

盐碱地土壤酶活性研究进展和展望

张体彬^{1,2}, 展小云^{1,2*}, 冯浩^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌, 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌, 712100)

摘要:盐碱地是农业生产重要的后备土地资源,同时土壤盐渍化是灌溉农业生产过程中首要考虑的问题之一。近年来,越来越多的研究开始关注盐碱地改良利用过程中包括土壤生物学性质在内的土壤整体环境质量的改善。其中,土壤酶是土壤生物活动的产物,其活性水平是土壤环境质量的良好生物学指标,可以用来评价土壤退化程度及管理措施的效果和可持续性。本文总结说明了盐渍化土壤酶活性状况及盐碱胁迫机理,并对盐碱地改良利用过程中土壤酶活性的研究现状进行了综述。最后从存在问题和关注热点出发,提出了下一步的研究重点。

关键词:盐碱地;土壤酶活性;土壤盐渍化;土壤改良

中图分类号:S156.4 **文献标识码:**A **文章编号:**0564-3945(2017)02-0495-06

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2017.02.35

张体彬, 展小云, 冯浩. 盐碱地土壤酶活性研究进展和展望[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 495-500

ZHANG Ti-bin, ZHAN Xiao-yun, FENG Hao. Research Advance and Prospect of Soil Enzyme Activities in Saline-alkali Soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 495-500

土壤盐渍化是世界性问题,涉及到世界各个地区,其中在干旱、半干旱地区尤为严重。全球盐渍土面积约为 $1 \times 10^9 \text{ hm}^2$,对发展综合性农业具有很大潜力^[1]。我国是世界盐碱地大国之一,盐渍土总面积约为 $0.99 \times 10^8 \text{ hm}^2$,且分布广泛,从热带到寒温带、滨海到内陆、湿润地区到极端干旱的荒漠地区,均有大量盐渍土的分布^[2]。同时,在灌溉农业地区,灌排不合理的农业管理措施,导致土壤盐渍化呈现增长趋势^[3]。随着人口增长,粮食需求日益增多,工业化、城市化发展,农田面积日益减少,土地资源成为制约社会经济和农业可持续发展的重要因素之一^[4]。盐碱地是我国重要的后备土地资源,盐碱地的合理利用对确保国家耕地面积不低于18亿亩的红线,和推动整个国民经济可持续发展均具有重要战略意义^[5]。

土壤盐渍化(包括盐化和碱化)影响土壤物理、化学和生物学性质,从而显著影响作物产量。关于土壤盐渍化对土壤理化性质和作物生长的影响,及其改良利用措施方面,已有大量的研究和较全面的综述^[1,3,6]。除土壤理化性质之外,土壤生物学性质也是评价土壤质量的重要属性^[7]。土壤盐渍化对微生物群落数量、相关酶活性等土壤生物学性质的不利影响,是盐渍土生产力较低的主要原因之一^[8]。其中土壤酶是土壤中微

生物活动的产物,土壤酶参与土壤中各种生物化学过程,是土壤生物活性的总体体现之一^[9-11]。在土壤有机质分解、腐殖质合成和养分循环过程中,土壤酶起着十分重要的作用,其活性水平可以直接反映土壤养分的转化速率和有效性^[12,13]。同时土壤酶活性对壤环境因子变异反应敏感,是评价土壤肥力水平、退化程度和管理措施优劣的微生物学指标^[14,15]。在极其脆弱的盐渍化土壤生态系统中,土壤酶的生态作用日益凸显。近年来,关于盐碱地土壤酶活性的研究,逐渐引起学者的重视,从各类盐渍化土壤酶活性现状,到盐渍土改良利用过程中土壤酶活性的变化规律,前人做了一系列的研究工作,但系统的文献综述、存在问题和对未来研究重点的展望,至今鲜见报道。

本文预期通过对前人文献的综述,阐明盐渍化土壤中酶活性的水平状况和盐碱胁迫机理,讨论盐碱地改良利用过程中土壤酶活性的变化规律,并从研究存在的问题和全球关注热点出发,试图提出下一步研究重点。

1 盐碱地土壤酶活性状况和盐碱胁迫机理

土壤中的酶,主要是与土壤有机、无机成分结合在

收稿日期:2016-09-09;修订日期:2017-01-04

基金项目:国家自然科学基金(51509238,41503078)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2452015091)资助

作者简介:张体彬(1983-),男,山东菏泽人,博士,助理研究员,主要从事农业节水灌溉和盐碱地改良方面的研究。E-mail:zhangtbin@163.com

*通讯作者:E-mail:zhanxy@ms.iswc.ac.cn

一起的,而土壤是一个包含固相、液相和气相的多相体,土壤中的很多因子,例如土壤水分、盐分、温度、pH 值等理化性质,土壤有机质、氮、磷等养分状况,以及土壤生物、微生物类群状况,都与土壤酶活性密切相关。所以关于土壤盐渍化对土壤酶的影响,以及土壤中的哪一个过程决定了其活性的变化,值得研究。

许多研究发现,土壤盐碱度的增加抑制了脱氢酶、 β -葡糖苷酶、脲酶、蛋白酶、碱性和酸性磷酸酶、芳基硫酸酯酶等酶活性^[16-19]。Pathak 和 Rao(1998)研究指出土壤含盐量和碱化度对谷酰胺酶和脱氢酶活性的影响不显著,但对天冬酰胺酶活性却影响显著^[20]。Rietz 和 Haynes(2003)的研究也表明,随着土壤电导率(EC)和交换性钠百分率(ESP,即碱化度)的增大, β -糖苷酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性降低,其中芳基硫酸酯酶受到的影响较小^[21]。Singh(2016)指出土壤溶液中 NaCl 浓度的增加引起土壤酶活性的改变,其中对水解酶(磷酸酶和 β -葡糖苷酶)的不利影响尤为显著^[22]。有研究表明,碱化土壤中脲酶、碱性磷酸酶活性与 pH 值之间常呈现非线性的负相关^[23-25]。而 Singh(2016)则指出随着土壤 pH 的升高,蛋白酶活性显著降低,而碱性磷酸酶则不然,此外,脱氢酶和蛋白酶和土壤 ESP 呈现显著负相关,而碱性磷酸酶则和 ESP 显著正相关,脱氢酶和土壤 pH 之间关系不显著^[22]。以上研究结果意味着不同的盐渍化类型土壤可能拥有着特定的优势酶活性。

土壤碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性分别在碱性和酸性土壤中活性较高^[26-28]。一般来说,碱性磷酸酶在中性和弱碱性的土壤中占主导地位。土壤酶活性取决于微生物生长和周围可获得养分供给的多少,所以碱性磷酸酶活性水平可能取决于于土壤有效磷的含量^[27]。对于半干旱地区碱化土壤而言,随着土壤 ESP 和 pH 值的升高,土壤无机态磷的含量增加。当土壤微生物周围磷素含量不足时,它们开始分泌产生酸性或碱性磷酸酶(这取决于土壤的 pH 值和微生物群落组成),而后,形成的磷酸酶催化有机质的分解,释放无机态磷^[29]。由此得出,磷酸酶活性和土壤中的无机态磷含量呈现负相关,此关系在盐渍土中尤为明显^[29,30]。Rao 等(2000)研究也指出磷酸酶常常固定于土壤粘粒矿物、有机和有机无机复合体的矿物中,表现出和其他土壤酶不同的催化特性^[31]。

对于不同盐渍化程度或类型的土壤酶活性水平比较,前人也做了一些研究。首先,李凤霞等(2012)对银川平原不同类型盐渍化土壤酶活性的研究发现,随着碱化土壤 pH 值和盐化土壤含盐量的增加,土壤过氧化氢酶、转化酶、碱性磷酸酶和脲酶活性均呈现逐渐降

低的趋势,土壤碱性磷酸酶活性表现为碱化土壤显著高于盐化土壤,而过氧化氢酶、转化酶和脲酶活性在不同类型土壤间差异不显著^[32]。牛世全等(2012)在河西走廊地区也研究了不同盐渍化程度土壤酶活性及其与理化因子的关系,结果显示,原生盐碱地、次生盐碱地和改良农田中的土壤酶活性依次升高,且主成分分析说明土壤中磷的循环很大程度上影响着河西地区盐碱地土壤微生物学性质^[33]。另外,孙慧等(2016)在余姚滨海地区,比较了不同盐碱度土壤中过氧化氢酶和脲酶活性,结果发现,在重度、中度和轻度盐碱地土壤中,2种酶活性有逐渐增加的趋势,同时,随土层的加深,过氧化氢酶活性逐渐增大,而脲酶逐渐减小^[34]。

从土壤酶的来源、存在环境、影响因素等角度考虑,盐渍化土壤中酶活性受到抑制的原因可归结以下几个方面:第一,土壤微生物由于较大的生物量、较高的代谢活性及短暂的生命周期^[19],能够产生和释放大量的胞外酶,然而在盐渍化土壤环境中,大多数微生物生长受到胁迫,土壤微生物生物量和群落数量较少,进而分泌的酶活性物质较少;第二,在干旱、半干旱环境中,土壤酶多属于胞外酶,常与土壤有机和矿物胶体结合^[17,19],但是土壤盐渍化严重影响了地上植物(作物、草本和树木)的生长,进而导致土壤中有有机物质来源(植物残渣、凋落物和根系)的减少,致使盐渍土有机质含量普遍较低^[2,35-37],不利于土壤微生物的生长和酶活性物质的吸附;第三,在盐碱土和碱化土壤中,由于含有过量的 Na^+ , SAR(钠吸附比)和 ESP 较高,相对于其他阳离子, Na^+ 通过分散土壤颗粒而对土壤团聚体产生不利的影响,导致原本稳定的酶物质失去保护,从而变得更易于变性失活^[10];此外,由于盐渍化土壤中含盐量较高,盐析效应导致酶活性物质脱水失活^[18],以及特殊离子的毒害也应该是土壤酶活性受到抑制的原因。Garcia 和 Hernandez(1996)曾提出,在对土壤生物学性质和肥力水平的不利影响方面,NaCl 比 Na_2SO_4 更加显著^[17]。其原因正是因为盐土特定离子的毒害作用严重影响微生物的生长,而氯化物的毒害比硫酸盐强。当然,也有研究提出,并不是所有的酶活性都对盐分胁迫敏感^[38],例如有学者提出,脲酶活性并不能用来反映草场盐渍化程度,而 β -葡糖苷酶和碱性磷酸酶则可以用来指示草场盐渍化过程中土壤质量的变化^[22]。

2 盐碱地改良利用过程中土壤酶活性的变化

土壤酶活性与土壤理化性质、养分状况、管理措施等密切相关,因此在盐碱地改良利用过程中,随着土壤

理化性质的改善,土壤酶活性势必发生相应的变化。土壤酶活性的大小可作为评价盐碱地改良利用效果和措施可持续性的一个重要指标之一。前人针对不同地区、不同类型的盐碱地,重点研究了不同改良措施、不同作物、不同灌溉施肥管理方式等对土壤酶活性的影响及其动态变化规律。

针对不同改良措施对盐碱地土壤酶活性的影响,康贻军等(2008)在滨海盐碱地上的研究发现,客土法虽能在短期内迅速改善土壤微生物活性,但其投入成本较高,排水改良法不利于盐碱地土壤酶活性的改善,而生物改良法(种植苜蓿)虽然对改善土壤微生物活性速度较慢,但成本相对低廉,且效果持久,有相对较好的应用前景^[39]。李凤霞等(2012)比较了添加秸秆、有机肥、脱硫废弃物和化学改良剂等不同改良措施对银川平原盐碱地土壤酶活性的影响。结果表明,几种改良措施均显著提高了土壤转化酶、脲酶和碱性磷酸酶的活性,但对过氧化氢酶活性的影响不显著^[32]。范富等(2015)在内蒙古通辽地区利用玉米秸秆夹层改良苏打盐碱地,结果发现玉米秸秆夹层显著增加了土壤脲酶、蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶和过氧化氢酶活性,但降低了多酚氧化酶活性,同时,随玉米秸秆用量的增加,脲酶、蛋白酶、淀粉酶、多酚氧化酶的酶活性升高,而纤维素酶和过氧化氢酶的活性变化不明显^[40]。

前人对新疆盐碱地的研究结果显示,不同灌溉方式都对土壤微生物生物量及碱性磷酸酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性有明显的促进作用,但对土壤过氧化氢酶没有影响,同时指出相对于渗灌和沟灌,滴灌方式最宜于提高土壤微生物特性^[41]。窦超银等(2010)利用膜下滴灌技术开发利用宁夏银北地区地下水浅埋区重度盐碱地,结果显示,改良利用之后土壤碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性显著提高,土壤酶活性与环境因子的相关性也增强,而且还通过主成分分析研究指出膜下滴灌种植3年之后,影响土壤酶活性的主要因子是土壤养分^[42]。针对东北松嫩平原盐渍化草场,Kang等(2013)等的研究发现,使用滴灌灌溉之后,土壤酶活性显著增强,预计在滴灌改良4~6年之后,土壤酶活性可以达到自然草场的水平^[43]。Zhang等(2013)在西北旱区龟裂碱土盐碱地上的研究发现,采用改良的膜下滴灌种植技术种植枸杞之后,龟裂碱土重度盐碱荒地土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均显著增加,土壤pH值始终是影响该土壤酶活性的主要因子,且在pH 7.38~10.00的范围内,3种酶活性随土壤pH的增大呈指数式减小^[23-25]。前人也总结了土壤pH对酶活性的影响机理。首先,高的土壤pH值影响土壤养分的有效

性,抑制土壤微生物群落的组成和多样性^[20];其次,土壤pH还通过氨基酸影响着酶活性,这是因为氨基酸是酶合成和催化反应的基本要素,而氨基酸官能团对pH值较敏感,土壤pH可以引起氨基酸的构象变化和化学变化;再次,土壤pH对有机质有显著的负面影响,土壤有机质含量较低时,土壤酶更易于变性失活,或者被土壤腐植酸聚合物生物降解^[44]。

徐双等(2015)在黄河三角洲滨海盐碱地上,研究了不同施肥处理对土壤微生物和酶活性的影响。结果表明,和农民传统施肥相比,使用生物菌肥能够有效提高棉花花铃期土壤酶活性,脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性分别提高49.7%、414.4%和22.8%^[45]。杨场等(2014)针对东北寒区盐碱地的研究发现,施氮量的增加可以提高盐碱地土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性,且4种酶活性在马铃薯不同发育时期的变化趋势存在差异^[46]。张旭龙等(2017)在新疆石河子地区通过不同油菜品种改良利用盐碱地,研究了盐碱地土壤酶活性的变化。结果发现,种植新葵6号对降低盐碱地根际土壤pH值、提高蔗糖酶活性的效果最为显著,而种植新葵4号则对提高根际土壤速效养分含量以及脲酶和磷酸酶活性的效果最为显著^[47]。同时利用种植甘草改良新疆旱区盐碱地,发现土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性随种植年限的增加呈递增趋势,利用回归分析得出土壤含水量对以上3种酶活性起着主导作用^[48]。

此外,前人还对不同植被群落下盐碱地土壤酶活性的差异,以及盐碱地改良利用过程中土壤酶活性的季节变化规律进行了研究。岳中辉等(2009)通过在松嫩平原盐碱草地上的研究提出不同植物群落土壤酶活性变化趋势不同,过氧化氢酶在碱蓬群落中具有最大活性,多酚氧化酶、过氧化物酶活性在碱斑裸地、碱蓬群落、碱蓬—虎尾草群落中活性较高,而蛋白酶、转化酶及碱性磷酸酶活性在羊草—寸草苔群落及双子叶杂草群落中的活性较高^[49]。而后,南丽丽(2015)对甘肃盐碱地土壤酶活性进行了比较,也发现不同植物群落下的土壤酶活性变化趋势不同,狗尾草群落下的脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性最大,而硝酸还原酶、脱氢酶活性在芦苇群落均最高,5种酶活性在盐爪爪群落下均最低,且土壤酶活性随着土壤深度的加深多呈递减趋势。同时其还对土壤酶活性的季节动态也进行了研究,结果表明,5种土壤酶活性季节变化趋势不同,脲酶、过氧化氢酶及碱性磷酸酶活性均在夏季达到最高,硝酸还原酶在秋季最高,脱氢酶在春季最高^[50]。

在盐碱地改良利用过程中,随着盐碱地土壤理化

性质的改良,土壤酶活性与更多的土壤理化性质的相关性达到显著水平^[255]。盐碱地土壤中酶活性的增加说明土壤肥力的提高,将有助于植物对土壤养分的吸收^[52,53]。根区土壤酶活性的增加应该归功于对应区域土壤环境的改善,包括盐分的淋洗、土壤 pH 值的降低,以及土壤养分含量的增加。土壤中的植物凋落物,以及根系分泌物提供了含氮的底物,进而诱导相关酶的合成^[54]。

3 盐碱地土壤酶活性研究展望

在盐碱地土壤环境因子对酶活性的影响方面,现有研究之间存在着很多疑问、甚至相互矛盾的结论,这给我们提供了进一步研究的可能和挑战。结合现代研究技术和当前社会普遍关注的热点,建议下一步可针对以下几个问题加以重点研究:

(1)统计显示,碱化土壤(包括碱土和盐碱土)占盐渍土总面积的 60%^[6],其由于过多的钠离子含量和“低盐高碱”的化学性质,土壤结构差。那么土壤微生物数量和酶活性是否与碱化土壤团聚体稳定性有关?碱化土壤形成过程中常见的干湿交替过程是如何影响土壤酶活性的?以及钙质碱化土壤改良利用过程中,原有 CaCO₃ 的溶解,是如何影响有机质分解、碳氮矿化和微生物活性的?

(2)土壤酶活性研究的最初目的并非用于测定生物活性本身,而是希望找到一个综合的酶活性指标,表征外部管理或环境条件下土壤化学和生物化学性质的变化^[15]。在盐碱地改良利用过程中,针对某一种盐渍化类型土壤,是否存在一种特定的土壤酶?测定其活性可以反映瞬时土壤理化性质、肥力水平和环境质量的综合改善,而无需对土壤的多个参数进行测定。

(3)结合全球变化热点问题,盐碱地的改良利用或灌溉农业地区日益加重的盐渍化程度是如何影响土壤酶和矿物质之间相关作用的?同时,考虑盐渍化对土壤碳氮循环的影响,我们应如何调节土壤酶活性,才能在盐碱地土壤生态系统中同时实现最小的碳损失(CO₂ 排放)和最大的碳储存(作物产量)?

参考文献:

[1] QADIR M, SCHUBERT S, GHAFOOR A, et al. Amelioration strategies for saline soils: a review [J]. Land Degradation and Development, 2000, 11: 501 - 521.

[2] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[3] 杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用. 中国科学院院刊, 2015, 30(增刊): 257 - 265.

[4] 赵其国. 土地退化及其防治[J]. 中国土地科学, 1991, 5(2): 22 - 25.

[5] 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.

[6] QADIR M, SCHUBERT S, GHAFOOR A, et al. Amelioration strategies for sodic soils: a review [J]. Land Degradation and Development, 2001, 12: 357 - 386.

[7] 黄 勇, 杨忠芳. 2009. 土壤质量评价国外研究进展 [J]. 地质通报, 8(1): 130 - 136.

[8] FRANKENBERGER W T, BINGHAM F T. Influence of salinity on soil enzyme activity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 1173 - 1177.

[9] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[10] GARCIA C, HERNANDEZ T, COSTA F. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1997, 28(1-2): 123 - 134.

[11] TRIPATHI S, KUMARI S, CHAKRABORTY A, et al. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 42: 273 - 277.

[12] ZAHIR A Z, MUHAMMAD A R M, MUHAMMAD A. Soil Enzymes Research: A Review [J]. Journal of Biological Sciences, 2001, 1: 299 - 307.

[13] ZAHIRAN H H. Diversity, adaptation and activity of the bacterial flora in saline environments [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 25: 211 - 223.

[14] 朱 丽, 郭继勋, 鲁 萍, 等. 松嫩羊草草甸羊草-碱茅群落土壤酶活性比较研究[J]. 草业学报, 2002, 11(4): 28 - 34.

[15] 曹 慧, 孙 辉, 杨 浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105 - 109.

[16] CHANDER K, GOYAL S, KAPOOR K K. Effect of sodic water irrigation and farmyard manure application on soil microbial biomass and microbial activity [J]. Applied Soil Ecology, 1994, 1: 139 - 144.

[17] GARCIA C, HERNANDEZ T. Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calcic soil [J]. Plant and Soil, 1996, 178: 255 - 263.

[18] TEJADA M, GARCIA C, GONZALEZ J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 1413 - 1421.

[19] TRIPATHI S, CHAKRABORTY A, CHAKRABARTI K, et al. Enzyme activities and microbial biomass in coastal soils of India [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 2840 - 2848.

[20] PATHAK H, RAO D L N. Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30: 695 - 702.

[21] RIETZ D N, HAYNES R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 845 - 854.

[22] SINGH K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27: 706 - 718.

[23] ZHANG T, KANG Y, LIU S, et al. Alkaline phosphatase activity and its relationship to soil properties in a saline-sodic soil reclaimed by cropping wolfberry (*Lycium barbarum* L.) with drip

- irrigation [J]. *Paddy and water Environment*, 2014, 12: 309 – 317.
- [24] ZHANG T, WAN S, KANG Y, et al. Urease activity and its relationships to soil physicochemical properties in a highly saline-sodic soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(2): 304 – 315.
- [25] 张体彬, 康跃虎, 万书勤. 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1392 – 1400.
- [26] DICK W A, CHENG L, WANG P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1915 – 1919.
- [27] SINGH K, PANDEY V C, SINGH B, et al. Ecological restoration of degraded sodic lands through afforestation and cropping [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 43: 70 – 80.
- [28] SINGH K, SINGH B, SINGH R R. Changes in physico-chemical, microbial and enzymatic activities during restoration of degraded sodic land: ecological suitability of mixed forest over monoculture plantation [J]. *Catena*, 2012, 96: 57 – 67.
- [29] ALLISON S D, WEINTRAUB M N, GARTNER T B, et al. Evolutionary economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function [M]. In: *Soil Enzymology*. Shukla G, Varma A (eds). Springer: Berlin, Germany, 2011.
- [30] ALLISON V J, CONDRON L M, PELTZER D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1770 – 1781.
- [31] RAO M A, VIOLANTE A, GIANFREDA L. Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo-mineral complexes: kinetics and stability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1007 – 1014.
- [32] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 19(6): 13 – 18.
- [33] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 等. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. *微生物学通报*, 2012, 39(3): 416 – 427.
- [34] 孙慧, 张建锋, 许华森, 等. 余姚滨海不同盐碱度土壤微生物及土壤酶的变化规律 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (10): 3361 – 3370.
- [35] KAUR B, GUPTA S R, SINGH G. Soil carbon, microbial activity and nitrogen availability in agroforestry systems on moderately alkaline soils in northern India [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(3): 283 – 294.
- [36] YUAN B C, LI Z Z, LIU H, et al. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 319 – 328.
- [37] YUAN B C, XU X G, LI Z Z, et al. Microbial biomass and activity in alkalized magnesian soils under arid conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 3004 – 3013.
- [38] PAN C, LIU C, ZHAO H. Changes of soil physico-chemical properties and enzyme activities in relation to grassland salinization [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 13 – 19.
- [39] 康貽军, 胡健, 杨小兰, 等. 盐碱度土壤微生物对不同改良方法的响应[J]. *微生物学杂志*, 2008, 28(5): 102 – 105.
- [40] 范富, 张庆国, 邵继承, 等. 玉米秸秆夹层改善盐碱地土壤生物性状[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 133 – 139.
- [41] 梁菊荣. 不同灌溉方式对新疆盐碱地土壤理化性质和微生物特性的影响[J]. *节水灌溉*, 2012, 7: 18 – 21.
- [42] 窦超银, 康跃虎, 万书勤, 等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 44 – 51.
- [43] KANG Y, LIU S, WAN S, et al. Assessment of soil enzyme activities of saline-sodic soil under drip irrigation in the Songnen plain [J]. *Paddy and Water Environment*, 2013, 11: 87 – 95.
- [44] MUHAMMAD S, MULLER T, JOERGENSEN R G. Relationships between soil biological and other soil properties in saline and alkaline arable soils from the Pakistani Punjab [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72: 448 – 457.
- [45] 徐双, 柳新伟, 崔德杰, 等. 不同施肥处理对滨海盐碱地棉花生长和土壤微生物及酶活性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 316 – 320.
- [46] 杨瑒, 靳学慧, 周燕, 等. 施氮量对寒区盐碱地马铃薯生育期土壤微生物数量和酶活性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014, 3: 32 – 37.
- [47] 张旭龙, 马森, 吴振振, 等. 不同油葵品种对盐碱地根际土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2017, DOI: 10.5846/STXB201510172095.
- [48] 吴振振, 马森, 张旭龙. 甘草对新疆盐碱地土壤理化性质及土壤酶活性的影响[J]. *农学学报*, 2016, 6(6): 24 – 29.
- [49] 岳中辉, 王博文, 庞健, 等. 松嫩盐碱草地主要植物群落土壤酶活性研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 158 – 162.
- [50] 南丽丽, 郭全恩, 向华, 等. 甘肃省盐碱草地主要植物群落土壤酶活性研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 311 – 315.
- [51] COOKSON P. Spatial variation of soil urease activity around irrigated date palms [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1999, 13: 155 – 169.
- [52] LIANG Y C, YANG Y F, YANG C G, et al. Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogenic soil [J]. *Geoderma*, 2003, 115, 149 – 160.
- [53] ACOSTA-MARTINEZ V, CRUZ L, SOTOMAYOR-RAMIREZ D, et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 35 – 45.
- [54] LIANG Y C, SI J, NIKOLIC M, et al. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37, 1185 – 1195.

Research Advance and Prospect of Soil Enzymes Activities in Saline-alkali Soils

ZHANG Ti-bin^{1,2}, ZHAN Xiao-yun^{1,2*}, FENG Hao^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;*

2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)*

Abstract: Saline-alkali soil is the important reserve land resource of agricultural production, and soil salinization is one of the first issues during the irrigated agricultural production. In recent years, it has drawn greater attentions to investigate the amelioration of soil environmental quality including soil biological properties, during the reclamation of saline-alkali soils. Soil enzyme, which is the products of biological activity, is a good indicator to soil environmental quality. Soil enzyme activity can be used to evaluate the degree of soil degradation, amelioration efficiency and the sustainability of agricultural practices. This paper summarized the current studies on soil enzymes activities in saline-alkali soils, and illustrated the stress mechanisms of soil salinity and sodicity on soil enzymes activities. The studies of soil enzyme activities in saline-alkali soils during the reclamation also were reviewed. Finally, based on the existing problems in current studies and the hotspot of social attention, an attempt was made to identify research gaps for future research.

Key words: Saline-alkali soil; Soil enzyme activity; Soil salinization; Soil reclamation

[责任编辑:孙福军]