

模拟酸雨对盆栽樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗叶矿质元素含量的影响

田大伦 ,黄智勇 ,付晓萍

(中南林业科技大学生态研究室,长沙 410004)

摘要 采用盆栽方法,以不同 pH 值(3.0、4.0、5.0)的模拟酸雨溶液对樟树幼苗进行浇灌处理,研究不同酸度酸雨对樟树幼苗叶矿质元素含量的影响。结果表明,各酸雨处理后樟树幼苗叶矿质元素含量都受到一定程度的影响,N、P、Ca、Mg、Fe、Al、Cu、Mn、Ni 含量均较对照有所增加,C、K、Zn 含量有所减少。S、Cd、Pb 含量变化表现为 pH3.0 处理 S、Cd 含量增加,Pb 含量下降,pH4.0 处理 S、Cd、Pb 含量均下降,pH5.0 处理 S、Cd 含量减少,Pb 含量增加。相关分析则表明,酸液 pH 值与樟树幼苗叶中 N、Mn 含量呈显著负相关。该项研究可为南方城市绿化树种的选择提供理论依据。

关键词 酸雨 樟树 叶 矿质元素 影响

文章编号:1000-0933(2007)03-1099-07 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Effects of simulated acid rain on mineral elements content in leaves of *Cinnamomum camphora* seedling in artificial potted environment

TIAN Da-Lun ,HUANG Zhi-Yong ,FU Xiao-Ping

Research Section of Ecology ,Central-South University of Forestry Technology ,Changsha 410004 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 1099 ~ 1105.

Abstract : It is well-known that acid rain are widespread contaminants in the environment. Many researches about acid rain focused on physiological characteristic , while much more information is required concerning mineral elements changes of plants. Through potted planting experiment , *Cinnamomum camphora* seedling which were planted in pots were treated with three different pH values (3.0 ,4.0 ,5.0) of simulated acid rain. The results showed that the mineral element content varied to a certain extent. The content of Nitrogen ,Phosphorus ,Calcium ,Magnesium ,Iron ,Aluminum ,Copper ,Manganese and Nickel was relatively higher in the treated plants than those without treatment , but the content of Carbon ,Potassium and Zinc was lower. The content change of Sulphur ,Cadmium and Lead trends as follows : Increasing for Sulphur ,Cadmium and decreasing for Lead under pH3.0 treatment. For pH4.0 treatment , the content of Sulphur ,Cadmium and Lead fell down. Under treatment of pH5.0 , content of Sulphur ,Cadmium ascended while content of Lead descended. Analysis showed that a negative one between pH concentration and content of Nitrogen. Manganese was significant. This study can offer basic theory for choosing the greening tree species in Southern cities.

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30571487 ,30271043) ;国家林业局重点资助项目 (2001-29 ,2005-28 ,2006-11 ,2006-17) ;湖南省教育厅资助项目 (C03C612) ;湖南省重点实验室资助项目 (06FJ3083) ;湖南省高教重点实验室资助项目 (20031020)

收稿日期 2006-10-24 ;修订日期 2007-01-15

作者简介 田大伦 (1939 ~) ,女,湖南长沙人,教授,主要从事森林生态学研究. E-mail : csfuywd@ hotmail. com

Foundation item : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30571487 ,30271043) ; Key Project of State Forestry Administration (No. 2001-29 ,2005-28 ,2006-11 ,2006-17) ; Project of Education Department of Hunan Province (No. C03C612) ; Key Lab Project of Hunan Province (No. 06FJ3083) and Key Lab Project of Hunan Higher Education (No. 20031020)

Received date 2006-10-24 ; **Accepted date** 2007-01-15

Biography : TIAN Da-Lun , Professor , mainly engaged in forest ecology. E-mail : csfuywd@ hotmail. com

Key Words : simulated acid rain ;*Cinnamomum camphora* ;leaves ;mineral elements ;effects

酸雨能使水体和土壤酸化、破坏森林、伤害庄稼、损害古迹、影响生物生存和人体健康 ,已成为重要的国际环境问题。在中国 20 世纪 80 年代 ,酸雨主要发生在以重庆、贵阳为主的西南地区 ,到 20 世纪 90 年代中期 ,酸雨迅速发展到长江以南 ,青藏高原以东及四川盆地广大地区。形成华中、西南、华东、华南 4 大酸雨区。以长沙、赣州、南昌、怀化为代表的华中酸雨区 ,已成为我国酸雨污染最严重的地区^[1]。目前我国在酸雨对植物影响方面的研究较多^[2~7]。一些研究结果表明^[8~12] ,酸雨的酸度越高 ,频次越多 ,对植物的伤害程度就越大。模拟酸雨能够加速植物叶片中 Fe、Mn、Ca、Mg、Cu 等元素的淋失 ,即酸雨能强化这种淋洗过程^[13]。植物营养元素含量的改变 ,可导致植物生长发育不良 ,增加对病虫害的敏感性。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^[14]。Borman 等人研究了酸雨污染对糖槭树叶片营养元素的影响发现叶片在尚未出现可见伤害时 ,其内的 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 等阳离子流失量明显高于对照植株^[15]。模拟酸雨对苋菜中微量元素的研究结果也表明酸雨使 K、Ca 等营养元素严重流失^[16]。Cronan 等的研究表明 ,在酸雨的作用下 , Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 等离子在冠层雨溶液中富集 ,造成叶片中养分大量淋失 ,阔叶林的淋失量大于针叶林^[17]。

樟树 (*Cinnamomum camphora*) 是我国南方重要的城市绿化树种之一 ,具有重要的经济和观赏价值。目前我国在酸雨对樟树影响方面的研究很少 ,对樟树林地土壤研究表明 ,樟树林地具有极强的抗酸缓冲能力^[18]。对樟树种子萌发和幼苗的生长研究也表明^[19] ,pH2.0 的酸雨才对樟树的生理生态方面有较强的影响 ,pH3.5 的酸雨反而促进了地径和幼苗生长 ,增加了单株生物量 ,而酸雨对樟树矿质元素含量的影响方面在我国还未见报道。本研究以地处中亚热带并且酸雨污染严重的长沙市的主要绿化树种樟树幼苗为研究对象 ,用模拟酸雨的处理方法 ,来研究酸雨对盆栽樟树幼苗叶矿质元素含量的影响 ,为城市绿化植物的选择和酸雨理论研究提供依据和参考^[1~23]。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

实验地设在湖南省长沙市中南林业科技大学城市生态站模拟酸雨实验室内 ,模拟酸雨实验室系不锈钢微框架结构的温室 ,面积 22m×6m。实验室地处东经 112°48′ ,北纬 28°03′。当地年平均气温 17.2℃ ,极端最高气温 40.6℃ ,最低气温 -12℃ ,年平均降雨量 1400mm。无霜期为 270~300d ,日照时数年均 1677.1h。属典型的亚热带湿润季风气候。

1.2 实验材料

樟树为 1 年生扦插苗 ,苗木高度在 50~70cm 之间 ,于 2004 年 10 月移栽到高 35cm ,直径 30cm 的塑料盆中 ,用红壤和肥料土按 7:1 的比例混合而成的土壤进行栽培。在缓苗期间 ,用自来水浇灌 ,长势良好。2005 年 4 月开始进行人工酸雨浇灌。

1.3 实验处理

酸雨的配制是按照长沙市 1992~2001 年酸雨中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^{-}$ (8:1)^[20] ,用浓硫酸和浓硝酸配置成酸原液 ,再用蒸馏水稀释成 pH 值为 3.0、4.0、5.0 的酸雨原液 ,并以此原液进行浇灌实验 ,每组实验设 4 个重复。以长沙市 1971~2000 年每月平均降雨量 (表 1)为依据 ,按盆口总面积 ,折算成每个 pH 值等级人工浇灌苗木酸雨量 (表 2) ,每次喷洒至叶片彻底湿润 ,对照组苗木用 pH 值 7.0 的自来水等量喷洒 ,平时用蒸馏水保持所有供试苗木盆内土壤湿度。实验期间苗木放置在温室中培育 ,排除自然干扰 ,室内温度因开窗对流基本与环境温度保持一致。2006 年 3 月 13 日采样 ,样品经杀青、烘干、粉碎处理后放入干燥器内进行元素分析。

1.4 测定方法

樟树幼苗叶 N 含量用半微量凯式定氮法测定 ,C 用水合热法测定 ,P 用钼锑抗比色法测定 ,S 用氯化钡比

浊法测定 ,Al 用铝试剂比色法测定 ;K、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Mn、Ni、Cd、Pb 用 HP-3510 原子吸收分光光度计进行测定。

表 1 长沙市 1971 ~ 2000 年实际月均温度和月均降水量
Table 1 The mean monthly temperature and rainfall in Changsha City (1971 ~ 2000)

项目 Item	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均温度 (℃) Mean temperature	4.8	6.2	10.9	16.9	22.0	25.6	29.1	28.7	24.0	18.4	12.5	6.8
平均降雨量 (mm) Mean rainfall	60.6	91.8	139.4	208.4	191.7	202.5	107.2	104.8	63.0	85.9	75.4	45.9

表 2 模拟酸雨浇灌次数及浇灌量
Table 2 Watering quantity and times of simulated acid rain in a year

项目 Item	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
浇灌次数 Watering times	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
每次浇灌量 (ml) Watering quantity at every time	267.75	405.5	615.75	920.5	846.75	894.5	473.5	463	278.25	379.5	333	202.75
酸雨浇灌总量 (ml) Watering quantity of simulated acid rain	1071	1622	2463	3682	3387	3578	1894	1852	1113	1518	1332	811

1.5 统计分析

采用最小显著差数法和直线相关分析对实验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对樟树幼苗叶大量元素含量的影响

从表 3 中可以看出 ,模拟酸雨对樟树叶的养分含量的变化有明显的影响 ,单因素方差分析表明 ,酸雨对樟树叶 N、K、Ca、S、Al 含量的影响极显著 ,对 Mg、P 含量影响显著 ,对 C 含量则没有显著影响。

表 3 不同酸雨处理樟树幼苗叶大量元素含量 (g·kg⁻¹)
Table 3 Content of macroelement in leaves of of Cinnamomum camphora Seedling under different acid rain treatment

pH	氮 Nitrogen	碳 Carbon	磷 Phosphorus	钾 Potassium	钙 Calcium	镁 Magnesium	硫 Sulphur	铝 Aluminum
3.0	9.34 ± 0.05	540.30 ± 15.76	0.26 ± 0.03	3.46 ± 0.07	12.18 ± 0.40	2.66 ± 0.06	2.21 ± 0.13	0.35 ± 0.03
4.0	8.93 ± 0.14	541.10 ± 16.78	0.27 ± 0.03	3.15 ± 0.06	10.39 ± 0.29	2.71 ± 0.13	1.41 ± 0.04	0.95 ± 0.04
5.0	7.91 ± 0.19	533.22 ± 12.93	0.28 ± 0.01	3.69 ± 0.10	9.93 ± 0.54	2.40 ± 0.24	1.22 ± 0.10	0.72 ± 0.05
CK	7.29 ± 0.19	557.51 ± 3.68	0.22 ± 0.02	3.69 ± 0.01	9.36 ± 0.05	2.26 ± 0.02	1.42 ± 0.11	0.36 ± 0.02
F 值 F value	30.52 **	1.05	4.80 *	42.90 **	33.31 **	6.76 *	55.74 **	207 **

* 代表处理间差异显著 ; * * 代表处理间差异极显著 ;元素含量均为平均值 ± 标准差 ; F_{0.05} (3 , 8) = 4.07 ; F_{0.01} (3 , 8) = 7.59 ;下同
* Difference is significant at 0.05 level ; * * Difference is significant at 0.01 level ;Figures in the table represent means ± standard error ;the same below

表 4 的多重分析表明 :N 含量 :pH3.0、pH4.0、pH5.0 溶液处理分别比对照增加了 28.16%、22.55%、8.52%。pH3.0、pH4.0 处理与对照差异极显著 ,pH5.0 处理与对照差异显著。C 含量 :pH3.0、pH4.0、pH5.0 酸雨处理分别比对照减少 3.09%、2.94%、4.36% ,3 个处理与对照差异均不显著 ,表明酸雨对 C 含量影响很小。P 含量 :pH3.0、pH4.0、pH5.0 酸雨溶液处理比对照增加了 26.44%、28.37%、33.17%。pH5.0 溶液处理的 P 含量最高 ,与对照差异极显著 ,pH3.0、pH4.0 处理与对照差异显著。K 含量 :pH3.0、pH4.0、pH5.0 溶液处理 K 含量比对照分别减少 6.29%、14.55%、0.14% ,其中 pH5.0 处理的 K 含量与对照差异很小 ,pH3.0、

pH4.0 处理与对照差异极显著,这说明酸雨对樟树叶中的 K 元素的流失有直接影响。Ca 含量 随着酸度的加大,樟树叶中 Ca 含量逐渐增加,pH3.0、pH4.0、pH5.0 处理分别比对照增加 30.13%、11.06%、6.11%,pH3.0、pH4.0 处理与对照差异极显著,pH5.0 处理与对照差异不显著。Mg 含量:pH3.0、pH4.0、pH5.0 溶液处理分别比对照增加 17.70%、19.74%、6.10%。pH3.0、pH4.0 处理与对照差异极显著,pH5.0 处理与对照差异不显著。S 含量:pH4.0、pH5.0 处理分别比对照减少 0.93%、14.08%,只有当酸度达到 pH3.0 时,S 含量有一个剧增,相对对照增长 55.44%,与对照的含量差异极显著,这表明只有当酸度达到一定程度时,樟树叶 S 才有一个明显的吸收。Al 含量:pH3.0 处理的 Al 含量与对照差异很小,pH4.0、pH5.0 处理的 Al 含量与对照含量差异极显著,分别为比对照增加了 170.26%、105.5%。

表 4 模拟酸雨对大量元素含量 (g·kg⁻¹)影响
Table 4 Effect of simulated acid rain on content (g·kg⁻¹) of macroelements

元素 Element	pH3.0		pH4.0		pH5.0		LSD _{0.05}	LSD _{0.01}
	相差值 Difference	差异幅度 (%) Different extent	相差值 Difference	差异幅度 (%) Different extent	相差值 Difference	差异幅度 (%) Different extent		
C	17.21	-3.09	16.41	-2.94	24.28	-4.36	—	—
N	2.05 **	+28.16	1.64 **	+22.55	0.62 *	+8.52	0.554	0.806
P	0.048 *	+22.13	0.052 *	+24.01	0.062 **	+28.73	0.041	0.060
K	0.23 **	-6.29	0.54 **	-14.55	0.005	-0.14	0.126	0.183
Ca	2.82 **	+30.13	1.04 **	+11.06	0.57	+6.11	0.688	1.001
Mg	0.40 **	+17.7	0.45 **	+19.74	0.14	+6.1	0.267	0.389
Al	0.005	-1.40	0.59 **	+166.57	0.37 **	+102.52	0.066	0.097
S	0.79 **	+55.44	0.01	-0.93	0.20 *	-14.08	0.192	0.279

* 代表 0.05 水平显著; ** 代表 0.01 水平显著;相差值、差异幅度百分比均以 CK 为标准;LSD_{0.05} 为 0.05 水平最小显著差数;LSD_{0.01} 为 0.01 水平最小显著差数;下同 * Difference is significant at 0.05 level; ** Difference is significant at 0.01 level ;Difference and different extent percentage are compared to control ;LSD_{0.05} means least significant difference at 0.05 level ;LSD_{0.01} means least significant difference at 0.01 level ;the same below

2.2 模拟酸雨对樟树叶金属元素含量的影响

表 5 表明,模拟酸雨对樟树幼苗叶 Fe、Cu、Zn、Mn、Ni、Cd、Pb 等金属元素含量均有明显影响,单因素方差分析表明,酸雨对上述金属元素含量影响均极为显著。

表 5 不同酸雨处理樟树幼苗叶金属元素含量 (mg·kg⁻¹)
Table 5 Content of (mg·kg⁻¹) metal element in leaves of *Cinnamomum camphora* Seedling Under different acid rain treatment

pH	铁 Iron	铜 Copper	锌 Zinc	锰 Manganese	镍 Nickel	镉 Cadmium	铅 Lead
3.0	220.9 ± 13.52	9.35 ± 0.20	17.31 ± 0.57	35.79 ± 0.42	3.51 ± 0.21	0.18 ± 0.03	9.78 ± 0.54
4.0	762.9 ± 12.38	13.57 ± 0.57	15.09 ± 0.37	31.53 ± 0.60	3.67 ± 0.11	0.07 ± 0.02	10.09 ± 0.94
5.0	512.6 ± 29.58	9.77 ± 0.17	17.78 ± 0.35	25.83 ± 0.43	3.10 ± 0.10	0.07 ± 0.02	12.45 ± 0.27
CK	219.6 ± 16.10	5.98 ± 0.15	26.34 ± 0.29	22.83 ± 0.11	3.05 ± 0.06	0.11 ± 0.02	11.77 ± 0.46
F 值 F value	559 **	275 **	437 **	541 **	15.99 **	14.39 **	13.73 **

表 6 的多重分析表明:Fe 含量:pH3.0、pH4.0、pH5.0 溶液处理分别比对照增加 0.59%、247.40%、133.42% pH3.0 处理与对照差异不显著,pH4.0、pH5.0 处理与对照差异极显著。Cu 含量:3 种酸雨处理均与对照差异极显著,其中 pH4.0 处理的含量最高,相对对照增长 126.82% pH3.0、pH5.0 溶液处理含量分别比对照增长 56.35% 和 63.42%。Zn 含量:随着酸度的加大,樟树幼苗叶中的 Zn 含量逐渐减少,pH3.0、pH4.0、pH5.0 处理分别比对照减少 34.31%、42.73%、32.51%,与对照差异均极显著。Mn 含量:Mn 含量变化趋势明显,即随着 pH 值的降低,樟树幼苗叶中的 Mn 含量随之增加,pH3.0、pH4.0、pH5.0 处理分别比对照

增长 56.81%、38.13%、13.19% 3 个处理均与对照差异极显著。Ni 含量 :樟树叶中 Ni 含量随酸度增加随之增大 pH3.0、pH4.0、pH5.0 处理分别比对照增加了 14.85%、20.15%、1.65% ,其中 pH5.0 处理与对照差异不显著 pH3.0、pH4.0 处理与对照差异极显著。Cd 含量 :只有 pH3.0 处理含量比对照增长 57.66% ,pH4.0、pH5.0 处理的 Cd 含量分别比对照减少 42.08%、42.79% 3 个处理均与对照差异极显著。Pb 含量 除 pH5.0 处理比对照增长 5.78% 外 pH3.0、pH4.0 处理分别比对照减少 16.92%、14.25% ,pH3.0、pH4.0 处理与对照差异极显著 pH5.0 处理与对照含量差异不显著。

表 6 模拟酸雨对金属元素含量 (mg·kg ⁻¹) 的影响								
Table 6 Effects of simulated acid rain on content of (mg·kg ⁻¹) metal elements								
元素 Element	pH3.0		pH4.0		pH5.0		LSD _{0.05}	LSD _{0.01}
	相差值 Difference	差异幅度 (%) Different extent	相差值 Difference	差异幅度 (%) Different extent	相差值 Difference	差异幅度 (%) Different extent		
Fe	1.3	+0.59	543.3 **	+247.40	293.0 **	+133.42	36.096	52.516
Cu	3.37 **	+56.35	7.56 **	+126.82	3.79 **	+63.42	0.610	0.888
Zn	9.04 **	-34.31	11.26 **	-42.73	8.56 **	-32.51	0.772	1.123
Mn	12.97 **	+56.81	8.70 **	+38.13	3.01 **	+13.19	0.812	1.181
Ni	0.45 **	+14.85	0.62 **	+20.15	0.05	+1.65	0.246	0.358
Cd	0.07 **	+57.66	0.05 *	-42.08	0.05 *	-42.79	0.046	0.067
Pb	1.99 **	-16.92	1.68 **	-14.25	0.68	+5.78	1.138	1.655

2.3 模拟酸雨与樟树叶矿质元素含量的相关性分析

表 7 的相关分析表明 :模拟酸雨的 pH 值与樟树幼苗叶中 N、P、S、Al、Ca、Mg、Fe、Cu、Mn、Ni、Cd 含量表现为不同程度的负相关 ;与 C、K、Zn、Pb 表现为正相关 ;与 Al、Cd、Fe 含量呈弱负相关。显著性检验表明 ,pH 值与 N、Mn 呈显著负相关 ($P < 0.01$) (相关系数分别为 -0.971、-0.959) ,这一结果说明酸雨的 pH 值下降直接导致了樟树叶中 N、Mn 含量的增加。

此外 樟树幼苗叶中 N 含量与 Mg 含量呈显著正相关 (相关系数为 0.964) ,与 Mn 含量呈极显著正相关 (相关系数为 0.991) ;Al 与 Fe 含量呈极显著正相关 (相关系数为 0.996) ;Mg 与 Ni 含量成显著正相关 (相关系数为 0.955) ,表明在酸雨浇灌后 ,它们两两间的含量变化趋势一致。K 与 Ni 含量呈显著负相关 (相关系数为 0.955) ;C 与 P 含量呈显著负相关 (相关系数为 0.983) ,表明两个元素间的含量变化趋势正好相反。

表 7 不同模拟酸雨处理后樟树叶矿质元素含量的相关分析															
Table 7 Correlation analysis among mineral content of in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> seedling after different acid rain treatment															
	pH	N	C	P	S	Al	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ni	Cd
N	-0.971 *	1.000	0.690	-0.514	1.000										
P	-0.774	0.631	-0.98 *	1.000											
S	-0.630	0.689	-0.012	0.060	1.000										
Al	-0.230	0.196	-0.524	0.599	-0.575	1.000									
K	0.622	-0.738	0.220	-0.397	-0.190	-0.602	1.000								
Ca	-0.891	0.894	-0.407	0.467	0.909	-0.230	-0.383	1.000							
Mg	-0.917	0.964 *	-0.502	0.645	0.501	0.417	-0.882	0.744	1.000						
Fe	-0.251	0.235	-0.859	0.574	-0.537	0.996 **	-0.662	-0.204	0.461	1.000					
Cu	-0.667	0.664	-0.638	0.759	-0.082	0.863	-0.856	0.278	0.818	0.883	1.000				
Zn	0.871	-0.805	0.855	-0.936	-0.169	-0.663	0.691	-0.556	-0.859	-0.667	-0.91	1.000			
Mn	-0.959 *	0.991 **	-0.458	0.565	0.780	0.061	-0.664	0.943	0.923	0.101	0.556	-0.730	1.000		
Ni	-0.803	0.901	-0.314	0.480	0.448	0.43	-0.955 *	0.639	0.97 *	0.486	0.802	-0.754	0.854	1.000	
Cd	-0.330	0.391	0.236	-0.231	0.937	-0.820	0.115	0.721	0.170	-0.795	-0.425	0.175	0.511	0.135	1.000
Pb	0.742	-0.879	0.050	-0.206	-0.736	-0.019	0.796	-0.773	-0.868	-0.088	-0.483	0.494	-0.888	0.904	-0.510

r_{0.05} = 0.950

3 结论与讨论

模拟酸雨对樟树幼苗叶的矿质元素含量有显著影响。3 种不同酸液处理后的 N、P、Ca、Mg、Fe、Al、Cu、Mn、Ni 含量均较对照均有所增加,其中 N、Ca、Mn、Mg 含量随着酸雨 pH 的降低而逐渐增加;Al、Cu、Fe 含量均是以 pH4.0 处理含量最高;Ni 含量以 pH5.0 处理含量最高。

3 种酸液处理后樟树幼苗叶中的 C、K、Zn 含量均比对照的樟树幼苗叶含量有所减少。其中 K、Zn 含量以 pH4.0 处理含量下降幅度最大,分别达到 14.55% 和 42.73%,其次是 pH3.0 处理,而以 pH5.0 处理下降幅度最小;C 含量在 3 种处理之间下降幅度相差不大。

3 种酸液处理后樟树幼苗叶中的 S、Cd、Pb 含量表现为:pH4.0、pH5.0 处理 S、Cd 含量比对照减少,而 pH3.0 处理含量则大幅度增加,分别达到 54.44% 和 57.66%。pH5.0 处理的 Pb 含量比对照增加 5.78%,pH 3.0、pH4.0 处理则含量下降。

模拟酸雨 pH 值与樟树幼苗叶中 N、Mn 含量呈显著负相关,樟树幼苗叶中 N 与 Mg 含量呈显著正相关,与 Mn 含量呈极显著正相关;C 与 P 含量呈显著负相关;Al 与 Fe 含量呈极显著正相关;K 与 Ni 含量呈显著负相关;Mg 与 Ni 含量成显著正相关。

樟树幼苗叶中大多数的元素并没有因酸雨的浇灌而大量淋失,反而起了一定的促进作用,叶中 N、P、Ca、Mg、Fe、Al、Cu、Mn、Ni 的含量均较对照增加。这可能一方面与樟树自身具有较强的适应能力有关,樟树生长迅速,适应性强,适宜在土质稍粘、微酸的环境下生长。另一方面樟树属于常绿深根系树种,根系发达,吸收能力强,酸雨活化了土壤中的某些矿质元素,而樟树通过发达的根系加强了对矿质元素的吸收来弥补植物体内被淋失的元素。长期的酸雨淋溶增加了红壤中微量元素 Zn 的淋失^[21],幼叶中 Zn 含量的减少可能与此有关,K 含量的减少则可能与其对酸雨的敏感性较强所致。低酸度的酸雨加速了樟树叶中 S 的淋失,随着酸度的加大 S 的输入进一步增加,导致樟树体内 S 的富积,叶中含量也急剧增加。

References :

- [1] Sun C J. Acid rain. Beijing :China Environmental Science Press ,2002. 1—213.
- [2] Chen M H ,O S J ,Jiang D S. The influence of simulated acidic rain on the growth of *Mango* and soil. Journal of Guangxi Agricultural University , 1995 ,14 (4) :300—304.
- [3] Tong G H ,Liu T J ,Huang W. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on lipid peroxidation of wheat seedlings. Acta Ecologica Sinica , 2005 ,25 (6) :1509—1516.
- [4] Zhou G Y ,Xiao C J X. The influence of acid precipitation on the element release in different soil types in Chongqing. Acta Ecologica Sinica , 1996 ,16 (3) :251 ~ 257.
- [5] Hou A M ,Peng S L ,Zhou G Y. Tree-ring chemical changes and possible impacts of acid precipitation in Dinghushan. Acta Ecologica Sinica , 2002 ,22 (3) :1552—1559.
- [6] Chen J M ,Pan G X ,CANG L ,et al. Effect of simulated acid rain on chemical behavior of copper in paddy soils and plant of Taihu Lake region. Acta Scientiae Circumstantiae ,2001 ,21 (4) :459—464.
- [7] Rinallo C ,Modi G. Fruit yield of field grown *Pear Pyruscommunis* exposed to different levels of rain acidity in Tuscanv. Sci Food Agri ,1995 ,68 (1) :43—50.
- [8] Yan W L ,Chen Z C ,Yang B Y ,et al. Effects of acid rain on trace elements in *Amaranth*. Guang Dong Microelements Science ,2004 ,11 (9) :61—64.
- [9] Tamm C O ,Cowling E B. Acidic precipitation and forest vegetation. In :Dochinger L S ,Seliga T A. Proc Internat Symp Acid Precipitation and the Forest Ecosystem. Upper Darby :NE Eor Exp Sta ,1976. 845—855.
- [10] Tong G H ,Liang H L. Effects of simulated acid rain and its acidified soil on soluble sugar and nitrogen contents of wheat seed lings. Chin. J. Appl. Ecol ,2005 ,16 (8) :1487—1492.
- [11] Lee J J ,Weber D E. The effect of simulated acid rain on seedling emergence and growth of eleven woody species. For Sci ,1979 ,25 (3) :393—398.
- [12] Huang Y Z ,Li Z X ,Li X D ,etal. Impact of simulated acid rain on growth and nutrient elements uptake by *Eucalyptus urophylla* and *Pinus massoniana*. Ecology and Environment ,2006 ,15 (2) :331—336.

[13] Huang J C , Xiao Y. Effects of simulated acid precipitation on the growth and physiological response of six garden plants. Journal of Southwest Agricultural University ,2002 ,24 (4) :360 — 362.

[14] Makarov M I , Kiscleva VV. Acidification and nutrient in forest soil subjected to nitrogen deposition. Water Air Soil Pollution ,1995 ,85 :1137 — 1142.

[15] Schweingruber F H. Tree rings and environment :Dendrology. Swiss Fedral Institute for Forest ,Snow and Landscape Research. Birmensdorf. Paul Haupt Verlag , Berne ,1996.

[16] Zhou Q , Huang X H , Zen Q L. Injury mechanism of acid rain on vegetation and its chemicals control. Journal of Agro-Environment Science ,2003 ,22 (5) :632 — 635.

[17] Cronan C S , Refiner W A. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hard-wood forests in New England. Oecologia ,1983 ,59 :216 — 223.

[18] Xiao C Y , Huang Q C. Study on *Cinnamomum camphora* and *Robinia pseudoacacia* for resistance to simulated acid rain. Soil ,2002 ,2 :99 — 103.

[19] Fan H B , Zhang R G. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growth of *Cinnamomum camphora*. Journal of Zhejiang Forestry College ,1996 ,13 (4) :412 — 417.

[20] Jiang Y M , Zeng G M , Zhang G , et al. Atmospheric acid deposition chemistry and the variational characteristics in Changsha city. Urban Environment and Urban Ecology ,2003 ,16 (Sup) :23 — 25.

[21] Xu Z J , Wang W Y , Liu G S , et al. Study on release of zinc from red soils under the influence by simulated acid rain. Journal of Xiangtan Mine Institute ,2003 ,18 (4) :79 — 82.

[22] Feng Z W. Ecological Effects and control strategies of acid deposition on ecosystem in China. Yunan Environmental Science ,2000 ,19 :1 — 6.

[23] Feng Z W. Impacts and Control Strategies of Acid Deposition on Terrestrial Ecosystems in China. Engineering Science ,2002 ,2 (9) 5 — 11.

参考文献：

[1] 孙崇基. 酸雨. 北京：中国环境科学出版社，2001.1 ~ 213.

[2] 陈美华 欧世金 蒋得书. 模拟酸雨对芒果生长及土壤的影响. 广西农业大学学报，1995，14（4）：300 ~ 304.

[3] 童贯和 刘天骄 黄伟. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗膜脂过氧化水平的影响. 生态学报，2005，25（6）：1509 ~ 1516.

[4] 周国逸 小仓纪雄. 酸雨对重庆几种土壤中元素释放的影响. 生态学报，1996，16（3）：251 ~ 257.

[5] 侯爱敏 彭少麟 周国逸. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系. 生态学报，2002，22（3）：1552 ~ 1559.

[6] 成杰民 潘根兴 仓龙 等. 模拟酸雨对太湖地区土壤-植物系统中铜的化学行为的影响. 环境科学学报，2001，21（4）：459 ~ 464.

[8] 颜戊利 陈志澄 杨冰仪 等. 酸雨对苋菜中微量元素的影响. 广东微量元素科学，2004，11（9）：61 ~ 64.

[10] 童贯和 梁惠玲. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗体内可溶性糖和含氮量的影响. 应用生态学报，2005，16（8）：1487 ~ 142.

[12] 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. 生态环境，2006，15（2）：331 ~ 336.

[13] 黄建昌 肖艳. 模拟酸雨对6种园林植物的影响. 西南农业大学学报，2002，24（4）：360 ~ 362.

[16] 周青 黄晓华 曾庆玲 等. 植物酸致损伤机理与化控减灾研究进展. 农业环境科学学报，2003，22（5）：632 ~ 635.

[18] 肖慈英 黄青春. 樟树和刺槐林地土壤对模拟酸雨缓冲性能研究. 土壤，2002，2：99 ~ 103.

[19] 樊后保 臧润国. 模拟酸雨对樟树种子萌发和幼苗生长的影响. 浙江林学院学报，1996，13（4）：412 ~ 417.

[20] 蒋益民 曾光明 张龚 等. 长沙市大气湿沉降化学及变化特征. 城市环境与城市生态，2003，16（增刊）：23 ~ 25.

[21] 许中坚 王晚英 刘广深 等. 红壤中微量元素锌在酸雨淋溶下的释放特征研究. 湘潭矿业学院学报，2003，18（4）：79 ~ 82.

[22] 冯宗炜. 中国酸雨的生态影响和防治对策. 云南环境科学，2000，19：1 ~ 6.

[23] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策. 中国工程科学，2002，2（9）5 ~ 11.