应用与环境生物学报 2010, **16**(4): 523~528
Chin J Appl Environ Biol=ISSN 1006-687X
2010-08-25
DOI: 10.3724/SP.J.1145.2010.00523

马尾松酸性根际环境中铝的化学行为*
——以重庆酸雨区马尾松林地土壤为例

王水良[1] 王 平[1**] 王趁义[2] 戴建远[3]
([1]南京林业大学化学工程学院 南京 210037)
([2]湖州师范学院化学系 湖州 313000)
([3]四川大学化学学院 成都 610064)

摘 要 以重庆酸雨区马尾松林地土壤为例, 通过马尾松幼苗盆栽试验法研究了酸性土壤-**马尾松根系界面铝**(Al)的化学行为. 林地土壤中的铝可分级为交换态铝(Alex)、有机态铝(Alor)、氧化态铝(Alox)、碳酸盐态铝(Alc)和不溶态铝(Alin). 研究结果表明: 共存盐基离子Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+和Na^+对Al^{3+}在土壤-**马尾松根系界面行为的影响呈**正效应(缓解铝毒), 影响顺序为Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+≈Na^+. 全氮和全磷含量与根系铝含量呈正相关; 土壤有机质(Organic matter, OM)含量与根际Alor浓度呈正相关. 土壤pH值(<5.0)与根际Alex呈负相关, 根际Alex大于非根际Alex, 马尾松根系铝的吸收主要取决于根际土壤Alex含量, Alex进入根系后逐步与根细胞壁小分子有机化合物配位, 主要以Alor累积于根部. 图1 表5 参20

关键词 化学行为; 铝和铝形态; 酸性林地; 土壤-**根系界面; 马尾松**
CLC X131.3 : Q948.1

Chemical Behavior of Aluminum in the Acidic Rhizosphere of *Pinus massoniana* Lamb
—A Case Study on Its Cultivation in Acid Forest Soil in Chongqing, China*

WANG Shuiliang[1], WANG Ping[1**], WANG Chenyi[2] & DAI Jianyuan[3]
([1]*School of Chemical Engineering, Nanjing Forestry University*, Nanjing 210037, China)
([2]*Chemistry Department, Huzhou Normal College*, Huzhou 313000, Zhejiang, China)
([3]*School of Chemistry, Sichuan University*, Chengdu 610064, China)

Abstract **The chemical behavior of aluminum (Al) in the acidic soil-root interface of** *Pinus massoniana* Lamb seedlings was investigated by planting them in pots. The Al in soil was fractionated into five operationally defined forms [exchangeable (Alex), carbonate (Alc), oxide (Alox), organic (Alor), and insoluble (Alin) species]. The results showed: 1) coexisted base ions (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+) were positively related to Al^{3+} tolerance in soil-root interface, and their alleviation followed a decreasing order: Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+≈Na^+; 2) the contents of total P and N had positive effects on the Al accumulated in the roots; and 3) the organic matter (OM) was positive to the Alor in *P. massonian* rhizosphere. Besides, soil pH (<5.0) was negatively related to the rhizospheric Alex. Alex concentration was always higher in the rhizosphere than in bulk soil. The accumulated amount of Al absorbed in the plant roots mainly depended on the Alex quantity of the rhizosphere soil. The Alex entered into the roots and gradually complexed with the small organic molecules in root cell wall, mainly accumulated in the roots as Alor species. Fig 1, Tab 5, Ref 20

Keywords chemical behavior; Al and Al speciation; acid forest soil; soil-root interface; *Pinus massoniana* Lamb
CLC X131.3 : Q948.1

铝(Al)是自然界中最常见的金属元素, 在地壳中分布广泛, 占地壳土壤的7%~8%. 植物对铝的利用较小, 土壤中化学形态的铝对植物生长有着极为重要的影响[1]. 近年来, 随着全球环境的日益恶化, 许多地区酸雨频繁沉降, 土壤的酸化程度随之加重. 中国南方地区因降水日益酸化, 酸雨危害面积达30%, 已成为继欧美之后的第三大酸沉降区[2]. 土壤酸化降低了土壤阳离子交换的盐基饱和度(Base saturation, BS), 导致盐基阳离子(Base cations, BC)淋溶和铝活化, 这时土壤中铝溶出量大增, 严重制约树木生长, 造成森林锐减. 森林是陆地森林生态系统中最重要的组成部分, 因此酸沉降影响下的森林土壤、林木状况倍受关注.

鉴于重庆市地形特殊及燃煤硫含量较高(2%~5%)等影响, 煤烟型大气污染比较严重, 首要污染物SO_2加剧了大气酸沉降频度, 降水pH值达4.0~4.2, 林地土壤多呈酸性[3]. 马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)是重庆市的主要针叶树种, 分布广泛, 生长迅速, 也是森林的主要群落树种, 在我国的林业发展和森林资源培育中占有十分重要的地位[4]. 马尾松对酸沉降以及土壤酸化表现出中等以上程度的酸铝受害, 它们在酸铝毒害下生长受抑, 针叶大量凋落, 死亡率较高, 铝毒已成为整个森林衰退的主要原因之一[5]. 目前酸化土壤活性铝对木本植物根系行为的研究鲜见报道, 本研究以重庆酸雨区马尾松林地土壤为例, 采用马尾松幼苗盆栽的试验方法初步探

收稿日期: 2009-09-13 接受日期: 2009-09-25
*国家自然科学基金项目(No. 30771696)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30771696)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wp_lh@yahoo.com.cn)

索酸化土壤-马尾松根系界面铝的化学行为，为酸沉降区域高铝毒害生态系统的修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 **马尾松幼苗** 供试马尾松种子（由中国林业科学院亚热带林业研究所提供）经灭菌、浸种和催芽，播于湿润棉花上，萌芽后生长约10 d的健康幼芽用于盆栽试验，栽培周期3 mo.

1.1.2 **供试土壤** 供试土壤采自四川省重庆市郊马尾松林地表层黄壤（0~20 cm），土壤容重为1.25~1.34 g/cm^3，土壤孔隙度为47%~50%. 供试土壤基本理化性质见表1. 供试土壤自然风干后，研磨、过孔径100目的尼龙筛，装于不漏水的塑料钵内，钵直径15 cm，高15 cm. 每钵定苗5株.

表1 供试土壤基本理化性质（*N*=16）

Table 1 Physicochemical characteristics of the tested soils (*N*=16)

项目 Item	非根际土壤 Bulk soil	根际土壤 Rhizosphere soil
pH	3.51±0.02	3.68±0.03
阳离子交换量 Cation exchange capacity (CEC, *b*/cmol+ kg^{-1})	16.78±1.27	15.44±1.32
碳氮比 Carbon-nitrogen ratio (C/N)	13.55±0.95	13.82±1.17
有机质 Organic matter (OM, *w*/g kg^{-1})	16.18±1.28	18.83±1.10
总碳 Total carbon (*w*/g kg^{-1})	13.57±1.17	16.11±1.34
全氮 Total nitrogen (*w*/g kg^{-1})	0.95±0.12	1.02±0.14
全磷 Total phosphorus (*w*/g kg^{-1})	0.32±0.05	0.47±0.08
钙 Ca (*w*/g kg^{-1})	3.86±0.45	4.01±0.28
镁 Mg (*w*/g kg^{-1})	5.30±0.52	5.27±0.37
钠 Na (*w*/g kg^{-1})	0.38±0.05	0.44±0.19
钾 K (*w*/g kg^{-1})	4.53±0.55	4.98±0.31

1.1.3 **灌溉水** 根据重庆酸雨组成、供试土壤基本理化性状以及本实验设计要求配制灌溉水，pH值为4.0~4.2. 共设置6个试验处理组（表2）.

每天每钵浇入灌溉水120 mL，使土壤水分保持在田间持水量水平. 3 mo后，采用抖根法制备根际土壤. 即将经外力轻轻抖落后仍附着在根系上的土壤作为根际土壤，其余土壤为非根际土壤. 每个处理多点同时采集土壤样品[根际土壤（Rhizosphere soil, RS）、非根际土壤（Bulk soil, BS）]（采集深度：0~10 cm）及马尾松幼苗. 根际和非根际土分别各自混匀，过2 mm筛，4 ℃保存. 每组每处理各设16个重复. 本试验共有352钵.

1.2 测定方法

参照土壤农化分析方法测定林地土壤样品的交换性阳离子（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、$A1^{3+}$）及全氮（N）、全磷（P）、土壤有机质（OM）含量和pH值[6]. 其中，K^+、Na^+、Ca^{2+}和Mg^{2+}用HCl+HNO_3+$HClO_4$+HF置微波炉消化，美国热电公司IRIS Intrepid Ⅱ电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定；OM测定采用重铬酸钾外加热法；pH值用1 mol/L KCl浸提，土水比为1 : 2.5，复合电极法测定；全N用凯氏定氮法测定；全P测定采用钼蓝法[7].

1.3 栽培测试

将采集的马尾松洗净，测量马尾松主根根长、株高和一级侧根数后，再分段（根系部分与地上部分）、粉碎，供铝形态分析用. 同时分别测定地上部分和根系部分的干重.

表2 试验处理组情况

Table 2 The six test groups

试验组 Test group		灌溉水 Irrigation water
a. 对照组 Control test	AT	去离子水 Deionized water
b. 盐基离子试验 Base cation test	BT1	Ca^{2+}（$CaCl_2$）浓度为1.00 mmol/L Ca^{2+} ($CaCl_2$) concentration of 1.00 mmol/L
	BT2	Mg^{2+}（$MgCl_2$）浓度为1.00 mmol/L Mg^{2+} ($MgCl_2$) concentration of 1.00 mmol/L
	BT3	Na^+（NaCl）浓度为1.00 mmol/L Na^+ (NaCl) concentration of 1.00 mmol/L
	BT4	K^+（KCl）浓度为1.00 mmol/L K^+ (KCl) concentration of 1.00 mmol/L
	BT5	Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+浓度分别为1.00 mmol/L Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+ concentrations of 1.00 mmol/L, respectively
	BT6	Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+浓度分别为1.00 mmol/L，Al^{3+}（$AlCl_3$）浓度为0.30 mmol/L Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+ concentrations of 1.00 mmol/L, respectively and Al^{3+} ($AlCl_3$) concentration of 0.30 mmol/L
c. 氮和磷试验 Nitrogen and phosphorus test	CT1	氮（NH_4NO_3）浓度为1.00 mmol/L Nitrogen (NH_4NO_3) concentration of 1.00 mmol/L
	CT2	磷(KH_2PO_4)浓度为0.20 mmol/L的水 0.20 mmol / L phosphorus (KH_2PO_4) concentration of water
	CT3	氮和磷浓度分别为1.00 mmol/L和0.20 mmol/L Nitrogen and phosphorus concentrations of 1.00 mmol/L and 0.20 mmol/L, respectively
	CT4	氮、磷和Al^{3+}浓度分别为1.00 mmol/L、0.20 mmol/L和0.30 mmol/L Nitrogen, phosphorus and Al^{3+} concentrations of 1.00 mmol/L, 0.20 mmol/L and 0.30 mmol/L, respectively
d. OM试验 Organic matter test	DT1	腐殖酸浓度为1.00 mmol/L Humic acid concentration of 1.00 mmol/L
	DT2	腐殖酸浓度为2.00 mmol/L Humic acid concentration of 2.00 mmol/L
	DT3	腐殖酸浓度为3.00 mmol/L Humic acid concentration of 3.00 mmol/L
	DT4	腐殖酸浓度为4.00 mmol/L Humic acid concentration of 4.00 mmol/L
e. Al^{3+}试验 Free Al^{3+} test	ET1	Al^{3+}浓度为0.100 mmol/L Al^{3+} concentration of 0.100 mmol/L
	ET2	Al^{3+}浓度为0.300 mmol/L Al^{3+} concentration of 0.300 mmol/L
	ET3	Al^{3+}浓度为0.500 mmol/L Al^{3+} concentration of 0.500 mmol/L
f. pH试验 pH test*	FT1	pH 3.00
	FT2	pH 4.00
	FT3	pH 5.00
	FT4	pH 6.00

*pH试验组灌溉水配制：向去离子水滴加0.1 mmol/L盐酸至近pH值，再滴加0.01 mmol/L氢氧化钠至所需pH值

*Preparation of the irrigation water in the pH test group: Dropping 0.1 mmol/L hydrochloric acid in deionized water to adjudge pH value, and then dropping 0.01 mmol/L sodium hydroxide to the pH as required

铝形态分为交换态铝（Exchangeable Al species，Alex）、有机态铝（Organic Al species，Alor）、氧化态铝（Oxide Al species，Alox）、碳酸盐态铝（Carbonate Al species，Alc）和不溶态铝（Insoluble Al species，Alin）. 受试材料铝形态的分析采用连续提取法，具体测试步骤参见文献[8].

2 结果与分析

2.1 土壤盐基离子对根系铝及幼苗生长的影响

土壤共存盐基离子（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）含量对马尾松根系铝含量以及幼苗生长的影响结果列于表3. 由表3中BT组试验结果可知，土壤环境共存盐基离子有助于幼苗生长，对马尾松根系铝的吸收累积表现为抑制效应，其中，共存离子Ca^{2+}和Mg^{2+}的抑制程度较大，它们可能参与土壤阳离子交换反应，增加土壤离子强度，降低铝活性从而达到缓解效果[9]. 本试验结果还表明，土壤共存盐基离子Ca^{2+}和Mg^{2+}的施入可以抑制植株根系对铝的吸收与积累，缓解或减轻铝毒，促进幼苗生长，而K^+和Na^+的影响程度相对较弱.

2.2 土壤全氮和全磷含量对根系铝及幼苗生长的影响

选取土壤全氮和全磷（以P_2O_5含量计）环境因子为参数，探讨它们对马尾松根系铝的吸收积累量以及幼苗生长的影响. CT组实验结果（表3）表明，全磷和全氮与马尾松根系铝含量呈正相关，林地土壤氮和磷营养元素增加，马尾松幼苗长势明显上升，其根系吸收和累积铝的能力也同步增强，这可能是磷在土壤中易与铝结合，根系在吸收氮和磷营养元素的同时，铝元素也随着磷营养元素一并向根际迁移[10]，由马尾松根须吸入，以至根系铝升高. 由表3中CT3数据可知，土壤全氮和全磷在根系铝累积以及幼苗生长方面也具有协同效应. 张帆等也观察到在铝胁迫下外源性磷、氮对杉木幼苗的生长具有调控作用[11].

2.3 土壤pH、OM和Al^{3+}对根系铝及幼苗生长的影响

根际pH值、OM和Al^{3+}与马尾松幼苗受铝胁迫之间的关系列于表3. 由DT组数据可知，土壤OM可缓解植物铝胁迫，促进马尾松幼苗生长. 其可能原因是OM尤其是低分子有机物可影响根尖的土壤环境，对植物根际营养具有重要作用；其次有机物还能在质外体或根际溶液中与铝络合形成有机态铝，从而提高根系对铝毒的耐性. 与对照处理AT相比较，FT和ET组实验结果显示，马尾松幼苗根系在遭遇高水平铝或强酸逆境时，表现最为明显的是根系铝积累量锐升，植株生长缓慢，根系形态相对矮小，可能是根际Al^{3+}导致植株整个生理功能失调[12].

2.4 土壤pH和OM对根际铝形态的影响

土壤pH值和OM对根际铝形态影响的分布特征列于表4. 土壤pH值影响的结果表明，在研究的范围内，铝的各种形态分布随土壤pH值的改变而变化，Alex随pH降低而增加，在pH≤5时，Alex水平锐升. Alex对植物的危害关系极大，也是土壤中各种铝形态转化的重要环节，应特别关注. 由表4还可以看出，土壤OM与根际Alor呈正相关，根际Alor大于非根际Alor，原因是土壤中加入铝配位剂腐殖酸，腐殖酸分子含有多种功能团，如羧基、醇羟基、酚羟基、甲氧基和醛基等，这些功能团与土壤中的Al^{3+}离子具有强烈的螯合作用，同时在根际，铝胁迫也诱导马尾松根系分泌的大量有机酸如苹果酸和柠檬酸等小分子有机酸也能与铝螯合，改变了土壤的铝形态，根际Alor浓度水平提高了78.7%，Alor的生成增加了铝在土壤中的移动性，也降低了铝对植物的毒性[13]. 同时，根际Alex大于非根际Alex，根际土壤中游离态Alex升高了14.5%，并且根际Alex浓度随土壤OM升高而稍为降低，这可能与土壤OM的化学性质以及马尾松根系分泌活动有关[14].

表3　土壤环境因子对根系铝及幼苗生长的影响（N=16）

Table 3　Effects of soil environmental factors on the Al content accumulated in *P. massonian* roots and its seedling growth (N=16)

处理 Treatment		根系铝 Al in root (m/μg seedling^{-1})	根长 Root length (l/cm)	株高 Plant height (h/cm)	根干重 Root dry weight (m/mg)	苗干重 Shoot dry weight (m/mg)	一级侧根数 Number of lateral roots
对照 Control	AT	43.7±2.9	8.8±0.5	8.5±0.3	28.2±1.9	69.7±5.8	5.3±0.7
盐基离子 Base cations	BT1	29.4±2.5	9.2±0.7	9.0±0.2	32.7±2.4	74.5±4.1	5.8±0.5
	BT2	32.5±1.8	9.1±0.6	8.8±0.5	31.3±2.2	72.3±3.2	5.6±0.9
	BT3	35.7±2.6	9.0±0.2	8.7±0.4	29.9±1.7	71.3±4.0	5.5±0.4
	BT4	35.4±1.4	9.0±0.4	8.7±0.3	29.8±1.6	71.5±1.8	5.5±0.6
	BT5	24.3±1.1	9.5±0.5	9.2±0.5	34.1±2.0	78.3±2.6	6.2±0.5
	BT6	118.7±8.9	7.8±0.3	7.7±0.2	25.5±1.5	65.8±1.5	5.2±0.3
N, P	CT1	39.7±2.8	9.5±0.3	8.9±0.4	31.2±1.5	73.5±4.3	5.7±0.5
	CT2	46.8±3.1	9.4±0.5	8.8±0.3	30.9±2.1	72.9±3.7	5.6±0.3
	CT3	48.2±2.5	9.7±0.4	9.1±0.2	31.8±2.4	75.3±4.1	5.9±0.6
	CT4	157.3±8.7	7.7±0.3	8.2±0.3	25.1±1.8	63.7±2.9	5.1±0.4
OM	DT1	23.5±1.1	9.0±0.5	8.7±0.4	30.7±2.0	71.5±3.4	5.4±0.3
	DT2	20.7±1.8	9.1±0.2	8.8±0.5	31.2±1.5	72.8±4.1	5.5±0.4
	DT3	17.2±3.3	9.2±0.6	8.9±0.3	32.6±2.4	74.0±2.5	5.5±0.2
	DT4	14.7±1.2	9.3±0.7	9.0±0.4	33.4±1.6	75.7±4.3	5.6±0.4
pH	FT1	108.4±5.3	7.7±1.0	7.8±0.5	26.4±1.8	63.5±3.5	4.9±3.1
	FT2	40.5±2.9	8.1±0.9	8.1±0.2	27.1±1.0	67.2±2.9	5.4±2.7
	FT3	36.7±2.3	8.5±1.1	8.4±0.3	28.3±2.1	69.4±2.2	5.5±3.6
	FT4	29.1±1.8	8.9±0.6	8.7±0.6	29.5±1.6	71.4±3.3	5.7±1.8
Al^{3+}	ET1	291.1±12.1	6.5±0.1	7.1±0.3	22.3±1.3	59.4±1.7	4.1±0.2
	ET2	314.2±25.2	6.4±0.2	7.0±0.5	21.7±0.8	58.0±2.4	4.0±0.3
	ET3	333.8±20.7	6.3±0.2	6.9±0.6	21.0±1.5	57.2±1.8	3.9±0.5

表4 土壤pH和OM对根际铝形态含量的影响（*N*=16）
Table 4 Effects of soil pH and OM on the Al speciation in *P. massonian* rhizosphere (*N*=16)

处理 Treatment		铝形态 Al speciation (*w*/mg kg^{-1})				
		交换态铝 Exchangeable Al species (Alex)	碳酸盐态铝 Carbonate Al species (Alc)	有机态铝 Organic Al species (Alor)	氧化态铝 Oxide Al species (Alox)	不溶态铝 Insoluble Al species (Alin)
对照 Control	BS	372.6±23.8	392.3±24.7	878.8±45.7	4974.7±225.9	9272.9±401.5
	RS	426.8±31.5	566.7±33.8	1570.6±109.4	4809.0±242.1	9018.9±357.3
pH	FT1	626.4±45.3	502.7±43.8	1772.5±83.4	4772.3±308.7	8953.8±522.3
	FT2	456.8±33.2	585.3±41.4	1582.1±93.6	4804.2±227.5	9014.1±421.8
	FT3	287.3±18.2	627.8±32.6	1138.4±98.7	5022.8±309.2	9066.3±577.2
	FT4	67.4±4.6	873.4±48.2	937.6±51.7	5173.5±283.7	9183.4±327.3
OM	DT1	385.8±21.5	527.4±29.5	1632.6±51.7	4763.3±307.5	9057.3±411.2
	DT2	359.8±18.7	543.6±32.1	1666.3±72.7	4792.5±194.8	9012.3±327.5
	DT3	335.9±26.3	522.8±37.2	1687.5±43.5	4713.5±206.4	9107.6±195.7
	DT4	315.7±16.4	553.4±29.1	1713.7±65.3	4687.5±259.3	9078.2±222.8

由表4结果分析，游离态Alex易受土壤pH值、OM等影响，其中，土壤pH值影响最重要. 已有研究表明，当土壤pH值降低到3.8~4.2以下时，大量固定的铝被溶解释放为游离的Al^{3+}形态，从而危害树木根系生长[2]. 本研究结果显示，当土壤pH值低于5.0时，pH值与土壤中Alex呈极其显著性负相关，相关系数为−0.698. OM量与土壤Alor浓度呈正相关性，相关系数为0.763.

2.5 根际铝形态及其行为

根际是指植物根系活动的那一部分土壤微区，其范围一般为离根表1~5 mm内的土壤，在此范围以外的土壤称非根际土壤. 采集根际和非根际土壤分组测定铝形态含量，由图1可以看出，根际土壤和非根际土壤中均存在5种铝形态，在根际，Alex和Alc尤其是Alor的比例明显偏高，Alox和Alin则反之，根际效应特征较明显.

在根际，马尼松根系对铝的吸收，主要取决于根系−土壤界面Alex的水平. **Alex通过根系−土壤界面进入根系，很快**即与根部细胞壁内源性低分子有机物（如有机酸、内源激素和代谢物等）配合形成稳定Alor配位分子，固定于根系[14]，Alex向Alor转变率近90%，其余则以Alex向地上部分迁移. 在供试马尾松体内仅检出Alex和Alor形态，见表5.

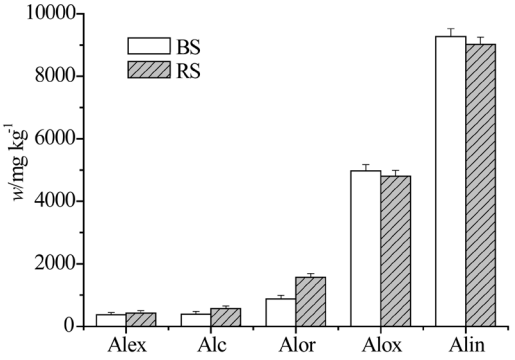


图1 马尾松根际土壤(RS)和非根际土壤(BS)铝形态含量（*w*/mg kg^{-1}）
Fig. 1 Contents (*w*/mg kg^{-1}) of Al speciation in rhizosphere soil (RS) and bulk soil (BS) of *P. massonian*

铝离子从土壤向马尾松根际移动，被根系吸附、吸收，并在体内迁移、聚积受根际界面诸多环境因子，如土壤pH、OM和铝形态转变等的影响，但是，经试验筛选，对根系铝毒效应贡献最大的影响因子是[Alex]. 在根际土壤Alex含量和马尾松（根系和地上部分）铝浓度之间观察到显著性相关关系：

$[Al]_R$=−0.135+8.88[Alex], R^2=0.907, P<0.005, N=30

$[Al]_S$=0.029+2.132[Alex], R^2=0.859, P<0.01, N=30

式中，$[Al]_R$：根系铝积累量（mg/kg）；$[Al]_S$：地上部分铝积累量（mg/kg）；[Alex]：根际土壤Alex含量（mg/kg）.

植株根系铝的迁移率是$[Al]_R$与$[\sum Al]_T$之间的比率. 本试验中马尾松各处理组植株体内铝的迁移率均在0.90左右，说明马尾松幼苗根系吸收的铝主要聚集在地下根部，其迁移能力较弱.

3 讨论

一般而言，林地生态系统遭受酸雨污染后，将导致土壤的盐基饱和度和盐基离子含量降低，同时也加大土壤铝的释放与活化，严重阻滞树木根系的生长和生理活动. 铝对树木造成危害的同时，树木本身也形成了一定的抵制措施. 在根际微域，铝胁迫诱导根系分泌更多的生物活性小分子，通过根际**pH值调节、铝形态改变等减轻铝的毒害作用.**

3.1 在酸雨污染区，土壤铝的释放与活化以及Alex的转变不仅与酸沉降酸度有关，而且还与林地土壤盐基离子的浓度有关. 一般地，盐基离子的淋溶量随酸雨pH值的降低而增加，

表5 马尾松根际的铝及其形态（*N*=16）
Table 5 The Al and Al speciation in the soil-root interface of *P. massonian* seedlings (*N*=16)

处理 Treatment	根际 Alex Rhizospheric Alex (*w*/mg kg^{-1})	体内铝积累量 Al accumulation in vivo (*m*/μg plant^{-1})				迁移率 Transport ratio $[Al]_R/[\sum Al]_T$
		$[\sum Al]_T$	$[Al]_R$		$[Al]_S$	
			Alex	Alor		
AT	372.6±23.8	92.8±5.3	7.8±1.0	69.8±4.7	15.2±1.3	0.84
BT5	287.2±17.3	43.1±2.7	3.8±2.7	31.6±1.4	7.7±0.8	0.82
CT3	407.5±18.9	56.7±3.7	5.2±0.7	43.0±2.7	8.5±0.6	0.85
DT1	385.8±21.5	47.3±2.9	3.3±1.6	38.3±2.5	5.7±3.2	0.88
ET1	1082.0±54.7	312.8±22.7	35.7±2.2	250.4±12.1	26.7±1.8	0.91
FT1	626.4±45.3	127.5±8.9	23.8±15.2	94.8±6.2	8.9±1.1	0.93

而盐基饱和度则随酸雨pH值的降低而降低, 土壤中各盐基离子淋失量大致为Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^{+}>K^{+}, 由此可知, 盐基离子对酸雨的敏感性顺序为Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^{+}>K^{+}. 土壤盐基离子能影响马尾松根系形态、生物产量以及根系铝累积量, 这可能是由于阳离子的淋析(如Ca和Mg), 引起营养物质氮、磷循环和供给变化, pH值降低及Al^{3+}迁移等, 这些变化可增加Al^{3+}的摄入, 阻碍植物的正常生长. 本研究结果表明, 土壤盐基离子缓解土壤**–马尾松根际微域铝毒的能力顺序是**Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+}≈Na^{+}. 这与盐基离子对酸雨的敏感性顺序基本吻合. 由此可见, 森林土壤盐基离子与树木抗铝性有着较为密切的关系, 可能是土壤中加入盐基阳离子, 可以增强土壤离子强度, 降低土壤铝的活性, 从而减轻Al^{3+}的毒害[15].

3.2　在本研究范围内, 林地土壤pH值与Alex含量呈负相关; 全磷和全氮与马尾松根系铝含量呈正相关, 土壤有机质(OM)含量与根际Alor浓度呈正相关. 究其原因是: 1)酸雨破坏土壤化学元素的平衡, 酸性土壤中过多的H^{+}与土壤胶体表面吸附的盐基离子(K^{+}、Na^{+}、Ca^{2+}、Mg^{2})进行交换反应, 而进入土粒表面, 被交换下来的盐基离子则随渗漏水流淋失, 导致盐基饱和度降低; 土粒表面的H^{+}又自发地与土壤矿物晶格表面的铝迅速反应, 转换成交换性铝, 加大土壤铝的释放与活化, 促进活性铝的溶出[16], 也造成根际游离态Alex上升; 2)土壤全氮和全磷水平升高, 植株加大对氮素和磷素的吸收, 由于酸性土壤中铝离子可与磷酸根形成难溶性磷酸铝沉淀, 所以在磷酸根离子迁移时, 也带动活性铝离子同向迁移, 导致马尾松根系铝积累量上升. 章爱群等也指出, 在磷铝胁迫下, 根活化难溶性磷并通过庞大的根系吸收, 促进植株的生长, 磷进入根系后在根细胞壁上键合铝离子, 从而减轻铝胁迫, 表现一定耐铝胁迫的能力[17]; 3)酸性土壤的铝逆境胁迫信号, 诱导根系释放适量小分子有机物, 通过铝形态由Alex向Alor转变等调节, 有效地适应不同的铝环境, 避让铝逆境危害[18].

3.3　迁移率是表示铝元素由植物的根系向地上部分运输能力的一个重要指标. 植株地上部分中铝元素含量与整株铝元素比值的高低直接反映了铝元素在植物体中由地下部根系向地上茎、叶迁移的能力. 本研究结果显示, 迁移率整体较低, 在0.82~0.93之间, 说明铝在植株体内的位移能力较弱, 马尾松根系对铝的吸收主要取决于根际土壤Alex含量, Alex由根际进入根系向地上茎、叶迁移的能力较弱. 这与前人有关结论基本一致, 陈文德等报道, 无论马尾松、柳杉还是杉木, 对金属元素的吸收储存具有基本相似性, 主要富集器官为植物更新新生能力强的根系和叶片, 而树干、树枝和树皮相对积累能力偏低[19]. 一方面是由于树干对铝元素的运输和传导具有筛检和分馏作用, 并能控制一定的量, 造成树干中铝的附存指数偏低. 其次是马尾松根系吸收的Al^{3+}与根细胞壁的活性基团键合, 聚集在根细胞壁上, 以至铝迁移能力降低. 有80%以上的铝主要以Alor形态聚集在马尾松根系, 这或许是马尾松的抗逆生理特性之一.

3.4　土壤中的铝以各种化学形态存在, 交换态铝、有机态铝虽在数量上不大, 不到全铝量的2%, 但它们是各种铝形态中较为活跃的部分, 对植物生长和生态环境具有重要意义[20]. 适度调整土壤酸度或土壤有机质, 可对森林土壤**–马尾松根**系界面铝的吸附、吸收、迁移和聚积产生定向影响. 因此从分子水平开展酸性林地土壤铝行为特征的研究, 探索土壤酸化与土壤各种铝形态之间的关系, 对区域林业发展和生态环境的保护都具有重要的实践意义.

References

1　Chen HM (陈怀满). **Heavy Metal Pollution in Soil-plant System. Beijing,** China: Science Press (北京: 科学出版社), 1996

2　Bian YM, Yu SW. **Forest decline in Nanshan, China.** *For Ecol Manage*, 1992, **51**: 53~59

3　Hou AM (侯爱敏), Peng SL (彭少麟), Zhou GY (周国逸). **Tree-**ring chemical changes and possible impacts of acid precipitation in Dinghushan, south China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2002, **22**: 1552~1559

4　Zhao Y (赵颖), Zhou ZC (周志春), Jin GQ (金国庆). **GCA/SCA of** seedling growth and root parameters in *Pinus massoniana* and the phosphorus environment influence. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2009, **45** (6): 27~33

5　Wang YH, Solberg S, Yu PT, Myking T, Vogtc RD, Du SC. **Assessments** of tree crown condition of two masson pine forests in the acid rain region in south China. *For Ecol Manage*, **2007, 242**: 530~540

6　Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). **Soil Physical and Chemical Analysis. Shanghai,** China: Shanghai Science and Technology Press (上海: 上海科学技术出版社), 1978. 55~78

7　Lu RK (鲁如坤). **Soil and Agro-chemical Analytical Methods. Beijing,** China: China Agricultural Scientech Press (北京: 中国农业科技出版社), 1999. 318~379

8　Wang P, Bi SP, Zhou YP, Tao QS, Gan WX, Xu Y, Hong Z, Cai WS. Study of aluminium distribution and speciation in atmospheric particles of different diameters in Nanjing, China. *Atmos Environ*, 2007, **41**: 5788~5796

9　Zeng GM, Zhang G, Huang GH, Jiang YM, **Liu HL. Exchange of Ca^{2+},** Mg^{2+} and K^{+} and uptake of H^{+}, NH_4^{+} for the subtropical forest canopies influenced by acid rain in Shaoshan forest located in Central South China. *Plant Sci*, 2005, **168**: 259~266

10　Mo JM, Fang H, Zhu WX, Zhou GY, Lu XK, Fang YT. Decomposition responses of pine (*Pinus massoniana*) needles with two different nutrient-status to N deposition in a tropical pine plantation in southern China. *Ann For Sci*, 2008, **65**: 405

11　Zhang F (张帆), Luo CD (罗承德), Zhang J (张健). **Alleviation effect of** exogenous Ca, P and N on the growth of Chinese fir seedlings under Al stress. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, **16** (2): 213~217

12　Kuang YW, Sun FF, Wena DZ, Zhou GY, Zhao P. Tree-ring growth patterns of masson pine (*Pinus massoniana* L.) during the recent decades in the acidification Pearl River Delta of China. *For Ecol Manage*, 2008, **255**: 3534~3540

13　Ma JF. Syndrome of aluminum toxicity and diversity of aluminum resistance in higher plants. *Int Rev Cytol*, 2007, **264**: 225~252

14　Huang J (黄娟), Hong GH (孔国辉), Xia HP (夏汉平). Aluminum

toxicity and its relationship with organic acids and phosphorus. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2005, **11** (4): 498~503

15 Lu XK, Mo JM, Gundersern P, Zhu WX, Zhou GY, Li DJ, Zhang X. Effect of simulated N deposition on soil exchangeable cations in three forest types of subtropical China. *Edosphere*, 2009, **19** (2): 189~198

16 Liu L (刘莉), **Li XH (**李晓红), Zhou ZM (周志明), Lin Y (林勇), Lu YY (卢义玉). Effects of simulated acid rain on soil acidification and base cations release of four types of typical soils from the three Gorges reservoir region. *J Chongqing Univ Nat Sci Ed* (重庆大学学报自然科学版), 1998, **30** (8): 63~69

17 Zhang AQ (章爱群), He LY (贺立源), Zhao H'E (赵会娥), Yang JF (杨建峰), Wu ZH (吴照辉), Li SY (李淑艳). **Effects of phosphorus** deficiency and Al toxicity on biological and nutrient characteristics of Maize seedlings. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2009, **15** (1): 48~52

18 Piñeros MA, Shaff JE, Manslank HS, Alves VMC, Kochian LV. Aluminum resistance in Maize cannot be solely explained by root organic acid exudation. A comparative physiological study. *Plant Physiol*, 2005, **137**: 231~241

19 Chen WD (陈文德), Li XW (李贤伟), Peng PH (彭培好). Phytoremediation process of *pinus massoniana* to the soil contaminated with heavy metals. *Sci Silv Sin* (林业科学), 2008, **44** (5): 6~10

20 Qiu RL (仇荣亮), Wu Q (吴箐), Lü YN (吕越娜), Li HR (李海蓉), Ruo RZ (罗荣昭). Releasing and buffering of Al^{3+} under simulated acid rain in south China. *Environ Chem* (环境化学), 1998, **17** (2): 143~147

欢迎订阅 欢迎投稿

《应用与环境生物学报》（双月刊）

刊号：ISSN 1006-687X /CN 51-1482/Q 邮发代号：62-15

《应用与环境生物学报》由中国科学院主管、中国科学院成都生物研究所主办、科学出版社出版，国内外公开发行，是我国应用生物学和环境生物学的核心刊物。主要报道生物学及相关学科在资源开发利用与可持续发展、环境整治、退化生态系统恢复与重建，以及在农、林、牧、医、能源、轻工、化工、食品等领域的基础研究、应用基础研究和应用研究的新成果、新技术、新方法和新进展。包括研究论文、研究简报和本刊邀约的综述或述评。读者对象主要为本学科的科研人员、大专院校师生和科研管理干部。

本刊为国内外多个知名数据库收录（国外如CA、BA、CSA、РЖ、ZR、EP等，国内如CSTPCD、CSCD、CBA、CEPS、《中文核心期刊要目总览》、万方数据、清华光盘、维普科技、《中国知识资源总库·科技精品期刊库》等），曾获得四川省一级学术期刊、中国期刊方阵双效期刊、中国农业期刊金犁奖学术类一等奖、中国精品科技期刊和RCCSE中国核心学术期刊等荣誉。

本刊创刊于1995年，1999年由季刊改为双月刊至今，双月25日出版，每期128页，全铜版纸印刷。每期定价25.00元，年定价150.00元。全国各地邮局（所）均可订阅。新订户可向本刊编辑部补购自1995年以来的各卷期，以及1999年增刊（环境微生物学研究专辑）。

地址：四川省成都市人民南路4段9号 中国科学院成都生物研究所 《应用与环境生物学报》编辑部
邮编：610041
电话：028-85237341（联系人：刘东渝）
传真：028-85237341
E-mail：biojaeb@cib.ac.cn
网址：http://www.cibj.com