

红壤

化学退化与重建

曾希柏 编著

中国农业出版社

红壤化学退化与重建

曾希柏 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

红壤化学退化与重建/曾希柏编著. —北京: 中国农业出版社, 2003.9

ISBN 7-109-08493-0

I. 红... II. 曾... III. 红壤—土壤退化—研究
IV. S156.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 074664 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 贺志清

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 13.5

字数: 240 千字 印数: 1~1 000 册

定价: 25.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)



曾希柏,湖南省双峰县人,博士、研究员。1996年7月毕业于西南农业大学资源环境学院,师从我国著名土壤学家、中国科学院院士侯光炯教授。1998年5月中国农业科学院博士后出站,合作导师刘更另院士。主要从事土壤肥力、土壤生态、农业资源高效利用等研究,先后在《土壤学报》、《生态学报》等刊物发表论文60余篇,参加4部专著写作。

封面设计 王 涛

序

土壤作为一种有限的自然资源，对地球上生命的生息繁衍至关重要。土壤既是矿物质、有机化合物和生命物质的复杂混合物，又不断受到自然的或人为施加的生物、化学及物理因素的相互影响。土壤学的研究对象是一个具有生物活性的、动态变化的复杂自然系统，具有高度非线性和可变性特征。这就决定了土壤学是一门综合的学科，涉及到许多地学、物理、化学、生物学以及生态学等学科领域，许多其他领域内的新技术、新手段也不断在土壤学研究中被采用。

土壤退化是在自然或人为措施影响下，其物理、化学及生物等性质的退化，土壤退化的过程实际上也是土壤肥力和生产力下降的过程。成土母质、气候、生物、地形、时间等成土五因素虽然对自然土壤性质的变化具有十分深刻的影响，但与人类活动比较，这种影响相对要弱得多。通过人类的合理利用与管理，不断改善土壤性质，提高其肥力和生产力，防止土壤退化，不仅是土壤科学研究者的责任和义务，同时也是我国农业和生态环境可持续发展、建设农村小康社会的重要课题。

当前，我国农业进入新的发展阶段，加入 WTO 既给我国农业的发展带来了巨大的机遇，但同时也面临着一系列挑战，农业的区域化、专业化水平低，农产品质量不高、国际竞争力弱、产销脱节、加工比例低、效益较低，是困扰当前我国农业发展的主要问题。如何调整农业结构、提高农民收入，特别是实现党的十六大提出的全面建设小康社会的宏伟目标，是当前农业发展的根本任务，也是土壤学研究的必然选择。但是，由于长期以来，特别是 20 世纪 80 年代以来，我国农业中化肥施用量逐渐增加、有机肥施用量逐渐减少趋势的发展，土壤的退化十分严重，对农业持续发展和生态环境建设带来了一系列影响，必须采取有力措施防止土壤退化，并尽快对已退化土壤进行恢复重建。

红壤是亚热带地区典型的地带性土壤，具有明显的富铝化特征。我国红壤主要分布于长江以南地区，涉及面积 218 万 km^2 ，占国土总面积的 22.7%，在我国农业和国民经济发展中占据十分重要的地位。但是，受高温、高湿、多雨等诸多因素的影响，红壤中化学、生物化学反应十分强

烈，加上土地利用过度、耕作管理不当等原因，红壤的退化，特别是土壤养分含量下降等现象十分严重。红壤退化不仅导致其生产力下降，更重要的是加剧了其水土流失，对农业持续发展和生态环境建设均带来了十分不利的影响。因此，防止红壤退化并对已退化红壤进行恢复重建，不仅对红壤地区农业发展具有十分重要的意义，而且也是土壤学研究的重要内容。

本书以作者在刘更另院士指导下完成的博士后出站报告等为基础，结合近年参加的有关课题及多年工作的资料积累，对土壤化学退化的化学原理及红壤地区旱地、水稻土、自然植被土壤等的化学退化与重建问题进行了系统、深入探讨，其研究结果不仅对防治红壤退化和退化红壤的重建、改善农业生态环境具有十分重要的意义，而且也将在一定程度上推动土壤学基础理论及应用研究的发展。

借此书出版之际，我谨代表中国农业科学院土壤肥料研究所对我国著名土壤学家侯光炯院士、刘更另院士等老一辈科学家致以崇高的敬意。他们雄厚的土壤学基础和丰富的实践经验，值得我们很好地学习和继承；他们严谨的学风和精益求精的科学态度，更是年轻一代土壤科学工作者所必须发扬的科学精髓。

中国农业科学院土壤肥料研究所所长、研究员



2003年7月26日

前 言

土壤是具有生物活性的自然体，土壤肥力的高低主要表现在其生产力状况。土壤肥力高低可用其生理性来表示，它主要是由土壤胶体和土壤生物的特性所决定的。已故著名土壤学家侯光炯院士在其“土壤肥力生物热力学”中，认为土壤胶体的性质或土壤肥力是由土壤的生理性所决定的。随着研究方法和手段的不断发展，以及相关研究的不断深入，土壤，特别是土壤胶体的化学性质随温度的变化而改变的规律，已逐渐被研究者所认识，并在土壤退化防治与退化土壤重建中发挥着十分重要的指导作用。

红壤是亚热带地区具有富铝化特征的主要土壤类型，我国红壤主要分布于长江以南广阔的低山丘陵区，共涉及 13 个省（自治区），土地面积近 218 万 km^2 ，占国土总面积的 22.7%，是我国重要的粮食和渔业、牧业生产基地，也是我国人口最密集的地区之一。但受诸多因素特别是土地利用过度、耕作管理不当等因素的影响，该地区土壤退化，特别是土壤养分含量下降的现象十分严重。据有关资料统计，目前水土流失面积已经达到近 1 亿 hm^2 ，养分贫瘠面积达到 2 000 多万 hm^2 ，土壤化学污染面积达到 300 余万 hm^2 ，酸化土壤面积达到 200 余万 hm^2 ，且土壤普遍偏酸，土壤的总退化面积已经占了该地区土地总面积的一半左右。如何防止红壤退化并对已退化红壤进行恢复重建，是该地区农业发展的重要问题。

土壤的化学退化包括土壤的化学风化、有机质的分解或含量下降、土壤中养分的消耗（包括养分供应比例失调）、土壤酸化及铝毒害作用的产生、土壤盐碱化、土壤矿物的分解以及土壤的化学污染等，是土壤退化的中心环节，也是导致土壤肥力和生产力下降的真正原因。因此，对红壤的化学退化与重建进行系统、深入研究，探讨其原因和机理，是红壤退化研究的中心内容之一。

本书以在刘更另院士指导下完成的博士后出站报告及近年来作者参加的相关课题研究结果为基础，以湘南红壤地区主要类型土壤为研究对象，从土壤化学退化的原理、旱地、水稻土、自然植被土壤等方面对红壤的化学退化与恢复重建问题进行了系统、深入的探讨。书中所涉及的土壤类型实际上已超出了通常所说的红壤，这种处理方法是否合适，还有望广大同

行评价。作者殷切希望这些研究结果对我国红壤地区农业持续发展和农业生态环境建设等能有所参考和借鉴。由于作者水平有限，本书中难免有许多不尽完善之处，恳请各位读者批评指正。

本书的有关研究先后得到了“国家自然科学基金 95 重点项目 (49631010)”、“九五”攻关项目 (96-004-03-12) 和“中国博士后科学基金”的资助，特此致谢。

借本书出版之际，我首先要衷心感谢刘更另院士在我多年的学习、工作中对我无微不至的关怀，感谢中国农业科学院祁阳红壤实验站高菊生、秦道珠、王伯仁以及中国农业科学院资源区划研究所山区室刘国栋、苍荣、邱建军、胡清秀等在相关实验、分析工作中的大力支持和帮助，还要感谢梅旭荣所长、徐明岗博士，以及许许多多关心、支持、鼓励我的老师、同事和朋友们。

作 者

2003 年 7 月

目 录

序

前言

第一章 引言	1
第二章 红壤化学退化原理	5
第一节 土壤的化学退化与培肥	5
一、土壤退化与培肥	5
二、我国土壤退化的主要形式	7
三、土壤的化学退化与培肥	9
第二节 土壤有机质的积累和分解	10
一、有机物质在土壤退化或培肥中的作用	10
二、土壤有机质的来源及积累	11
三、土壤有机质的分解和转化	12
第三节 土壤养分退化	14
一、土壤养分的来源及积累	14
二、土壤养分退化的主要途径	14
第四节 土壤酸化	22
一、土壤 pH 与土壤酸度	22
二、土壤中铝的溶液化学	23
三、土壤对酸碱的缓冲作用	25
第五节 土壤胶体保肥供肥性能的变化	26
一、土壤胶体的特性	26
二、土壤胶体吸附解吸与缓冲能力	29
第六节 土壤的化学风化作用	29
一、土壤黏土矿物类型	30
二、土壤原生矿物的稳定性	30
三、土壤黏土矿物的化学风化	31
第七节 土壤潜育化	33
一、有机质的分解与累积	34

二、铁锰的还原淋溶	34
三、伴生过程	35
第八节 土壤的化学污染	36
一、土壤污染物的来源	36
二、污染物在土壤中的吸附	37
三、污染物在土壤中的迁移	38
第九节 大量施用化肥对红壤化学退化的影响	39
一、化肥对土壤的可能污染	39
二、化肥中养分离子的平衡与转化	40
三、化肥中伴随离子的影响	41
第三章 红壤旱地的化学退化与培肥	43
第一节 利用方式对土壤化学性质的影响	43
一、不同利用方式下土壤 pH 的变化	44
二、不同利用方式下土壤有机质的变化	45
三、不同利用方式对土壤养分的影响	45
第二节 施肥对土壤化学性质的影响	46
一、土壤酸度变化	47
二、土壤有机质变化	49
三、土壤氮素变化	53
四、土壤磷素变化	55
五、土壤钾素变化	58
六、土壤铜、铁、锰、锌等的变化	61
七、土壤交换性盐基变化	63
八、土壤吸附解吸特性的变化	64
第三节 母质类型对旱地土壤化学性质的影响	69
一、对土壤酸度影响	70
二、对土壤有机质的影响	72
三、对土壤养分的影响	73
第四节 红壤旱地季节性干旱的防御措施	75
一、增加植被覆盖度, 营造“绿色水库”	75
二、修建集雨工程	76
三、合理轮作和选用抗旱作物品种	77
四、实行旱地覆盖或施用抗旱保水剂	77
第四章 水稻土的化学退化与培肥	79
第一节 有机肥和化肥对水稻土化学性质的影响	79

一、对土壤 pH 的影响	80
二、对土壤有机质的影响	81
三、对土壤养分的影响	84
第二节 母质类型对水稻土化学性质的影响	87
一、对水稻土酸度的影响	87
二、对水稻土有机质的影响	88
三、对水稻土氮、磷、钾等养分含量的影响	89
四、对水稻土交换性能的影响	90
五、对水稻土铁形态的影响	91
六、对水稻土黏土矿物的影响	92
第三节 肥料中陪伴离子对水稻土化学性质的影响	94
一、对土壤有机质的影响	94
二、对土壤养分的影响	95
三、对土壤交换性阳离子的影响	97
四、对土壤吸附解吸性能的影响	98
五、对土壤缓冲能力的影响	100
六、阴离子（陪伴离子）类型与水稻土化学性质的变化	102
七、水田或旱土对不同形态养分的适应性	104
第四节 稻田耕作制度对土壤化学性质的影响	105
一、对作物产量的影响	106
二、对土壤有机质的影响	107
三、对土壤养分变化的影响	109
第五章 自然植被下土壤的化学退化与培肥	113
第一节 自然植被类型对土壤化学性质的影响	113
一、自然植被类型对土壤 pH 的影响	114
二、对土壤有机质的影响	115
三、对土壤养分的影响	116
第二节 自然植被刈割对土壤化学性质的影响	117
一、对土壤剖面构型及容重的影响	118
二、对土壤有机质的影响	120
三、对土壤氮素的影响	122
四、对土壤磷素的影响	124
五、对土壤钾素的影响	125
六、对土壤铜、铁、锰、锌状况的影响	125
七、对土壤酸度的影响比较	127
八、对土壤交换性盐基的影响	127

第三节 自然植被覆盖土壤人工开垦后化学性质的变化	128
一、自然植被覆盖土壤人工开垦对化学性质的影响	128
二、红壤地区气候条件下自然植被的演变	130
三、植被的覆盖状况与土壤性质	131
四、自然植被的刈割与保护问题	132
第四节 自然和耕作状况下红壤化学性质的差异	133
一、土壤 pH、有机质及养分状况的比较	134
二、土壤对 H_2PO_4^- 的吸附解吸比较	135
三、土壤对钾素的缓冲能力	137
四、土壤黏土矿物组成	138
第六章 土壤污染及其防治	140
第一节 土壤污染物的来源及类型	140
一、土壤污染物的来源	140
二、土壤污染物的类型	141
第二节 土壤污染及其影响因素	142
一、土壤污染的定义和指标	142
二、土壤污染与危害的特点	143
三、土壤环境污染发生类型	144
四、影响土壤污染的主要因素	145
五、我国土壤污染的典型事例	146
第三节 土壤污染对植物生长的影响	148
一、重金属污染对植物生长的影响	149
二、几种典型无机离子对植物生长的影响	154
三、农药污染对植物生长的影响	164
四、污泥对植物生长的影响	165
五、化肥污染对植物和环境的影响	166
第七章 红壤化学退化的防治对策	169
第一节 红壤退化的防治	169
一、采取合理的土壤利用方式	170
二、对土壤进行合理管理	171
三、采取针对措施,克服不良因子的影响	173
四、配合施用土壤结构改良剂	174
第二节 红壤污染的防治	175
一、重金属污染的防治	175
二、化学农药污染的防治	180

三、污泥对土壤污染的防治	184
四、土壤环境放射性污染的控制与防治	186
第三节 植物修复技术及其应用	187
一、植物修复技术的提出与发展	188
二、超富集植物对重金属的移除作用	191
三、主要重金属超富集植物	192
四、重金属超富集植物的机制	194
参考文献	196

1

第一章

引言

土壤既是独立的历史自然体，也是易受人类活动影响，并为人类提供食物的自然资源，它是地球中处于大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互交叉的圈层，是联系有机界和无机界的中心环节，也是结合地理环境各组成要素的重要环节。在农业上，土壤既是作物地上部分的支撑体，也是作物生长的介质及水分和养分的重要来源。同时，土壤还是外来水分和养分的重要缓冲库，通过其缓冲作用防止外来养分的流失，增加其植物有效性。当然，在环境研究中，土壤还是环境污染物质的净化库，通过土壤对各种离子的吸收和固定等作用，降低污染物质的有效性，防止其导致更大范围的污染。

土壤退化与培肥是土壤在自然或人为因素作用下，其肥力或生产力的两种不同的发展方向。在这个过程中，如果土壤肥力上升、生产力提高，则意味着土壤是处于进化或培肥阶段；反之，则土壤处于退化阶段。土壤退化一般包括物理退化、化学退化和生物退化，如土壤养分含量下降或比例失调、土壤酸化或盐碱化、土壤沙化或黏化、土壤潜育化、土壤污染等。因此，土壤退化意味着其肥力或生产力下降、耕性变差、缓冲力降低等，并直接影响作物的产量和品质。当前，随着我国人口增加和耕地面积减少两种不可逆转趋势的发展，人地矛盾日益尖锐，对土地过度利用的现象时有发生，如草原过牧、耕地过度利用等，加上不合理的施肥（如过量施用化肥或化肥施用比例不当等）、耕作管理不当及污染物的肆意排放等人类活动，使土壤退化的现象呈日趋严重的趋势，对我国农业和农村经济，特别是土壤生产力的发展带来了十分不利的影响。因此，防治土壤退化、进行退化土壤的恢复重建与培肥，是我国农业发展新阶段的重要任务之一。

红壤是亚热带地区具有富铝化特征的主要土壤类型，是广泛分布于热带、亚热带地区的典型地带性土壤。该地区年平均气温达 $15 \sim 28^{\circ}\text{C}$ ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温一般在 $5\,000^{\circ}\text{C}$ 以上，年降水量 $1\,200\text{mm}$ 以上，但受季风气候的控制，该地区水热的季节分布很不平衡，夏季炎热潮湿，冬季温凉干旱，干湿季十分明显，红壤即是在此气候条件下富铝化和生物富集化两种过程长期作用下形成的。其中富铝化过程是红壤形成的基础，也是导致红壤具有酸、黏、板、瘦等特性的重要原因；生物富集化过程则是红壤在此气候条件下肥力能够不断发展的重要前提。上述两种作用，也导致了红壤土层深厚、脱硅富铝作用强烈、铁游离度高、风化淋溶作用强、黏粒及次生矿物含量高等显著特点。

在红壤的富铝化过程中，高温高湿促进了成土母质中可溶成分的流失，碳酸钙亦因从土体淋失而不复存在，最复杂的硅酸盐类也发生铁铝和硅的分离。在初期阶段的中性淋溶过程中，硅酸流失，铁铝相对积累，其特点是风化壳厚、黏粒含量多、胶体品质差、土壤大多为酸性至强酸性反应，这就是红壤特有的富铝化作用。由于有大量游离氧化铁的存在，因此，红壤一般呈红色。

虽然高温高湿条件有利于红壤的形成，但即使是在同样的条件下，因母质的差异，矿物的分解程度与淋溶强度也并不完全一致。如板页岩红壤、花岗岩红壤、第四纪红壤进行比较，其 pH 分别为 4.6、5.7 和 4.0，土壤有机质含量分别为 2.00、1.49 和 3.93g/kg ，土壤代换性酸总量分别为 2.46、0.24 和 6.24mmol/kg ，土壤阳离子代换量分别为 39.2、17.8 和 73.3mmol/kg ，土壤盐基饱和度分别为 37.0%、86.6% 和 33.1%。很显然，上述 3 种母质发育的土壤比较，第四纪红壤中矿物的分解较彻底、淋溶作用更强烈，而花岗岩红壤中则相对较弱。

我国红壤主要分布于长江以南广阔的低山丘陵区，其范围大致在北纬 $24^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 之间，包括江西、福建、湖南、浙江等省的大部分，广东、广西、云南等省（自治区）的北部，以及江苏、安徽、贵州、湖北、四川等省的南部，共涉及 13 个省（自治区）。上述省（自治区）的土地面积近 218万 km^2 ，占国土总面积的 22.7%，是我国重要的粮食和渔业、牧业生产基地，也是我国人口最密集的地区之一。但是，受诸多因素，特别是土地利用过度、耕作管理不当等因素的影响，该地区土壤退化，特别是土壤养分含量下降的现象较为严重，已经严重影响、甚至制约了该区域农业的持续发展。据有关资料统计，目前该地区水土流失面积已经达到近 1亿 hm^2 ，养分贫瘠面积达到 $2\,000\text{多万 hm}^2$ ，土壤化学污染面积达到 300 余万

hm², 酸化土壤面积达到 200 余万 hm², 且土壤普遍偏酸, 土壤的总退化面积已经占了该地区土地总面积的一半左右。所以, 深入开展有关红壤退化的研究, 探明其退化原因和机理, 并在此基础上建立起一套行之有效的防止红壤退化和进行退化红壤恢复重建的措施, 已成了该地区土壤学研究和农业持续发展的当务之急。

虽然有关土壤退化的研究很多, 土壤化学退化的研究也早在 20 世纪 60 年代即有过报道, 但相关问题的系统研究还较少。直到 20 世纪 90 年代, Logan, T.J. (1990) 在其论文“Chemical Degradation of Soil”中, 对土壤化学退化的内容、退化过程、研究现状、研究方法及有关防治措施等进行了较系统的探讨, 同时还列举了土壤化学退化的若干实例, 认为土壤化学退化的内容主要包括土壤的化学风化、土壤有机质的积累和分解、土壤养分的退化、土壤酸化、土壤中铝的毒害作用、铁锰的氧化还原、土壤矿物的分解及化学退化土壤的恢复重建等方面。从现在的情况来看, 这些内容虽然已概括了土壤化学退化的主要问题, 但显然还有待进一步完善和补充。此后, Nambiar, K. K. M、Panda, N.、Singh, N. T. 等 (1996) 又分别对土壤的酸化、盐渍化及肥力衰退等化学退化现象作了相应的研究, 并根据其研究结果, 提出了防治相应类型化学退化的具体措施, 而此外的大多数研究, 则主要是集中在土壤养分的变化等方面。

在我国, 有关土壤化学退化的研究目前主要是集中在土壤养分贫瘠化、土壤酸化和土壤的化学污染等方面, 其中有关土壤养分贫瘠化(或土壤养分退化)的研究是最多的, 在与红壤化学退化有关的研究中, 从 20 世纪 60 年代起朱兆良等就对土壤氮素变化、鲁如坤和蒋柏藩等对土壤磷素、谢建昌等对土壤钾素、刘铮等对土壤微量元素的变化进行了研究, 但当时主要是从土壤养分变化角度来研究的, 并非针对土壤退化及培肥进行; 而进入 20 世纪 90 年代以来, 孙波等 (1995) 对红壤养分贫瘠化的综合研究, 于天仁等 (1996 年) 对土壤酸化及有关机理的研究, 刘更另、陈同斌等 (1985、1993、1996) 对土壤化学污染的研究, 都具有较强的代表性。但是, 关于红壤在不同施肥及管理等措施下的化学退化与培肥等的系统研究, 目前尚未引起足够的重视。

本书首先将对土壤退化, 特别是土壤化学退化的有关原理及过程进行系统论述和总结; 同时, 利用刘更另院士在中国农业科学院红壤试验站(湖南祁阳)和山区试验站(湖南冷水滩)设置的若干长期定位试验, 分别对 3 种红壤——第四纪红壤、花岗岩红壤和紫色土在不同的施肥(等量稻草或化肥)长期影响下, 水稻土长期施用不同阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})