

STUDY ON ACIDIFICATION AND
ACIDITY CONTROL MECHANISM
OF TYPICAL RED SOIL



典型红壤酸化的 关键过程与调控机理研究

佟德利 王磊 著



科学出版社

典型红壤酸化的关键过程 与调控机理研究

佟德利 王 磊 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

红壤地区水热资源丰富,生物物质循环活跃,土壤和生物类型多样,具有较高的生物生产潜力和良好的投资效益,是我国南方农业综合开发的重要基地。近几十年来,迅速发展的工业化和城市化所导致的酸沉降增加和农业生产中铵态氮肥的大量施用,使红壤呈加速酸化趋势。土壤的严重酸化不仅不利于作物的生长,而且导致作物产量与品质的下降。解决不合理施肥与酸化控制的矛盾,已经成为我国热带亚热带地区农业可持续发展过程中必须解决的问题。

本书通过室内培养、盆栽试验与田间试验相结合的方式,探讨了不同氮肥、不同利用方式、不同初始 pH、不同作物对红壤硝化作用及酸度的影响,以揭示红壤酸化的根源;同时,选取不同 C/N 与灰化碱含量的有机物料,观测其对土壤酸度的调控能力,确定最能反应有机物料调控强酸性土壤能力的作物指标,以期为强酸性土壤的改良提供参考依据,并对其酸化机制进行阐述,同时对改良后红壤复酸化的风险进行评价。本书的研究结果阐明了改良红壤酸化的发生条件与驱动机制,为完善酸性土壤的改良和维持农田生态系统的健康稳定提供科学依据,可供土壤、农林、环境等领域的专业人员和研究生及农技推广人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型红壤酸化的关键过程与调控机理研究/佟德利,王磊著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-051768-5

I. ①典… II. ①佟… ②王… III. ①红壤-酸性土壤-土壤改良
IV. ①S156.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 027540 号

责任编辑: 马 丹 / 责任校对: 李 影
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕 者

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京崇华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2017 年 4 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 200 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

我国热带亚热带地区（ $10^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ ）广泛分布着红色和黄色土壤，因其在土壤发生和生产利用上有共同之处，统归为红壤系列或富铝化土纲，包括砖红壤、赤红壤、红壤和黄壤等主要类型，总面积 $2.18 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，约占全国总面积的 22.7%。红壤地区气温高、热量和降雨量充沛、自然条件优越，是我国主要粮食产区和热带亚热带经济作物如橡胶、油棕、可可、柑橘、茶叶、油桐、蚕桑等的主要产区，历来在我国农业可持续发展和生态环境建设中发挥着重要作用。

由于热带亚热带地区高温多雨、水热同季，矿物遭受强烈的化学分解和盐基淋失过程，导致 SiO_2 淋失和铁、铝氧化物富集，形成 pH 为 4~5 的铁铝土。20 世纪 50 年代，随着土壤资源调查范围的扩大，特别是红壤地区的调查，带动了土壤酸度本质、土壤交换性盐基组成、土壤氧化还原过程以及土壤黏土矿物组成研究的开展；60 年代起，特别是 70 年代中期之后，先后开展了有关红黄壤表面化学、电学性质以及水合氧化物型表面电荷可变特性及其界面化学行为等领域的研究；自 80 年代起，于天仁院士对可变电荷土壤的酸度做了深入研究和总结，指出土壤酸通常以 H^+ 的形式表现出来，但红壤中的 H^+ 主要是由于 Al^{3+} 的水解而形成的产物，即红壤中交换性酸以 Al^{3+} 为主体。自然条件下，土壤中交换性 H^+ 在总酸度中所占的比例很小的基本原因是，氢质土壤是不稳定的， H^+ 可以自发地与土壤固相的铝化合物包括黏土矿物中的结晶态铝相反应，而释放出等当量的 Al^{3+} ，由此红壤的酸度特征得以明确。近年来，随着工业发展，酸雨、氮肥施用等农业措施对土壤酸度产生较大影响，使得红壤酸化再次成为重要的研究课题。

氮是作物生长中极其重要的营养元素之一，施用氮肥是保障粮食生产安全的根基，在促进农业迅速发展的同时，也引起了一系列环境、生态和资源方面的重大问题，如土壤肥力下降、酸化加剧等。我国是世界上施用氮肥最多的国家，氮肥投入量占全球输入量的 30%。然而，氮肥利用率非常低，损失严重。农业生产中铵态氮肥往往过量施用，经硝化作用产生净质子，导致土壤呈加速酸化趋势。酸害和铝毒导致长江以南红壤地区

作物生长不良甚至减产,通过新型改良剂可以调控土壤酸度,可以使酸化红壤的综合生产能力和经济效益明显提高。为此,本书系统总结了红壤的养分循环、土壤酸化与修复方面的最新研究进展。在总结国内外相关研究工作的基础上,重点阐述根/土界面氮肥行为对红壤酸度的影响,及针对我国红壤酸度特点研发的改良新方法的原理与技术特点。

全书共三篇 13 章,分别综述了氮循环对土壤酸化的影响及酸化土壤的调控改良研究,介绍了根/土界面氮肥行为影响土壤酸化的关键过程,以及研发的新型改良剂对酸化红壤的调控机理与效果。具体而言,第一篇主要阐述红壤酸化的现状、特点和主要原因以及土壤酸化的调控原理与技术。第二篇主要介绍硝化作用驱动下的红壤酸化机制,即氮肥对茶园红壤和农田红壤硝化作用及酸度的影响、氮肥对不同初始 pH 红壤硝化作用及酸度的影响、盆栽条件下氮肥对红壤酸度的影响等三方面内容,重点阐述关于根/土界面氮肥行为与土壤酸化之间关系的研究与讨论;第三篇主要介绍农业废弃物对强酸性茶园土壤的调控机制、秸秆源生物质炭对酸化茶园土壤的改良、复配改良剂对酸化茶园土壤的修复及其调控机制、改良剂对红壤硝化作用和复酸化的影响等四方面内容,重点阐述在已有研究工作基础上研发的新型改良剂调控红壤酸度的机理及其应用。

本书的相关研究得到国家自然科学基金项目(41401336、41601314)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y412201450、Y412201452)、江苏省自然科学基金(BK20130105)、辽宁省教育厅科学研究一般项目及沈阳师范大学博士启动项目的资助,深表感谢!

中国科学院南京土壤研究所徐仁扣研究员、蒋新研究员、马毅杰研究员、章钢娅研究员等诸位先生在研究工作中给予了细致的指导,研究同时得到了南京土壤研究所土壤表面电化学研究室、化学环保室的诸位同仁以及沈阳师范大学李玥莹教授、马纯艳教授、马莲菊副教授和王兰兰副教授的帮助。在此,笔者一并致谢,感谢他们为本书的顺利出版做出的无私奉献。

限于作者的水平,书中还存在疏漏和不足之处,请读者和同行批评指正。

著 者

2016 年 8 月于沈阳

目 录

第一篇 研究背景

第 1 章 红壤酸化的现状与危害	3
1.1 我国红壤酸化现状	3
1.2 红壤酸化特点	4
1.3 土壤酸化的危害	5
第 2 章 土壤酸化的成因	8
2.1 土壤酸化的自然因素	8
2.2 土壤酸化的人为因素	9
2.2.1 酸沉降	9
2.2.2 植物根系酸的分泌	9
2.3 施肥加剧土壤酸化	10
2.3.1 氮肥生物氧化导致的土壤酸化	11
2.3.2 硝化作用及其驱动力	13
第 3 章 酸化土壤的改良与阻控	15
3.1 合理的农艺措施	15
3.1.1 合理的肥料应用与管理	15
3.1.2 合理的水肥管理	16
3.1.3 合理选择作物品种与秸秆还田	16
3.2 土壤酸度调控措施	16
3.2.1 酸化土壤的无机改良原理与技术	16
3.2.2 酸化土壤的有机改良原理与技术	18
3.2.3 酸化土壤的根际改良技术	20

第二篇 硝化作用驱动下的红壤酸化机制

第4章 氮肥对茶园红壤与农田红壤硝化作用及酸度的影响	23
4.1 引言	23
4.2 材料与方法	24
4.2.1 供试红壤	24
4.2.2 培养试验处理	24
4.2.3 样品分析方法	25
4.2.4 土壤微生物基因组 DNA 的提取及定量 PCR 分析	25
4.2.5 数据与图形处理	25
4.3 结果	26
4.3.1 培养过程中土壤 pH 的动态变化	26
4.3.2 无机氮的动态变化	28
4.3.3 净硝化作用	29
4.3.4 红壤中氨氧化微生物的数量变化	31
4.4 讨论	32
4.4.1 硝化作用与土壤 pH 变化的关系	32
4.4.2 硝化作用与土壤性质及肥料品种的关系	33
4.4.3 氨氧化微生物与环境因素的关系	34
4.5 结论	35
第5章 氮肥对不同初始 pH 红壤硝化作用及酸度的影响	36
5.1 引言	36
5.2 材料与方法	37
5.2.1 供试土壤	37
5.2.2 培养试验处理	37
5.2.3 样品分析方法	37
5.2.4 数据与图形处理	38
5.3 结果与讨论	38
5.3.1 无机氮的变化与硝化作用	38

5.3.2	土壤酸度的变化	40
5.3.3	土壤硝化速率与酸化速率及其相互关系	42
5.4	结论	44
第 6 章	盆栽条件下氮肥对红壤酸度的影响	45
6.1	引言	45
6.2	材料与方法	45
6.2.1	供试土壤	45
6.2.2	盆栽试验概况	46
6.2.3	氨氧化细菌富集培养基及培养条件	46
6.2.4	根箱试验概况	47
6.2.5	样品分析方法	47
6.2.6	数据与图形处理	48
6.3	结果与讨论	48
6.3.1	盆栽试验结果与讨论	48
6.3.2	根箱试验结果与讨论	56
6.4	结论	58
第 7 章	金针菇菌糠及其生物质炭对红壤酸度及硝化潜势的影响	59
7.1	引言	59
7.2	材料与方法	60
7.2.1	供试土壤	60
7.2.2	菌糠生物质炭的制备	60
7.2.3	培养试验处理	60
7.2.4	样品分析方法	61
7.2.5	数据与图形处理	61
7.3	结果与讨论	61
7.3.1	添加菌糠及其生物质炭对土壤 pH 的影响	61
7.3.2	添加菌糠及其生物质炭对土壤交换性酸的影响	62
7.3.3	添加菌糠及其生物质炭对土壤无机氮含量及硝化潜势的影响	63
7.4	结论	64

第三篇 土壤酸度改良剂的筛选及酸度调控机理

第 8 章 农业废弃物对强酸性茶园土壤的调控机制	69
8.1 引言	69
8.2 材料与方法	70
8.2.1 供试土壤与有机物料	70
8.2.2 培养试验设计	70
8.2.3 样品分析方法	71
8.2.4 数据与图形处理	72
8.3 结果	72
8.3.1 添加有机物料对土壤 pH 的调节	72
8.3.2 土壤中无机氮含量变化	73
8.3.3 土壤交换性酸与交换性盐基的变化	75
8.4 讨论	76
8.5 结论	78
第 9 章 秸秆源生物质炭对酸化茶园土壤的改良	79
9.1 引言	79
9.2 材料和方法	80
9.2.1 供试土壤	80
9.2.2 供试生物质炭	80
9.2.3 生物质炭的 XRD 图谱	81
9.2.4 生物质炭表面有机官能团	82
9.2.5 生物质炭酸碱滴定曲线	82
9.2.6 试验设计	83
9.2.7 样品分析方法	83
9.2.8 数据处理	83
9.3 结果	84
9.3.1 酸化茶园土壤的 pH	84
9.3.2 酸化茶园土壤中无机氮含量动态变化趋势	84

9.3.3 酸化茶园土壤中水溶性碳含量动态变化趋势	87
9.3.4 酸化茶园土壤交换性质的变化趋势	87
9.4 讨论	88
9.5 结论	91
第 10 章 碱渣与有机物料对酸化茶园土壤的复合修复	92
10.1 引言	92
10.2 材料和方法	93
10.2.1 供试土壤与修复材料	93
10.2.2 培养试验设计	94
10.2.3 样品分析方法	95
10.2.4 数据处理	95
10.3 结果	96
10.3.1 土壤 pH 的变化	96
10.3.2 土壤氮循环对 pH 的影响	97
10.3.3 土壤交换性质的变化	100
10.4 讨论	101
10.5 结论	103
第 11 章 复合改良剂对亚表层土壤酸度的调控	104
11.1 引言	104
11.2 材料与方法	105
11.2.1 供试土壤与有机物料	105
11.2.2 试验设计	105
11.2.3 样品分析方法	106
11.2.4 数据处理	106
11.3 结果与讨论	106
11.3.1 淋溶液的理化性质	106
11.3.2 亚表层土壤 pH 变化	110
11.3.3 亚表层土壤交换性质	111
11.3.4 亚表层土壤无机氮含量	112

11.4 结论	114
第 12 章 茶叶品质改良效果的初步探索	115
12.1 引言	115
12.2 材料与方法	115
12.2.1 供试有机物料	115
12.2.2 试验设计	116
12.2.3 茶叶品质的测定	117
12.3 结果与讨论	117
12.3.1 土壤 pH	117
12.3.2 茶叶品质	118
12.4 结论	121
第 13 章 改良剂对红壤硝化作用和复酸化的影响	122
13.1 引言	122
13.2 材料与方法	123
13.2.1 供试红壤	123
13.2.2 培养试验处理	123
13.2.3 样品分析方法	124
13.2.4 数据与图形处理	124
13.3 结果与讨论	124
13.3.1 无机改良剂对红壤硝化作用和复酸化的影响	124
13.3.2 生物质炭改良对红壤硝化作用和复酸化的影响	128
13.4 结论	132
参考文献	133
后记	151

第一篇

研究背景

第 1 章 红壤酸化的现状与危害

土壤酸度 (Soil acidity) 指土壤酸性的强弱程度, 可用容量指标和强度指标表示。前者指土壤中致酸物质的数量, 后者指土壤酸性的强弱程度。土壤酸度的强度指标包括 pH、pK 和 $\text{pH} \sim 0.5\text{Ca}$ 。pH 是与土壤固相处于平衡状态的土壤溶液中 H^+ 浓度 (活度) 的负对数, 是表征土壤酸碱度的常用指标。pH 低于 6.5 的土壤称为酸性土壤, pH 高于 7.5 的土壤称为碱性土壤, pH 为 6.5~7.5 的土壤称为中性土壤。从世界范围来看, 酸性土壤主要分布在热带、亚热带地区与温带地区。北欧和北美的酸化土壤类型主要为灰化土, 我国的酸性土壤集中分布在长江以南的广大热带和亚热带地区。土壤酸化 (Soil acidification) 指土壤中氢离子数量增加或土壤酸度由低变高的过程, 分为自然酸化和人为酸化两种。土壤酸化是土壤退化的重要表现, 同时会导致作物减产、森林退化、生态环境恶化。

1.1 我国红壤酸化现状

红壤主要分布在世界的热带、亚热带地区, 是生产粮食与热带林木及作物的重要基地。总面积约 $6.4 \times 10^9 \text{ hm}^2$, 占世界陆地面积的 45.2%。我国热带亚热带地区 ($10^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$) 广泛分布着红色和黄色土壤, 因其在土壤发生和生产利用上有共同之处, 统归为红壤系列或富铝化土纲, 包括砖红壤、赤红壤、红壤和黄壤等主要类型。这类土壤主要分布在广东、广西、海南、湖南、江西、贵州、云南、福建、浙江和安徽等 15 个省区, 总面积 $2.18 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占全国总面积的 22.7%。红壤地区气温高、热量和降雨量充沛、自然条件优越, 是我国主要粮食产区和热带亚热带经济作物如橡胶、油棕、可可、柑橘、茶叶、油桐、蚕桑等的主要产区, 历来在我国农业可持续发展和生态环境建设中发挥着重要作用 (赵其国等, 2002; 孙波等, 2011)。

华中和华南地区以红壤为主, 主要集中在湖南、江西、福建、浙江、广东、广西、

海南,黄壤主要分布在四川、贵州、云南高原地区。红壤地区大部分酸性土壤 $\text{pH} < 5.5$, 其中很大一部分土壤的 $\text{pH} < 5.0$, 甚至为 4.5。在我国南方 6 省区(闽、浙、赣、湘、粤、桂)中,酸性土壤的面积大、酸性强。根据第二次全国土地普查资料,我国亚热带地区的福建、湖南和浙江等省 pH 为 4.5~5.5 的强酸性土壤分别占各省土壤总面积的 49.4%、38%、16.9%, pH 为 5.5~6.5 的酸性土壤分别占各省土壤总面积的 37.5%、40%、56.4%, 江西省 $\text{pH} < 5.5$ 的强酸性土壤面积为该省土壤面积的 70.98% (赵其国等, 2002; 孙波等, 2011)。我国南方大部分酸性土壤盐基饱和度较低, 为 25% 左右, 正处于土壤缓冲力较小的范围; 同时, 该地区土壤有机质含量普遍偏低。这些因素使得我国南方大面积红壤、黄壤的酸缓冲力较弱, 容易发生酸化。另外, 由于工业的迅速发展, 酸性气体大量排放, 酸性沉降物对环境的影响不断增加, 造成我国南方地区酸沉降的频率和强度增加。目前, 我国南方黄红壤地区已成为世界上除北美和欧洲之外的第三大酸雨区(赵其国等, 2002)。湖南衡山地区林地土壤酸度 20 年间(1981—2001)土壤 pH 逐年下降, 土壤交换性酸逐年增加, 土壤 pH 降幅最大达 1 个单位(吴甫成等, 2005), 酸沉降是导致衡山地区土壤酸化的主要原因。

近年来, 由于酸沉降和土壤的高强度利用, 我国土壤酸化呈加速发展趋势。研究表明自 20 世纪 80 年代到 21 世纪初, 我国农用土壤普遍发生酸化, 土壤 pH 降幅在 0.13 ~ 0.80 个单位之间; 其中, 301 个 $\text{pH} < 5.50$ 的红黄壤样点土壤平均 pH 由 20 世纪 80 年代的 5.37 (4.40~6.60) 下降至近期的 5.14 (粮食作物, 4.17~6.52) 和 5.07 (经济作物, 3.93~6.44), 20 年间土壤分别 pH 下降了 0.23 和 0.30 个单位, 其中种植经济作物的土壤 pH 降幅明显高于种植谷物的土壤 (Guo *et al.*, 2010)。以茶园土为例, 江苏省的毛麓茶场未种茶的黄棕壤初始 pH 为 5.37, 种植茶树 9 年后降至 4.99 ~ 5.29, 29 年后降至 4.60 ~ 4.65, 80 年后降至 3.62 ~ 4.03; 安徽省祁门县山地茶园, 种植茶树 6 年后红黄壤土壤 pH 为 5.0 ~ 6.3, 19 年后降至 4.06 ~ 4.13, 23 年后降至 3.85 ~ 3.90。不当农业措施, 尤其是氮肥的过量施用, 是导致耕地土壤加速酸化的主要原因。

土壤酸害成为红壤地区农业发展的瓶颈之一, 酸化现象严重则增加了该地区农业发展的阻力。

1.2 红壤酸化特点

土壤自然酸化过程是非常缓慢的, 当降水量大于蒸发量时, 土壤中可以发生淋溶过

程,即进入土壤中的水带着土壤中的可溶性碱性物质沿剖面向下迁移进入地下水,或随地表径流进入地表水。由于 H^+ 的性质非常活泼,当降雨中含有 H^+ 或土壤中有 H^+ 产生时,这些 H^+ 很容易与土壤发生反应而消耗土壤中的碱性物质。这两个过程使土壤中的碱性物质不断消耗,土壤的酸-碱平衡被破坏,土壤逐渐呈酸化趋势(孙波等,2011)。土壤中除了少量的可溶性酸以外,酸性主要是由于固相部分带有负电荷或与溶液进行质子传递。因此,可以把土壤看成一种胶体酸。黏土矿物、有机质和铁铝氧化物都可以起这种作用。黏土矿物是大多数土壤酸的主要载体。硅氧四面体和铝氧八面体中的同晶替代所产生的负电荷可以吸收质子,而变为酸基。另外,晶体边缘面上的硅或铝相接的OH基团,在一定条件下也可表现为酸基,游离铁铝氧化物与质子的关系,依介质的pH条件而定。有机质的羧基、羟基和烯醇羟基,都可以在一定条件下解离,释放质子(于天仁,1987)。红壤的酸度本质是活性铝的存在,红壤中铝的活化度与酸度的关系极为密切,即铝活化度越大,酸度越强,反之亦然。此外,红壤铁的形态也起重要的间接调节作用,当土粒表面被游离氧化铁膜所包被时,铝的活化受到抑制,而在某种条件下,游离铁活化,破坏了胶膜,铝的活化又可能增强。因此红壤氧化铁的活化度与其酸度的关系同样密切(赵其国等,1988)。

土壤本身的性质在某些方面类似于弱酸,同时又存在一定数量的盐基离子,可以看成是由弱酸和弱碱组成的复合体系,这使得土壤对酸碱有一定的缓冲能力,可用pH缓冲容量(pH Buffer Capacity, pHBC)表示,它是指土壤pH增加或降低一个单位所需的碱或酸的量,其数值大小可由土壤的缓冲曲线求得(姜军等,2006; Aitken *et al.*, 1994)。缓冲容量大的土壤对外源酸的抵御能力较强,不易发生酸化;而缓冲容量小的土壤则比较容易发生酸化。红壤的组成决定其酸碱缓冲容量的大小。从矿质部分看,红壤的黏土矿物组成以高岭石为主,阳离子交换量相对较低,对酸的缓冲容量较其他类型土壤小得多。其次,红壤区水热条件较好,有机质易于分解,故其有机质含量较低,因此有机部分对缓冲容量的贡献比较小。再者,土壤胶体的缓冲曲线中缓冲能力较强的部分位于盐基饱和度50%左右,缓冲能力较弱部分位于盐基饱和度25%以下和75%~100%。红壤是盐基不饱和土壤,其盐基饱和度位于缓冲能力较弱的范围(于天仁,1998)。以上三个因素结合起来,造成红壤对酸的缓冲能力较弱,难以抵御酸的输入,易发生酸化。

1.3 土壤酸化的危害

土壤酸化使土壤中的 H^+ 、 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 等毒性元素浓度增加(Zhang *et al.*, 2007),

活性增强,从而影响植物的正常生长。这主要有两个方面的原因,一是土壤 pH 降低使重金属的溶解度增加;二是土壤 pH 降低使土壤对重金属离子的吸附量减小。土壤 pH 对重金属被吸附的影响也有两种机制,一是随着 pH 的提高,可变电荷土壤的表面负电荷增加,对重金属的吸附量增加;另一种机制是随着 pH 的提高,重金属离子的水解作用增强,土壤表面对水解反应形成的金属-羟基离子的吸附亲和力比对游离金属离子的大,因此重金属离子的吸附量随水解作用的增加而增强。

土壤溶液中过量的 H^+ 会影响根膜的渗透性,破坏根膜上的离子选择性载体, H^+ 还与别的离子争夺吸附位,干扰其他离子在根表的传输(孙波等, 2011)。但与 Al^{3+} 的毒性相比, H^+ 的毒性较小。 Al^{3+} 对植物的细胞壁、细胞质膜、液泡膜及细胞分裂产生不良影响(何龙飞等, 1999; 何龙飞等, 2002; Alessa *et al.*, 2001; Delhaize *et al.*, 1995; Hotst, 1995; Lindberg *et al.*, 1993; Ma *et al.*, 2004; Schwarzerova *et al.*, 2002; Tabuchi *et al.*, 2004; Taylor, 1988), 同时, Al^{3+} 使得植物对养分的吸收代谢受阻(何龙飞等, 2000; Calba *et al.*, 1997; Gassmann *et al.*, 1994; Jones *et al.*, 1995; Liang *et al.*, 2001; Macklon *et al.*, 1992; Regel *et al.*, 2003; Rout *et al.*, 2001; Rufty *et al.*, 1995)。因此, 铝毒是酸性土壤地区影响植物生长的主要因素之一(沈仁芳, 2008)。

土壤酸化还导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等营养性盐基离子大量淋失(钱琛等, 2010), 可溶性 Al^{3+} 的增加又与盐基离子竞争土壤表面的吸附位, 加速盐基淋失(于天仁等, 1996)。随着土壤酸化的进行, 土壤 pH 降低, 胶体表面正电荷增加, 净负电荷减少, 土壤阳离子交换量(CEC)下降, 对钙、镁、钾等养分离子的固持能力显著减弱, 由此降低土壤对酸的缓冲能力, 加速酸化进程。例如: 当 pH 低于 3.0 或 3.5 时, 酸雨对我国南方主要土壤类型盐基离子淋溶总量明显增加, 但 pH 高于 3.5 时则影响不显著。此外, 研究表明, 长期酸雨淋洗会导致土壤养分库的损耗, 土壤中某些矿物经酸雨淋洗后发生风化, 释放出盐基离子, 造成土壤养分贫瘠, 这是因为土壤经酸雨淋洗后土壤中交换性盐基的总量加上淋出液中盐基离子总量高于原土壤中的交换性盐基离子总量。土壤酸化严重阻碍了作物对营养元素的吸收(Murata *et al.*, 2002)。例如: 土壤的酸化将直接影响茶树吸收功能。有研究发现, 当土壤 pH 为 5.0~6.0 时, 茶树的根系发达, 生长旺盛, 当 pH 小于 4.0 时, 根尖萎缩, 生长受到抑制, 茶树对氮、磷、钾等营养元素的吸收量急剧下降, 对钙的吸收与土壤 pH 呈显著的正相关, 对硼和钼的吸收与土壤 pH 则呈二次曲线相关, 对铝、锰、锌的吸收与土壤 pH 呈负相关, 在 pH 为 5.0~6.0 时, 吸收量最多。盐基离子与一些微量元素的缺失将影响到茶树营养平衡和茶树的正常生长, 进而影响到茶