

福建省土壤酸化现状与治理对策

——以福建省18个县(市、区)为例

谢 渊¹, 纪梦雅¹, 付学治¹, 王 妍¹, 章德赞², 曹敏杰¹, 翁 凌¹

(1. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 三明市大田县农业科学研究所, 福建 三明 366100)

[摘要] 以福建省18个县(市、区)为调查位点, 对土壤酸化现状及治理情况开展调查。通过实地调查、取样分析和数据收集, 获得各调查位点土壤pH值数据。结果表明, 18个县(市、区)中, 强酸性($\text{pH} \leq 5.0$)土壤占13个, 酸性($5.0 < \text{pH} \leq 5.5$)土壤占5个。2017—2021年, 在福建省的9个设区市中, 有7个市的土壤酸化问题依然严重。通过“线上问卷+电话访谈+实地调查”的方式, 对地方政府、农户和企业3类调查对象开展调研, 摸清了福建省土壤酸化治理现状及面临的问题。研究表明: 应高度重视土壤酸化治理工作, 充分利用福建省丰富的贝类加工副产物贝壳, 将其加工成土壤调理剂, 达到治理土壤酸化, 缓解土壤重金属污染, 提高作物产量和品质, 助推经济绿色发展的效果。基于“重协同、强产业、全链条、促发展”的治理理念, 结合成功案例, 提出政府主导、校企助推、人才助农、精准施策的“政产学研”多元互助模式, 共同推动土壤治理。

[关键词] 土壤酸化; 牡蛎壳; 土壤调理剂; 福建省

[中图分类号] S 159(257)

Current Situation of Soil Acidification and Treatment Measures in Fujian Province: Take 18 Counties (Cities, Districts) in Fujian Province as an Example

XIE Yuan¹, JI Mengya¹, FU Xuezhi¹, WANG Yan¹, ZHANG Dezan², CAO Minjie¹, WENG Ling¹

(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Agricultural Technology Station of Datian County, Sanming 366100, China)

Abstract: In this paper, 18 counties (cities, districts) in Fujian Province were selected as survey sites to investigate the status of soil acidification and its management. The soil pH data of the 18 counties (cities, districts) were obtained via field investigation together with the assistance of local agricultural technology stations. It was found that among the 18 counties (cities, districts), 13 of them were strongly acidic ($\text{pH} \leq 5.0$), and 5 were acidic ($5.0 < \text{pH} \leq 5.5$). From 2017 to 2021, soil acidification was still a serious problem in 7 of the 9 municipalities in Fujian Province. Through online questionnaire, telephone interview and field survey for local governments, farmers and enterprises, the current situations and problems of soil acidification management in Fujian

[收稿日期] 2022-03-30

[基金项目] 农业农村部现代农业产业技术体系项目(CARS-49); 2020年国家级大学生创新创业实践项目(202010390035)

[作者简介] 谢渊(2000—), 男, 本科生, 从事食品加工及贮藏方向研究。通信作者: 翁凌(1970—), 女, 高级实验师, 从事水产品加工及副产物利用研究。E-mail: weng1201@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

Province were clarified basically. More attention should be paid to treatment of soil acidification. It was proposed that effective utilization of the abundant shell resources as soil conditioner can control soil acidification, alleviate soil heavy metal pollution, and improve crop yield and quality, thereby increasing farmers' income and promote green economic development. Based on the principle of "attach importance to coordination, strengthen industry, whole chain and promote development", combined with successful cases, the "government-industry-academia-research-application" multi-faceted mutual assistance model of government-led, university-enterprise promotion, talents assisting agriculture, and precise policy implementation were proposed with a purpose to promote soil management.

Keywords: soil acidification; oyster shell; soil conditioner; Fujian Province

0 引言

土壤是生态环境的重要组成部分,是人类赖以生存的主要资源之一。土壤是植物、动物和人类生存的重要支撑,扮演着植物生长介质、水供给和净化、养分和有机废弃物再循环、大气圈调理器、生物栖息地、工程介质等重要角色^[1]。作为非再生资源,土壤的健康直接关系到人类的可持续发展。

我国耕地资源严重短缺,在长期自然及人为不合理因素的开发利用下,我国大部分地区的土壤肥力不断下降,土壤质量不断退化,特别是土壤酸化问题日益严重^[2-3]。土壤酸化在自然条件下进程较为缓慢,但是,由于化肥的过量施用以及矿物质燃料的大量使用,自20世纪80年代以来,我国农田土壤的pH值平均下降了0.5^[4]。酸雨、有效养分补充不足等因素加速了土壤酸化进程^[5]。据统计,我国酸化耕地面积已占全国耕地总面积的40%以上,而且还在持续发展,土壤酸化态势十分严峻^[6]。而且,我国南方土壤酸化问题更为严重,特别是福建省的酸性、强酸性耕地占比高达66.5%^[7-8]。

土壤酸化的不良影响涉及面广,程度深。对植物,土壤酸化影响植物根系发育和营养元素的吸收,破坏植物养分的再循环;对水循环系统,酸性物质会加速水系统中的污染循环;对动物,栖息地遭受破坏,不利于生物多样性的发展;对土壤本身,酸化是土壤不健康性状之一,会导致土壤板结,有害金属(如铝)的活性增强,土壤资源利用率下降^[6-7]。迄今为止,国内外对耕地土壤酸化治理的研究大多只关注于方法与产品,对生态环境的长期稳定发展关注度不够。

治理酸化土壤有利于改善土壤质量,提高土地资源利用率,也有利于维持生态系统的平衡和可持续发展。因此,本研究以福建省18个县(市、区)为调查地,检测土壤酸化的情况,探究土壤酸化治理面临的问题与修复对策,提出酸化土壤治理的有效途径和思路,以期改善土壤质量,提高土壤资源利用率,恢复生态环境提供理论参考。

1 方法

1.1 研究思路

从土壤酸化及治理的重要性出发,选取福建省18个县(市、区)36个基地开展调查。首先,通过实地调查及多个县区农技站提供的资料,获得18个县(市、区)代表性区域土壤的最新pH值数据,并结合2017年各县区pH值数据^[9],分析当地土壤酸化的现状和成因,为后续制定土壤改良方案提供参考。其次,通过“线上问卷+电话访谈+实地调查”的形式,面向调研地的农户、企业和地方政府收集资料,深入分析土壤酸化治理面临的问题及部分地区土壤治理的成功案例,并以此为基础,提出有针对性的建议与修复对策。

1.2 调研地点

本文调查的福建省18个县(市、区)36个基地的具体情况见表1。

表 1 调查走访的地点
Tab.1 Locations of investigation

县(市、区) County(City, District)	调查地 Place	经纬度 Longitude and latitude
漳州市平和县 Pinghe County, Zhangzhou City	板仔镇联建村 Lianjian Village, Banzai Town	117°23114'E, 24°31138'N
	安厚镇山口村 Shankou Village, Anhou Town	117°20867'E, 24°16332'N
	芦溪镇村坑村 Cunkeng Village, Luxi Town	117°10704'E, 24°49243'N
	霞寨镇大坪村 Daping Village, Xiazhai Town	117°18684'E, 24°39253'N
	九峰镇大芹山 Daqin mountain, Jiufeng Town	117°12047'E, 24°21264'N
漳州市龙海区 Longhai District, Zhangzhou City	紫泥镇紫泥村 Zini Village, Zini Town	117°84331'E, 24°44466'N
漳州市长泰区 Changtai District, Zhangzhou City	长泰区绿港园 LÜgang park, Changtai District	117°79723'E, 24°66843'N
	长泰区雪美村 Xuemei Village, Changtai District	117°79210'E, 24°66678'N
	长泰区上花村 Shanghua Village, Changtai District	117°82158'E, 24°67408'N
龙岩市永定区 Yongding District, Longyan City	金砂乡永丰农场 Yongfeng farm, Jinsha Town	116°69535'E, 24°74908'N
	金砂乡秀山村 Xiushan Village, Jinsha Town	116°84824'E, 24°90908'N
	金砂乡赤竹村 Chizhu Village, Jinsha Town	116°69565'E, 24°75296'N
龙岩市武平县 Wuping County, Longyan City	城关镇载文村 Zaiwen Village, Chengguan Town	116°17438'E, 24°08364'N
泉州市惠安县 Huian County, Quanzhou City	净峰镇前炉村 Qianlu Village, Jingfeng Town	118°95274'E, 24°97838'N
莆田市仙游县 Xianyou County, Putian City	大济镇钟峰村 Zhongfeng Village, Daji Town	118°62484'E, 25°37590'N
	度尾镇湘溪村 Xiangxi Village, Duwei Town	118°55463'E, 24°45981'N
平潭综合实验区 Pingtan Comprehensive Experimental Area	中楼乡昆湖村 Kunhu Village, Zhonglou Town	119°78669'E, 25°58061'N
三明市宁化县 Ninghua County, Sanming City	济村乡武层村 Wuceng Village, Jicun Town	116°56551'E, 26°34140'N
三明市大田县 Datian County, Sanming City	桃源镇桃源村 Taoyuan Village, Taoyuan Town	117°58118'E, 25°78508'N
	前坪乡下地村 Xiadi Village, Qianping Town	117°85577'E, 25°79507'N
南平市武夷山市 Wuyishan City, Nanping City	武夷街道大布村 Dabu Village, Wuyi Street	118°03466'E, 27°70534'N

续表 1 Continued table 1		
县(市、区) County(City, District)	调查地 Place	经纬度 Longitude and latitude
南平市建瓯市 Jianou City, Nanping City	东游镇头村 Tou Village, Dongyou Town	118°07497'E, 27°02693'N
	南雅镇太平村 Taiping Village, Nanya Town	118°30677'E, 27°91160'N
南平市顺昌县 Shunchang County, Nanping City	洋墩乡洋墩村 Yangdun Village, Yangdun Town	117°88573'E, 27°02768'N
	洋墩乡路马头村 Lumatou Village, Yangdun Town	117°87991'E, 27°00590'N
南平市政和县 Zhenghe County, Nanping City	杨源乡杨源村 Yangyuan Village, Yangyuan Town	119°02608'E, 27°15552'N
	杨源乡坂头村 Bantou Village, Yangyuan Town	119°12180'E, 27°14555'N
厦门市集美区 Jimei District, Xiamen City	后溪镇第二农场 Second farm, Houxi Town	118°02045'E, 24°65299'N
	后溪镇黄地村 Huangdi Village, Houxi Town	117°98660'E, 24°74479'N
	灌口镇田头村 Tiantou Village, Guankou Town	117°97138'E, 24°62856'N
	灌口镇双岭村 Shuangling Village, Guankou Town	117°98661'E, 24°64006'N
	灌口镇坑内村 Kengnei Village, Guankou Town	117°96910'E, 24°60953'N
宁德市屏南县 Pingnan County, Ningde City	长桥镇柏源村 Boyuan Village, Changqiao Town	118°77488'E, 26°87695'N
宁德市寿宁县 Shouning County, Ningde City	下党乡下党村 Xiadang Village, Xiadang Town	119°31880'E, 27°41195'N
宁德市古田县 Gutian County, Ningde City	凤都镇村尾村 Cunwei Village, Fengdu Town	118°63135'E, 26°56911'N
	凤都镇长坑村 Changkeng Village, Fengdu Town	118°65611'E, 26°62567'N

1.3 土壤采样方法

以表 1 中的 18 个县(市、区)为土壤采样区域, 围绕布设样点地块空间形状分布, 采用 S 型取样, 去除表面浮土, 用取土器采取 0~20 cm 深的表层土壤, 每块地取 5 个样点, 放入自封袋中, 填写标签及相关信息。土壤运回实验室, 经自然风干、粉碎后过筛, 用于土壤酸度指标的测定。

1.4 土壤样品的酸度测定

土壤酸度(pH 值)测定采用电位法^[10]。

1.5 数据处理

每块处理土壤取 5 个样品, 每个样品重复测定 3 次, 取平均值, 采用 Excel 软件进行数据整理及分析。

2 实验结果与分析

2.1 福建省耕地土壤酸化的总体变化情况

福建省酸化耕地面积超过总耕地总面积的 66.5%, 其中漳州市平和县的土壤酸化面积更是占到

总耕地面积的 99.3%^[9]。本研究获得了具有代表性的 18 个县(市、区)土壤酸度(pH 值)数据(见图 1)。经分析发现,18 个县(市、区)的土壤中,酸性($5.0 < \text{pH} \leq 5.5$) 5 个,强酸性($\text{pH} \leq 5.0$) 13 个,特别是漳州市平和县耕地土壤 pH 值为 4.01。

2017 年调研发现,福建省平潭综合实验区耕地土壤 pH 值为 6.25,为全省最高;南平市耕地土壤 pH 值为 4.99,为全省最低^[9]。对 2017 年的数据与本次调研得到的土壤酸度数据(见图 2)进行归纳分析可知,2017—2021 年,在福建省的 9 个设区市中,有 7 个市的土壤酸化问题不仅没有得到改善,而且有不加剧的趋势,土壤酸化治理迫在眉睫。

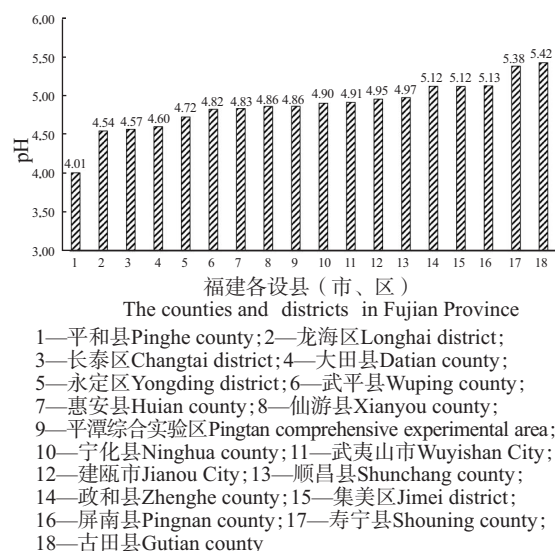


图1 福建省18个县(市、区)土壤pH值

Fig.1 Soil pH value in 18 counties (cities, districts) of Fujian Province

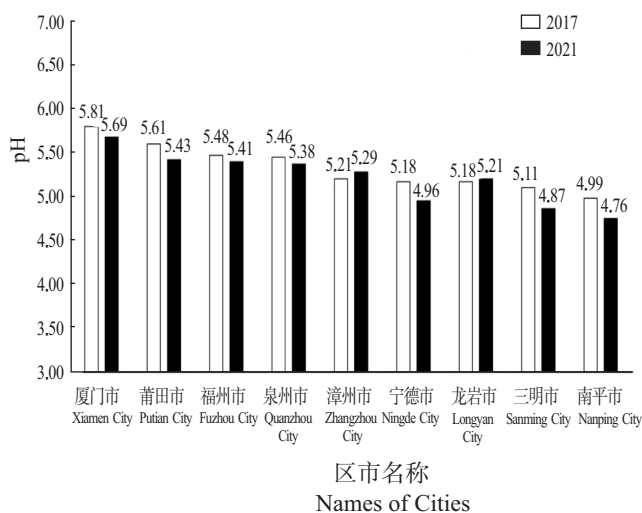


图2 福建各设区市耕地土壤pH值变化(2017—2021年)

Fig.2 Changes of soil pH value of cultivated land in cities of Fujian Province (2017-2021)

2.2 土壤酸化治理方法及效果分析

福建省的土壤酸化问题由来已久,成因复杂。除了土壤母质条件外,氮肥的大量施用以及酸雨等因素的影响是主要原因。在实地调查的过程中了解到,福建省 18 个县(市、区)在解决土壤酸化的问题上采取了多种不同的治理措施和方法。在对有效性和可行性进行筛选后,本研究对 7 种土壤酸化的治理方法进行综合分析和效果总结,对土壤酸化治理现状进行更加深入的剖析。

2.2.1 草木灰

草木灰是由秸秆、稻草等烧制而成的灰肥,是一种来源广泛、成本低廉的治理土壤酸化原料。将其施放到酸化的土壤中,可以中和酸性物质,调节和改善农作物的生存环境^[11-12]。但草木灰的制备过程会造成严重的大气污染,因此我国已禁止使用该方法。

2.2.2 有机肥

在认识到氮肥大量施用带来的土壤酸化问题后,部分农户用有机肥替代氮肥,以期达到增加有机质含量,提高土壤肥力,缓解耕地土壤酸化的效果^[13]。但有机肥种类繁多,品质良莠不齐。大部分有机肥实际上为中性或偏酸性,不能直接解决土壤酸化问题,再加上异味大、田间施用较为麻烦等原因,部分农户使用意愿较低。

2.2.3 秸秆还田

秸秆还田是把不能直接用来作为饲料的水稻、玉米以及高粱秸秆等直接粉碎后施到土壤中,等它们腐熟后达到增加土壤肥力,改良土壤性质,加速生土熟化的效果^[14]。秸秆还田还可以积累土壤有机质。该技术的推广也是我国大部分地区土壤有机质含量增加的主要原因^[15]。但是,秸秆本质上属于有机肥,对于土壤酸化难以产生治理效果。此外,秸秆还田方法不当还会导致作物出苗率降低,土

壤病菌含量高,土传病等作物病害的发生率增加等负面影响^[16]。

2.2.4 微生物菌肥

微生物菌肥可以改良土壤的微生物环境,对土壤酸化具有显著的缓解作用。在缓解土壤酸化的同时,微生物菌肥还具有提升土壤肥力,促进农作物对养分的吸收等作用^[17]。但微生物菌肥效果受土壤环境影响较大,在土壤酸化严重的地块,微生物的定殖能力受限,虽然与有机肥共同使用可以提升微生物的适应能力,但成本也较高。

2.2.5 石灰及土窑烧制贝壳灰

石灰是治理酸化土壤较为常用、有效的改良剂,可以快速降低土壤酸度,补充土壤中的钙元素,满足农作物生长的需要^[18-20]。但是,石灰碱性大,长期使用会导致烧苗、土壤板结,使土壤中的矿物质营养元素比例失调,或者造成土壤局部碱化等问题^[21]。

土窑烧制贝壳灰的主要成分是石灰,在其烧制过程中,通常使用煤炭作为燃料,产品品质难控制且混有煤渣,施用后,会给土壤带来重金属超标的风险。

2.2.6 矿渣、白云石等矿物

矿渣和白云石中具有多种有利于改善土壤酸化的物质,将这些矿物质施放到已经酸化的土壤中会降低土壤酸度^[22],但其中常含有重金属元素,会对土壤造成重金属污染等严重不良后果^[14]。

2.2.7 牡蛎壳土壤调理剂

牡蛎壳土壤调理剂是以牡蛎壳为原料,经过高温处理后,再破碎为粉末成品,是一种新型土壤调理剂,其主要成分为碳酸钙和氧化钙,此外还含有镁、锌、钾等。牡蛎壳土壤调理剂除能降低土壤酸度外,还能补充植物生长所需的有益元素,也有利于增强有机肥、化肥的作用效果^[23-24]。将牡蛎壳加工为土壤调理剂,实现了原本为固废垃圾的牡蛎壳的资源化、高值化利用^[25]。将该产品施用在花生^[23]、水稻^[24]、蜜柚^[26]、甜瓜^[27]、番茄^[27]和油菜^[28]等作物中,均实现了改良土壤酸化,提高作物产量、提升农产品品质的效果。

当前,我国生态文明建设已进入了以节能降碳为重点的新阶段。牡蛎生长过程会利用海水中的钙离子和二氧化碳,形成碳酸钙躯壳,是典型的生物降碳活动^[29]。伴随牡蛎的收获,大量碳酸钙直接被移出大海。将其适度煅烧后施用于土壤,可使得生物碳长期储存,形成一个“可移出的持久碳汇”。

牡蛎壳土壤调理剂用于土壤酸化治理,在提高土壤质量的同时,也提高了海洋贝类的资源利用率,符合可持续发展理念。将其用于土壤酸化治理,可有效解决福建省土壤酸化问题。

3 结论与建议

3.1 结论

本研究结果显示,在福建省平和县等18个县(市、区)中,强酸性($\text{pH} \leq 5.0$)土壤为13个,酸性($5.0 < \text{pH} \leq 5.5$)土壤为5个。2017—2021年,在福建省的9个设区市中,有7个市的土壤酸化问题依然严重,且有不断加剧的趋势。对福建省18个县(市、区)在解决土壤酸化的问题上采取的多种不同治理措施和方法进行综合分析和效果总结,笔者认为:应充分利用福建省丰富的贝类加工副产物贝壳资源,将其加工处理生产成土壤调理剂,治理土壤酸化,缓解土壤重金属污染,提高作物产量和品质,增加农民收入,助推经济绿色发展。

3.2 建议

1) 政府主导,构建土壤治理利益共同体。土壤酸化治理情况复杂,周期长,面积广,投入大,是一项复杂的系统工程,需要各方共同发力,构建土壤治理利益共同体。政府要从生态文明建设的视角出发,建立健全土壤酸化源头预防、过程严管、后果严惩、损害赔偿的防治土壤酸化制度体系。同时,要加大土壤治理专项资金扶持力度,加大对农户施用土壤调理剂的补贴力度,调动农户施用以贝

壳为原料生产的生态友好的土壤调理剂的积极性。政府还应加大研发经费的投入,激励高校和科研院所、生态科技企业等与农户一起参与土壤酸化治理工作,形成土壤酸化治理人人有责、大家出力、协作共赢的良好局面。

2) 校企助推,打造土壤科技治理产业链。高校和科研机构要主动承担土壤问题研究项目,特别是基础研究类项目,将最新科研成果及时转化,将最新产品尽快投入企业生产和实际应用。高校应与生态科技企业一起加大技术投入,增强研发力量,提高产品质量。通过走访农户,了解产品的使用成效,获取一手资料,定期收集农户意见,不断优化技术,及时更新产品。

企业应与政府、高校、农户多方合作,以多种措施扩大产品的宣传面,提高产品的影响力。要积极参与地方政府招标,建设土壤调理剂应用示范基地,坚持可持续发展原则,展现生态科技企业的责任与担当。

3) 人才助农,提升土壤生态治理监测效能。土壤酸化的有效治理离不开科学的分析检测。土壤监测覆盖面广,工作量大,需要大量基层农业技术人员。对此,政府应出台相关扶持政策,加强基层农业专业技术人才队伍建设。同时,高校可常态化地组织学生开展社会实践活动,通过“三下乡”、“返家乡”等活动,参与到土壤酸化监测调查的队伍中来。

在基层农业技术力量得到加强的前提下,可通过科学设置监测点,增加土壤监测的密度;规范技术操作,提升监测结果的精度;出台措施,定期检测,强化监测的频度。通过细化考核指标,将以上土壤监测“三度”落细落实,全方位做好土壤的“体检”工作。各级政府部门应将土壤酸化治理攻坚战目标任务完成情况纳入生态环境质量状况考核方案,确保土壤监测制度落细落实。

4) 精准施策,推进土壤绿色治理富农战略。针对土壤酸化导致的农产品产量低、品质差、投入产出比不高等问题,应以“一村一品”为抓手,精准锁定地方高附加值农作物,因地制宜、因物制宜改良土壤,打造特色品牌,助力乡村振兴。根据区域内特色作物生长特性,结合自然、地理、气候等农业生产条件,合理制定土壤改良方案。可通过建立土壤酸化治理示范点或者选取专业水平较高的农业专业合作社或种植大户进行示范,带领农户开展土壤酸化治理。要了解国内外肥料的发展方向,特别要关注绿色智能肥料的发展趋势^[30]。高校和科研院所应通过科普宣传等形式积极主动将当前最新农业技术、土壤改良办法以“农业技术培训”、“农民会”等形式推广宣传。与生态科技企业一起,将安全有效的土壤改良剂新产品应用到更多农户的土地上,实现农作物增产增收,提质增效。通过树立榜样农户带动更多农户参与,以点带面,引领土壤酸化治理工作,以实际成效调动农户参与土壤酸化治理的积极性与主动性。

致谢 感谢莆田市科技局、平潭综合实验区农业农村局等单位提供历史数据和采样帮助。

[参考文献]

- [1] 吴克宁,杨淇钧,赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报,2021,58(3):537-544.
- [2] 赵其国,杨劲松,周华. 保障我国“耕地红线”及“粮食安全”十字战略方针[J]. 土壤,2011,43(5):681-687.
- [3] 郭安宁. 不同土壤退化类型及其调控对土壤微生物的影响机制[D]. 北京:中国地质大学,2020.
- [4] 张福锁. 我国农田土壤酸化现状及影响[J]. 民主与科学杂志,2016(6):26-27.
- [5] JIN K M, WHITE P J, WHALLEY W R, et al. Shaping an optimal soil by root-soil interaction[J]. Trends in Plant Science, 2017,22(10):823-829.
- [6] 张俊伶,张江周,申建波,等. 土壤健康与农业绿色发展机遇与对策[J]. 土壤学报,2020,57(4):783-796.
- [7] 刘娇娴,崔骏,刘红宝,等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. 环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.
- [8] 徐福祥,范协裕,沈金泉,等. 基于GIS技术的福建省耕地土壤酸化研究[D]. 福州:福建农林大学,2015.
- [9] 张世昌. 福建耕地土壤pH空间分布及动态分析[J]. 中国农技推广,2019,35(2):49-51,32.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [11] DAVIES W J, SHEN J B. Reducing the environmental footprint of food and farming with agriculture green development[J].

- Frontiers of Agricultural Science and Engineering,2020,7(1):1-4.
- [12] DEMEYER A, VOUNDI NKANA J C, VERLOO M G. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake:an overview[J]. Bioresource Technology,2001(77):287-295.
- [13] LIU T, CHEN X Y, HU F, et al. Carbon-rich organic fertilizers to increase soil biodiversity:evidence from a meta-analysis of nematode communities[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2016,232:199-207.
- [14] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management;a review[J]. Geoderma,2005,124(1/2):3-22.
- [15] 杨帆,徐洋,崔勇,等.近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J].土壤学报,2017,54(5):1047-1056.
- [16] 宋佳,曾希柏,王亚男,等.秸秆还田的效果、问题与对策[J].生态学杂志,2020,39(5):1715-1722.
- [17] 卢国甫.土壤酸化现状与治理[J].农业与技术,2019,39(2):20-21.
- [18] 刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.
- [19] MANJOKA J, YEROKUN O A, LUNGU O I, et al. Changes in soil organic matter and soil aggregation of a *Zambian oxisol* after applying lime[J]. International Journal of Soil Science,2007,2(3):190-196.
- [20] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2):238-244.
- [21] 谢会雅,陈舜尧,张阳,等.中国南方土壤酸化原因及土壤酸性改良技术研究进展[J].湖南农业科学,2021(2):104-107.
- [22] 武际,郭熙盛,王文军,等.施用白云石粉对黄红壤酸度和油菜产量的影响[J].中国油料作物学报,2006,28(1):55-58.
- [23] 严建辉.牡蛎壳土壤调理剂对黄泥田花生产量及土壤酸化改良的影响[J].农学学报,2019,9(11):17-20.
- [24] 罗华汉,柳开楼,余跑兰,等.牡蛎壳粉对水稻产量和土壤重金属钝化的影响[J].中国稻米,2016,22(3):30-33.
- [25] 苗建银,赵海培,李超柱,等.牡蛎壳的开发利用[J].水产科学,2011,30(6):369-372.
- [26] 李雁乔,章騫,黄永生,等.煅烧牡蛎壳粉对土壤酸化及琯溪蜜柚果实的改善效果[J].集美大学学报(自然科学版),2020,25(4):256-264.
- [27] 许玲玲.牡蛎壳土壤调理剂对酸化土壤及两种作物品质影响的研究[D].厦门:集美大学,2020.
- [28] 田中学,徐丽萍,王旭.土壤调理剂对小油菜镉吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1):94-100.
- [29] 曹俐,王莹.海水养殖的碳汇潜力估算及其与经济脱钩分析以三大沿海地区为例[J].海洋经济,2020,10(5):48-56.
- [30] 张福锁,申建波,危常州,等.绿色智能肥料:从原理创新到产业化实现[J].土壤学报,2022,59(4):873-887.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)