

土壤生态研究

Researches on Soil Ecology

杨方勤 张健 等著

Edited by Yang Wanqin & Zhang Jian



四川出版集团 四川科学技术出版社

序

在全球环境变化影响下,人类的生存环境受到严重的挑战,其中森林退化、水土流失加剧、环境污染、土地荒漠化和干旱化以及石漠化等生态环境退化问题又特别突出,已经成为制约人类经济和社会可持续发展的最大障碍。中国从 20 世纪 70 年代末开始,采取改革开放的政策,仅用 30 年时间就走完了发达国家上百年的经济发展历程。但在经济高速发展的同时,其生态环境也遭受到不同程度的破坏,如何从中国国情出发,尽快从生态学理论上寻求改善我国生态环境退化状况的依据,同时按科学发展观,选择和实施经济可持续发展的道路,是国家稳定发展面临的、急需解决的重大任务之一。土壤生态学是生态学领域最重要的分支学科,应当为国家、为全球做出其他学科所不能替代的贡献。

土壤生态学是土壤学、生态学、生物学和环境科学等的交叉学科之一。我国关于土壤生态学的研究,最近一些年来愈来愈活跃。除了有很多高水平的研究论文发表外,陆续问世的几部土壤生态学专著,也是显著的标志,其中以杨万勤教授为首的几位青年学者共同撰写出版的这部《土壤生态研究》的专著就是这一领域的最新研究成果。

我认为这本专著主要有以下几个特点:(1)以现代生态学理论为指导,分别从农业(耕地)生态系统、草地生态系统、湿地生态系统、污染生态系统等子系统,比较全面和系统地论述了土壤生态系统的结构、功能及可调控技术。(2)以近些年在土壤生态学问题的典型研究成果为基础,如根据三峡库区农业生态系统、金沙江干热河谷稀树草灌系统、川西亚高山森林生态系统、若尔盖高原湿地系统等研究,所取得的大量第一手数据资料,深入分析和阐述了各类土壤生态系统的特点。(3)以青年学者对科学问题的敏锐眼光所发现并获得的科研成果中,有多方面的创新,如关于人口密集区的低山丘陵区土壤重金属和农药污染的时空特征及环境效应;退化土壤生态系统和污染土壤生态系统的生态修复;土壤生态系统的汇/源格局及驱动机制;土壤酶活性与土壤生态对气候变化的响应机理等。(4)这部专著既有土壤生态学学术理论问题的探讨,又有很多当前急需解决的生态环境治理的实际问题的案例分析;既有宏观的环境生态系统的研究,又有微观的如微区环境、土壤动物、土壤微生物、土壤酶活性等的研究;既有区域退化土壤生态防治途径的分析,又有具体的退化土壤生态修复技术试验研究结果等。

本书反映了当前土壤生态学研究的最新进展,为我国 21 世纪生态环境建设的国家需求问题提供了土壤生态学专业方面的科学依据,是一部有重要理论和实践应用价值的专著,是土壤学、地理学、生态学、生物学、环境科学等多门学科专业人员的很有价值的参考书。

本书的青年作者们恰恰都有一位共同的导师，他就是知名的土壤生态学家宋光煜教授。这本书既是献给国家发展战略需求的学术专著，又是献给宋光煜教授 70 华诞的一份厚礼。这也是宋光煜教授 40 多年来成功教书育人最有说服力的证明。

宋光煜教授现为西南大学教授、博士生导师，中国土壤学会顾问；曾担任西南农业大学资源与环境学院院长，中国土壤学会常务理事，重庆市土壤学会理事长；曾获部、省二、三等科技进步奖 6 项，编写教材和专著 4 部，撰写学术论文 60 余篇。宋光煜教授培养了一大批土壤学高层次专业人才。他忠诚爱国、治学严谨、学风正派、谦和厚道、艰苦朴素，是一位受到学术界和同行们尊重的良师益友。借此机会，在祝贺他 70 岁生日之时，向他表达我们的深切敬意！并祝福他健康长寿！继续为国家和人民做贡献。

我们为这本书的出版感到高兴的同时，也使我们对我国的青年学者充满了希望。希望他们继承老一辈科学家的好传统，戒骄戒躁，再接再厉，勇攀科学高峰，为我国科学事业的发展做出更大的贡献！

何毓蓉

（中国科学院成都山地所研究员、博士生导师）

2007 年 12 月于成都

前 言

日益严重的全球气候变化、森林面积锐减、土壤退化加速、水土流失面积扩大、区域性和复合性环境污染负荷增加、生物多样性丧失加剧等全球性和区域性生态与环境问题并没有因为人类社会迈入 21 世纪这一新的历史纪元和 20 世纪世界经济高速发展所取得的成就而得到有效遏制,土壤荒漠化、干旱化和石漠化,温室气体排放,土壤、水体和大气环境污染,生物入侵,森林面积缩小和功能退化等生态环境问题及其与经济发 展的耦合作用仍然是制约人类经济社会可持续发展的重要障碍。

受中国自然生态与环境的脆弱性和地区发展的不平衡以及巨大的人口压力等的限制,当中国用 20 多年的时间走完发达国家上百年的发展历程后,在经济社会取得高速发展的同时,生态与环境也遭受了严重的破坏。温室气体排放量大、土壤重金属和持久性有机物质 (POPs) 污染、水质恶化、大气污染、水土流失、土壤荒漠化和干旱化以及石漠化、森林整体质量较差等一系列的区域性和复合性生态环境问题成为 21 世纪我国经济和社会可持续发展的重要瓶颈,是我国政府和科学家不可回避的重大科学和技术问题。作为一门土壤学、生态学、生物学和环境科学等交叉整合的新兴边缘学科,土壤生态学的发展和成熟可望为解决这些生态与环境问题提供重要的理论依据和技术支撑。结合中国生态环境的现状与发展趋势,发展中国特色的土壤生态学理论体系、研究框架和技术体系是我国土壤生态学家在新的历史纪元中的神圣使命。

中国的土壤生态研究起步于 20 世纪 70 年代末期。虽然起步较晚,但经过我国土壤学家和生态学家 30 多年的辛勤耕耘,目前已初步形成了具有中国特色的土壤生态学理论体系和研究框架,其研究对象已经覆盖了森林、农田、草地和湿地,其研究领域已经从以土壤生物群落的结构和功能延伸到土壤生态系统恢复重建、区域污染土壤生态修复、土壤生态系统对气候变化的响应以及土壤生态系统在减缓气候变化中的作用和技术等方面,其研究成果为我国的农业清洁生产、污染土壤防治、农田水利工程、退化生态系统的恢复与重建以及退耕还林(草)工程、天然林资源保护工程、长江防护林工程等一系列的国家大型生态工程建设项目提供了有力的科技支撑。

本书献给知名的中国土壤生态学家宋光煜教授。这是因为他对土壤生态学做出了重要贡献,因为他多年来坚持教书育人,培养了一批年轻的和成熟的土壤生态科研人才和土壤生态建设管理人才,因为他对中国主要地区,特别是长江上游地区土壤生态建设和经济发展所做出的巨大贡献。

为表达对恩师 70 华诞的祝贺,也为庆祝宋光煜先生对中国土壤生态学和长江上游土壤生态建设所做出的贡献,2007 年 1 月 20 日,他的硕士和博士研究生们倡议为祝贺恩师这一特别的生日出版一部《土壤生态研究》专著。不到一年的时间里,恩师的学生及其所在的研究团队以他们正在进行的科学研究工作和翔实的第一手资料完成了土壤生态系统的结构和功能、农业土壤生态、森林土壤生态、草地土壤生态、湿地土壤生态、污染土壤生态、土壤生态恢复及土壤生态与全球变化等八章的撰写,完成的内容覆盖了当前我国土壤生态研究的主要研究领域和主要研究对象。这部专著在相当程度上反映了恩师在培养土壤生态学高级科研和管理人才方面的系统性和多样性。

宋光煜教授,博士生导师,国务院特殊津贴获得者,中国土壤学会顾问,原西南农业大学资源与环境学院院长,中国土壤学会常务理事,重庆市土壤学会理事长。1960 年毕业于西南农业大学土壤农化系,后留校历任助教、讲师、副教授、教授等职。长期从事土壤学、土壤改良学、土壤生态学的教学和科研工作,先后承担国家级和省部级科研项目 20 余项,获部、省二、三等科技进步奖 6 项,编写教材和专著 4 部,撰写学术论文 60 余篇。1995 年担任博士生导师后,重点培养土壤生态学高层次人才,在开展金沙江干热河谷退化土壤生态的修复与重建研究、根际土壤系统微生物定殖与繁衍研究、若尔盖高原湿地生态系统的研究和丘陵区土壤侵蚀生态工程建设等研究中,教授的博士生们获得了良好的学习、锻炼机会,他们撰写的多篇论文在国内外学术刊物上发表,他们现已成为科研、教学和管理部门的骨干力量,为我国土壤生态学科的建设与发展及经济建设发挥了重要作用。宋光煜教授治学严谨,学风正派,重视理论与实践相结合,重视学科建设,是一位优秀的土壤生态学家和良师益友,因而受到学术界和同行的尊重。

本书共分八章,第 1 章以国内外已有的研究论述和编写者的研究成果为基础,论述了土壤生态系统的结构和功能;第 2~5 章分别以编写者取得的科研素材(三峡库区农业面源污染及其对马铃薯晚疫病的影响、巨桉人工林土壤动物生态、亚高山森林土壤微生物动态、若尔盖高原湿地土壤有机碳动态)为例,重点阐述了不同类型土壤生态系统的结构和功能及可能的调控技术;第 6 章以低山丘陵区土壤重金属和农药特征为研究案例,重点阐述了土壤生态系统的重金属和农药残留污染的时空特征及环境效应;第 7 章重点阐述了退化土壤生态系统和污染土壤生态系统的生态修复技术和措施;第 8 章阐述了土壤生态系统的汇/源格局及驱动机制,论述了土壤生态系统结构和功能对气候变化的响应机制,以亚高山森林土壤有机层酶活性对气候变化的响应为案例,揭示了高寒森林土壤生态对气候变化的响应机理。这部专著反映了当前土壤生态研究的主要研究领域和主要研究对象的最新成果,其出版将为 21 世纪土壤生态学的学科发展做出相应的贡献。

本书的出版得到国家自然科学基金项目(No. 30471378, 30771702)、“十一五”国家科技支撑计划课题(No. 2006BAC01A11)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目、四川省公益性重大项目(2007NGY006)、教育部重点科研项目、四川省杰出青年基金(07JQ0081)、四川省

教育厅国家自然科学基金预研项目、四川农业大学人才引进项目等的资助。特此致谢！

由于我们的学识和水平有限，经验缺乏及受学科背景的限制，书中难免存在观点和认识上的不足和不妥之处，恳请专家和读者批评指正！

杨万勤

2007年11月于雅安

目 录

序	1
前 言	1
第 1 章 土壤生态系统的结构和功能	1
1.1 土壤与土壤生态系统	1
1.2 土壤的物理结构和环境	2
1.3 土壤的化学特性和功能	10
1.4 土壤有机质	16
1.5 土壤的养分组成和有效性	19
1.6 土壤生物群落的结构和功能	25
第 2 章 农业土壤生态	32
2.1 农业土壤的生产与生态功能	33
2.2 农业土壤微生物群落及其调控因素	36
2.3 土壤动物群落及其调控因素	48
2.4 土壤酶及其生态功能	55
2.5 农业土壤生态系统的物质循环	58
2.6 研究案例 ——三峡库区农业面源污染及其对马铃薯晚疫病的影响	67
第 3 章 森林土壤生态研究	80
3.1 森林土壤生态学研究进展	80
3.2 森林土壤动物群落的结构和功能	88
3.3 森林土壤微生物群落的结构和功能	95
3.4 森林土壤酶	104
3.5 森林土壤食物链(网)	114
3.6 研究案例 1 ——巨桉人工林土壤动物生态研究	123

3.7 研究案例 2	
——亚高山森林土壤微生物生态研究	131
第 4 章 草地土壤生态	145
4.1 土壤生物群落的组成及相互关系	145
4.2 草地土壤生物群落的生态功能	146
4.3 草地土壤生物群落组成	148
4.4 草地土壤生物多样性及研究方法	148
4.5 草地土壤生物群落结构	151
4.6 草地土壤生物群落功能	152
4.7 草地土壤生物群落与环境的关系	153
4.8 退化草地土壤生态系统的恢复与重建	154
4.9 研究展望	160
第 5 章 湿地土壤生态	
——以若尔盖高原湿地土壤有机碳动态为例	162
5.1 研究背景	162
5.2 研究区域的生态环境条件	163
5.3 材料与方法	168
5.4 结果与分析	172
5.5 结论与讨论	184
第 6 章 污染土壤生态	188
6.1 污染土壤生态学的定义	188
6.2 土壤污染的种类及其生态环境效应	189
6.3 国内外研究进展	195
6.4 存在的问题与挑战	201
6.5 研究案例	
——以四川省低山丘陵区(五通桥区)为例	202
第 7 章 土壤生态恢复	237
7.1 土壤退化	238
7.2 土壤生态退化的概念及类型	239
7.3 退化土壤的生态恢复	244
7.4 重金属污染土壤的修复	249

7.5 土壤持久性有机污染物的降解	252
7.6 无机污染物的人工修复	256
7.7 酸性和碱性土壤改良	261
7.8 矿区土壤的生态修复	264
第8章 土壤生态与全球气候变化	270
8.1 土壤生态系统的碳库	271
8.2 土壤碳汇	281
8.3 土壤生态系统的碳排放	288
8.4 土壤生态系统碳源/汇格局及驱动机制	291
8.5 土壤生态系统结构和功能对气候变化的响应	298
8.6 研究案例 ——亚高山森林土壤有机层酶活性对模拟气候变化的响应	306
8.7 研究展望	327
主要参考文献	329

Contents

Preface	1
Introduction	1
Chapter 1 Structure and function of soil ecosystem	1
1.1 Soil and soil ecosystem	1
1.2 Physical structure and environment of soil	2
1.3 Chemical features and function of soil	10
1.4 Soil organic matter	16
1.5 Soil nutrient composition and its availability	19
1.6 Structure and function of soil biotic community	25
Chapter 2 Agricultural Soil Ecology	32
2.1 Productivity and ecosystem function of agricultural soil	33
2.2 Microbial community and regulation factors in agricultural soil	36
2.3 Faunal community and regulation factors in agricultural soil	48
2.4 Soil enzyme and their ecological significances	55
2.5 Nutrient cycles in agricultural soil ecosystem	58
2.6 Case	67
Chapter 3 Forest Soil Ecology	80
3.1 Advances in forest soil ecology	80
3.2 Structure and function of forest soil faunal community	88
3.3 Structure and function of forest soil microbial community	95
3.4 Forest soil enzyme	104
3.5 Food chain (web) in forest soil	114
3.6 Case 1	124
3.7 Case 2	123

Chapter 4 Grassland Soil Ecology	131
4.1 Composition of soil biotic communities and their interactions	145
4.2 Ecosystem function of soil biotic community in grassland soil	145
4.3 Composition of soil biotic community in grassland	148
4.4 Biodiversity and its method in grassland soil	148
4.5 Structure of soil biotic community in grassland	151
4.6 Function of soil biotic community in grassland	152
4.7 Relationships of soil biotic community with environmental factor in grassland ..	153
4.8 Restoration and reconstruction of degraded grassland soil ecosystem	154
4.9 Perspectives	160
 Chapter 5 Wetland Soil Ecology	
—a case from dynamics on soil organic carbon in Zoige Wetland	162
5.1 Background	162
5.2 Ecological and environmental condition in the study region	163
5.3 Materials and Methods	168
5.4 Results and analysis	172
5.5 Discussions and Conclusions	184
 Chapter 6 Pollution Soil Ecology	188
6.1 Definition of pollution soil ecology	188
6.2 Soil pollutants and their environmental effects	189
6.3 Advances	195
6.4 Challenges	201
6.5 Case	
—from hilly region in Sichuan	202
 Chapter 7 Soil Ecological Restoration	237
7.1 Soil degradation	238
7.2 Definition soil ecological degradation	239
7.3 Ecological restoration on degraded soil	244
7.4 Bioremediation on soil polluted by heavy metal	249
7.5 Decomposition of persistent organic pollutants (POPs) in soil	252
7.6 Artificial remediation on inorganic pollutants in soil	256

7.7	Improvement on acid and alkali soils	261
7.8	Ecological remediation on mine soil	264
Chapter 8	Soil Ecosystem and Global Climate Change	270
8.1	Carbon pool in soil ecosystem	271
8.2	Soil carbon sink	281
8.3	Carbon emission in soil ecosystem	288
8.4	Patterns on carbon source/sink in soil ecosystem and their forcing mechanisms	291
8.5	Responses of the structure and function of soil ecosystem to climate change	298
8.6	Case ——Response of enzyme activity in soil organic layer of subalpine forest to simulated climate change	306
8.7	Perspectives	327
References		329

第 1 章 土壤生态系统的结构和功能*

经典生态学认为,土壤是陆生生物群落生长繁衍的基地,许多环境因素都是通过对土壤生态系统的直接或间接作用而对地上/地下生物群落的生长与繁衍产生影响的(Russell, 1973)。土壤圈理论认为,土壤是陆地表面的疏松表层,是岩石圈、大气圈、水圈和生物圈之间交互作用的产物(Mattson, 1932),是生物与非生物之间进行物质循环和能量交换的最为重要的生态界面,是地圈系统中进行物质循环和能量交换的最活跃和最重要的圈层,支撑和调节着生物过程,为植物生长提供了养分、水分和适宜的物理条件,决定着自然植被的分布和演替,影响到大气圈的物质组成和水热平衡(杨万勤等, 2006)。从土壤的形成与演替来看,土壤并不是一个孤立的系统,而是不断与岩石、大气、生物及水进行物质和能量交换的动态系统(杨万勤等, 2006)。从土壤生态学观点来看,土壤本身也是一类复杂的生态系统——土壤生态系统,它是由土壤物理化学要素、土壤生物群落、植物根系以及环境因素等生物和非生物因素遵循一定的物流和能流模式组成的有机功能整体(杨万勤等, 2000),与农林牧副渔的安全生产、全球气候变化、水土流失与水源涵养、污染物质降解、生物多样性保护等密切相关。过去 30 多年,土壤学和生态学的研究成果使我们对土壤的认识和研究逐步上升到生态系统水平,已经认识到土壤不仅是植物生长的基础和生态因子,而且是地球系统中最具活性的组成部分,在全球气候变化减缓、生物多样性保护、水土保持和水源涵养等方面都具有显著的和不可替代的作用和地位。因此,土壤生态系统的结构和功能是土壤生态研究的基础。

1.1 土壤与土壤生态系统

土壤是由生物、气候、母岩、地形和时间等成土因素经过物理风化、化学风化和生物风化等综合作用形成的地球陆地疏松表层,是由固、液、气三相物质组成的疏松多孔体,是植物生长的基础和绝大多数生物栖息和繁衍的场所。不同的成土因素及其决定的成土过程的组合决定了地球上陆地表面多样性的土壤类型。

*本章由杨万勤、张健、黄从德编写。

固、液、气三相物质的比例决定了土壤肥力,从而成为决定土壤生产力的重要因素之一。一般而言,土壤矿物质的比例占总体积的45%左右,土壤空气占总体积的20%~30%,土壤水分占总体积的20%~30%,而生物体约占总体积的5%左右(杨万勤等,2006)。但三相物质的组成与比例是植被、气候、土壤母质、地形和成土时间等因素综合作用的结果,并随着主导因素的变化而存在很大差异。例如,在温暖湿润地区,枯枝落叶和粗死木质残体分解速率较快,生物元素周转迅速,土壤淋溶作用强烈,因而森林地表的枯枝落叶层较薄,淋溶层较厚, $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比较小,盐基含量较低;而在高寒地区,受低温的限制,有机物质分解速率较为缓慢,生物元素周转缓慢,生态系统以生物元素累积为主,土壤有机层一般较厚,土壤矿质层的 $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值和盐基含量较高。

土壤生态系统是以土壤为中心,并通过物质和能量交换与生物圈、岩石圈、水圈和大气圈相联系的有机无机复合体,其组成与结构主要取决于生物过程(Lavelle & Spain, 2001)。土壤生态系统由生物系统、土壤系统和环境系统三部分组成。生物系统由土壤大、中、小型动物群落、土壤微生物群落、根系、地下茎、果实(种子)及凋落物等组成;土壤系统由矿质元素、土壤水分、有机质、胶体、酶类、蛋白质、氨基酸、有机酸、生长素及其他代谢物质组成;环境系统主要是指与土壤相联系的光、热、水、气、母岩、母质及地形等,它对整个生态系统的结构、功能和过程产生重要影响(杨万勤等,2000)。土壤生态系统的界定拓宽了经典土壤学和生态学的研究范围,促进了土壤学、生态学、水文学、环境科学等学科的交叉与整合,使土壤生态学真正融合为一门具有广泛研究领域的新兴边缘交叉学科。

1.2 土壤的物理结构和环境

土壤的物理结构与环境是指土壤中除生物和养分成分以外的固、液、气三相物质及其相互作用形成的特殊物理结构,它是生态系统过程和功能的基础(杨万勤等,2006)。这些特殊的物理结构为生态系统提供了以下相互联系的重要生态系统功能。

- 为植物提供了机械支撑功能。土壤物理结构为植物生长提供了巨大的支撑能力,使植物能够在一定的风力和降水强度下直立生长,从而成为植物生长发育和演替的基础。土壤对植物的机械支撑能力取决于土壤物理结构和植物本身的特性。
- 为土壤生物提供了栖息场所。土壤是土壤动物和微生物的栖息场所,特别是土壤机械组成决定的空隙和孔隙是中、小型动物最为重要的栖息场所,而土壤的通气性则决定了土壤微生物的种类、数量和活性。
- 具有碳源、汇、库的功能。土壤是陆地生态系统最重要的碳库和释放源(Schlesinger, 1999),但这些功能取决于土壤的机械组成、通气性、土壤厚度、土壤水分、土壤

温度以及生态系统的物种组成和结构。

- 土壤水库的功能。土壤水库的库容取决于土壤厚度、土壤孔隙、粒径分布等物理特性,其对于调节区域水量平衡、河川径流等具有十分重要的和不可替代的作用。同时,土壤生态系统的微生物对有毒有害物质的降解作用以及土壤颗粒的吸附和过滤作用能净化地下和地表水质,这些作用是人类清洁水源的保障。
- 土壤养分库的功能。土壤养分库特征与土壤养分含量、土壤厚度、土壤水热动态、土壤机械组成等土壤物理结构密切相关,是植物生长发育和生态系统演替的基础。

1.2.1 土壤机械组成与功能

土壤矿物质是土壤母质经过物理、化学和生物风化作用形成的、存在于土壤中的各种原生矿物和次生矿物,是构成土壤的骨架,约占土壤固相物质重量的 95%。细小的土壤矿物称为土壤颗粒。土壤颗粒大小和数量的构成状况称为土壤机械组成,是反映土壤质地的重要指标,决定着土壤密度、容重、团聚体结构、孔隙度、持水特性、通气性等土壤物理特性。土壤颗粒越小,土壤黏粒和粉粒比例越高,土壤就越黏重,土壤对养分和水分的吸附能力越强,其保蓄养分和水分的能力就越强。但土壤黏粒含量越高,土壤与植物和微生物争夺水分和养分的能力也越强,植物和微生物容易遭受干旱胁迫和养分匮乏。同时,土壤机械组成决定的孔隙和空隙为土壤动物提供了栖息生境,而土壤的通气性则与土壤生物群落的种类、数量和分布特征有关(杨万勤等, 2004)。因此,土壤物理结构不仅是土壤肥力的基础,而且是决定土壤水库功能的重要生态因子。

土壤对植物的机械支撑能力取决于土壤机械组成、土壤厚度及植物本身的特性。一般而言,根系正常生长需要根域内有充足的氧气。土壤通气状况良好,则根系生长迅速,根毛丰富。而氧气不足时,根系粗短,根毛稀少,摄取水分和养分的能力较低,则林木生长受阻。土壤氧含量低于 10%时,许多植物根系生长受阻,含氧量低于 5%时,根系生长可能停止。显然,黏粒含量和水分含量过高的土壤因其土壤通气性较差和机械障碍可能限制根系的生长,从而限制深根系植物的生长与分布。杨万勤(2001)的研究表明,生长于燥红土上的酸角(*Tamarindus indica*)根系为“主根系”形态,而生长于变性土上的酸角根系则呈“心形根系”形态。这是因为变性土的机械组成以 $<0.001\text{ mm}$ 的黏粒为主(64.59%),土壤“缩膨性”对根系的损伤严重,土壤黏质化对根系生长和扩展有障碍作用,因而根系分布的深度和面积都较小,植物生长极差,生物量很低,根/冠比高达 0.98。燥红土的细砂和粉沙含量相对较高,黏粒含量相对较低,土体结构较为疏松,通气性较好,有利于植物根系的生长和扩展,根系的分布面积和深度较大,植物生长较好,根/冠比为 0.52(表 1-1)。例如,受地震、滑坡、泥石流、崩塌等山地灾害的影响,川西高寒森林土壤发育经常受阻,土体结构较差,土壤有机层和腐殖质层较厚,石砾含量较少,但淀积层和母质层石砾含量

高，树木以坠子形根系的浅根系植物为主，80%以上的根系分布在土壤有机层和腐殖质层(杨万勤等，2006)。

表 1-1 金沙江干热河谷变性土和燥红土上酸角的生长状况
Table 1-1 Growth status of *Tamarindus indica* tree in the dry-red soil and vertisol of the dry and hot valley of the Jinsha River

土壤类型	株高 (h/m)	冠径 (d/m)	根系深度 (d/m)	根系分布面积 (A/m ²)	生物量 (m/kg)				根/冠比
					根	树干	枝	叶	
燥红土	4.54	4.45	3.84	92.24	23.08	14.14	26.02	4.56	0.52
变性土	1.05	0.80	2.05	9.62	5.20	3.40	1.30	0.60	0.98

土壤机械组成是土壤生物栖息的基础。土壤动物群落主要生活在土壤空隙和孔隙中，土壤中的空隙和孔隙越多，越有利于土壤中、小型动物生存繁衍。显然，土壤黏粒含量和石砾含量较高时，土壤空隙和孔隙较少，土壤动物数量就较少，而土壤的沙砾含量较高、土壤团粒结构较好时，土壤空隙和孔隙较多，土壤动物数量就越多。表 1-2 所示为金沙江干热河谷雨季时测定的土壤动物的类群数量和个体数量(杨万勤，2001)。由表可见，燥红土和变性土的土壤动物类群主要为膜翅目(Hymenoptera)、蜘蛛目(Araneae)、弹尾目(Collembola)、蜱螨目(Acarina)、双翅目(Diptera)、直翅目(Orthoptera)、缨翅目(Thysanoptera)、鳞翅目(Lepitoptera)、半翅目(Hemiptera)、双尾目(Diplura)、蜈蚣目(Scloenpdromorpha)、拟蝎目(Pseudoscorpiones)、革翅目(Dematode)和线虫纲(Nematoda)，但变性土上没有检测出倍足纲(Diplopoda)动物。由于变性土的黏粒含量和粉沙含量很高，土壤空隙和孔隙含量相对较少，因而变性土的土壤动物数量远远小于燥红土。无论是燥红土还是变性土，表层土壤(0~20 cm)动物群落的种类和数量明显高于低层土壤(20~40 cm)。

表 1-2 金沙江干热河谷变性土和燥红土雨季的土壤动物种类和数量*
Table 1-2 The sort and quantity of soil fauna in the dry-red soil and vertisol of the dry and hot valley of the Jinsha River in the rainy season

		膜翅目	蜘蛛目	弹尾目	蜱螨目	双翅目	直翅目	缨翅目	鳞翅目	半翅目	双尾目	蜈蚣目	拟蝎目	革翅目	线虫纲	倍足纲	总数(Σ)
燥红土	A	987	211	525	153	13	48	19	9	4	11	1	8	13	91	2	2095
	B	317	72	181	27	0	3	1	0	1	0	0	0	0	29	0	631
变性土	A	723	163	413	97	7	32	21	13	6	5	1	1	3	57	—	1533
	B	292	40	175	21	0	2	1	1	0	2	0	0	0	22	—	555

*注：分 A(0~20cm)、B(20~40cm)层取样，取样面积为 10 cm×10 cm，所取土样用干漏斗法(Tullgren 法)和湿漏斗法(Baerman 法)分别提取中小型土壤动物。大型土壤动物采用手检法测定，取样面积为 50 cm×50 cm，分 A、B 两层提取大型土壤动物。

土壤机械组成与土壤微生物群落的分布密切相关。金沙江干热河谷燥红土和变性土表层土壤的纤维素分解菌、氨化细菌、硝化和反硝化细菌都高于底层土壤(表 1-3)。除固氮菌以外,纤维素分解菌、氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌均以燥红土高于变性土(杨万勤, 2001)。这表明,黏粒含量较高的变性土因其通气性相对较差,微生物群落的数量就较低。

土壤机械组成与土壤生态系统的碳源、汇、库功能密切相关。土壤生物(微生物、根系和动物)的呼吸作用释放 CO₂ 进入大气,同时,通过对地上/地下(根系)凋落物的储存作用,将有机碳储积在土壤中,从而成为全球碳循环的碳汇和碳库。土壤团粒结构越好,土壤通气性越强,土壤生物群落(微生物、动物和根系)活性越高,分解有机物质的能力越强,释放到大气中的 CO₂ 可能越多,从而成为大气 CO₂ 的源,但土壤通气性好时,植物生长旺盛,固定的 CO₂ 量也可能较高,从而又使土壤成为 CO₂ 的汇和库,因此,土壤碳源/汇功能的强度取决于其通过植物固定的 CO₂ 与释放的 CO₂ 之间的比例,最终取决于土壤的机械组成、土壤的通气性、土壤厚度、土壤水分、土壤温度以及生态系统的物种组成和结构。

表 1-3 金沙江干热河谷变性土和燥红土中功能细菌的数量特征(干湿交替季节样品) ($n_{CFU}/10^4 \cdot g^{-1}$)

Table 1-3 Quantitative characteristics of functional bacteria in vertisol and dry-red soil of the Jinsha river

		好氧性纤维素分解菌	好氧性固 N 菌	氨化细菌	硝化细菌	反硝化细菌
燥红土	A	10.26	4.56	456	417.50	423.52
	B	1.11	1.08	49	33.25	34.35
变性土	A	0.95	1.28	72	28.98	40.32
	B	0.62	3.58	15	22.75	32.10

1.2.2 土壤水分与土壤水库功能

作为土壤生态系统的重要组成部分,土壤水分不仅调控着土壤温度、土壤通气性、植物生长发育以及植物群落的分布、物种组成和结构以及生产力等,而且是土壤有毒物质的稀释剂和土壤径流的补给源。土壤水分可能以固态、液态和气态三种形态存在,但主要以液态水的形态存在。根据其物理状态、移动性和它对植物的有效性,又可以把土壤水分区分为气态水、结合水、结晶水、物理束缚水、毛管水和自由重力水等。植物和其他土壤生物主要利用液态水,而固相和气相水分对于特定时间和特定地点的土壤发生和土壤生物活动具有特别重要的意义(Lavelle & Spain, 2002)。土壤水分冻结的时间和厚度随着纬度、海拔和坡向的变化而变化,一般表现为随着纬度和海拔的增加,土壤水分冻结的时间越长,土壤冻结的厚度越大。低纬度和低海拔地区,土壤水分主要以液态水的形态存在,很难冻结。高寒地区的土壤水分在冬季冻结,表层土壤的水分则在夏季融化,成为植物生长的重要资源或流域水分补给的重要水源。无论哪种形态的土壤水分,在土壤生态系统的物质循环、能量转换以及土壤形成过程中都具有重要作用,因此,控制和改善土壤水分状况是改善土壤生态系统结构和功能以及提高土壤生产力的重要措施。