处理

采用 SPSS13.0 软件进行双因素方差分析,并用 Duncan 检验进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨和外源铝对茶树铝吸收与积累的影响

表 1 是模拟酸雨和外源铝对茶树铝吸收积累的影响。随着铝处理浓度的提高,茶树根、茎和叶中铝含量明显增加,积累量依次为根>叶>茎,表明铝处理促进茶树根、茎和叶对铝的积累,并且主要积累在根部。无铝处理时,酸雨对各器官中铝含量没有明显的影

响,0.5 g·kg⁻¹ 铝处理时,酸雨对根中铝含量影响不明显,而茎和叶中铝的含量随着酸度的增加略有增加,但差异不显著。1 g·kg⁻¹ 铝处理时,根、茎和叶中铝的含量随着酸雨酸度的增加而降低。由此表明,适量的铝作用下,酸雨可以促进茶叶对铝的积累,高铝高酸则抑制茶叶对铝的积累。

表 1 模拟酸雨和外源铝对茶树铝吸收积累的影响

Table 1 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on Al uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	铝含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	9.44±0.526f	1.48±0.386c	4.77±0.270e
	4.5	8.18±0.365f	1.62±0.526c	5.29±0.226de
	6.0	11.92±0.857e	1.87±0.681c	5.88±0.364d
0.5	3.0	12.84±0.843e	3.28±0.239b	5.35±0.198de
	4.5	14.79±0.898d	1.81±0.467c	4.97±0.553e
	6.0	13.36±0.407de	1.86±0.469c	4.81±0.254e
1	3.0	17.47±0.433c	3.17±0.311b	7.25±0.194c
	4.5	20.55±0.715b	4.06±0.400b	10.07±0.433b
	6.0	26.74±1.563a	7.99±0.490a	13.88±0.336a

注:同列不同小写字母表示各元素含量在各处理组合之间差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 模拟酸雨和外源铝对茶树磷和钾吸收与积累的影响

表 2 和表 3 是模拟酸雨和外源铝对茶树磷和钾吸收积累的影响。随着铝处理浓度的增加,茶树根、茎和叶中磷含量稍有增加,表明铝促进茶树对磷的吸收,但铝对茶树磷的分布没有明显的影响,磷在茶树体内的分布仍为茎>根>叶。在不同浓度铝处理下,模

表 2 模拟酸雨和外源铝对茶树磷吸收积累的影响

Table 2 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on P uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	磷含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	0.20±0.091ab	0.22±0.026c	0.06±0.009c
	4.5	0.11±0.032b	0.32±0.024ab	0.09±0.011b
	6.0	0.08±0.019b	0.30±0.017b	0.03±0.007c
0.5	3.0	0.20±0.0275ab	0.35±0.030ab	0.08±0.011bc
	4.5	0.12±0.018b	0.25±0.026bc	0.09±0.007bc
	6.0	0.14±0.017b	0.32±0.012ab	0.04±0.005c
1	3.0	0.20±0.039ab	0.37±0.026a	0.09±0.009b
	4.5	0.28±0.015a	0.35±0.035ab	0.30±0.055a
	6.0	0.24±0.069a	0.38±0.041a	0.10±0.024b

表 3 模拟酸雨和外源铝对茶树钾吸收积累的影响

Table 3 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on K uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	钾含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	2.09±0.147ab	2.20±0.258c	3.45±0.251b
	4.5	1.45±0.305b	2.84±0.201b	3.69±0.152b
	6.0	1.36±0.205b	2.90±0.230b	3.47±0.198b
0.5	3.0	1.61±0.119b	3.03±0.188b	3.76±0.229b
	4.5	1.66±0.152b	2.82±0.176b	3.46±0.258b
	6.0	2.10±0.145a	3.69±0.273a	3.73±0.200b
1	3.0	1.68±0.149b	3.28±0.152ab	5.42±0.199a
	4.5	1.78±0.158ab	3.33±0.167ab	5.24±0.199a
	6.0	1.26±0.210b	3.75±0.242a	5.10±0.174a

拟酸雨的酸度对茶树根和茎中磷含量没有明显影响,而酸度为 pH4.5 的酸雨有利于茶叶磷的积累(表 2)。随着铝处理浓度的增加,茶树根中钾含量没有明显的差异,而茎和叶中钾含量稍有增加,表明铝对茶树钾的吸收稍有促进作用。在各铝浓度处理下,酸度对茶树根、茎和叶中钾含量没有明显的影响(表 3)。

2.3 模拟酸雨和外源铝对茶树钙和镁吸收与积累的影响

表 4 和表 5 是模拟酸雨和外源铝对茶树钙和镁吸收积累的影响。随着铝处理浓度的增加,茶树根系中钙的含量稍有下降,而茎和叶中钙含量却有明显增加,表明铝抑制茶树根对钙的吸收,但不影响钙在茶树中的运输。模拟酸雨条件下,茶树根、茎和叶中钙含量没有明显的差异,表明酸雨对茶树钙吸收积累没有明显影响(表 4)。模拟酸雨和外源铝对茶树镁吸收积累的影响与钙的相似(表 5)。

表 4 模拟酸雨和外源铝对茶树钙吸收积累的影响

Table 4 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on Ca uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	钙含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	1.32±0.079a	4.89±0.252c	4.81±0.308b
	4.5	1.31±0.048a	4.85±0.292c	5.35±0.249b
	6.0	1.28±0.090a	4.56±0.351c	4.66±0.251b
0.5	3.0	0.60±0.066bc	6.37±0.348b	5.62±0.333b
	4.5	0.68±0.090b	5.82±0.290bc	5.65±0.193b
	6.0	0.63±0.053bc	6.04±0.445b	5.81±0.277b
1	3.0	0.48±0.050c	11.67±0.518a	16.66±0.975a
	4.5	0.50±0.049c	12.53±0.673a	16.67±1.145a
	6.0	0.48±0.066c	11.61±0.544a	17.35±1.152a

表 5 模拟酸雨和外源铝对茶树镁吸收积累的影响
Table 5 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on Mg uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	镁含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	5.37±0.417a	0.105±0.001bc	4.05±0.252c
	4.5	4.40±0.400b	0.119±0.005ab	4.80±0.383b
	6.0	4.15±0.190b	0.111±0.005abc	4.30±0.163bc
0.5	3.0	2.97±0.469c	0.109±0.003abc	4.45±0.233bc
	4.5	2.52±0.270c	0.097±0.015c	4.15±0.194c
	6.0	3.10±0.217c	0.119±0.008ab	4.35±0.091bc
1	3.0	2.70±0.305c	0.119±0.005ab	6.65±0.212a
	4.5	2.70±0.459c	0.114±0.003abc	6.55±0.241a
	6.0	2.90±0.356c	0.124±0.009a	6.95±0.208a

2.4 模拟酸雨和外源铝对茶树铁、铜和锌吸收与积累的影响

表 6、表 7 和表 8 是模拟酸雨和外源铝对茶树

表 6 模拟酸雨和外源铝对茶树铁吸收积累的影响
Table 6 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on Fe uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	铁含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	2.04±0.073c	0.31±0.039d	9.40±0.379f
	4.5	1.63±0.183c	0.23±0.025d	10.80±0.335ef
	6.0	3.04±0.201b	0.26±0.021d	9.60±0.192f
0.5	3.0	2.84±0.232b	0.54±0.067c	12.10±0.499de
	4.5	2.92±0.228b	0.90±0.088b	12.80±0.476d
	6.0	3.01±0.172b	0.90±0.049b	13.90±0.321d
1	3.0	3.58±0.306a	0.91±0.034b	21.65±0.687c
	4.5	3.98±0.277a	0.83±0.021b	30.20±0.939b
	6.0	4.04±0.331a	1.67±0.013a	58.35±2.110a

表 7 模拟酸雨和外源铝对茶树铜吸收积累的影响
Table 7 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on Cu uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	铜含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	0.11±0.021d	0.14±0.013cd	5.05±0.216cd
	4.5	0.10±0.014d	0.12±0.012d	5.55±0.262cd
	6.0	0.08±0.017d	0.16±0.017cd	4.95±0.283d
0.5	3.0	0.18±0.011ab	0.19±0.020c	5.55±0.386cd
	4.5	0.13±0.026c	0.19±0.019c	5.20±0.355cd
	6.0	0.16±0.013bc	0.15±0.012cd	5.65±0.314c
1	3.0	0.20±0.010a	0.31±0.036ab	7.10±0.313ab
	4.5	0.15±0.019bc	0.29±0.030b	7.40±0.215a
	6.0	0.17±0.013abc	0.36±0.030a	6.70±0.254b

表 8 模拟酸雨和外源铝对茶树锌吸收积累的影响
Table 8 Effects of stimulated acid rain and exogenous Al on Zn uptake and accumulation in tea plants

铝处理浓度/ g·kg ⁻¹	pH 值	锌含量/mg·g ⁻¹		
		根	茎	叶
0	3.0	0.23±0.022a	0.09±0.011c	0.07±0.008b
	4.5	0.20±0.016ab	0.10±0.019c	0.09±0.009ab
	6.0	0.17±0.013b	0.11±0.026c	0.09±0.007ab
0.5	3.0	0.25±0.024a	0.09±0.015c	0.10±0.011ab
	4.5	0.17±0.040b	0.09±0.012c	0.09±0.007ab
	6.0	0.23±0.010a	0.14±0.010c	0.09±0.008ab
1	3.0	0.15±0.018b	0.36±0.032b	0.11±0.027ab
	4.5	0.15±0.024b	0.48±0.041a	0.12±0.029a
	6.0	0.16±0.012b	0.43±0.050a	0.11±0.029ab

铁、铜和锌吸收积累的影响。随着铝处理浓度的增加，茶树根、茎和叶中铁含量明显增加，表明铝促进茶树对铁的吸收。在无铝处理下，模拟酸雨降低根系中铁的含量，对茎和叶中铁含量没有明显影响。但随着铝处理浓度的增加，酸雨明显降低茶树根、茎和叶中铁的含量，并且铝处理浓度越高，酸雨对根、茎和叶中铁含量的抑制作用越大（表 6）。随着铝处理浓度的增加，茶树根、茎和叶中铜的含量稍有增加，表明铝处理促进茶树对铜的吸收和积累。在各浓度铝处理下，酸度对茶树根、茎和叶中铜的含量没有明显影响（表 7）。随着铝处理浓度的增加，茶树根中锌含量稍有下降，而茎和叶中锌含量明显增加，特别是 1 g·kg⁻¹ 浓度铝处理下的增幅较大，表明铝处理降低茶树根系对锌的吸收，但不影响茶树对锌的运输。在各浓度铝处理下，酸度对茶树锌的吸收没有明显的影响（表 8）。

3 讨论

在本实验条件下，茶树铝的积累随外源铝含量的增加而增加，说明在土壤中添加一定量的铝有利于茶树根、茎和叶对铝的吸收和积累，并且铝主要积累在根部(表 1)，这与李海生等的研究结果相一致^[12]。在适量外源铝的作用下，酸雨促进了茶叶对铝的积累，这也与李海生的研究结果相一致^[11]。现有研究指出，植物吸收铝的主要形态为 Al³⁺，且植物对它的吸收主要是以被动吸收方式进行，并主要随质流上移至地上部分^[14-15]。随着酸雨酸度的增加，土壤酸化程度增加，土壤溶液中以 Al³⁺形式存在的铝量增加^[16-17]，因此酸雨促进茶叶对铝的吸收。然而在高铝作用下，酸雨却抑制茶叶对铝的吸收，这可能是因为高铝的条件下，酸雨使土壤中 Al³⁺的量超出了茶树的耐受范围，从而

加剧了铝对茶树的毒害作用。已有研究表明,在所有铝的形态之中 Al^{3+} 的毒性最大^[17]。

研究表明,植物发生铝毒原因之一是铝干扰了营养元素的吸收和转运^[18],而茶树能在富含铝的酸性土壤上生长,这说明茶树对这些营养元素的吸收有其内在的机制。有关铝对作物磷吸收积累影响的研究目前有两种观点:一是铝减少作物对磷的吸收和积累,认为土壤中铝离子的出现导致铝-磷化合物的形成,使磷变成非有效态,结果导致了磷的不足。李海生等对广东省茶园调查的结果也表明,茶园土壤的富铝化作用强,活性铝含量高,酸度大,对磷的固定能力较强,致使土壤有效磷含量低^[19-20]。二是铝能调节作物对磷吸收和积累。Konishi 等^[21]认为,铝能调节对磷的吸收,在磷低水平时,铝对磷的吸收向地上部分的转运及维持生长起调节作用;当磷水平增高时,铝通过把磷聚积在根部,来调节磷的吸收利用,这样来减弱过量磷的危害及转运至植物体其他组织从而促进茶的生长。李海生认为对于一般作物的无效态铝,对于茶树不一定是无效的^[12]。有人将茶培植到加有铝的水培液中,发现促进了茶苗对磷的吸收^[22-23]。本文的研究也表明,铝促进茶树根、茎和叶对磷的吸收和积累(表3)。

铝的原初毒害是根原生质膜 Ca^{2+} 通道受阻,导致根尖细胞 Ca^{2+} 净吸收下降,原生质 Ca^{2+} 缺乏, Ca^{2+} 平衡破坏,进而影响细胞结构和功能,导致镁、锌在根系阳离子交换量的饱和度下降,镁和锌的吸收下降,这可能是铝竞争了镁和锌在根质外体上的结合位点^[24]。已有研究表明,铝降低植物根、茎和叶中钙、镁和锌的含量^[24-25],本文研究也表明,随着铝处理浓度的增加,茶树根中的钙、镁和锌的含量下降,而茎和叶中却有增加的趋势(表4,表5和表8),这也可能是茶树耐铝性的原因之一。李海生等的研究也表明,植物在铝培养下,镁含量在根中下降,但不影响镁向地上部分的转运,地上部分的镁有增加趋势^[12]。当然也有不同的结果,如在 Konishi 所做的试验中根、茎、叶镁量均趋于下降^[21],这可能是与所使用的茶树品种不同有关。

钾对植物体内参与各种重要反应的酶起着活化剂的作用,是40多种酶的辅助因子,钾促进呼吸进程及核酸和蛋白质的形成,此外,钾对糖类的合成和运输有影响^[26]。铝的供应促进了钾在茶树根、茎中含量^[24],本研究结果也表明,随着铝处理浓度的增加,茶树根、茎和叶中钾含量增加(表3)。这可能归因于铝的存在减少了 K^+ 从根细胞的泄露^[27]。

铁是许多重要氧化还原酶的组成成分,在呼吸、

光合和氮代谢等方面的氧化还原过程中都起着重要的作用,同时影响叶绿体构造形成。有研究认为,铝毒处理会降低铁在植株茎叶中的浓度,使植株出现缺铁失绿症^[28]。铜是某些氧化酶的成分,可以影响氧化还原过程,铝竞争铜在根表面的同一结合位点,明显减少铜在根系和地上部的含量^[28]。本实验结果表明,铝处理增加茶树根、茎和叶中铁和铜的含量(表6和表7),这也可能是茶树耐铝性的原因之一。总之,在本实验条件下,铝处理对茶树根、茎和叶吸收积累各测定元素没有明显的不利影响,反而具有不同程度的促进作用,这在一定程度上体现了茶树对铝的耐性。

一般认为,酸雨的酸度越高,频次越多,对植物的伤害程度就越大^[29-31]。雨水酸度大小能改变营养元素从叶组织中被淋失的速度和组成,自然降雨过程会将植物叶片和茎内的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子洗脱下来,而酸雨更强化了这种淋洗过程^[32]。有研究表明模拟酸雨能够加速植物叶片中铁、锰、钙、镁、铜等元素的淋失^[33]。本研究表明,酸雨对茶树根、茎和叶中各矿质营养元素的含量没有明显不利的影响,这表明不同的树种对酸雨的反应并不相同,这与其他研究者得出的结论基本一致^[34-37]。仅从对矿质元素含量的影响来看,茶树对酸度较低的酸雨具有较强的抵抗能力。有关模拟酸雨和外源铝共同作用对茶树矿质营养影响的研究目前还未见报道。从本实验结果来看,在各浓度铝处理下,酸雨对茶树根、茎和叶中钾、钙、镁、锌和铜含量没有明显的影响,但对磷元素有一定促进作用(表2~表5、表7、表8)。一方面可能是因为茶树喜酸性的本质决定的,另一方面也可能是因为土壤对酸雨的缓冲所致。但在外源铝处理下,酸雨降低茶树根、茎和叶中铁含量,并且随着铝处理浓度的增加,酸雨对茶树铁吸收积累的抑制作用加剧(表6)。具体的原因有待进一步研究。

4 结论

(1) 土壤中铝添加有利于茶树根、茎和叶对铝的吸收与积累,在适量铝处理下酸雨促进茶树铝的积累,高酸高铝抑制茶树对铝的吸收与积累。

(2) 铝添加促进茶树根、茎和叶对磷、钾、铁、铜的吸收和积累,降低根对钙、镁和锌的吸收与积累,但茎和叶中钙、镁和锌的含量继续增加。这些结果表明铝对茶树矿质营养的吸收没有不利的影响,反而在不同程度上促进这些元素的吸收与积累,这进一步证实了茶树的耐铝性。

(3)在各铝浓度处理下,酸雨对茶树钾、钙、镁、锌和铜元素没有明显的影响,适中的酸度对磷元素的吸收积累反而稍有促进作用,这表明茶树对酸雨具有较强抵抗和适应能力,但酸雨降低茶树对铁的吸收与积累,特别是在高浓度铝处理下酸雨对铁的抑制作用更明显。

参考文献:

- [1] 刘厚田, 田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与土壤铝活化的关系[J]. 环境科学学报, 1992, 12(3): 297-299.
LIU Hou-tian, TIAN Ren-sheng. Relationship between decline of a Masson pine forest and aluminum activation in Nanshan, Chongqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1992, 12(3): 297-299.
- [2] 西北农学院, 华南农业大学. 农业化学研究法[M]. 第2版. 北京: 农业出版社, 1987: 93.
Northwestern Agricultural College, South China Agricultural University. Research methods for agricultural chemistry[M]. 2nd edition. Beijing: Agricultural Publishing House, 1987: 93.
- [3] Lazof D B, Goldsmith J G, Rufty T W, et al. Rapid uptake of aluminum into cells of intact soybean root tips. Amicroanalytical study using secondary ion mass spectrometry[J]. *Plant Physiology*, 1994, 106(3): 1107-1114.
- [4] 曹洪法, 高吉喜, 舒俭民. 铝对马尾松幼苗影响的研究[J]. 生态学报, 1992, 12(3): 239-246.
CAO Hong-fa, GAO Ji-xi, SHU Jian-min. Study on the effect of aluminum on *Pinus massoniana* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(3): 239-246.
- [5] Chibilit G. Interaction of aluminum and calcium on Nemaguard' peach seedling nutrient contents and growth in sand culture[J]. *Scientia Horticulturae*, 1990, 43(1-2): 29-36.
- [6] 余国泰, 秦遂初. 有机肥缓解小麦铝毒效果的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 57-62.
YU Guo-tai, QIN Sui-chu. Study on the effect of organic fertilizer alleviating aluminum toxin[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(1): 57-62.
- [7] 郝鲁宁, 刘厚田. 铝对水稻幼苗的生理影响[J]. 植物学报, 1989, 31(11): 847-853.
HAO Lu-ning, LIU Hou-tian. Effect of aluminum on the physiology of rice seedlings[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1989, 31(11): 847-853.
- [8] Alina K P, Henry P. Trace elements in soils and plants[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1984: 134-136.
- [9] Alfer A C, Meriz W. Trace elements in human and animal nutrition[M]. 5th edition. New York: Academic Press Inc, 1986.
- [10] Mciachlan D R C. Aluminum and the risk for Alzheimer's disease[J]. *Environmetrics*, 1995, 6: 233-275.
- [11] 李海生. 不同 pH 水平下茶苗对铝、铜及矿质养分吸收和累积的研究[J]. 广东教育学院学报, 2005, 25(5): 78-81.
LI Hai-sheng. Study on the absorption and accumulation of aluminium, copper and mineral nutrients in tea seedlings under different pH levels[J]. *Journal of Guangdong Education Institute*, 2005, 25(5): 78-81.
- [12] 李海生, 张志权. 不同铝水平下茶对铝及矿质养分的吸收与累积[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 186-190.
LI Hai-sheng, ZHANG Zhi-quan. The absorption and accumulation of aluminum and mineral nutrient in tea plant (*Camellia sinensis* L.) under different Al level[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 186-190.
- [13] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 50-52.
ZHANG Zhi-liang, QU Wei-qing. Guidebook of phyto-physiology experiments[M]. 3th edition. Beijing: Higher Education Press, 2003: 50-52.
- [14] 顾明华, Tetsuo Hara, 陆申年, 等. 铝毒在不同作物上的差异及温度的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3(2): 59-65.
GU Ming-hua, Tetsuo Hara, LU Shen-nian, et al. Responses of different crops to effect of temperature on aluminum toxicity[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1994, 3(2): 59-65.
- [15] Sasaki M, Yamamoto Y, Matsumoto H. Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots[J]. *Physiological Plantarum*, 1996, 96(2): 193-198.
- [16] Wa G A, Tsuma T. Characteristics of upward translocation of aluminum in plants[J]. *Soil Science Plant Nutrition*, 1984, 30(3): 345-358.
- [17] Wa G A, Tsuma T, Keneko M. High toxicity of hydroxy-aluminum polymer ions to plant roots[J]. *Soil Science Plant Nutrition*, 1987, 33(1): 57-67.
- [18] For C D, Chang R C, White M C. The physiology of metal toxicity in plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 29: 511-566.
- [19] 丁淑能, 阮建云, 吴 洵. 活性腐植酸在红壤茶园的应用效果[J]. 中国茶叶, 1996, 18(2): 2-3.
DING Shu-neng, RUAN Jian-yun, WU Xun. Applied effect of actived humic acid in red soil tea garden[J]. *China Tea*, 1996, 18(2): 2-3.
- [20] 李海生, 张志权. 茶(*Camellia sinensis* L.)对铝的吸收与累积研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41(1): 72-75.
LI Hai-sheng, ZHANG Zhi-quan. Studies on the absorption and accumulation of aluminium in tea bush (*Camellia sinensis* L.)[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2002, 41(1): 72-75.
- [21] Konish S, Miyamoto S, Takit T. Stimulatory effects of aluminum on tea plant grown under low and high phosphorus supply[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, 31(3): 361-368.
- [22] Konish S, Miyamoto S. Stimulatory effect of aluminum on the growth of tea plants with special reference to phosphorus absorption[J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1984, 55: 29-35.
- [23] Konish S, Miyamoto S, Taki T. Stimulatory effects of aluminum on tea plant grown under low and high phosphorus supply[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, 31(3): 361-368.
- [24] 陈文荣, 刘 鹏, 黄朝表, 等. 铝对荞麦铝和其他营养元素运输的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 173-176.
CHEN Wen-rong, LIU Peng, HUANG Chao-biao, et al. Effects of aluminum on influx and translocation of aluminum and other essential elements in Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 173-176.
- [25] 肖祥希, 陈立松, 蔡艳惠, 等. 铝胁迫对龙眼幼苗营养元素吸收的影响

- 响[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(2):230-233.
- XIAO Xiang-xi, CHEN Li-song, CAI Yan-hui, et al. The effect of aluminum stress on the absorption of nutrient elements in Longan (*Dimocarpus longana*) seedlings[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 27(2):230-233.
- [26] Peter R. Interaction between aluminum toxicity and calcium uptake at the root apex in near-isogenies lines of wheat (*Triticumaestivum* L.) differing in aluminum tolerance[J]. *Plant Physiology*, 1993, 102:975-982.
- [27] Wagatsuma T, Keneko M. High toxicity of hydroxy-aluminum polymer ions to plant roots[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1987, 33:57-67.
- [28] Delhaize E. Uptake on environmental stress; Aluminum toxicity and tolerance in plants[J]. *Plant Physiology*, 1995, 107:315-321.
- [29] 王力军, 青长乐, 牟树森. 模拟酸雨对土壤化学及蔬菜生长的影响[J]. 农业环境保护, 1993, 12(1):17-20.
- WANG Li-jun, QING Chang-le, MAO Shu-sen. Effects of simulated acid rain on chemistry of soil and growth of vegetables[J]. *Agricultural Environment Protection*, 1993, 12(1):17-20.
- [30] 黄建昌, 肖 艳. 模拟酸雨对 6 种园林植物的影响[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(4):360-362.
- HUANG Jian-chang, XIAO Yan. Effects of simulated acid precipitation on the growth and physiological responses of six garden plants[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(4):360-362.
- [31] Rinallo C, Modi G. Fruit yield of field grown pear *pyruscommun* is exposed to different levels of raom acidity in Tuscanv[J]. *Journal Science Food Agriculture*, 1995, 68(1):43-50.
- [32] Makarov M I, Kiscleva V V. Acidification and nutrient in forest soil subjected to nitrogen deposition[J]. *Water Air Soil Pollution*, 1995(85):1137-1142.
- [33] 陈美华, 欧世金, 蒋得书. 模拟酸雨对芒果生长及土壤的影响[J]. 广西农业大学学报, 1995, 14(4):300-304.
- CHEN Mei-hua, OU Shi-jin, JIANG De-shu. The influence of simulated acidic rain on the growth of mango and soil[J]. *Journal of Guangxi Agricultural University*, 1995, 14(4):300-304.
- [34] 颜戊利, 刘冬英, 陈志澄, 等. 黄皮对酸雨的抗性[J]. 中国果树, 2004(2):31-33.
- YAN Wu-li, LIU Dong-ying, CHEN Zhi-cheng, et al. Resistance of *Clausena lansium* on acid rain[J]. *China Fruits*, 2004(2):31-33.
- [35] 黄益宗, 李志先, 黎向东, 等. 模拟酸雨对华南典型树种生长及营养元素含量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(2):331-336.
- HUANG Yi-zong, LI Zhi-xian, LI Xiang-dong, et al. Impact of simulated acid rain on growth and nutrient elements uptake by *Eucalyptus urophylla* and *Pinus massoniana*[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2):331-336.
- [36] 王金凤, 温远光, 梁宏温. 柳州酸雨区马尾松年轮元素含量变化研究[J]. 生态科学, 2005, 24(4):310-313.
- WANG Jin-feng, WEN Yuan-guang, LIANG Hong-wen. The research on the content of chemical element of *Pinus massoniana*'s tree ring in Liuzhou[J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(4):310-313.
- [37] Cronan C S, Reiners W A, Reynolds R C, et al. Forest floor leaching: Contributions from mineral, organic and carbonic acids in New Hampshire subalpine forests[J]. *Science*, 1978, 200:309-311.