

福建部分酸化障碍土壤的pH、ORP、EC理化性质及其土壤结构调理

黄紫洋^{1*}, 钟云峰², 肖自军², 钟云平²

¹福建师范大学化学与材料学院, 福建 福州

²福建洋屿环保科技股份有限公司, 福建 泉州

收稿日期: 2024年12月3日; 录用日期: 2025年2月10日; 发布日期: 2025年3月31日

摘要

福建地处中国南方亚热带, 由于人们长期的土壤利用缺乏科学理论指导引发了部分土壤出现严重障碍问题。本文选取了福建省内10处酸化障碍土壤作为实验研究基地, 进行了土壤pH值、氧化还原电位(ORP)、电导率(EC)等理化性质的跟踪测定, 发现酸化土壤的pH值低下, 同时出现ORP异常及EC偏低等问题, 通过采用泉州市洋屿土壤科技有限公司生产的土壤结构调理剂进行调理改良, 历经2年实验及4季作物的轮作, 酸化障碍土壤的pH、ORP和EC都得到逐步恢复并趋向正常范围。

关键词

酸化障碍土壤, 土壤pH值, 土壤氧化还原电位, 土壤电导率, 土壤结构调理剂

The pH, ORP and EC Physicochemical Properties and Soil Structure Condition of Some Acidified Obstructive Soils in Fujian Province

Ziyang Huang^{1*}, Yunfeng Zhong², Zijun Xiao², Yunping Zhong²

¹College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

²Fujian Yangyu Environmental Protection Technology Co., Ltd., Quanzhou Fujian

Received: Dec. 3rd, 2024; accepted: Feb. 10th, 2025; published: Mar. 31st, 2025

Abstract

Due to the lack of scientific theoretical guidance on long-term soil utilization, some soils have

*通讯作者。

文章引用: 黄紫洋, 钟云峰, 肖自军, 钟云平. 福建部分酸化障碍土壤的pH、ORP、EC理化性质及其土壤结构调理[J]. 土壤科学, 2025, 13(2): 69-76. DOI: 10.12677/hjss.2025.132009

serious obstacles in Fujian Province where is located in the subtropical climate zone of southern China. Based on 10 acidified obstructive soils in Fujian Province as experimental bases, the measurements of soil pH, oxidation-reduction potential (ORP), electrical conductivity (EC) and other physicochemical properties were investigated and tracked concurrently. It was found that the pH value of the acidified soils was below the normal value, and there were also problems such as abnormal ORP and low EC. Soil structure conditioners produced by Quanzhou City Yangyu Soil Technology Co., Ltd. were employed for conditioning and improvement of the acidified soils. After 2 years tests and 4 crop rotations, the pH value, ORP, and EC of the acidified obstructive soils had gradually recovered and tended to the normal ranges.

Keywords

Acidified Obstructive Soil, pH Value of Soil, Redox Potential of Soil, Soil Electrical Conductivity, Soil Structure Conditioner

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤作为地球表层自然系统中最重要的组成部分，是农作物生产的物质基础，是人类赖以生存的最基本的生产资料。世界人口在近百年来迅速增加，不合理的耕作、开垦、施肥耗尽了土壤的有效生产能力，严重破坏了土壤微生态平衡，导致土壤再生能力衰减、土壤环境质量劣化、土壤承载力和可持续性下降等土壤障碍问题。因此，障碍土壤的防治已成为各国农业及社会经济可持续发展亟待解决的问题[1]-[5]。总体上看，我国南方的土壤出现较为明显的酸化现象，而北方的土壤则出现明显的盐碱化问题，形成了地理位置上独特的“南酸北碱”障碍土壤基本格局。

土壤酸碱性在自然条件下主要由土壤的盐基状况决定，而土壤的盐基状况取决于土壤淋溶过程和盐基矿化过程的相对强度。其中，土壤酸化是指土壤吸收性复合体接受了一定数量交换性 H^+ 或 Al^{3+} ，使土壤中碱性盐基离子淋溶流失的过程。一般认为土壤的 pH 值小于 6.5，可认定为酸化障碍土壤[6] [7]。现今农民为了追求产量长期大量施用化肥，而施石灰、烧火粪、施有机肥等传统农业措施一点点地缺失，耕地土壤养分不断失衡，这些是造成酸化土壤形成的主要原因。

土壤酸化是福建省内主要的障碍土壤形式，由于土壤中 pH 值、氧化还原电位(ORP)和电导率(EC)等理化性质的恶化，造成土壤微团粒结构遭受严重破坏，土壤矿化过程的活性受阻，导致土壤中可被植物根系吸收的养分下降；同时，土壤酸化活化了土壤中的重金属离子，促使其转化成游离态，农作物会过量吸收重金属离子，导致农作物中重金属离子的过量累积而对农产品的生产和食品安全造成严重威胁。福建地处北温亚热带，是酸性土壤主要分布地区，并且土壤的酸化程度及土壤酸化面积还随着经济的发展和地方的建设呈现出进一步增加的态势[8]-[10]。

由于气候变化和人为因素的影响，造成了可以利用的耕种土地酸化的情况不断加剧，不仅影响我国土壤环境质量、耕种农作物生长情况、粮食安全以及人类健康，还对国家的社会经济建设造成不利的影响。因此，应对障碍土壤问题及其改良修复障碍土壤成为全世界科研工作者关注的焦点[11] [12]。本研究选取了福建省内 10 处酸化障碍土壤进行实验研究，根据土壤的 pH 值、氧化还原电位(ORP)和电导率(EC)进行了实时实地跟踪与测定，其间采用泉州市洋屿土壤科技有限公司生产的土壤结构调理剂进行土壤调

理改良, 探索如何合理、经济、有效地利用土壤结构调理剂对酸化土地进行土壤结构调理和改良, 为酸化障碍土壤生产力的恢复和土壤微生态环境的修复提供基本的理化实验数据。

2. 实验仪器与方法

2.1. 实验仪器

CHI660E 型电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)、PHS-3E 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)、DDS-307 型电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 土壤 pH 的测定

实验中土壤 pH 值的测定采用土壤农业化学分析方法[13] [14]并结合 GB/T 23486-2009 《城镇污水处理厂污泥处置 - 园林绿化用泥质》的测定方法进行, 即准确称取经风干后过 1.0 mm 筛下土壤样品 20.0 g, 加入蒸馏水 50.0 ml(水土比 2.5:1), 往复振荡 5 min, 过滤, 得清澈滤液即为土壤浸出液, 密封保存待用。

移取上述土壤浸出液 25 ml, 采用玻璃电极为测量电极, 将 pH 计的温度校正调整至土壤浸出液温度后, 通过 pH 计直接读取土壤的 pH 值。

2.2.2. 土壤 ORP 的测定

氧化还原电位(ORP)的测定是根据 HJ 746-2015 《土壤氧化还原电位的测定电位法》进行, 即铂电极作为工作电极, 饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极, 将铂电极和 SCE 分别与 pH 计的正、负端相连, 选择开关置于 mV 档, 然后将两电极插入土壤中, 待 5~10 min 后电位达到平衡时, 直接从 PHS-3C 型酸度计中读取 E 测定 [13] [15]。同样, 实验研究中同时采用电化学工作站进行开路电压 - 时间曲线(OCPT)测定土壤的氧化还原电位 Eh 土壤进行对比, 测定过程中注意将三电极测量体系中的对电极和参比电极同时连接到 SCE 上, 如果被测土壤过于干燥, 氧化还原电位计数始终处于变化状态, 可以在两电极之间的土壤里滴加少量去离子水, 从而构成有效的电化学回路, 土壤 Eh 值换算如式(1)。

$$Eh_{\text{土壤}} = E_{\text{SCE}} + E_{\text{测定}} \quad (1)$$

2.2.3. 土壤 EC 的测定

实验中对土壤电导率(EC)的测定是根据土壤农业化学分析方法[13] [16]并结合 CJ/T 340-2016 《绿化种植土壤》的分析步骤进行, 即准确称取经风干后过 1.0 mm 筛下的土壤样品 20.0 g, 加入蒸馏水 100.0 ml(水土比 5:1), 反复振荡 5 min, 过滤, 得清澈滤液即为土壤浸出液, 密封保存待用。

移取上述土壤浸出液 25 ml, 将电导率仪的温度补偿调节至土壤浸出液温度后, 从电导率仪直接读取浸出液的电导率(κ , $\mu\text{S}/\text{cm}$)即为土壤的电导率。

3. 结果与讨论

3.1. 酸化土壤 pH、ORP 和 EC 的测定结果

本研究选取福建省内 10 处酸化障碍土壤进行 pH、ORP 和 EC 的跟踪测定, 取样方法采用“田”字 5 点取样法。实验中根据未调理前土壤的 pH 值进行实验点的筛选, 确定福建省内 10 处 $\text{pH} < 6.5$ 的酸化土壤作为本实验研究对象, 跟踪实验结果如表 1。实验中土壤调理剂的施用方案大致如下: $\text{pH} < 5.5$ 的酸化土壤采用 1 次性施用 500 kg/亩土壤结构调理剂, 个别土壤 pH 严重偏低及 ORP 偏高的实验点采用 1000 kg/亩土壤结构调理剂, 通常 pH 在 5.5~6.5 之间的微酸化土壤, 则采用在耕作前先施用 250 kg/亩作为底

肥, 1 个月后再追加 250 kg/亩作为追肥。土壤的 pH、ORP 和 EC 的跟踪测定一般在施用全部调理剂后的 1 个月左右的时间点进行。施用调理剂采用每年 2 次, 实验周期 2 年, 共进行 4 次调理剂的施用, 合计施用量为 2000 kg/亩。同时在实验过程中配合施用的化肥为通常年份用量的 1/3。种植的作物根据当地的种植习惯, 选择如花生、水稻、地瓜、胡萝卜、马铃薯、花菜、菌草或油菜等进行轮作, 坡地主要种植如马蹄笋、葡萄、芦柑、芙蓉李、黄桃等。

Table 1. Results of pH, ORP, and EC measurements of some acidified obstructive soils in Fujian Province
表 1. 福建部分酸化障碍土壤的 pH、ORP 和 EC 测定结果

序号	实验地点	调理方法	pH	Eh, mV	$\kappa, \mu\text{S}/\text{cm}$	效果评价
1	泉港区山腰街道锦联村地瓜地	未调理前	5.85	222	206	
		第 1 次 500 kg/亩	5.84	236	204	旱地, pH 有所提升, ORP 变化不大, EC 有所下降
		第 2 次 500 kg/亩	5.95	233	213	
		第 3 次 500 kg/亩	6.04	211	177.4	
		第 4 次 500 kg/亩	6.04	217	188.0	
2	晋江市东山镇石兜村红萝卜地	未调理前	5.62	186	187.2	
		第 1 次 500 kg/亩	5.70	219	190.1	旱地, pH 略有提升, ORP 略有提升, EC 略有提升
		第 2 次 500 kg/亩	5.73	217	180.9	
		第 3 次 500 kg/亩	5.63	220	195.9	
		第 4 次 500 kg/亩	5.93	190	183.5	
3	涵江区萩芦镇萩芦村花菜地	未调理前	6.20	211	184.4	
		第 1 次 500 kg/亩	6.30	222	183.7	旱地, pH 略有提升, ORP 略有提升, EC 变化不大
		第 2 次 500 kg/亩	6.45	238	215	
		第 3 次 500 kg/亩	6.36	235	187.6	
		第 4 次 500 kg/亩	6.39	232	164.2	
4	南安市乐峰镇坑口村马蹄笋地	未调理前	5.58	357	75.6	
		第 1 次 500 kg/亩	6.02	375	77.4	坡地, pH 提升明显, ORP 下降明显, EC 有所提升
		第 2 次 500 kg/亩	6.32	367	69.6	
		第 3 次 500 kg/亩	6.49	289	89.4	
		第 4 次 500 kg/亩	6.26	279	88.0	
5	永泰县白云乡岭下村菌草地	未调理前	5.70	327	23.4	
		第 1 次 500 kg/亩	5.82	339	48.6	坡地, pH 有所提升, ORP 变化不大, EC 提升明显
		第 2 次 500 kg/亩	5.92	342	64.8	
		第 3 次 500 kg/亩	5.89	366	80.1	
		第 4 次 500 kg/亩	6.09	338	82.4	

续表

6	福安市溪潭镇岳秀村葡萄地	未调理前	4.17	165	237	坡地, pH 提升显著, ORP 提升明显, EC 变化不大
		第 1 次 1000 kg/亩	4.58	165	227	
		第 2 次 1000 kg/亩	5.18	190	218	
		第 3 次 1000 kg/亩	4.79	212	230	
		第 4 次 1000 kg/亩	5.30	210	212	
7	连城县四堡镇双泉村芙蓉李地	未调理前	5.85	533	21.9	坡地, pH 变化不大, ORP 下降明显, EC 变化不大
		第 1 次 500 kg/亩	5.92	530	14.7	
		第 2 次 500 kg/亩	5.61	478	13.7	
		第 3 次 500 kg/亩	5.90	487	20.6	
		第 4 次 500 kg/亩	5.65	468	20.4	
8	松溪县花桥乡花桥村地瓜地	未调理前	4.48	423	8.9	坡地, pH 提升明显, ORP 有所下降, EC 提升明显
		第 1 次 1000 kg/亩	4.63	396	8.1	
		第 2 次 1000 kg/亩	5.50	418	34.8	
		第 3 次 1000 kg/亩	5.34	348	23.4	
		第 4 次 1000 kg/亩	5.34	376	32.8	
9	建宁县均口镇修竹村水稻地	未调理前	5.01	92	35.5	水田, pH 明显提升, ORP 明显提升, EC 明显提升
		第 1 次 500 kg/亩	5.13	102	38.4	
		第 2 次 500 kg/亩	5.14	136	47.6	
		第 3 次 500 kg/亩	5.55	127	46.8	
		第 4 次 500 kg/亩	5.60	135	49.2	
10	翔安区马巷街道后郭村油菜地	未调理前	4.21	103	70.2	水田, pH 略有提升, ORP 有所提升, EC 有所提升
		第 1 次 500 kg/亩	4.40	144	77.4	
		第 2 次 500 kg/亩	4.57	133	75.6	
		第 3 次 500 kg/亩	4.57	140	80.9	
		第 4 次 500 kg/亩	4.50	145	86.1	

3.2. 酸化障碍土壤的 pH 变化

土壤酸化的过程主要包含两个方面: (1) 自然酸化。自然界的土壤酸化本质上是伴随着土壤形成的一种非常普遍的自然演化过程。然而在强降雨的条件下, 土壤中的易溶离子随着强降雨的发生而产生强烈的淋溶作用, 绝大部分的盐基离子随着淋溶的水渗作用向下移动, 致使土壤中易溶性成分急剧下降。土壤溶液中由水电离或有机酸解离产生的 H^+ 便逐步取代土壤中失去的盐基离子, 使得土壤盐基化的饱和度下降, H^+ 的浓度逐渐增加, 从而引发土壤逐步自然酸化。(2) 人为酸化。自上世纪 80 年代以来, 酸雨被认定为全球性气候污染的主要因素。在酸雨的长期作用下, 土壤中的 H^+ 逐渐增加, 导致土壤的 pH 值逐

渐下降，大大加剧了土壤酸化的进程；而土壤的酸化另一主要人为因素来自于不合理、不科学的耕作措施，主要是由于农业引进了工业化的生产方式，在农业的生产活动过程中过度施用氮肥、钾肥和磷肥等化肥，造成土壤可溶性盐基离子的大量流失，致使土壤中 H^+ 的含量不断提高，农作物耕作土壤的酸化问题愈发严重[7][13][14]。

根据 GB/T 23486-2009《城镇污水处理厂污泥处置 - 园林绿化用泥质》的要求：园林土壤要求 pH 在 5.5~7.8 之间；CJ/T 340-2016《绿化种植土壤》中要求：水土比为 2.5:1 时，pH 处于 5.0~8.3 之间。从实验结果可以看出，根据起始土壤的 pH 的不同，采用不同施用量的土壤结构调理剂调理改良后的酸化障碍土壤，处于强酸化土壤采用每次 1000 kg/亩的调理剂进行调理改良后，可使土壤 pH 由 4.0 提升 1 个数量级至 5.0 左右，改良效果较为显著；处于酸化土壤 $4.5 < pH < 5.5$ 范围内的酸化障碍土壤，采用每次 500 kg/亩的调理剂进行改良，可由 $pH < 5.5$ 上升至 pH 为 6.0 左右，改良效果良好；而对于 $pH > 5.5$ 的弱酸化土壤进行调理改良后，其 pH 的变化不大，但总体酸化障碍问题也能得到小幅度的缓解。

3.3. 酸化障碍土壤的 ORP 变化

众所周知，土壤中发生化学反应的活性，主要是指土壤中的氧化还原反应，其实质与土壤中存在的可变化合价如 Fe、Mn、O、N、S、C 等元素的化合价形态相关，它们是土壤的氧化还原反应的基础，因此从土壤的 ORP 变化可以很好地分析土壤的活性状况。

通常情况下，旱地土壤的正常 Eh 为 200~750 mV，若大于 750 mV，则土壤完全处于氧化状态，有机质快速耗尽，完全丧失种植作物的属性。若小于 200 mV，则表明土壤水分过多，通气不良，应排水或松土以提高其 Eh 值。但如果土壤中溶解氧严重不足，长期处于厌氧状态，土壤易形成还原性环境，土壤中有机质被还原，致使土壤出现 ORP 下降，从而演化为黏性障碍土壤[1][13][15][17]。因此，土壤的 ORP 直接影响土壤中有机质的矿化过程，如果土壤 $Eh > 250$ mV，土壤处于高氧化态，致使土壤中有机质的矿化过程加剧，造成土壤有机质含量快速下降，同时再加上土壤处在酸化的条件下，其中有机质将快速流失从而丧失土壤的种植属性。而对于 $ORP < 100$ mV 的土壤，此时具有明显的还原性，土壤中有机质的矿化过程缓慢，同样也严重影响作物的生长。

从实验结果可以看出，对于酸化的旱地土壤，通过土壤结构调理剂改良后，ORP 一般都能调节至比较适宜的 200~250 mV；而酸化的水田土壤，通过土壤结构改良后，其 ORP 一般也可以达到相对适宜的 150 mV 左右；坡地土壤一般 ORP 都较高，经土壤结构调理剂的调理改良后，其 ORP 可得到一定程度的降低，逐步趋于旱地土壤所需的 ORP 范围。

3.4. 酸化障碍土壤的 EC 变化

土壤电导率(EC)是土壤的电化学特征参数，反映土壤的盐分状况、养分含量、水分含量等理化信息，是土壤水溶性盐基含量的重要指标，而土壤水溶性盐基是判定土壤中盐类离子是否影响作物生长的重要因素[1][14][17]。根据 GB/T 23486-2009《城镇污水处理厂污泥处置 - 园林绿化用泥质》的要求，园林土壤电导率要求 $\kappa < 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，CJ/T 340-2016《绿化种植土壤》中则要求：水土比为 5:1 时，EC 值处于 150~900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间。

从实验数据可知，采用土壤结构调理剂调理改良后的酸化障碍土壤，从 EC 值的表现变化可见，不管 EC 值处于哪一范围，所有酸化土壤的 EC 值经土壤结构调理剂调理改良后都能得到一定程度的恢复，这与土壤结构调理剂中添加的少量水溶性无机盐有关。无机盐的加入可有效提升土壤的电导率，同时加快有机质的矿化进程，因此对于所有酸化障碍土壤，其电导率的改良效果都极为显著。特别是对一些 $\kappa < 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的土壤进行土壤结构调理剂的调理改良后，其 EC 值得到不同程度的提升，并逐步趋向于正常的

EC 值范围。

3.5. 酸化土壤 pH、ORP 和 EC 之间的相互关系

酸化障碍土壤的出现是以土壤质量降低为标志, 其实质表现在土壤的物理、化学、生物学等方面性质的下降。从实验结果不难看出, 障碍土壤问题与土壤质量降低紧密相关[1][8][14]。其中, 土壤的 pH、ORP 和 EC 是相互关联、相互制约并相互影响的 3 个主要土壤理化指标。

首先, 当土壤的 $\text{pH} < 6.5$ 时, 土壤产生一定的酸化障碍, 此时土壤的 ORP 若出现偏高或偏低, 都将对土壤有机质的充分利用产生极为不利的影响。当土壤中的 EC 偏高时, 即土壤中水溶性盐基离子浓度偏高致使土壤形成盐碱化障碍土壤; 而土壤中的 EC 偏低时, 即土壤由于淋溶作用流失大量的水溶性离子, 从而致使土壤活性降低。

其次, 当土壤的 pH 下降时, 土壤中的阳离子溶出速率发生指数级上升, 造成可溶性离子大量的流失, 致使土壤的 EC 值不断下降, 有机质的矿化过程受到抑制, 土壤的活性随之降低。

再者, 在酸化障碍土壤中, 当土壤的 ORP 上升时, 土壤处于氧化态, 有机质矿化速率过快, 造成大量有机质因矿化而流失; 当土壤的 ORP 下降时, 土壤处于还原态, 有机质矿化速率过于缓慢, 造成土壤中可被根系吸收的物质受限, 土壤活性降低。

最后, 在酸化障碍土壤中, 当土壤的 EC 值下降时, 土壤的导电能力随之下降, 离子的迁移受限, 有机质的矿化过程也受到抑制, 从而无法提供足量的矿化物保证作物根系营养所需, 严重影响作物的生长; 而当 $\kappa > 900 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 土壤中的盐基离子浓度过高, 致使土壤的渗透压超过作物根系的渗透压, 作物将由于高渗透压而脱水萎蔫, 导致作物脱水而干枯凋亡。

从实验结果看, 对于旱地、坡地和水田等不同类型的种植土壤, 土壤结构调理剂对旱地的调理改良效果最为显著, 对于水田土壤的 EC 和 ORP 也能得到一定程度的提升, 而对于高 ORP 和低 EC 的坡地土壤, 由于土壤中有机质含量较少, 调理剂的使用量相对有限, 调理改良效果仅得到初步的效果, 后续仍需要更大力度地改良与调理, 方能最大程度地转化坡地酸化障碍的 ORP 偏高和 EC 偏低问题。

4. 结论

本实验通过选取 10 处福建省内部分酸化障碍土壤作为研究对象, 同时采用泉州市洋屿土壤科技有限公司生产的土壤结构调理剂进行土壤调理改良, 历经 2 年实验和 4 季作物的轮作, 实验过程中针对土壤的 pH、ORP 和 EC 进行跟踪测定并进行分析探讨, 同时与传统的钙镁土壤调理剂进行对比, 结论如下:

(1) 对于不同酸化程度的障碍土壤, 在 $\text{pH} < 4.5$ 的高酸化障碍土壤采用 2 年 4 次 $1000 \text{ kg}/\text{亩}$ 的土壤结构调理剂进行改良, 土壤的 pH 可提升 1 个单位, 改良效果显著; 当 $4.5 < \text{pH} < 5.5$ 的酸化障碍土壤采用 2 年 4 次 $500 \text{ kg}/\text{亩}$ 的土壤结构调理剂进行改良, 土壤的 pH 提升了 0.5 个单位, 改良效果明显; 而当 $5.5 < \text{pH} < 6.5$ 的弱酸化障碍土壤采用 2 年 8 次 $250 \text{ kg}/\text{亩}$ 的土壤结构调理剂进行改良后, 土壤的酸化程度也得到了小幅度的缓解。

(2) 对于酸化障碍土壤的 ORP 和 EC 异常问题, 结合其不同的酸化程度, 通过实验研究发现, 科学合理地使用土壤结构调理剂, 可以有效缓解由于土壤的 ORP 偏高和 EC 偏低问题, 其 ORP 值可由 $Eh > 300 \text{ mV}$ 或 EC 值可由 $\kappa < 90 \mu\text{S}/\text{cm}$ 中得到改良。其中, 旱地的 ORP 逐步恢复到 200 mV 左右, EC 恢复至 $180 \mu\text{S}/\text{cm}$; 坡地的 ORP 可得到 $50\text{--}100 \text{ mV}$ 的变化, EC 也得到 $10\text{--}60 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的变化; 水田的 ORP 都得到 $30\text{--}40 \text{ mV}$ 的提升, EC 也得到 $10\text{--}15 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的提升; 这些变化都一致指向, 经过土壤结构调理剂的改良后, 土壤的 ORP 和 EC 性质都得到有效改善, 逐步恢复土壤的种植属性。

(3) 根据实验结果发现, 对于酸化障碍土壤, 必须严格跟踪并控制土壤的 pH、ORP 和 EC 值, 适时、

适当、适量使用土壤结构调理剂，才能保证土壤的理化性质长期处于有效范畴，防止出现土壤的酸化或盐碱化障碍。当土壤中出现氧化还原电位降低、电导下降、pH下降时，土壤将产生酸化障碍问题；而当土壤中氧化还原电位升高、电导升高、pH升高时，土壤却走向另一个极端，出现盐碱化障碍问题。

基金项目

福建师范大学横向课题(项目编号：DH-1567)。

参考文献

- [1] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [2] Cregan, P.D. and Scott, B.J. (1998) Soil Acidification—An Agricultural and Environmental Problem. CSIRO Publishing, 75-77.
- [3] Inkley, D., Driscoll, C.T. and Allen, H.L. (1989) Acidic Deposition and Forest Soils. Springer-Verlag.
- [4] Liu, H., Du, X., Li, Y., Han, X., Li, B., Zhang, X., et al. (2022) Organic Substitutions Improve Soil Quality and Maize Yield through Increasing Soil Microbial Diversity. *Journal of Cleaner Production*, **347**, Article ID: 131323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131323>
- [5] Late, R.L. (1994) Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Science Society of America*.
- [6] 孟远夺. 我国农田土壤酸化状况与治理措施探讨[J]. 中国农技推广, 2014, 30(6): 38-39.
- [7] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [8] 翁伯琦, 吴良泉, 林怡, 等. 福建省耕地土壤酸化改良面临的挑战及对策[J]. 亚热带资源与环境学报, 2021, 16(4): 32-37.
- [9] 沈仁芳, 赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学学报, 2019, 9(3): 16-20.
- [10] 邱婷, 张屹, 肖姬玲, 等. 土壤酸化及酸性土壤改良技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2016(10): 114-117, 121.
- [11] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [12] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1): 23-28.
- [13] 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: 12-21, 74-79, 87-89.
- [14] 李海玲. 土壤pH值的测定——电位法[J]. 土壤肥料, 2011(13): 47-48.
- [15] 李卓, 汪雁, 孔瑾. 土壤氧化还原电位测定方法的探讨与研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(10): 172-174.
- [16] 张祯, 荀久玉, 孔锦. 土壤电导率的测定中影响因素研究[J]. 科技信息(学术版), 2007(28): 276-277.
- [17] Vorenkamp, M., van der Geest, H.G. and Hunting, E.R. (2011) An Improved Datalogger and Novel Probes for Continuous Redox Measurements in Wetlands. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **91**, 801-810. <https://doi.org/10.1080/03067319.2010.535123>