

# 加强红壤退化分区治理，促进东南红壤丘陵区 现代高效生态农业发展<sup>①</sup>

孙 波<sup>1,4</sup>，董元华<sup>1,4</sup>，徐明岗<sup>2,4</sup>，曾希柏<sup>3</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所，南京 210008；2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081；3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京 100081；4 农业部耕地保育重点实验室，南京 210008)

**摘 要：**本文概述了我国东南丘陵区红壤退化现状、原因和治理意义，总结了 30 年来不同阶段红壤退化治理的成果，分析了红壤区域进一步发展现代高效生态农业的途径。论文提出针对红壤区域保障粮食安全、保护生态环境和应对全球气候变化的多重目标，在常规化学农业基础上，充分利用区域水热资源优势，融合生态农业、循环农业和智慧农业等模式的科学理念和优势，创新区域现代高效农业的建设原理、关键技术、配套政策法规和管理体系；针对红壤退化的区域特征，开展流域尺度红壤退化的综合治理和适度规模经营，建立红壤流域智慧农业发展模式，促进红壤区域农业现代化。

**关键词：**红壤退化；流域尺度；生态修复；高效生态农业

**中图分类号：**S156.6

## 1 治理退化红壤对发展红壤区生态农业的重要意义

我国东南红壤丘陵区(云贵川以东、长江以南)包括湘、赣、浙、闽、桂、粤、琼及鄂、苏、皖南部，土壤面积约 113 万 km<sup>2</sup>，占全国土地总面积的 11.8%。这一地区广泛分布着铁铝土纲，主要包括砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤等土类(图 1)，其中红壤占 55.8%，赤红壤占 17.5%，砖红壤占 3.9%，黄壤占 22.8%<sup>[1]</sup>。

红壤地区跨越中亚热带、南亚热带及热带，水热资源丰富(年均温 15~28℃，≥10℃积温 5 000~9 500℃·h，年均降雨 1 200~1 500 mm，高温多雨，湿热同季)，农业生产和经济发展潜力很大。红壤地区是我国水稻、油料、经济林果(如柑橘、香蕉、荔枝、芒果、龙眼、油茶、竹类)、经济作物(茶叶、蔬菜)重要产区，历来在我国农业持续发展和生态环境建设中发挥着重要作用。由于自然因素和人类不合理的利用，红壤生态系统面临水土流失、土壤酸化、土壤肥力和生态功能退化、人工林衰退等退化过程，造成土地生产力

下降，限制了气候生产潜力的发挥，制约了红壤区域特色经济作物和经济林果的发展<sup>[2-3]</sup>。

红壤生态系统退化的重要原因之一是土壤侵蚀，侵蚀引起土壤有机质和矿质养分流失，降低了土壤有效水储量和通透性，部分剧烈侵蚀的坡耕地退化为无法耕种的光石山。其次，红壤区强烈的风化和淋溶作用，加剧了土壤养分的贫瘠化和肥力衰减，导致红壤耕地有机质含量低，氮、磷、钾养分供应不足，有效态钙、镁含量低，硼、铝等微量元素贫乏。第三，红壤酸性强，且经受酸沉降与不合理施用化肥引起的加速酸化过程，导致红壤对钾、铵、钙、镁等离子的吸附量减少，加剧了养分的淋失；同时酸化增强了铝、锰等元素的浓度和活性，对作物产生毒害作用。最后，由于不合理的耕作管理导致土壤生物功能退化，形成连作障害，降低了农产品产量和品质<sup>[4-5]</sup>。土壤侵蚀、酸化、养分贫瘠化和生物功能退化过程相互耦合，共同阻碍了红壤区土地生产力的提升，导致农业经营效益下降，影响了红壤地区农业的可持续发展和农业现代化。因此，红壤退化治理对维护红壤丘陵区生态平衡和国家粮食安全意义重大。

基金项目：国家重点基础研究发展计划项目(2011CB100506)和国家科技支撑计划项目(2009BAD6B00)资助。

作者简介：孙波(1968—)，男，江苏南京人，博士，研究员，研究方向为土壤质量与农田养分循环，近期重点研究农田土壤碳氮转化微生物过程及其驱动因素。E-mail: bsun@issas.ac.cn

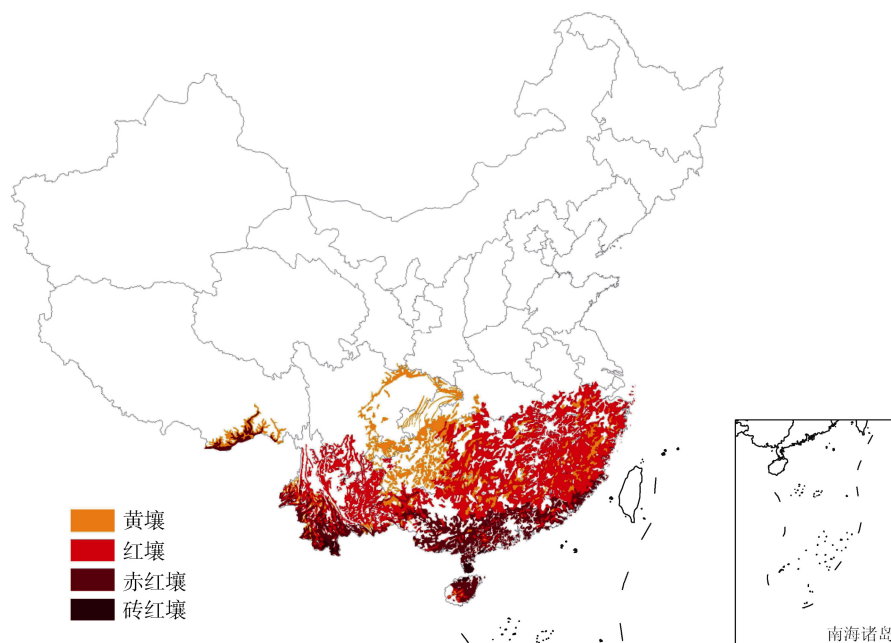


图 1 我国东南丘陵区主要土壤类型分布图  
Fig. 1 Main soil types distributed in Southeastern China

## 2 红壤退化治理的发展和主要成果

从 20 世纪 50 年代起,我国陆续开展了红壤资源调查和利用、红壤生态系统养分循环和管理、土壤侵蚀与治理、生态系统恢复重建等方面的研究。从“八五”开始,在红壤退化机理和治理方面开展了系列研究和技术示范,由中国科学院、中国农业科学院、相关农业院校和各省(自治区)农科院联合承担实施的支撑项目包括:南方红黄壤丘陵区中低产地综合治理研究和农业可持续发展研究<sup>[6]</sup>、退化土壤恢复重建与季节性干旱防御关键技术研究<sup>[7]</sup>、红壤带中南部丘陵区粮食与经济林果牧高效综合发展研究<sup>[8]</sup>、东南丘陵区持续高效农业及农林复合发展模式与技术研究<sup>[9-10]</sup>、中南贫瘠红壤与水稻土地力提升关键技术模式研究与示范<sup>[11-12]</sup>、南方丘陵岗地红黄壤区沃土技术模式研究与示范<sup>[13-15]</sup>。在应用基础研究方面实施的“973”、“863”和国家自然科学基金重点项目包括:红壤侵蚀、酸化和肥力退化机理及其恢复重建机制<sup>[4]</sup>、南方季节性缺水灌区(江西省鹰潭)节水农业综合技术体系集成与示范<sup>[7]</sup>、中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控对策的研究<sup>[16]</sup>、以及广西红壤肥力与生态功能协同演变机制与调控<sup>[17-18]</sup>。

通过长期研究,南方红黄壤地区综合治理与农业可持续发展技术研究、中国红壤退化机制与防治、南方红壤区旱地的肥力演变调控技术及产品应用分别获得 2002 年、2004 年和 2009 年度国家科学技术进步奖二等奖。这些成果从防酸控蚀、保水增肥、建立

高效农林复合生态系统等方面推进了红壤退化的治理水平: 阐明了南方 6 类区域(红壤岗地、红壤低丘、红壤中高丘陵、紫色土丘陵、赤红壤丘陵、黄壤高原)水土流失规律、允许侵蚀量和生态整治技术,提出了发挥工程水库-土壤水库作用的防御旱涝灾害对策、以及基于坡地集水-节水灌溉-避旱栽培抵御季节性干旱的原理,揭示了低产田(渍潜田和贫瘠旱地)障碍因素与土壤因侵蚀、酸化和肥力衰减的退化机理,提出了以多元多熟间套种技术、高效三元结构种植技术和调整鱼塘水体氮磷比技术为代表的优质高产高效种养技术,建立了基于优质粮经饲主导产业与产业化经营的农业高效开发模式,基于信息技术提出南方红黄壤地区的农业发展战略。提出红壤退化防治技术体系,包括侵蚀红壤的快速绿化与水土保持技术,退化土壤肥力恢复与优化施肥技术,丘陵岗台地的立体种养模式及配套土壤管理技术,酸性土壤改良治理技术,蓄、保、灌结合防御季节性干旱的综合配套土壤管理技术,带动了地方农业结构的调整和特色农业的发展,加快了水土流失治理和土壤肥力的恢复。明确了红壤旱地酸化、盐基流失和养分贫瘠与非均衡化特征,建立了基于土壤母质的旱地分类施肥管理新思路,构建了红壤区旱地改土培肥与生产力提升的综合调控技术体系,研发了抵御干旱和平衡供应养分的旱地专用复合肥、多功能调理型复合肥和生物-化学复合调理剂。

在上述研究的基础上,依托在科技部、中国科学院、农业部、水利部等支持下建立的生态试验站、农

业综合开发示范基地和水土保持科技示范园区,实施了“十一五”国家科技支撑计划“红壤退化的阻控和定向修复与高效优质生态农业关键技术与试验示范”,针对红壤区特色经济作物和经济林果生态系统的建设,在 4 个区域(赣东北和湘东低丘岗地、闽西南中高丘陵区、粤东低山丘陵区 and 桂西岩溶丘陵区)研究了红壤退化过程及其阻控原理,研发了退化坡地生产力的培育理论和技术体系,建立了红壤丘陵区绿色农产品的安全生产技术和高效生产模式<sup>[19]</sup>。

基于土壤生物群落结构的调控机制,建立了修复土壤生物功能、阻控连作障碍的生物和化学综合调控技术体系。包括:1)有机与无机结合的土壤酸化长效阻控关键技术体系:筛选了环境安全的碱渣复合改良剂,基于碱渣研发低成本的有机无机复合改良剂以及基肥型改良剂;针对林地土壤酸度改良,研发了坡顶集中施用改良剂-自然扩散修复法。研发了基于豆科植物和硝化抑制剂的高效改良剂;研发了生物质炭改良剂和制备技术,确定了生物炭的最佳制备温度,研制了野外型生物炭改良剂的制备设备,制定了施用技术规程。2)土壤养分和生物功能协同提升技术:基于南方土壤肥力评价体系和离散型施肥模型,建立了油菜-花生平衡施肥技术规程,研制了配套花生专用磷石膏复混肥。基于红壤团聚体的生物物理调控机制,确定了红壤旱地秸秆/猪粪合理配比;研发了秸秆田间腐熟剂和无害化添加剂;研制了菇渣有机肥配方。基于红壤土著微生物筛选和复壮研发了混合接种和配套施肥技术,建立了防治花生连作障碍的复合菌剂和中药材间作技术。

基于红壤物质循环的调控机制,有效集成化学、生物和工程技术,建立了阻控侵蚀、酸化、肥力退化的协同技术体系和模式。重点发展了丘陵红壤水土保持技术和崩岗治理模式:基于红壤坡面产沙和径流形成机制,建立了以保护团聚体和减缓径流为核心的侵蚀阻控理论和技术;针对不同坡度旱地,建立了减缓径流的工程和生物配套措施体系。基于崩岗形成机制,建立了“治坡、降坡、稳坡”三位一体的崩岗治理模式,根据崩岗功能区分区匹配了工程治理技术;基于 GIS、RS、GeoCA 模型模拟,制定了县域尺度水土流失强度监测评价系统和治理规划。

基于红壤生物协同机制,针对红壤特色经济作物和经济林果,建立了农林牧复合生态系统的快速重建技术和模式。包括:1)红壤丘陵林地立体植被重建模式:基于群落构建理论确定了侵蚀红壤劣地马尾松林植被恢复重建的群落指标,针对不同侵蚀程度的花岗岩红壤劣地,从剧烈侵蚀到轻度侵蚀构建了 4 种快

速恢复群落模式,包括剧烈侵蚀的水保草覆盖模式、乔灌木混交模式、补植乡土植物模式、经济林生草覆盖模式。针对大面积人工纯林生态改造,确定了 80% 速生丰产林 20% 生态乡土林的林分改造模式,建立了林下植被管理配套技术。2)红壤流域综合经营的林果草-作物-牧-沼模式:基于养殖废弃物养分循环过程和线性规划模型,建立了小流域循环立体种养优化模式,包括江西、湖南、福建、广西和广东的葡萄-花生-猪/沼、油茶/柑橘(西瓜)-猪/沼、杨梅/茶树-猪/沼、任豆树-牧草-牛/沼、脐橙(番木瓜、金柚)-猪/沼等模式。基于泵吸式水肥一体化技术,建立了亚热带特色水果的标准化生产和管理技术体系,解决了病害频发和劳力短缺问题。

### 3 红壤退化治理中面临的主要问题

#### 3.1 大幅度提高红壤生产力,保障区域作物高产稳产和农产品有效供给

东南红壤丘陵区中、低肥力土壤的面积比例分别为 40.8% 和 33.3%;林旱地土壤中 53.2% 的有机质和 62.7% 的全氮处于中度贫瘠化水平,77.8% 的速效磷处于严重贫瘠化水平,耕地土壤中 90% 缺硼和钼,49% 缺锌。同时,红壤区的大部分酸性土壤  $\text{pH} < 5.5$ ,江西、福建、湖南 3 省  $\text{pH}$  在 5.5 以下的强酸性土壤面积分别占 71.0%、53% 和 42%。2001 年对江西武夷山-鄱阳湖 9 县(市)的调查表明,与 20 世纪 80 年代第二次土壤普查相比,红壤丘陵旱地有机质含量下降,土壤酸化加剧,土壤质量仍在退化<sup>[4]</sup>。

肥力低下和质量退化是导致红壤作物生产力低下的主要原因。东南红壤丘陵区粮食和油料(花生、油菜)等作物的单产均低于全国平均水平,江西、湖南等 10 省粮食单产仅为全国平均的 72.7%,其中小麦单产不足全国平均的 1/2,玉米和薯类单产亦仅为全国平均的 85% 左右;油料作物单产仅为全国平均产量的 93.4%,其中花生单产仅为全国平均单产的 86.2%。通过退化红壤的改良和修复,可以大幅度提高红壤的生产力,提高作物的产量和品质,充分发挥红壤区水热资源丰富、气候生产潜力高、环境污染相对轻微和特色农产品品种资源丰富的特色,满足国家对农产品有效供给和产品多样化优质化等方面的需求。

#### 3.2 建设红壤丘陵坡地综合开发的生态模式,提高农业整体效益

红壤坡地生产力水平低,以种植业为主的农民难以迅速增加收入。在发展红壤区农村经济方面,需要以“治水、改土、造林”为重点,大力发展和融合红壤区域的特色种植业和养殖业,完善红壤区域农业开

发的产业链，提高农业综合开发规模，实现经济效益和生态效益的双赢。红壤丘陵坡地生态类型多样，建立以经济作物和林果业为主导、以养殖业为配合的农林牧复合系统，优化红壤丘陵坡地特色农业模式，有效提高红壤区资源利用效益，增加农业综合开发的经济效益，促进农民增收和区域农业经济的可持续发展。

东南红壤丘陵区集约化畜禽养殖业迅猛发展。2007年生猪年出栏2.8亿头，家禽41.0亿只，可利用的畜禽排泄物有机肥超过3亿t。一方面畜禽养殖业污染物的无序排放导致养殖场周边土壤和水环境污染状况严重，另一方面生产的部分有机肥中含有重金属、抗生素、病原菌和盐分等，不合理施用有机肥(如在设施地大量使用)将导致土壤重金属污染、生物污染和次生盐渍化等次生障碍。同时，南方有近2亿t的水稻秸秆资源。因此需要合理利用有机肥资源，集成秸秆快速腐熟技术、畜禽排泄物安全处理和合理施用技术，发展种养结合优化模式和技术体系，提高种养系统内养分循环利用水平和产出效益，促进种养模式的健康发展，保障土壤环境和农产品质量安全，促进美丽乡村建设<sup>[5]</sup>。

### 3.3 建立红壤区优质高效的生态系统，提高区域碳汇能力

20世纪90年代以来，红壤丘陵区林地面积增加，但一些地区水土流失和土壤酸化导致森林退化、生物多样性下降，特别是人工林抗逆性差、服务功能低下，影响了区域森林的碳汇功能和森林生态系统的稳定性<sup>[6]</sup>。华南地区疏残林面积达 $1.17 \times 10^5 \text{ km}^2$ (占该区土地总面积的25.2%)，导致水土流失严重，珠江流域水土流失面积达 $7.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，年平均流失土壤2.3亿t。近年来，桉树因其速生、丰产、短期经济效益好等特点在南方广泛栽种，2009年广东种植面积为 $1.06 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，2010年广西种植面积为 $1.65 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，但是大规模种植桉树纯林已经引起地力退化、地下水位下降、生物多样性减少等问题。因而，改造大面积荒坡的低效林和疏残林，提高人工林地的生产力和碳汇功能，建立高效和持续稳定的森林生态系统，可以促进红壤丘陵区经济的可持续发展。

红壤虽然瘠薄、有机碳库低，但气候生产潜力巨大，土壤的固碳潜力非常高。对湘、赣、浙、闽、桂、粤、琼的预测表明，施用化肥、有机肥和秸秆还田后农田土壤固碳潜力可以达到3912万t/a<sup>[20]</sup>。开展退化红壤的防治，可以提高红壤固碳能力，为我国碳汇外交和控制全球气候变化提供服务。

### 3.4 防治水土流失，促进区域生态环境建设和可持续发展

红壤区降水量高，集中在4—6月，多为大暴雨，

降雨侵蚀力指数高；地貌以山丘为主，花岗岩以及红层土壤易受侵蚀；加上红壤区人口密集，坡地的农业开发利用强度大，导致水土流失极易发生。目前红壤区水土流失面积为19.6万 $\text{km}^2$ ，占土地面积的17.2%，占山丘面积的23.8%。南方红壤区每年因水土流失带走氮、磷、钾的总量约为 $1.28 \times 10^6 \text{ t}$ ，其中氮约 $8.0 \times 10^5 \text{ t}$ <sup>[3]</sup>。近期的中国水土流失与生态安全综合科学考察表明，红壤区水土流失急需解决崩岗修复和林下水土流失治理两个问题。南方红壤7省区崩岗总数超过22万个，崩岗密度可达380个/ $\text{km}^2$ ，红壤崩岗区年均产沙量约为 $6.72 \times 10^7 \text{ t}$ ，这些崩岗严重破坏地表，埋没农田，淤积江河湖库。另一方面，虽然近年来南方8省森林覆盖率平均为52.9%，但普遍存在“远看青山在，近看水土流”的景象，林下水土流失严重<sup>[21]</sup>。

红壤区气候生产潜力大，适宜适合实施植被恢复措施。针对丘陵和缓坡发展适合的水土流失阻控技术和生态模式，可以显著提高红壤区土地整理成效，有效增加后备土地资源；促进红壤区单一纯林植被的正向演替，保障长江中下游流域和珠江流域的生态安全。

## 4 促进红壤区现代生态农业体系建设的对策

从1978年改革开放至今，我国农业先后经历4个发展阶段：高产阶段(1978—1984年)、优质阶段(1985—1991年)、高效阶段(1992—2001年)、安全可持续阶段(2002—2014年)。2015年中共中央、国务院颁发《关于进一步深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见》，提出要大力发展农业产业化，推进农业结构调整，积极发展多种形式适度规模经营体系；在不断增强粮食生产能力的前提下，加强农业生态治理，建设资源节约、环境友好的现代农业。因此，必须基于红壤区域气候、地形、土壤和作物特色，发展适度规模经营的生态友好型现代农业模式，实现红壤区域农业的可持续发展。

我国近30年来的粮食增长，除培育作物新品种、创建高产栽培模式等贡献外，主要依赖大量水肥和农药投入，1978—1996年我国各主要技术对粮食单产提高的贡献份额是：优良品种占33.8%，先进栽培技术(包括种植技术、施肥技术、节水灌溉技术、机械技术等)占34.1%，植物保护技术占14.2%，土壤改良占17.9%，耕地的作物生产潜力远未得到有效发挥。尽管我国粮食总产增加了73%(从1978年的3048亿kg增至2006年的4900亿kg以上)，但同期化肥用量却增加了467.5%。2012年化肥用量(纯量)达5839.8万t，氮肥平均施用量(按粮食作物播种面积计算)已超过190 kg/ $\text{hm}^2$ 。在农业部《农业科技发展规划(2006—2020

年)》中要求农业科技进步贡献率要从“十五”期间的 48% 提高到在 2020 年的 63%, 因此仍然需要提升常规农业的集约化技术水平和管理水平。

从保护农业环境和人体健康的角度, 有机农业和绿色农业模式以生产无公害农产品、绿色食品和有机食品为目的, 在生产中不采用基因工程获得的生物及其产物, 不使用化学合成的农药、化肥、生长调节剂和饲料添加剂等物质, 强调生产方式中资源可持续利用和生态平衡<sup>[22-23]</sup>。在一般的气候条件下, 有机农业的产量比常规农业的产量要低 20%~40%, 但有机农业因不使用化肥、农药而对环境的损害较小, 同时有利于增加生物多样性, 提高土壤质量<sup>[24-26]</sup>。同样, 循环农业和低碳农业等模式以“低能耗、低污染、低排放”为特征, 以农业生产过程中温室气体减排为目的, 以减少化肥使用的清洁生产为核心, 推进各种农业资源在多层次系统间的流动和循环利用, 通过综合技术实现节能减排和农民增收。但在上述农业发展模式中, 需要加强对各种生物质资源, 特别是有机肥资源利用中有害物质(重金属、抗生素、激素、病原菌、抗性菌)威胁人体健康风险的管理<sup>[27-28]</sup>。

在提高农业智能化方面, 智慧农业充分应用现代信息技术, 依托农田传感网络、无线通信网络和 3S 技术, 集成新一代互联网和物联网、云计算和专家智慧, 实现对农业生产环境的智能感知和预警、对农业生产过程的智能分析和决策指导, 通过精准化种植、可视化管理、智能化决策, 提高农业资源利用效率和产出率, 保障生态环境安全和农业可持续发展<sup>[29-30]</sup>。

从综合提高农业经济、社会和生态效益的角度, 生态高值农业以市场为导向, 以生态环境友好、农产品安全、可持续性、智能化、高值化为特征, 运用现代农业高新技术体系, 融合现代农业科技、市场和产业经济概念, 构建合理的农业生态经济结构, 建立集休闲、观光、教育、文化于一体的高值化服务型农业产业体系与生产模式<sup>[31-33]</sup>。

我国东部红壤丘陵区兼有生态脆弱区和农业主产区(水稻、油菜、柑橘等)特色, 面临巨大的资源-环境-人口压力, 人均耕地面积小, 同时中低产田比例大, 耕地质量退化严重, 已经制约了区域农业的可持续发展。针对红壤区域保障粮食安全、保护生态环境和应对全球变化的多重目标, 应以常规化学农业为基础, 广泛融合生态农业、循环农业、低碳农业、有机农业、智慧农业和生态高值农业等农业发展模式的科学理念, 基于红壤不同区域的自然和社会经济条件, 充分发挥区域水热资源丰富的优势, 着力强化中低产田改良, 不断创新红壤区域集约化现代生态农业模式的发展原

则、关键技术体系、配套政策法规和管理体系, 提高农业综合生产能力, 促进区域农村经济发展和农业生态环境建设, 保障区域粮食安全和农产品有效供给。

红壤丘陵区素有“七山一水两分田”之谓, 丘陵、谷地、平原交错分布, 土壤类型多样, 由于地形、母质、土壤和生态系统的不同组合, 导致红壤的复合退化过程存在显著的时空差异。因此, 在发展红壤区域适度规模的现代高效农业模式过程中, 需要针对不同区域红壤的复合退化特点进行分区治理, 改善区域农业生产的基本条件和农业综合生产能力。第一, 以红壤流域作为区域生态系统退化综合治理和农业适度规模经营的基本单元, 把重点地区生态环境退化的综合治理和生态功能修复作为发展现代高效生态农业模式的突破口, 通过工程治理、技术集成、模式带动、政策引导、部门协作和法规保障, 按区域气候-土壤-生物类型、分阶段地建设红壤流域高效生态农业体系。第二, 结合新技术的发展(新能源、新材料、新装备、新信息技术、新生物技术), 建立流域尺度智慧农业模式, 不断创新红壤区域农业生态系统构建模式和管理体系, 保障流域复合农业生态系统生产力和生态环境质量的协同提高, 促进红壤区域的农业现代化。第三, 以红壤旱地肥力和生产力提升为重点, 进一步强化区域中低产田改良和地力提升研究, 大幅度提升耕地地力和生产力, 充分利用区域水热资源, 全面提高粮食和农产品产量, 最大限度发挥该区域在保障国家粮食安全、农产品有效供给中的作用。

#### 参考文献:

- [1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-1 253
- [2] 南方红壤退化机制与防治措施研究专题组. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 1-495
- [3] 赵其国. 中国东部红壤区土壤退化的时空变化、机理及调控对策[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-332
- [4] 何园球, 孙波. 红壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-375
- [5] 张桃林. 增强责任感提高执行力 努力开创农业资源环境保护工作新局面——在全国农业资源环境工作会议上的讲话[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 487-494
- [6] 中国农业科学院. 红黄壤地区综合治理与农业持续发展研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 1-613
- [7] 张斌. 红壤水分与水分循环[A]//赵其国. 红壤物质循环及其调控[C]. 北京: 科学出版社, 2002: 198-277
- [8] 徐明岗, 黄鸿翔. 红壤丘陵区农业综合发展研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-236
- [9] 陈长青, 何园球, 卞新民. 东南部红壤区农林复合生态系统分类体系研究. 中国农学通报, 2005, 21(9): 385-387, 420
- [10] 徐明岗, 文石林, 李菊梅. 红壤特性与高效利用[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2005: 1-248
- [11] 曾希柏. 红壤化学退化与重建[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 1-256

- [12] 曾希柏, 李菊梅, 徐明岗, 高菊生, 孙楠. 红壤旱地的肥力现状及施肥和利用方式的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 434–437
- [13] 陈先茂, 彭春瑞, 关贤交, 邵彩虹, 邱才飞. 红壤旱地不同轮作模式的效益及其对土壤质量的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(6): 75–77
- [14] 解开治, 徐培智, 严超, 张发宝, 陈建生, 唐拴虎, 黄旭, 顾文杰. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 160–165
- [15] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 徐明岗, 曾希柏, 聂军, 张文菊. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质影响[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4 542–4 548
- [16] 赵其国, 张桃林, 鲁如坤, 黄鸿祥. 我国东部红壤区土壤退化的时空变化、机理及调控对策[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1–332
- [17] 赵其国, 黄国勤. 论广西生态安全[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5125–5141
- [18] 黄国勤, 王淑彬, 赵其国. 广西生态农业: 历程、成效、问题及对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5 153–5 163
- [19] 孙波. 红壤退化阻控与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1–466
- [20] 韩冰, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612–619
- [21] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 南方红壤区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1–275
- [22] 龚勋. 我国绿色农业发展基本路径探析[J]. 农业经济, 2012(7): 53–54
- [23] 时松凯. 我国有机产品发展现状与对策[J]. 广东农业科学, 2011(1): 157–158
- [24] Seufert V, Ramankutty N, Foley J. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. Nature, 2012, 485: 229–232
- [25] dePonti T, Rijk B, van Ittersum MK. The crop yield gap between organic and conventional agriculture[J]. Agricultural Systems, 2012, 108: 1–9
- [26] Forman J, Silverstein J. Organic foods: health and environmental advantages and disadvantages[J]. Pediatrics, 2012, 130(5): 1 406–1 415
- [27] 高旺盛, 陈源泉, 梁龙. 论发展循环农业的基本原理与技术体系[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(6): 731–734
- [28] 金辰, 孙波, 赵其国, 李辉信. 我国发展低碳农业的政策、法规和技术体系分析[J]. 土壤, 2014, 32(1): 7–14
- [29] 江莹旭, 华芳芳, 郑梁梁, 张伟. 农艺与物联网下的智慧农业[J]. 农业工程, 2014, 4(4): 38–40
- [30] 王维瑞. 智慧土肥的发展目标与建设内容探讨[J]. 中国农技推广, 2014 (10): 41–43
- [31] 中国科学院农业领域战略研究组. 中国至2050年农业科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1–156
- [32] 中国科学院农业科技领域发展路线图研究组. 至2050年中国生态高值农业体系建设特征与目标[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1 765–1 770
- [33] 赵其国, 段增强. 中国生态高值农业发展模式及其技术体系[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1 249–1 254

## Promote Development of Modern High-Efficient Ecological Agriculture Based on Divisional Remediation of Red Soil Degradation in Hilly Region of Southeastern China

SUN Bo<sup>1,4</sup>, DONG Yuan-hua<sup>1,4</sup>, XU Ming-gang<sup>2,4</sup>, ZENG Xi-bai<sup>3</sup>

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3 Institute of Environment and Sustainable Development for Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4 Key Laboratory of Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The status quo and causes of red soil degradation in the hilly region of Southeastern China were described, and the significances to control and remediate the degraded red soil ecosystems were discussed. Then the achievements were summarized for the remediation of red soil degradation during last 30 years. Finally the ways to develop modern efficient ecological agriculture in red soil region were analyzed. Facing the multiple tasks of increasing food safety, protecting environment and responding to global climate change, we should take road to develop modern high-efficient ecological agriculture to make full use of regional advantaged resources of water and heat, in which the main steps are to improve the building principles, key technologies and supporting policies, regulations and management systems, and to integrate the advanced scientific concepts from different agricultural models, such as ecological agriculture, recycling agriculture and intelligent agriculture. Based on considering the regional characteristics of red soil degradation, comprehensively remediating the red soil degradation and developing moderate large-scale land management could be carried out at the basin scale, and the basin-scale intelligent agricultural models could be established to promote the agricultural modernization.

**Key words:** Red soil degradation; Basin scale; Ecological remediation; High-efficient ecological agriculture