

贵州无籽刺梨种植区土壤质量研究进展

王羽^{1*}, 吕文强^{1,2#}, 陈波¹, 向仰州¹, 殷梦贵¹

¹贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳

²贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年2月24日; 录用日期: 2022年3月26日; 发布日期: 2022年4月6日

摘要

植被恢复与重建是治理石漠化重要的举措之一, 无籽刺梨具有较高的经济、社会和生态效益, 近年来常被作为石漠化地区生态重建的经济树种。无籽刺梨的种植促进了石漠化区土壤质量的改善, 而其品质和生产潜力反过来也受到土壤质量的制约。因此, 关于无籽刺梨种植区土壤质量的研究得到了广泛关注。本文在广泛阅读文献的基础上, 综述了贵州无籽刺梨种植区土壤质量的研究进展, 并进行了系统总结, 包括: 1) 土壤养分; 2) 土壤理化性质; 3) 土壤重金属; 4) 土壤酶。最后, 对目前的研究不足进行了讨论, 并对未来需要进一步开展的研究工作进行了展望。

关键词

无籽刺梨, 品质, 土壤质量, 贵州, 种植区

Advance in Research on Soil Quality of *Rosa kweichonensis var. sterilis* Growing Area in Guizhou Province

Yu Wang^{1*}, Wenqiang Lv^{1,2#}, Bo Chen¹, Yangzhou Xiang¹, Menggui Yin¹

¹School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guiyang Guizhou

Received: Feb. 24th, 2022; accepted: Mar. 26th, 2022; published: Apr. 6th, 2022

Abstract

Vegetation restoration and reconstruction is one of the important measures to control rocky de-

*第一作者。

#通讯作者。

sertification. Recently, *Rosa kweichonensis var. sterilis* was applied to ecological reconstruction in rocky desertification that had high economic, social and ecological benefits. The planting of *Rosa kweichonensis var. sterilis* could positively improve the degraded soil quality in rocky desertification area. On the other hand, degraded soil quality played an important role on quality and production potential of *Rosa kweichonensis var. sterilis* in rocky desertification area. Therefore, research on soil quality in *Rosa kweichonensis var. sterilis* growing area was widely concerned. This review systematically summarized soil quality in *Rosa kweichonensis var. sterilis* growing area, including: 1) soil nutrient; 2) soil physical and chemical properties; 3) soil heavy metal; 4) soil enzyme. With those results gathered, we summarized the shortcomings of previous studies and prospected the future researches as well.

Keywords

Rosa kweichonensis var. sterilis, Quality, Soil Quality, Guizhou, Growing Area

Copyright © 2022 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

贵州省地处我国西南喀斯特地区的腹心地带,碳酸盐岩分布面积广,其出露面积约 13 万 km²,约占全省土地总面积的 3/4,是全国喀斯特地貌发育最为典型的省份之一[1]。喀斯特石漠化不仅使土地蓄水保肥能力下降,造成土地生产力降低、地表植被覆盖大面积减少、地表水资源枯竭,而且造成土地生态系统功能丧失、粮食减产[2]。受季风气候的强烈影响,当地的水热组合以及岩石组成成分等加速了土地退化,加上人类活动的影响,使土地生态系统表现出显著的脆弱性。贵州省生态环境和社会经济发展的平衡能力弱,可持续能力差,促使人粮矛盾、人地矛盾尖锐且突出[1]。由于长期不合理利用和开垦土地,导致石漠化进程加剧,水土流失严重。因此石漠化治理是改善生态环境的关键所在,也是实现可持续发展的主要途径。从本质上看,石漠化过程的具体表现是土地退化,石漠化面积扩增意味着生态系统的抗干扰能力减弱,生物的生存环境丧失[3]。传统的石漠化治理是以花椒、金银花等经济作物作为首选,由于其生态适宜性能力较差,且随着种植年限的增加而发生不同程度的退化。随着对无籽刺梨的研究不断深入,发现其富含黄酮、超氧化物歧化酶、维生素 C 及多种微量元素,其中维 C 是猕猴桃的十倍左右,作为一种新型的保健水果,其特有的营养价值给当地带来丰厚的收入,且对喀斯特石漠化地区的生态修复发挥着重要作用。总的来说,无籽刺梨在社会、经济、生态方面极具开发潜力[4][5]。

无籽刺梨为多年生落叶灌木,对于喀斯特生态修复的影响是积极的,其特有的生态适应性:耐瘠、抗旱、根系较浅等,使无籽刺梨与其他植物存在较大差异,对研究喀斯特地区土壤质量的演变和修复也具有典型的代表性,且在恶劣的土壤条件下能够很好地生长[6]。由于碳酸盐岩的大面积出露,导致贵州省大部分地区土壤贫瘠、成土缓慢、土层浅薄以及土层不连续等是造成优质的土地资源稀缺的本质因素[7]。喀斯特石漠化地区水土流失严重,土体不能很好地解决水、肥、气、热等问题[8],促使无籽刺梨的生长受到限制,导致其果实的品质和产量受到严重地限制。随着现代化进程加快,人们对于健康的要求更高,更加追求原生态产品,必将对无籽刺梨的需求加大,这必定会给无籽刺梨产业带来巨大的商机。因此,提高无籽刺梨的产量和品质对于石漠化地区来说至关重要。土壤生态系统是很多动植物和微生物生存和繁衍的庇护所[9],改善其生物多样性对于喀斯特石漠化地区的土地修复起着举足轻重的作用。土

地生产力(即土壤肥力)是土壤质量的核心,土地生产力的高低与土壤物理、化学、生物等指标相关,各个指标相互制约、相互影响,其中某个指标的变化必然影响其它指标的生态作用[10]。笔者在广泛阅读文献的基础上,分别从土壤养分、土壤理化性质、土壤重金属、土壤酶几个方面具体论述无籽刺梨种植区土壤质量研究进展,对部分学者的研究成果进行总结并对无籽刺梨产业化发展提出合理的建议,以期在无籽刺梨产业化发展提供参考。

2. 土壤养分

土壤养分是土壤理化性质的综合反映,同时也是土壤肥力和土壤生态系统的基础,与土地或土壤生产能力的高低显著相关,也是植物生长发育所需营养元素的主要来源[11]。而土壤肥力与无籽刺梨的品质和生产潜力显著相关[12]。不同石漠化程度土壤有机质含量是正常土壤的 15.4%~66.6%、全 N 的水平只是正常土壤的 14.8%~56.7%,喀斯特地区在植被遭到破坏后,土壤养分含量降低,失去了土壤营养物质的基本来源,导致无籽刺梨生产价值降低[13]。贵州喀斯特地区地形条件复杂多样、气候温暖湿润、降水丰富且集中夏季,使土壤营养物质流失较快[14],给刺梨产业的发展造成严重影响。土壤 C、N、P、K 元素在植物生长发育过程中发挥着重要作用,对植物的正常生长影响显著,其组成状况及养分含量的多少均会影响作物的长势及品质[15]。张珍明等人对平坝、乌当、西秀三个无籽刺梨基地土壤养分进行了研究,结果表明土壤有效态养分含量相对较低,全磷含量缺乏、全氮中等、全钾含量相对比较丰富[16]。但也有研究者指出,安顺市西秀区无籽刺梨基地土壤钾素相对比较丰富,林龄在四年以下的无籽刺梨基地普遍存在缺钾问题[17]。原因可能是由于喀斯特地区特殊的成土因素,钾素主要来源于母质风化,省内广泛分布的土壤类型为黄壤,而黄壤是最缺钾的土壤之一,加上作物根系的吸收作用与套作,钾元素普遍存在缺乏。目前,种植无籽刺梨都以施用化肥为主,刺梨长势虽好,但果实的品质却受到严重的限制,同时也造成刺梨基地的生物多样性严重下降,这有悖于可持续发展的理念,不利于当地的生态系统的稳定。如何高效的利用土壤有效养分,改善果实的品质以及增加产量,对于贵州省的经济、社会、生态至关重要,也是当前发展无籽刺梨产业的重难点。

3. 土壤理化性质

土壤质量一般以土壤物理、化学等指标反映[18]。土壤孔隙度、土壤含水量和土壤容重是衡量土壤物理性质优劣的重要指标,植物生长发育和土壤养分的有效性与土壤孔隙度和土壤容重显著相关[19] [20] [21]。喀斯特地区土层浅薄、土层不连续,加上人为活动的不断干扰,土壤质量呈下降趋势。土壤肥力可以直接反映土壤质量的好坏,土壤物理性质和土壤化学性质与土壤肥力显著相关,直接影响土壤生态系统中动植物以及微生物的生长发育和生理活动[22] [23] [24]。李朝婵等对贵州省内 11 个无籽刺梨基地土壤理化性质的研究结果表明,田间持水量与土壤容重、土壤有机质与土壤全氮之间都存在显著的相关关系,分别呈正相关和负相关关系[25];杨皓等人的研究表明,无籽刺梨种植基地随种植年限的延长土壤有机质含量持续增加,但有机质含量峰值也只存在 3~4 年林龄中,之后便呈缓慢下降的趋势[17],这可能与农户的施肥与管理有关。由于喀斯特地区土壤酸碱度不平衡,经果林种植对土壤 pH 有积极的影响且能改善土壤环境质量[26]。种植无籽刺梨有利于喀斯特山区土地生态系统的修复,而且随种植时间的持续增加,土壤 pH 趋近于无籽刺梨生长适宜的偏酸性土壤环境[27]。就目前而言,种植户大多为了追求经济效益,盲目施用化肥,化肥的过量施用不仅造成土壤板结、透气性差、资源浪费等现象,且不利于无籽刺梨品质的提高[28]。同时,也会造成土壤有机质含量大幅度降低,土壤理化性质严重恶化。施用安全优质的有机肥对土壤物理性状的改善有显著的作用[29],有研究表明,有机肥的施用对土壤的大、中孔隙度有积极的影响,相比较而言,有机肥处理的土壤孔隙度比化肥处理和作施肥处理的土壤孔隙度改善明

显, 分别是化肥处理的 1.45~1.68 倍、是不作施肥处理的 1.22~1.43 倍[30]。因此, 合理的施肥手段对于土壤理化性质至关重要, 而土壤理化性质又是土壤肥力的体现, 与无籽刺梨的品质和产量息息相关。

4. 土壤重金属

无籽刺梨在喀斯特地区能够很好的生长, 单株产量高, 含有多种营养元素, 在贵州被广泛引种, 具有良好的市场发展前景。土壤是人类赖以生存、生产和生活的条件, 但同时也是接纳各种污染物的最终场所[31]。近年来, 种植户为寻求无籽刺梨更大的经济效益, 盲目施用农药、化肥, 以及对当地矿产资源的开采等均会导致农产品重金属含量增加[32]。随着人们生活水平的持续提升, 有机农业种植满足了人类对绿色无公害产品追求, 同时也是农民扩大收益、增加产量的主要种植方式和人类获取安全食品的重要途径[33]。其中, 重金属是有机食品检测的指标之一。重金属是指毒性比较强, 对人类健康具有潜在威胁的无机污染物, 它们通过污染土壤和作物, 并在其中富集, 对作物的生长发育、产量和品质均有不可估量的危害[34]。重金属含量超标不仅会影响无籽刺梨的品质, 而且可以通过食物链在人体内富集, 对人体的健康造成永久性危害。导致土壤重金属含量升高的重要原因之一是化肥和有机肥的过度使用[35]。因此, 合理的使用化肥和有机肥是减少土壤重金属污染的有效途径之一。不同的学者对贵州省内十个无籽刺梨种植基地重金属污染状况进行了研究, 研究结论基本一致, 种植基地土壤重金属 As、Pb 的含量均处于标准范围内, 对人体健康不会构成较大威胁, 但基地 Cd 含量超标严重, 土壤遭受 Hg、Cu 两种重金属不同程度的污染, 超标率分别高达 60%、50% [36] [37], 其中 Cd 污染的治理迫在眉睫。由于贵州省特殊的地质演化背景, 矿山地区重金属含量的背景值偏高, 如赫章、纳雍的铅锌矿以及铜仁万山地区的汞矿等[38]。因此, 在重金属含量过高的地区, 应充分考虑当地的地质背景和重金属的有效态。贵州省矿产资源丰富, 在采矿时产生含有大量重金属的矿渣和废水, 经大气降水之后随地表径流扩散到周边的土壤及水体, 特别是农业种植区, 给当地的生态系统造成严重的危害, 进而威胁着人类的健康。在人为活动的强烈干扰下, 重金属的迁移转化速率增加, 无论是大气、水体、森林、土壤等都存在不同浓度的重金属污染。目前, 省内经济飞速发展, 无籽刺梨产业化势在必行。提高无籽刺梨的品质和产量是实现其规模化生产的基础, 土壤重金属污染是限制其规模化生产的重要因素, 如何实现无籽刺梨绿色生产及可持续发展, 是当前发展无籽刺梨产业面临的重大挑战。

5. 土壤酶

来源于植物残体、植物根系、土壤动物以及土壤微生物的土壤酶, 不仅是一种生物活性物质, 同时也是土壤生态系统中最活跃的有机成分之一, 能催化土壤中的复杂有机物质转化为简单无机化合物[39]。 β -葡萄糖苷酶、脲酶和磷酸酶的活性能在一定程度上影响作物的产量[40]; 而过氧化氢酶、脲酶与蔗糖酶等则会影响到作物的品质[41] [42]。薛冬等对红壤土壤酶的研究结果表明, 过氧化氢酶、蔗糖酶及磷酸酶活性对土壤有机碳、全磷、全氮含量有很大影响[43]。周玮等对花江喀斯特地区花椒人工林的土壤研究结果表明, 随着花椒林龄的增加, 蔗糖酶活性缓慢上升, 且花椒种植年限在四年后, 基地土壤蔗糖酶活性持续上升且增加趋势明显[44]。随着无籽刺梨种植时间的延长, 土壤肥力得到了很大的改善、土壤酶活性不断上升, 特别是蔗糖酶活性增加趋势较为明显[17], 和上述的研究结果基本一致, 究其原因, 可能是随着无籽刺梨种植年限的增加, 对养分的需求不断增大, 根系代谢旺盛, 分泌物增多, 土壤中的各种矿质营养元素的代谢和循环加快, 土壤酶在其中起着重要作用且活性不断上升。杨皓等人对无籽刺梨基地土壤及树体特征对种植年限的研究结果表明, 随种植时间的延长, 土壤肥力得到了很大的改善, 且土壤酶的活性持续上升, 然而过氧化氢酶的活性则呈现一种先上升后缓慢下降的趋势, 峰值出现在 3~4 年林龄中, 可能与种植年限和重复施肥有关[6]。酶在土壤生态系统中起着举足轻重的作用, 关乎着作物的产量与品

质。酶活性高，促进土壤养分的循环与代谢，根系的吸收作用强烈，促进作物的生长发育。对于喀斯特地区种植无籽刺梨来说，合理进行施肥与套作、改善土壤条件能很大程度上解决无籽刺梨的品质与产量。同时也能扭转喀斯特石漠化地区的生态脆弱性，将社会 - 经济 - 生态效益实现高度一体化，打造贵州省特有的无籽刺梨品牌。

综上所述，喀斯特石漠化地区种植无籽刺梨有利于生态环境的恢复和重建，使土壤养分含量升高，土壤理化性质趋向于改良，土壤酶的活性上升，有利于土壤质量的恢复和无籽刺梨的生长；而因全省地处于喀斯特石漠化地带，成土条件不足所导致的土壤瘠薄，造成无籽刺梨的品质和产量受到严重地限制；此外，全省矿产资源丰富，采矿过程中所产生的废渣废水携带大量的重金属，使无籽刺梨的绿色发展受到阻碍。改善土壤质量，降低土壤重金属不仅有利于土壤的可持续利用，同时也利于无籽刺梨产业健康发展。

6. 问题与展望

1) 问题

在全国范围内，贵州省作为一个喀斯特地貌强烈发育的省份，水土保持能力差、山高坡陡、土层浅薄等因素，导致省内农业基础欠缺[45]。改善土壤质量是目前生态修复攻克的关键点，而土壤质量的优劣对于无籽刺梨的产量和品质起着决定性作用。因此，在寻求经济效益的同时，更应该注重其生态效益所带来的价值以及土壤质量的可持续发展与利用。

当前，由于无籽刺梨价值较高，受到了学者的广泛关注，主要的焦点集中在无籽刺梨的香气成分分析、扦插育苗与组培快繁、形态学特征、药理特性及抗白粉病等生物学特征和树体的化学成份分析等方面[4][46][47]。但关于无籽刺梨的品质、产量与土壤质量的有关研究则明显不足，存在一定的问题。

2) 展望

针对以上不足，有待开展进一步的研究工作：

① 土壤质量影响无籽刺梨品质的机制需要阐明。在已有的研究中，学者从两个方面对贵州无籽刺梨种植区的土壤质量进行了大量研究，一是无籽刺梨的种植会对石漠化区退化土壤带来如何影响，二是无籽刺梨品质和土壤质量之间的相关关系如何。但土壤质量影响无籽刺梨品质的机制尚不明确，在今后的研究中应阐明土壤质量影响无籽刺梨品质的机理，为无籽刺梨的精确管理和产业的可持续发展提供科技支撑。

② 加强无籽刺梨品质与生态环境因子之间的相关性研究。尽管土壤质量直接影响着无籽刺梨的品质，但无籽刺梨的品质也受到其他生态环境因子的影响，如降水、温度等。贵州作为一个山区省份，不仅土壤质量具有高度的空间异质性，其气候等其他生态环境因子也就有区域上的差异性。为促进无籽刺梨在贵州全省区域上合理化种植，应开展无籽刺梨品质和生态环境因子之间的综合研究。

③ 加强重金属在无籽刺梨 - 土壤系统的迁移转化过程研究。贵州作为一个重金属地质高背景区(如镉)，在目前的研究中发现无籽刺梨种植区镉等重金属存在不同程度的超标现象，高含量的镉会不会被无籽刺梨果实富集，影响无籽刺梨果实的质量安全？无籽刺梨种植过程中的管理措施会不会促进无籽刺梨对地质高背景区镉的吸收？这些问题都亟待回答。厘清重金属在土壤 - 无籽刺梨系统中的作用机理，才能通过采取合适的技术措施减少果实中重金属的含量、改善果实的品质，为人体健康构建一道安全绿色的屏障，从而进一步推动无籽刺梨产业的进一步发展。

基金项目

国家级大学生创新训练项目(202114223004)；校级大学生创新训练项目(202114223145)；2020年贵州

师范学院校级博士启动基金项目(2020BS019)。

参考文献

- [1] 苏维词, 朱文孝. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性分析[J]. 山地学报, 2000, 18(5): 429-434.
- [2] Wang, S.J., Liu, Q.M. and Zhang, D.F. (2004) Karst Rocky Desertification in Southwestern China: Geomorphology, Landuse, Impact and Rehabilitation. *Land Degradation & Development*, **15**, 115-121. <https://doi.org/10.1002/ldr.592>
- [3] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [4] 杨皓, 李婕玲, 范明毅, 等. 无籽刺梨研究进展与展望[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 38-42.
- [5] 赵转地, 张爱华, 洪峰. 刺梨及其产品的营养及保健药用价值研究进展[J]. 环境与职业医学, 2007, 24(1): 82-84.
- [6] 杨皓, 李婕玲, 范明毅, 等. 贵州无籽刺梨基地土壤及树体特征对种植年限的响应[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 797-804.
- [7] 梁彬, 朱明秋, 陈宏峰, 等. 西南岩溶石山地区土地资源脆弱性研究意义及应用前景[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 9087-9090.
- [8] 史德明, 韦启潘, 梁音, 等. 中国南方侵蚀土壤退化指标体系研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 1-9.
- [9] 张心昱, 陈利顶. 土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 30-34.
- [10] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.
- [11] Chen, Y.-D., *et al.* (2013) Minimum Data Set for Assessing Soil Quality in Farmland of Northeast China. *Pedosphere*, **23**, 564-576. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60050-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60050-8)
- [12] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 50-55.
- [13] 龙健, 李娟, 汪境仁, 等. 典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 77-81.
- [14] Yang, P., Tang, Y.Q., Zhou, N.Q., *et al.* (2011) Characteristics of Red Clay Creep in Karst Caves and Loss Leakage of Soil in the Karst Rocky Desertification Area of Puding County, Guizhou, China. *Environmental Earth Sciences*, **63**, 543-549. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0721-1>
- [15] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 510-516.
- [16] 张珍明, 张家春, 贺红早, 等. 喀斯特地区无籽刺梨产地土壤与植株的碳、氮和磷分布特征[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3): 618-622.
- [17] 杨皓, 范明毅, 李婕玲, 等. 喀斯特山区无籽刺梨种植基地土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 28-37.
- [18] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [19] 李永强, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 61-64, 69.
- [20] 魏强, 凌雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [21] Zhao, X.Q., Ding, N. and Yan, P. (2012) Changing Rules of Physical and Chemical Properties of *Eucalyptus urophylla* spp. Forest at Different Ages in Southwest Yunnan Province. *Agricultural Science & Technology*, **13**, 1298-1302.
- [22] Whittinghill, K.A. and Hobbie, S.E. (2012) Effects of pH and Calcium on Soil Organic Matter Dynamics in Alaskan Tundra. *Biogeochemistry*, **111**, 569-581. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9688-6>
- [23] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 植物残茬对土壤酸度的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2382-2388.
- [24] 王志刚, 赵永存, 廖启林, 等. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 720-727.
- [25] 李朝婵, 李婕玲, 全文选, 等. 喀斯特地区无籽刺梨产地土壤理化特征与评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(5): 12-15, 23.
- [26] 周利军, 张雪萍, 陈设. 扎龙自然保护区土地利用变化与生态风险评价[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 186-90.
- [27] 杨皓, 李婕玲, 范明毅, 等. 喀斯特山区无籽刺梨种植基地土壤质量特性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 385-389.

- [28] 曾希柏, 陈同斌, 林忠辉, 等. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 539-546.
- [29] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181.
- [30] 邓超, 毕利东, 秦江涛, 等. 长期施肥下土壤性质变化及其对微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5): 888-893.
- [31] 董红梅. 陕西白水苹果园土壤元素分布与环境研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [32] Mapanda, F., Mangwayana, E.N., Nyamangar, J., *et al.* (2007) Uptake of Heavy Metals by Vegetables Irrigated Using Wastewater and the Subsequent Risks in Harare, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, **32**, 1399-1405. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.046>
- [33] 伍应德. 基于生态环境的贵州喀斯特山区现代农业发展模式探讨[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 246-249.
- [34] 王海慧, 郇恒福, 罗瑛, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11): 210-214.
- [35] 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2936-2943.
- [36] 杨莽安, 张泽东, 李朝婵, 等. 贵州无籽刺梨果实与种植基地土壤重金属污染评价[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(4): 288-298.
- [37] 张泽东, 李朝婵, 黄先飞, 等. 喀斯特地区无籽刺梨种植基地土壤重金属风险评价[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 310-314.
- [38] 王义, 黄先飞, 胡继伟, 等. 重金属污染与修复研究进展[J]. 河南农业科学, 2012, 41(4): 1-6.
- [39] Marx, M.-C., Wood, M. and Jarvis, S.C. (2001) A Microplate Fluorimetric Assay for the Study of Enzyme Diversity in Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**, 1633-1640. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00079-7)
- [40] Verstraete, W. and Voets, J.P. (1977) Soil Microbial and Biochemical Characteristics in Relation to Soil Management and Fertility. *Pergamon*, **9**, 253-258. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(77\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(77)90031-1)
- [41] 王艳茹, 郭巧生, 邵清松, 等. 土壤因子对药用白菊花活性成分含量影响研究[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(6): 676-681.
- [42] 张新慧, 张恩和, 郎多勇, 等. 不同茬口对当归根际土壤酶活性及其产量和品质的影响[J]. 中草药, 2011, 42(11): 2322-2325.
- [43] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 等. 红壤酶活性与肥力的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1455-1458.
- [44] 周玮, 周运超, 田春. 花江喀斯特地区花椒人工林的土壤酶演变[J]. 中国岩溶, 2008, 27(3): 240-245.
- [45] 周运超, 周习会, 周玮. 贵州岩溶土壤形成及其可持续利用[J]. 山地农业生物学报, 2005, 24(5): 47-53.
- [46] 郑元, 辛培尧, 高健, 等. 无籽刺梨的研究与应用现状及展望[J]. 贵州林业科技, 2013, 41(2): 62-64.
- [47] 刘松, 赵德刚. 无籽刺梨研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2014, 33(1): 76-80.