

草地生态系统土壤酶活性研究进展

向泽宇¹, 王长庭¹, 宋文彪², 四郎生根³,

呷绒仁青³, 达瓦泽仁³, 扎西罗布³

(1. 西南民族大学生命科学与技术学院, 四川 成都 610041; 2. 青海省湟源县农业技术推广中心, 青海 湟源 812100;
3. 四川省道孚县农牧和科技局, 四川 道孚 626400)

摘要:土壤酶在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面扮演着重要角色, 研究土壤酶活性对于探讨草地生态系统结构、功能及其可持续发展有着重要的意义。土壤酶的研究历经 20 世纪 50 年代以前的奠定时期, 20 世纪 50—80 年代的迅速发展时期和 20 世纪 80 年代以后与其他学科相互渗透的时期。土壤酶主要来源于土壤微生物, 分为六大类, 即氧化还原酶、水解酶、转移酶、裂合酶、连接酶和异构酶。本研究总结了不同退化程度、施肥、放牧、土壤微生物、季节变化等因素对草地生态系统土壤酶活性的影响, 结果表明, 随着退化程度的加重, 土壤酶活性呈降低趋势; 施肥在一定程度上能增强土壤酶活性; 轻度放牧会使土壤酶活性增加, 重度放牧会使土壤酶活性降低; 土壤微生物与土壤酶活性呈显著正相关关系; 土壤酶活性随季节变化有一定的规律性波动。最后, 本研究对青藏高原高寒草甸生态系统的退化、恢复和治理与土壤酶活性关系的研究发展前景进行了展望。

关键词:草地生态系统; 土壤; 酶活性

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2011)10-1801-06

^{*1} 草地是草本和木本饲用植物与其着生的土地构成的具有多种功能的自然综合体, 是地球上最重要的陆地生态系统类型之一。草地生态系统作为陆地生态系统的主体类型, 约占陆地总面积的 1/4 ~ 1/3^[1]。在草地生态系统中, 土壤微生物是生态系统的重要成员, 其参与草地生态系统的物质和能量循环, 是土壤中最活跃的部分, 对植物地上和地下部分营养有着重要意义。土壤微生物及植物根系等能够释放各种酶类进入土壤, 土壤酶类和微生物一起推动着土壤的代谢过程。土壤酶(soil enzyme)作为土壤生态系统的组分之一, 是生态系统的生物催化剂, 在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用。它们参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环, 既是土壤有机物转化的执行者, 又是植物营养元素的活性库^[2-3]。土壤中已经被鉴定出的约 60 种酶活性表明, 土壤酶活性与土壤质量的很多理化指标相关联, 酶的催化作用对土壤中元素(包括 C、N、P、S)循环与迁移有着重要作用^[4]。

土壤养分、土壤结构等理化特征一直被用作表征土壤质量、土壤肥力的指标。但随着气候变化、人口的不断增长, 土地开发利用强度不断加大, 为实现土地资源持续利用和防止土壤退化, 对土壤环境质量的评估和监测越来越重要, 传统的理化指标已难以满足土壤质量健康状况、土壤恢复过程及其恢复

潜力研究的需要。特别是 20 世纪 80 年代以来, 广泛分布于青藏高原的高寒草甸生态系统在自然扰动与人为因素的干扰下, 呈现出明显的退化趋势, 陆地生态系统的退化减少了植被生产力和土壤有机质输入量, 并加快了土壤有机质的分解速率, 加速了土壤生态系统的退化。因此, 用土壤酶活性作为较全面地反映土壤环境、质量和肥力变化, 判别胁迫环境下土壤生态系统退化的早期主要预警指标之一, 对于分析和探讨草地生态系统结构、功能及其可持续利用将具有重要的现实意义。

1 土壤酶的发展、来源、分类及功能

1.1 土壤酶学发展简史

自 Wood^[5]首次从土壤中检测出过氧化氢酶活性以来, 土壤酶研究经历了一个较长的奠定和发展时期。20 世纪 50 年代以前为土壤酶学的奠定时期, 许多土壤学者从各种土壤中共检测出了 40 余种土壤酶的活性, 并发展了土壤酶活性的研究方法和理论, 土壤酶研究逐渐发展

收稿日期: 2011-01-04 接受日期: 2011-04-27
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30730069); 西南民族大学研究生创新型科研项目; 西南民族大学高层次人才引进项目; 西南民族大学研究生学位点建设项目(2011XWD-S071012)
作者简介: 向泽宇(1986-), 男, 湖北汉川人, 在读硕士生, 主要从事草地生态和根系生态学研究。
E-mail: xiang0712@foxmail.com
通信作者: 王长庭 E-mail: wangct@swun.edu.cn

成一门介于土壤生物学和生物化学之间的新兴边缘交叉学科^[6]。20世纪50—80年代中期为土壤酶学迅速发展的时期,土壤酶的检测技术和方法不断改进,一些新的土壤酶逐渐被检测出来;到80年代中期,大约有60种土壤酶被检测出来,土壤酶学的理论体系逐渐完善,土壤酶活性被作为土壤肥力指标而受到土壤学家的普遍重视^[7]。20世纪80年代中期以后为土壤酶学与林学、生态学、农学和环境科学等学科相互渗透的时期,土壤酶学的研究已经超越了经典土壤学的研究范畴,在几乎所有的陆地生态系统研究中,土壤酶活性的检测成了必不可少的测定指标。由于土壤酶活性与土壤生物、土壤理化性质和环境条件密切相关^[8],因而土壤酶活性对环境扰动的响应、根际土壤酶的功能重要性、土壤酶研究技术以及土壤酶作为土壤质量的指标等成为主攻方向^[9-10]。

1.2 土壤酶的来源 通常认为土壤酶在很大程度上起源于土壤微生物,同样它也可能来源于植物和土壤动物。植物活的根对土壤酶活性具有影响,一方面在于植物根能分泌胞外酶,另一方面也可能是根刺激了土壤微生物的活性。Skujins^[11]以及后来的Speir等^[12]、Castellano和Dick^[13-14]的研究都表明,根际土壤比非根际土壤更能增加诸如磷酸酶、核酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、芳基硫酸酯酶和蛋白酶的活性,但是这些研究均不能区分酶是起源于植物根还是起源于土壤微生物。植物残体在分解的过程中也能够向土壤中释放酶,或者在分解的植物细胞组织中保持部分活性。土壤酶也可能来源于土壤动物,已有报道表明,脲酶^[15]、磷酸酶^[16]和转化酶^[17]活性来源于蚯蚓的排泄物,同时蚂蚁对转化酶活性也有一定的贡献^[18]。

1.3 土壤酶的分类和功能 为有效研究和应用各种酶,国际酶学委员会(International Enzyme Committee)于1961年提出了一个分类系统,按照酶的催化反应类型和功能,把已知的酶分为六大类^[19],即氧化还原酶、水解酶、转移酶、裂合酶、连接酶和异构酶,土壤中酶活性的研究主要涉及到前4种酶。

氧化还原酶类(oxidoreductases): 主要包括脱氢酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、硫酸盐还原酶等。氧化还原酶是土壤中研究较多的一类酶,由于这些酶所催化的反应大多与获得或释放能量有关,因此在土壤的物

质和能量转化中有很重要的地位;它参与土壤腐殖质组分的合成,也参与土壤形成过程,因此对于土壤氧化还原酶系的研究,有助于对土壤发生及有关土壤肥力实质等问题的了解^[20]。

水解酶类(hydrolases): 主要包括蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、蛋白酶、脂肪酶、磷酸酶、纤维素分解酶、芳基硫酸酯酶、 β -葡萄糖苷酶、荧光素二乙酸酯酶等。水解酶能水解多糖、蛋白质等大分子物质,从而形成简单的、易被植物吸收的小分子物质,对于土壤生态系统中的C、N循环具有重要作用;例如高等植物具有脲酶(urease),能酶促有机质分子中肽键的水解。土壤脲酶活性与土壤微生物数量、有机质含量、全氮和速效氮含量呈正相关,常用土壤脲酶活性表征土壤的氮素状况^[20]。

转移酶类(transferases)和裂合酶类(lyases): 主要包括转氨酶、果聚糖蔗糖酶、转糖苷酶、硫氰酸酶、天门冬氨酸脱羧酶、谷氨酸脱羧酶、色氨酸脱羧酶等。这两类酶在土壤物质转化中同样起着重要作用,转移酶不仅参与蛋白质、核酸和脂肪的代谢,还参与激素和抗菌素的合成与转化;裂合酶在土壤中也具有某些活性,但直到现在对于这类酶的研究还很少^[4]。

2 土壤酶活性的影响因子

草地土壤系统中,一切复杂的生化过程都是在土壤酶的参与下进行的,草地土壤酶的活性大致反映了草地土壤生物化学过程的相对强度;测定相应酶的活性,可以间接了解某种物质在土壤中的转化情况。因此,草地生态系统土壤酶活性的高低与草地土壤肥力密切相关,也是判别草地土壤肥力与土壤质量的重要指标之一。

2.1 草地退化程度 谈嫣蓉等^[21]对东祁连山不同退化程度草地土壤酶活性的研究发现,3个不同退化程度样地的中性磷酸酶、纤维素酶和过氧化物酶活性随土壤深度的加深而呈现递减的规律,主要是由于土壤表层积累了较多的枯枝落叶和腐殖质,有机质含量高,有充分的营养源支持微生物的生长,加之水热条件和通气状况好,微生物生长旺盛,代谢活跃,呼吸强度加大从而使表层的土壤酶活性较高。随着土壤剖面的加深,土壤容重变大,孔隙度变小,限制了土壤生物的正常活动;有机质也随土层的加深而急剧下降,pH值变大,土壤地下生物量也随之下降;土壤温度的降低及土壤水分的减少,限制了土

壤微生物的代谢产酶能力。由于这些因素的综合作用,土壤酶活性随着土层的加深逐渐降低^[22]。此外,在高寒草地,由于其寒冷的气候环境条件,土壤微生物的种类和数量较少^[23],退化草地植被的结构和生物量发生了变化,从而使得下垫面状况和局地微气候有所改变^[24],对土壤微生物的活动和数量产生了影响。具体表现为,不同退化演替阶段的草地,土壤过氧化氢酶、脲酶和中性磷酸酶在 0~20 cm 土层均随草地退化程度加剧而降低,这与土壤有机碳、土壤微生物总数、细菌和真菌数量的变化趋势相同。在 20~30 cm 土层,3 种土壤酶在不同草地中的活性大小顺序为:未退化>轻度退化>重度退化>中度退化,这可能与重度退化草地上的植物种类有关,而未退化草地的各种土壤酶活性较高:一方面,未退化草地土壤有机质、全氮含量丰富,结构疏松,孔隙比例适当,这种条件为土壤微生物提供了相对充足的碳源和能源物质,利于土壤动物、土壤微生物和植物根系的生命活动;另一方面,草地退化引起的植被结构和生物量变化,对土壤微生物的活动和数量产生影响,而土壤微生物活性与土壤酶活性密切相关^[25]。

2.2 施肥 施肥可以改善土壤理化特性、水热状况和微生物区系,从而对土壤酶活性产生影响。有机肥料以及化学肥料的施用都会对土壤酶活性产生明显的影响。长期不同施肥方式可明显提高土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶活性^[26]。在早熟禾(*Poa annua*)草坪中,闰双堆等^[27]研究表明,在 N、P、K 施用总量相同的条件下,随复混肥中污泥含量的增加,草坪土壤脲酶、蛋白酶、转化酶和磷酸酶活性显著提高,各施肥处理与对照比较差异均达到显著水平。说明无机肥料与适量污泥配施也对土壤酶活性的提高起一定作用,但污泥使用量较高后作用不再明显。而施肥对天然草地土壤酶活性的影响,主要体现在施入的氮肥对脲酶活性抑制作用较强,而 N、P 肥混施在一定程度上既能使脲酶活性受到激活,又能使磷酸酶活性受到激活,N、P 肥混施的量为 45 g/m² 时,脲酶与磷酸酶活性最强,而且相应蔗糖酶活性也有所增强^[28]。

2.3 放牧 放牧是草地利用的主要方式之一。放牧家畜主要通过采食、践踏影响土壤的物理结构(如紧实度、渗透率),同时通过采食活动及畜体对营养物质的转化和排泄物归还等影响草地营养物质的循

环,导致草地土壤理化性质和酶活性的变化。不同程度的放牧均可导致典型草原土壤中多酚氧化酶和过氧化氢酶活性的增加,轻度放牧使土壤中脲酶、蔗糖酶和蛋白酶活性增加,中度和重度放牧导致此 3 种酶活性降低^[29]。在贝加尔针茅(*Stipa capillata*)草原,放牧显著提高了 0~10 cm 土层中的脲酶活性,而大针茅(*S. grandis*)草原土壤脲酶活性在放牧条件下显著降低,克氏针茅(*S. sareptana* var. *krylovii*)草原土壤脲酶活性则无显著变化。贝加尔针茅、大针茅和克氏针茅群落 0~10 cm 土壤的磷酸酶活性和转化酶活性在放牧压力下均显著增加。而放牧干扰下过氧化氢酶活性在贝加尔针茅群落 0~10 cm 土层中显著降低($P<0.05$),在大针茅群落显著升高($P<0.05$),而在克氏针茅群落没有发生显著变化。总之,中度放牧压力下不同类型草原土壤酶活性变化各不相同,但整体呈上升趋势,说明适度放牧有利于提高草原土壤酶活性,加强土壤中营养元素的矿质化作用,有利于系统内营养物质循环^[30]。

2.4 土壤微生物 贝加尔针茅草原土壤脲酶活性与土壤中固氮菌、真菌的数量分别具有极显著和显著正相关关系,这与土壤脲酶本身的特性有关^[31]。土壤脲酶是一种分解含氮有机物的水解酶,普遍存在于真菌中,是植物氮素营养的直接来源。土壤细菌、真菌、总微生物数量与过氧化氢酶、脲酶、中性磷酸酶呈显著或极显著相关,这在很大程度上反映了微生物量对土壤酶活性的重要影响和贡献^[25]。在伊犁绢蒿(*Seriophidium transiliense*)荒漠退化草地中,土壤细菌与脲酶呈显著正相关($P<0.05$),真菌与过氧化氢酶、脲酶呈显著负相关($P<0.05$)^[32],但真菌所释放的复杂的酶系统能积极参与有机物质的分解,使枯落物中的蛋白质转化成草地植物可直接吸收的可溶性氨基酸和铵盐等,同时它对无机营养的吸收也有显著影响^[33],这些都说明土壤微生物对土壤酶的贡献较大。

2.5 季节变化 不同盐碱草地土壤酶活性对季节变化的响应不同,过氧化氢酶、多酚氧化酶和碱性磷酸酶活性在中度、重度盐碱化草地中的季节变化幅度大于轻度盐碱化草地,说明草地的退化虽然没有使这 3 种酶活性的季节动态趋势发生变化,但却使其对环境变化的敏感性增加;而土壤过氧化物酶、蛋白酶和转化酶活性的季节变化幅度都表现为中度、重度盐碱化草地小于轻度盐碱化草地,说明盐碱化

程度的加重在一定程度上抑制了这3种酶活性对季节变化的敏感性;碱斑土壤由于没有地上植被生长,其活性主要受土壤温度和本身特性的影响,表现为过氧化氢酶、蛋白酶和转化酶的活性都较低,在不同季节中的变化幅度较小,而过氧化物酶、多酚氧化酶、碱性磷酸酶活性的变化幅度较大^[34]。羊草(*Leymus chinensis*)草原土壤过氧化氢酶活性的季节动态呈抛物线型^[35],在大多数群落中各土层的土壤过氧化氢酶活性的最大值均出现在8月,最小值出现在6月或10月。因为土壤微生物总量随着春季温度上升而逐渐增高,最高峰出现在8月中旬,土壤温度和湿度都最适宜微生物的生长;随着季节的变化,9月以后,温度和湿度同步下降,土壤微生物生物量也逐渐下降^[36]。土壤微生物是土壤酶的主要来源,因而,土壤酶活性也呈现出相应的季节波动。

2.6 其他因素 除了上述几种因子对草地土壤酶活性有影响外,土壤的理化性质、草地生长年限等对草地土壤酶活性也有一定的影响。王启兰等^[37]对高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸土壤性质及酶活性进行了研究,结果表明,对0~20 cm土层所测的7种土壤酶中,土壤有机质和有效钾除与多酚氧化酶呈显著负相关外,与其余6种酶(过氧化氢酶、脲酶、蛋白酶、纤维素酶、转化酶、碱性磷酸酶)呈显著正相关;全氮、有效磷、阳离子交换量除与转化酶相关性不显著外,与其他6种酶呈显著相关;有效氮、全钾只与纤维素酶、碱性磷酸酶存在显著的相关关系;pH值、全磷与所测的7种酶均无明显的相关性。总之,各种土壤因子不仅直接影响土壤酶活性的大小,还通过相互之间的作用间接调控土壤酶活性。土壤酶活性与土壤肥力也存在一定关系。在高寒草甸草地,随载畜量增加,0~20 cm土层土壤脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均表现为高载畜量区高于中载畜量区和低载畜量区;与全氮、速效氮、速效磷和速效钾养分变化基本一致,这可能与“高区”放牧家畜排泄的粪便增加了土壤中的速效养分有关^[38]。在农牧交错带退耕还草草地的土壤酶活性与土壤肥力高度相关^[39]。土壤中可供植物利用的营养元素的多少,与土壤酶活性的高低直接相关。在良好的有机养分状况下,土壤酶活性较高,其对土壤中营养元素的矿质化作用强度愈大,愈有利于系统内的营养物质循环^[40]。另外,不同生长年限

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)栽培草地0~40 cm土层内,脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和淀粉酶的活性在生长2年的紫花苜蓿地中均高于生长5年的紫花苜蓿地,纤维素酶活性在生长5年的紫花苜蓿地中高于生长2年的紫花苜蓿地^[41],说明随着生长年限的增加多数酶的活性呈下降趋势,这可能是由于土壤的理化性质逐渐趋于成熟稳定。

3 结论

虽然土壤酶活性的研究工作方兴未艾,但由于土壤酶活性的影响因素非常复杂,土壤中微生物种类、水气热状况、酸碱度、结构组成、养分丰缺、扰动(人为和自然)等都显著地影响土壤酶活性。因此,土壤酶作为土壤质量的重要指标,必须考虑其测定方法。目前对于土壤酶的研究,无论是土壤的前处理、土壤灭菌、分析条件,还是在表达土壤酶活性单位方面都有待进一步完善。规范土壤酶活性的研究方法已成为当务之急。

基于土壤酶目前的研究状况,今后的研究需要注意:1)土壤生态系统。土壤作为草地生态系统研究媒介之一,其作用和作用机理还需要大量具体数据的支持。2)土壤酶活性变化与草地退化和恢复之间的关系,主要指不同退化、不同恢复程度植被生物量(地上、地下生物量)、土壤理化特征、土壤肥力、土壤微生物区系,以及其与土壤酶活性的关系等。3)全球变化对土壤酶活性的影响。伴随着全球变化研究的展开,气候因素变化对草地生态系统中土壤环境、土壤质量等的影响,引起越来越多国内外研究者的关注。人们希望找到一个综合的酶活性指标,来表征外部管理或环境条件下土壤化学和生物化学的变化。

4 展望

青藏高原被誉为中国的水塔,其生态安全一直受到中国乃至周边国家的关注。高寒草甸草地作为该区重要的植被类型,其生态系统稳定性的维持机理研究对退化草地恢复措施的确定和建立具有重要的现实意义。但目前对于退化高寒草甸生态系统的研究还有很多亟待解决的问题,如高寒嵩草(*Kobresia myosuroides*)草甸植被和土壤退化程度的标志性指标是什么?其退化的阈值如何?“黑土型”草地进行人工修复后其演替规律和方向(正、逆向演替)?人工修复草地完成植被演替过程而成为气候顶级群落的时限?酶活性指标能否表征不同修复条

件下土壤质量、肥力和土壤环境的变化?等等。因而,作为土壤肥力和土壤质量重要指标的土壤酶活性,在其他草地类型退化、施肥、放牧、土壤微生物、季节变化等方面的研究方法和结果将为高寒草地生态系统功能的维持和发展提供新的方向和视角,这也是未来土壤酶学发展必须努力的方向。

参考文献

- [1] 刘楠,张英俊.放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J].草业科学,2010,27(4):11-14.
- [2] Badiane N N Y,Chotte J L,Pate E,*et al.* Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semiarid tropical regions [J]. *Applied Soil Ecology*,2001,18(3):229-238.
- [3] He W X,Zhu M E. Relationship between urease activity and fertility of soils in Shanxi Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*,1997,34(4):392-398.
- [4] 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.
- [5] Wood T G. Field investigations on the decomposition of leaves of *Eucalyptus delegatensis* in relation to environmental factors[J]. *Pedobiologia*,1991,14:343-371.
- [6] Burns R G,Dick R P. *Enzymes in the Environment: Ecology, Activity and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc.,2001:7-22.
- [7] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1989:11-34.
- [8] Dick R P,Breakwill D,Turco R. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrating biological indicators[A]. In:Doran J W, Jones A J. *Handbook of Methods for Assessment of Soil Quality*[M]. Madison: SSSA Special Publication 49 Soil Science Society of America Special Publication,1996:247-272.
- [9] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality [A]. In:Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, *et al.* *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*[M]. Madison: Soil Science Society of America Special Publication,1994:107-124.
- [10] Dick R P. Enzyme activities as integrative indicators of soil health[A]. In: Parkhurst C E. *Bioindicators of Soil Health*[M]. Oxon, United Kingdom: CAB International,1997:121-156.
- [11] Shkjins J. History of abiotic soil enzyme research[A]. In: Burns R G. *Soil Enzymes* [M]. New York: Academic Press,1978:51-84.
- [12] Speir T W, Lee R, Pansier E A, *et al.* A comparison of sulphatase, urease and protease activities in planted and fallow soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1980,12:281-291.
- [13] Castellano S D, Dick R P. Influence of cropping and sulfur fertilization on transformations of sulfur in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991,55:283-285.
- [14] Dick R P, Deng S. Multivariate factor analysis of sulfur oxidation and rhodanese activity in soils [J]. *Biogeochemistry*,1991,12:87-101.
- [15] Syers J K, Sharpley A N, Keeney D R. Cycling of nitrogen by surface-casting earthworms in a pasture ecosystem [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,1979,11:181-185.
- [16] Park S C, Smith T J, Bisesi M S. Activities of phosphomonoesterase from *Lumbricus terrestris* [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,1992,24:873-876.
- [17] Kiss I. The invertase activity of earthworm casts and soils from anthills [J]. *Agrokem Talajtan*,1957,6:65-85.
- [18] Kozlov K A. The role of soil fauna in the enrichment of soil with enzymes [J]. *Pedobiologia*,1965,5:140-145.
- [19] 徐雁,向成华,李贤伟.土壤酶的研究概况[J].四川林业科技,2010,31(2):14-20.
- [20] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008,18:395-404.
- [21] 谈嫣蓉,蒲小鹏,张德罡,等.不同退化程度高寒草地土壤酶活性的研究[J].草原与草坪,2006(3):20-22.
- [22] 赵兰坡,姜岩.土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J].土壤通报,1986(3):138-141.
- [23] 周华坤,周立,赵新全,等.放牧干扰对高寒草场的影响[J].中国草地,2002,24(5):53-61.
- [24] 李家藻,朱桂如,杨涛,等.海北高寒草甸生态系统定位站纤维素分解和土壤CO₂释放的研究[A].高寒草甸生态系统(第1集)[M].兰州:甘肃人民出版社,1982:162-173.
- [25] 冯瑞章,周万海,龙瑞军,等.江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J].土壤通报,2010,41(2):263-269.
- [26] 王灿,王德建,孙瑞娟,等.长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J].生态环境,2008,17(2):688-692.
- [27] 闰双堆,玉山,刘利军.污泥复混肥对早熟禾草坪草生长性状及土壤酶活性的影响[J].中国生态农业学报,

- 2008, 16(5):1104-1108.
- [28] 裴海昆. 不同施肥量对天然草地土壤酶活性的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2001, 31(2):15-16.
- [29] 高雪峰, 武春燕, 韩国栋. 放牧对典型草原土壤中几种生态因子影响的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4):130-133.
- [30] 赵帅, 张静妮, 赖欣, 等. 放牧与围封对呼伦贝尔针茅草原土壤酶活性及理化性质的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(1):71-76.
- [31] 文都日乐, 张静妮, 李刚, 等. 放牧干扰对贝加尔针茅草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(4):517-522.
- [32] 范燕敏, 朱进忠, 武红旗, 等. 对伊犁绢蒿荒漠退化草地土壤微生物和酶活性的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(6):1288-1293.
- [33] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 等. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化[J]. 林业科学研究, 1997, 10(4):373-379.
- [34] 岳中辉, 王博文, 王洪峰, 等. 松嫩平原西部退化盐碱草地土壤酶活性的季节动态[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6):162-165.
- [35] 鲁萍, 郭继勋, 朱丽. 东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6):675-679.
- [36] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤微生物影响的研究述评[J]. 草业科学, 2010, 27(1):65-70.
- [37] 王启兰, 王溪, 王长庭, 等. 高寒矮嵩草草甸土壤酶活性与土壤性质关系的研究[J]. 中国草地学报, 2010, 32(3):51-56.
- [38] 焦婷, 常根柱, 周学辉, 等. 高寒草甸草场不同载畜量下土壤酶与土壤肥力的关系研究[J]. 草业学报, 2009, 18(6):98-104.
- [39] 郭彦军, 韩建国. 农牧交错带退耕还草对土壤酶活性的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(5):23-29.
- [40] 唐玉姝, 慈恩, 颜廷梅, 等. 太湖地区长期定位试验稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力关系[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):1000-1006.
- [41] 邵继承, 杨恒山, 张庆国, 等. 不同生长年限紫花苜蓿人工草地土壤酶活性及分布[J]. 草业科学, 2008, 25(4):76-78.

Advances on soil enzymatic activities in grassland ecosystem

XIANG Ze-yu¹, WANG Chang-ting¹, SONG Wen-biao², Silangshenggen³,
Garongrenqing³, Dawazeren³, Zhaxiluobu³

- (1. College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Sichuan Chengdu 610041, China;
2. Huangyuan Agricultural Technology Promotion Center in Qinghai Province, Qinghai Huangyuan 812100, China;
3. Daofu Agriculture and Animal Husbandry and Technology Bureau in Sichuan Province, Sichuan Daofu 626400, China)

Abstract: Soil enzymes play an important role in the soil ecosystem nutrient cycling and energy flow. Therefore, the study of soil enzymatic activities has important significance to investigate the structure, function and sustainable development of grassland ecosystem. The research of soil enzymes has experienced three different historical periods which were foundation period (Before 1950s), fast development period (1950—1980s) and mutual penetration with other disciplines period (1980s). Soil enzymes are mainly derived from soil microbe. They can be divided into six categories which were oxidoreductase, hydrolase, transferase, lyase, ligase and isomerase. This paper summarizes several factors affecting soil enzymatic activities of grassland ecosystem, such as degradation levels, fertilization, grazing, soil microbe, season and so on. Based on previous research, we concluded that: 1) soil enzymatic activities tend to decrease with the aggravation of degradation, 2) soil enzymatic activities could be increased to some extent by fertilization, 3) soil enzymatic activities increased by light grazing but reduced by heavy grazing, 4) soil enzymatic activities positively correlated with soil microbe, 5) soil enzymatic activities varied with season. Finally, a prospect to the research and development of the relationship between degradation, restoration and improvement of Qinghai-Tibet plateau alpine meadow ecosystem and soil enzymatic activities was made.

Key words: grassland ecosystem; soil; enzymatic activities