

尕海湿地植被退化过程中有机碳及相关土壤酶活性变化特征

马维伟, 孙文颖

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: 以青藏高原东缘尕海湿地不同植被退化程度样地为研究对象, 采用定位研究与室内试验相结合的方法, 研究植被退化过程对土壤有机碳和土壤酶活性的影响。结果表明: 植被退化显著影响土壤有机碳含量和土壤酶活性, 降低了土壤有机碳的含量和酶促反应效率, 且这种影响随土层深度变化有所不同。四种植被退化阶段有机碳含量和酶活性均值总体上(0~100 cm)表现为未退化>轻度退化>中度退化>重度退化。不同土层中, 20~40 cm 土层的有机碳含量中度退化>轻度退化; 0~10 cm 土层中淀粉酶和纤二糖酶中度退化阶段活性值较高; 20~100 cm 土层中蔗糖酶重度退化阶段活性值最高, 纤二糖酶活性重度退化>中度退化。同一退化程度土壤有机碳含量、蔗糖酶和纤二糖酶活性随土层深度增加显著降低($P<0.05$); 淀粉酶和纤维素酶活性在>40 cm 土层中活性值有所上升, 整体呈波动下降趋势。

关键词: 沼泽化草甸; 植被退化; 土壤酶; 土壤有机碳

湿地系统作为一种重要的生态系统, 虽仅占陆地表面的5%~8%, 但储存了全球陆地生态系统碳库的30%左右。由于湿地的巨大有机碳储量, 其微小变化都会影响大气中的碳量^[1], 对调解全球碳循环和气候变化有重要作用^[2]。但近年来, 受全球气候变化、过度放牧等作用, 中国湿地面积萎缩、植物生态功能退化、生物多样性水平下降^[3], 引起湿地土壤有机碳库和土壤酶活性发生明显改变^[4-7]。土壤酶是碳循环过程的重要驱动力, 有机碳的分解转化与土壤酶活性息息相关^[8]。土壤蔗糖酶能将土壤中蔗糖分子分解成果糖和葡萄糖而被植物和微生物吸收利用; 土壤淀粉酶能转化土壤中淀粉组分为易溶解利用的单糖; 土壤纤二糖酶分解多聚糖和 β 葡糖苷, 纤维素酶分解纤维素, 最终形成土壤的营养源。而这些酶通过催化作用促进土壤中大分子化合物的分解和易溶性营养物质的形成, 从而提高土壤有机质的利用率。很多研究表明土壤酶的分解作用参与并控制着陆地系统土壤有机碳的循环过程。如汤洁等^[8]研究表明土壤淀粉酶和过氧化氢酶活性与土壤有机碳含量呈正相关关系, 且过氧化氢酶活性与有机碳相关性更显著; 万忠梅等^[9]认为土壤酶活性增强促使土壤活性有机碳组份分解加速; 夏品华等^[5]研究发现湿地退化过程中碳库的损失受氧化还原酶影响。因此, 土壤酶活性与土壤碳循环密切相关, 研究其活性对土壤有机碳含量的影响对于理解土壤碳循环过程具有重要意义。

收稿日期: 2019-03-07; 修订日期: 2019-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860143); 甘肃省 GEF/OP12 三期专题研究项目(GS-GEF/OP12-01); 2019 陇原青年创新创业(团队)项目(LYRC2019-34); 甘肃省高等学校科学研究创新团队项目(2018C-16)

作者简介: 马维伟(1980-), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

E-mail: mww-007@163.com

通讯作者: 孙文颖(1995-), 女, 陕西户县人, 硕士, 助理工程师, 主要从事林业生态研究。

E-mail: 419386215@qq.com

尕海湿地作为青藏高原东缘甘南湿地的重要组成部分,其碳库稳定对甘南区域气候变化具有重要的指示作用^[10]。近年来受全球气候变暖和人为干扰等影响,尕海湿地植被大面积退化,湿地生态功能日趋脆弱^[11,12]。在此背景下,研究土壤酶活性对湿地植被退化的响应过程,这对深刻理解湿地土壤碳循环过程具有重要意义。目前对于不同植被条件下土壤有机碳和酶活性特征的研究多集中于草地^[13,14]、森林^[15,16]以及黄河三角洲与三江平原^[9,17]地区,而在青藏高原湿地,尤其是其东南缘的甘南湿地相关研究较少。鉴于此,本文以尕海沼泽化草甸湿地为研究对象,研究湿地植被退化过程中土壤有机碳及与其密切相关的四种土壤酶活性(蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶和纤维素酶)的分布特征,揭示植被退化对湿地土壤酶活性和土壤有机碳的影响,探讨湿地生态系统土壤酶活性和土壤有机碳之间的关系,以为高寒湿地碳库变化的微生物机制研究提供基础数据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

尕海湿地地处甘肃省甘南藏族自治州碌曲县尕海一则岔自然保护区(33°58'~34°32' N, 102°09'~102°46'E),保护区内湿地总面积57846 hm²,沼泽化草甸占88.4%^[18]。该区域为青藏高原大陆性季风气候,全年气温较低,降雨充足,日照时间长。年均温为1.2℃,最热月在7月,最冷月为1月;年均降雨量为781.8 mm,降水年内分布不均,主要集中在7-9月,降雨量可达623.1 mm,占全年的79.7%;冬长夏短,冬季年均可达240天。植物种类主要包括藏蒿草(*Kobresia tibetica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)、线叶蒿(*Artemisia subulata*)等。土壤类型主要包括暗色草甸土、沼泽土和泥炭土等。试验区土壤有机碳平均含量为15.38 g/kg,土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶和纤维素酶活性的平均含量分别为41.73 mg/g、85.18 mg/g、24.93 mg/g和5.60 mg/g。

1.2 样地设置

在对尕海湿地环境及植被特征全面调查的基础上,结合相关资料,确定尕海周边的沼泽化退化草甸为试验区,采用空间序列替代时间序列的方法,选取地势平缓、坡向相对一致的地段,依据湿地物种组成、生物量、物种多样性等指标^[19],将沼泽化草甸湿地分为四种退化梯度:未退化(CK)、轻度退化(SD)、中度退化(MD)及重度退化(HD)。每个梯度设置10 m×10 m的样地,重复三次,共计12块样地,详细的样地设置团队先前已报道^[20],样地具体情况见表1。

1.3 样品采集与分析

于2017年7月中旬进行土壤采样。在上述四种样地内,采用“蛇”型五点法,分0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80和80~100 cm六层,用土钻进行采样,相同土层的土壤组成一个混合土样,共72份,剔除土壤中可见杂物,四分法缩至500 g左右,装于自封袋内带到实验室进行自然风干、研磨后过2 mm筛,用于土壤酶活性及有机碳(SOC)的测定(每个样品重复三次)。土壤蔗糖酶、淀粉酶和纤维素酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定;纤二糖酶活性采用硝基酚比色法测定^[21];SOC含量采用外加热—重铬酸钾氧化容量法测定^[22]。

1.4 数据处理

选用Excel 2010制图、SPSS 23.0软件进行数据统计分析。不同退化程度间差异性检

表1 样地基本情况

Table 1 General information of sampling sites

退化程度	盖度/%	地下生物量 (干质量)/(g/m ²)	水位	容重 (g/cm ³)	通气度 /%	总孔隙度 /%
CK	96	2133.34	有较浅的季节性积水, 地下水位20~40 cm	0.36±0.01	28.92±3.79	31.86±4.12
SD	86	1378.23	无积水, 地下水位40~70 cm	0.39±0.02	24.60±5.98	27.06±6.45
MD	45	347.86	无积水, 地下水位70 cm以下	0.61±0.05	28.26±3.22	29.93±2.98
HD	由于严重退化, 地表几乎无植被生长, 地表裸露面积90%以上			0.56±0.03	23.70±3.19	25.6±3.26

验采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 及多重比较法 (LSD) ($\alpha=0.05$)。选择 Pearson 相关分析法对各因子的相关关系进行分析。图中不同退化梯度 0~100 cm 土层土壤酶活性和有机碳含量为各土层的加权平均值, 权重为土层厚度所占比例。

2 结果分析

2.1 土壤有机碳

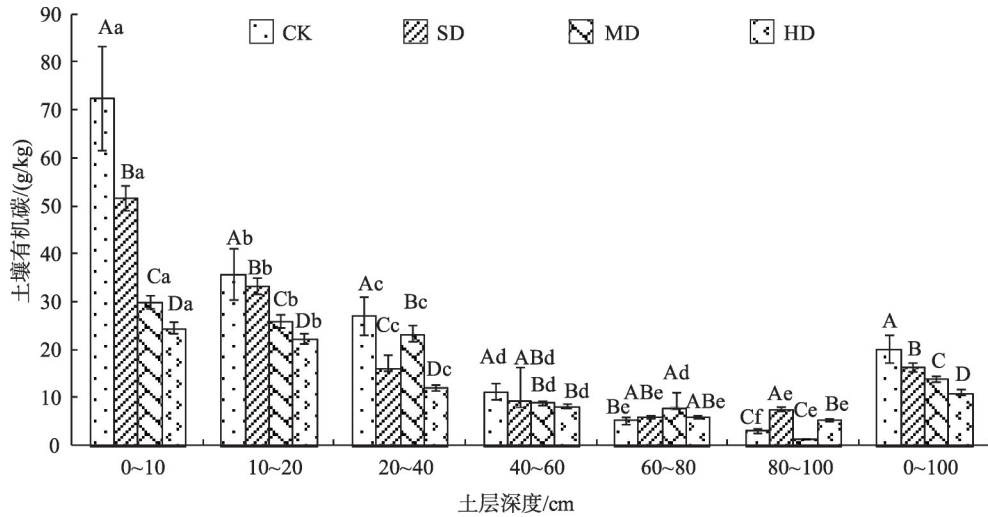
植被退化过程中尕海湿地土壤 SOC 剖面变化规律如图 1 所示。在 0~100 cm 土层中, 四种退化梯度 SOC 均值为 CK (20.20 g/kg) >SD (16.37 g/kg) >MD (13.85 g/kg) >HD (11.09 g/kg), 且随植被退化程度加剧显著性减小 ($P<0.05$)。除在 20~40 cm 土层以 MD 高于 SD 外, 0~60 cm 土层其他各层变化趋势基本一致, 均随植被退化程度加剧 SOC 含量显著性降低 ($P<0.05$); 而在 60~100 cm 土层中, 各退化阶段 SOC 含量变化幅度较小, 仅为 1.36~7.75 g/kg。表层 (0~10 cm 和 10~20 cm) SOC 含量均值为 44.64 g/kg 和 29.35 g/kg, 占总体的 64.98%。在 0~80 cm 土层, 各退化类型 SOC 随土层加深而显著性降低 ($P<0.05$), 而在 80~100 cm 土层 SOC 差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2 土壤酶活性

2.2.1 土壤蔗糖酶和淀粉酶活性

植被退化对尕海湿地土壤蔗糖酶和淀粉酶活性影响明显。由图 2a 可知, 0~100 cm 土层蔗糖酶活性均值随退化程度加剧显著降低 ($P<0.05$), 为 CK (48.88 mg/g) >SD (45.01 mg/g) >MD (38.13 mg/g) >HD (34.88 mg/g)。0~10 cm 和 10~20 cm 土层中各退化阶段变化趋势与整个剖面趋势相同, 随退化程度加剧逐渐降低; 除 10~20 cm 土层的 CK 和 SD 间差异不显著 ($P>0.05$) 外, 其他各退化程度间均存在显著差异 ($P<0.05$)。20~100 cm 土层中活性值 CK 最低, HD 最高, 最大差值为 19.05 mg/g。0~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性均值为 193.49 mg/g, 占 0~100 cm 土层总值的 77.29 %。同一退化程度蔗糖酶活性随土层深度增加而降低。

由图 2b 可知, 0~100 cm 土层中, 四种退化程度土壤淀粉酶活性的均值为 CK (107.89 mg/g) >SD (96.27 mg/g) >MD (69.47 mg/g) >HD (67.09 mg/g)。在 0~10 cm 土层, MD 的活性值显著高于其他三个退化阶段 ($P<0.05$)。0~20 cm 土层土壤淀粉酶活性的均值为 384.73 mg/g, 占整个土层的 62.23%。各退化程度淀粉酶活性均呈现出随土层加深波动下降趋势, 其中 CK 和 SD 变化趋势一致, 呈“升—降—升—降”趋势, 酶活性最大值在 10~20 cm 土层, 分别为 271.32 mg/g 和 142.27 mg/g; MD 和 HD 呈“降—升—降”趋势, 最大值在 0~10 cm 层, 分别为 321.73 mg/g 和 217.68 mg/g; SD 阶段酶活性值



注: 不同大写字母表示同一土层不同退化程度间存在差异 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一退化程度不同土层间存在差异 ($P < 0.05$), 下同。

图1 不同植被退化阶段土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content in different vegetation degradation stages

在40~60 cm土层增加显著 ($P < 0.05$), 为58.25 mg/g, 其他三个退化阶段在60~80 cm土层显著增加 ($P < 0.05$), 为14.45~52.20 mg/g。

2.2.2 土壤纤二糖酶和纤维素酶活性

由图3可知, 植被退化对尕海湿地土壤纤二糖酶和纤维素酶活性影响显著。在整个土层剖面(0~100 cm)纤二糖酶活性均值表现为CK (34.48 mg/g) > SD (27.62 mg/g) > MD (20.08 mg/g) > HD (17.56 mg/g), 统计分析表明MD和HD差异不显著 ($P > 0.05$), 其他各退化阶段均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。各退化阶段纤二糖酶活性在同一土层明显不同, 在0~10 cm土层, MD (55.04 mg/g) > SD (49.64 mg/g); 在20~100 cm土层, HD略高于MD, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。表层(0~20 cm)土壤酶活性均值为100.70 mg/g, 占整个土层(0~100 cm)的57.53%。各退化阶段纤二糖酶活性垂直分布较为相似, 除0~10 cm土层中SD的活性值(49.64 mg/g)低于10~20 cm土层(58.15 mg/g)外, 其他退化阶段纤二糖酶活性均随土层增加呈显著性降低趋势 ($P < 0.05$) (图3a)。

随植被退化程度的加剧, 0~100 cm土层的纤维素酶活性均值为CK (8.69 mg/g) > SD (6.84 mg/g) > MD (4.50 mg/g) > HD (2.36 mg/g), 且差异显著 ($P < 0.05$)。表层(0~20 cm)土壤纤维素酶活性均值为18.50 mg/g, 占整个土层(0~100 cm)的49.68% (图3b)。各退化阶段纤维素酶活性随土层加深总体呈下降趋势, CK和SD阶段酶活性在0~80 cm土层随土层加深显著下降 ($P < 0.05$), 而在80~100 cm土层略有增加, 最大变幅分别为10.38 mg/g和12.79 mg/g; MD和HD阶段在0~10 cm土层中活性值最大, 分别为7.95 mg/g和4.32 mg/g, 随土层加深呈波动性减小, 最大变幅为5.45 mg/g和3.29 mg/g。

2.3 土壤有机碳和土壤酶的相关性分析

由表2可以看出, SOC含量与蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶和纤维素酶活性均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 说明土壤酶活性与SOC含量密切相关。SOC与四种酶的相关程度表现为: 蔗糖酶 ($r=0.946$) > 纤二糖酶 ($r=0.871$) > 纤维素酶 ($r=0.803$) > 淀粉酶

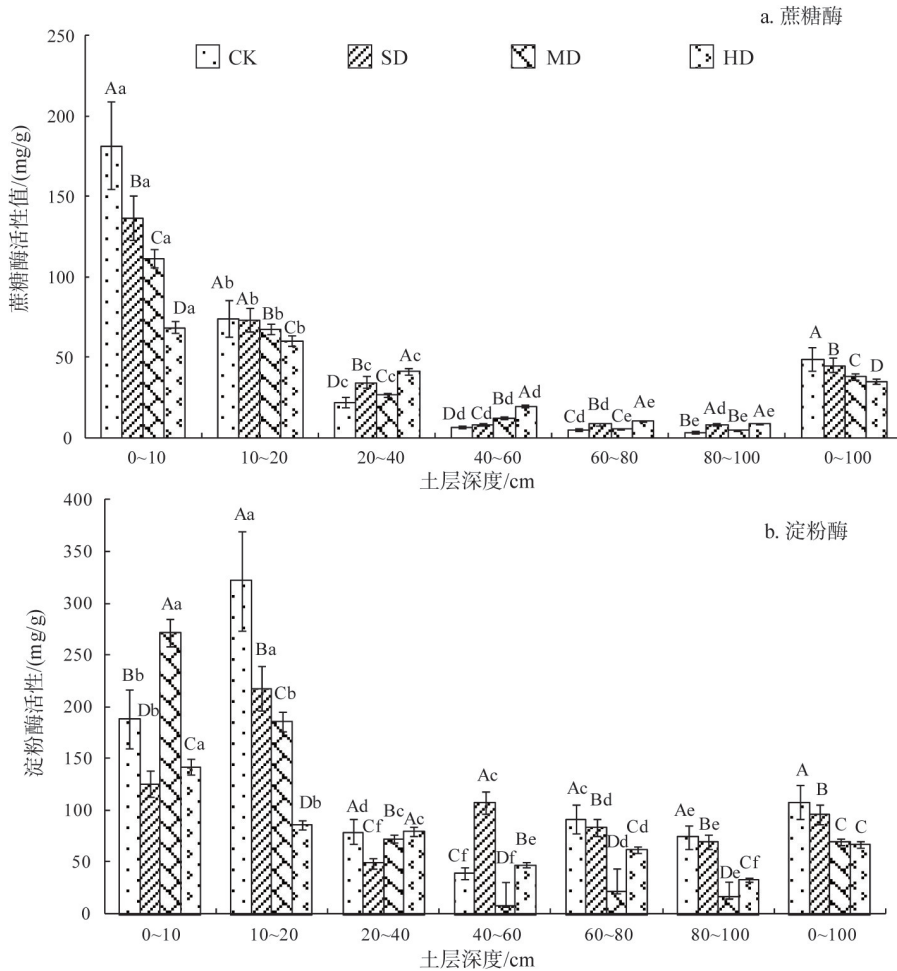


图2 不同植被退化阶段土壤蔗糖酶和淀粉酶活性

Fig. 2 Soil invertase and amylase activities in different vegetation degradation stages

($r=0.644$), 表明蔗糖酶的变化对SOC的响应更大。四种土壤酶之间也呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。地上生物量与SOC和四种土壤酶之间均呈显著或极显著正相关关系, 这表明植被退化引起的地上生物量变化可能直接或者通过影响湿地土壤酶活性, 从而影响土壤有机碳分布特征。

3 结论与讨论

随着植被退化程度的加剧, SOC含量逐渐降低(图1), 表明杂海湿地植被退化伴随着碳库的损失, 湿地碳汇功能减弱。夏品华等^[5]对贵州草海湿地的研究发现, 沿湿地退化梯度表层土壤有机碳含量降低, 这与本文研究结果一致。杂海湿地植被退化过程中群落组成和结构发生变化, 生物量随退化演替逐渐减小(表1), 使得SOC输入量降低; 其次, 随植被退化演替的进行, 地表植被覆盖度降低, 土壤裸露, 表面温度增加, 同时湿地土壤含水量减少, 地下水位降低^[23], 湿地土壤由淹水的缺氧环境进入复氧环境, 导致土壤微生物活性增强, 加速了SOC分解, 引起SOC矿化量增加, 积累量减少^[24]。因此,

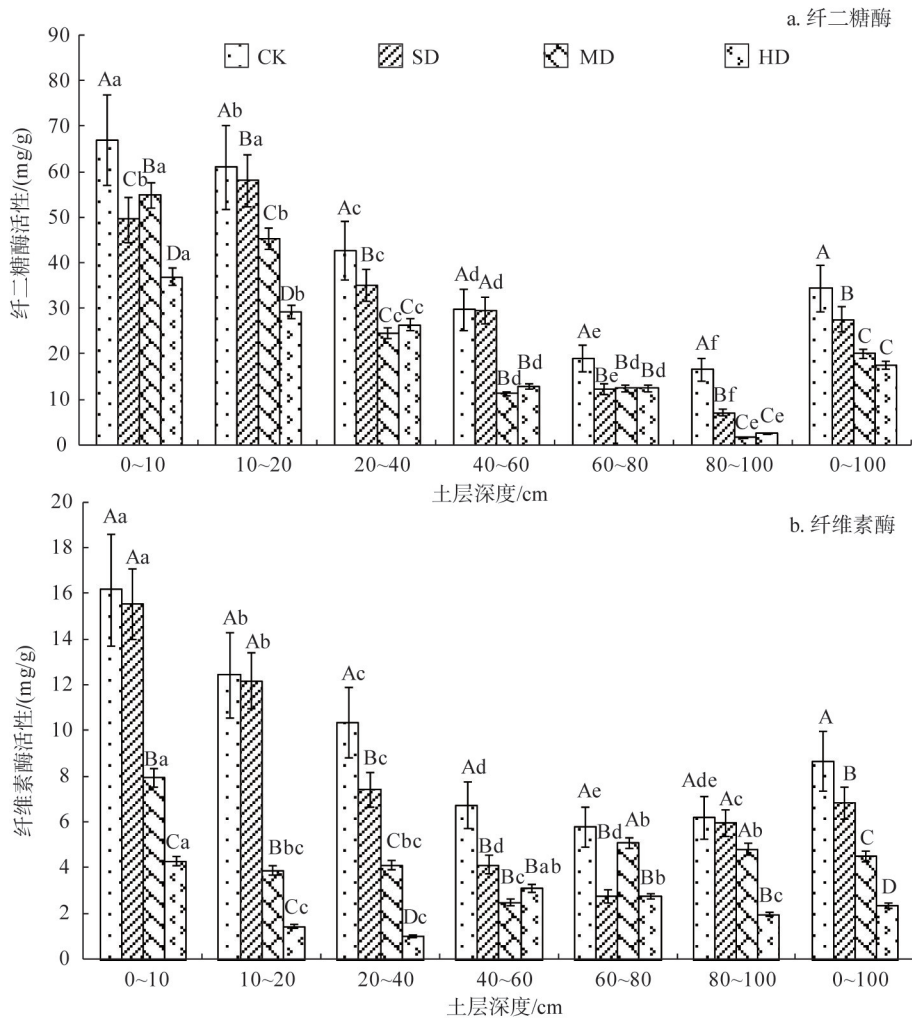


图3 不同植被退化阶段土壤纤二糖酶和纤维素酶活性

Fig. 3 Soil fiber disaccharidase and cellulase activities in different vegetation degradation stages

表2 土壤有机碳含量和土壤酶之间相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis between organic carbon content and soil enzymes activity

	地上生物量	土壤有机碳	纤维素酶	纤二糖酶	淀粉酶
蔗糖酶	0.874*	0.946**	0.696**	0.830**	0.681**
淀粉酶	0.744*	0.644**	0.557**	0.834**	
纤二糖酶	0.700*	0.871**	0.755**		
纤维素酶	0.830**	0.803**			
土壤有机碳	0.961**				

注: *, **分别表示相关性在0.05、0.01水平上显著。

SOC含量沿退化梯度呈下降趋势。从土壤垂直剖面看,同一退化程度SOC含量随土层深度增加而降低,且表层土壤(0~10 cm和10~20 cm)明显高于深层土壤(20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm)。这是由于多数情况下植物大部分功能细根集聚在表层,如尕海湿地优势种矮蒿草,其根系量的85%集中在0~20 cm土层^[11],使得土壤的根

系分泌物含量较高,根系周转速率更快,且表层是植物枯枝落叶的输入层,土壤腐殖质含量较高,为微生物创造了良好的生长条件,使微生物在这一范围较为活跃,微生物分解腐殖质进一步增加了SOC含量,因此SOC在土壤表层富集。随着土层深度增加,根系密度变小,凋落物输入量减少,SOC含量随之降低^[5]。

研究发现,尕海湿地不同植被退化类型下四种土壤酶的活性均值变化一致,均随着退化程度的加剧土壤酶活性显著降低($P<0.05$),表明植被退化使得土壤酶活性减弱。秦嘉海等^[25]对祁连山黑河不同退化草地土壤的研究显示酶活性随土壤退化加剧而降低,与本文结果一致。植被特征与土壤密切相关,植物的盖度变化引起环境(光、温度)变化,同时根系的机械作用和分泌物也能直接或间接影响土壤生化性质^[26]。尕海湿地不同植被退化类型地上植被特征不同(表1),土壤获得的水分、光照资源也就不同,导致土壤水热条件和通气状况有明显差异。植被退化不明显的区域种类丰富,丰富度和均匀度指数较高,同时根系较多,这有利于土壤有机质及养分的累积^[27],使土壤酶有充足的反应底物。同时土壤质地疏松,水、热和氧气条件较好,微生物活动旺盛,代谢产酶能力强,促进了土壤酶的增殖和积累,并提高了土壤酶的分解能力。植被退化程度越高土壤越贫瘠,植物盖度降低,地上、地下生物量减少,而植被根系分泌及残体分解是土壤酶的主要来源,生物量的减少使得由植被分泌或分解产生的酶来源减少;同时,土壤结构变差,紧实度增加,而孔隙度减小,不利于氧气交换^[28],进而导致土壤呼吸减弱,微生物活性降低,从而抑制了土壤酶活性的发展。

不同土壤层次上看,0~10 cm土层中纤二糖酶活性CK最高,但MD阶段却显著高于SD阶段。这是由于在尕海湿地MD阶段植被盖度虽较小,但地表植被凋落物最高^[29],使得土壤有机质来源较多,加上牛羊践踏使凋落物破碎并与土壤充分接触,促进了凋落物的分解,使得土壤养分快速转移到土壤中去,增加了纤二糖酶反应底物,因此表现出较高的酶活性。20~100 cm深层土壤中,蔗糖酶的HD阶段活性值最高,淀粉酶和纤二糖酶活性HD>MD,严重退化阶段土壤中的酶反而表现出较高的酶活性。这是由于尕海湿地植被退化直接影响土壤蓄水能力^[30],使得湿地含水量减少,地下水位降低^[23],土壤物质随水分运动向下迁移,促使酶类物质向深层土壤迁移并在深层土壤中积累^[31]。此外,尕海湿地植被退化后,土壤粘粒增多,粘粒形成的团聚体对蔗糖酶有一定的吸附保护作用,被吸附的土壤酶活性不受改变且稳定性增强^[32],这表现出酶的潜在活力。

在土壤垂直剖面上,酶活性自上而下大体呈逐渐下降趋势,表层(0~20 cm)酶活性值占到了剖面整体的50%左右,有明显的“表聚现象”,说明土壤深度对酶活性有显著影响。这与吴俐莎等^[33]对土壤酶活性土层深度变化特征研究的结果一致。表层土壤累积了较多的枯落物和腐殖质,养分高、通气性好,微生物活力强、代谢旺盛,使得土壤酶来源丰富,酶促反应效率高。随着土层深度增加,地下生物量减少、有机质含量下降,pH增加、容重变大,深层土壤中的生物活动受到限制功能活性急剧下降^[34],这些因素综合作用导致土壤酶活性随着土层加深逐渐降低。本文中SOC与四种土壤酶活性均呈极显著正相关(表2),说明四种土壤酶与SOC含量的增加和积累有密切联系。土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶和纤维素酶对土壤中糖类和纤维素类化合物的分解和易溶性营养物质的形成起关键作用,进入土壤和累积在土壤中的化合物在它们的作用下分解转化,使得土壤中SOC含量提高,同时如果SOC含量高,又为土壤酶提供充足的底物供应,使酶促反应效率提高,由于这种协同作用土壤酶与SOC在土层垂直剖面表现出相似分布特征。

随土层深度的增加土壤酶活性整体呈下降趋势,但深层土壤中仍有较高的酶活性,且淀粉酶和纤维素酶活性值的不同退化阶段分别在40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm土层明显上升。这一结果表明在尕海湿地深层土壤中土壤酶的分解能力不容忽视,其参与的酶促反应过程仍然活跃。Senga等^[35]的研究发现,参与营养元素水解的土壤酶活性随土层深度的增加出现了显著回升,与本文结果一致。也有研究发现深层土壤中酶活性趋于稳定^[36]。这可能与不同湿地生态系统的水文和气候条件、土壤性质以及深层土壤的发育与演替状况等因素有关^[37]。土壤中的各种酶都不是单独存在于土壤中,它们之间相互影响^[38]。四种酶之间呈极显著相关关系,说明它们在土壤中进行酶促反应时有相互促进的作用,一定程度上提高了反应效率。在未来的研究中应对不同植被退化程度深层土壤酶活性予以关注并设计试验加以验证。

总之,尕海湿地植被由未退化到重度退化过程中,SOC含量和土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶和纤维素酶活性在整个土层(0~100 cm土层)呈降低趋势;随土层深度增加,表层(0~10 cm)土壤中MD阶段纤二糖酶活性显著增加;20~100 cm土层中,MD阶段的SOC和HD阶段的蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶活性值较大。可见,植被退化显著降低了土壤有机碳含量和酶促反应效率,导致该区土壤环境恶化,碳库损失严重。青藏高原高寒湿地气候特殊,终年气温较低,日照充足但热量差,全年无绝对霜期,不利于多数植物的生长,研究区内植被类型较为单一,生态系统空间异质性不明显^[39],不利于抵御内外干扰。植被一旦破坏,生长恢复十分困难,伴随着土壤生产力下降和碳库的损失,最终导致湿地生态功能丧失。因此,制定相应的恢复措施,减缓植被退化,对区域生态系统稳定和碳库保存尤为重要。

参考文献(References):

- [1] 张旭辉,李典友,潘根兴,等.中国湿地土壤碳库保护与气候变化问题.气候变化研究进展,2008,(4):202-208. [ZHANG X H, LI D Y, PAN G X, et al. Conservation of wetland soil C stock and climate change of China. *Advances in Climate Change Research*, 2008, (4): 202-208.]
- [2] SONG C C, LAFLEUR P M, MIAO Y Q, et al. Wetland-atmosphere methane exchange in Northeast China: A comparison of permafrost peatland and freshwater wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 239-249.
- [3] 龚亚珍,韩炜, BENNETT M, 等.基于选择实验法的湿地保护区生态补偿政策研究.自然资源学报,2016,31(2):241-251. [GONG Y Z, HAN W, BENNETT M, et al. Study on eco-compensation policy design for wetland: A choice experiment approach. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(2): 241-251.]
- [4] 张建锋,邢尚军,樊宝敏,等.黄河三角洲植被群落和土壤酶活性对湿地退化的响应.水土保持通报,2009,29(4):1-6. [ZHANG J F, XING S J, FAN B M, et al. Responses of plant community and soil enzyme activities to wetland degradation in the Yellow River Delta region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 1-6.]
- [5] 夏品华,喻理飞,寇永珍,等.贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系.环境科学学报,2017,37(4):1479-1485. [XIA P H, YU L F, KOU Y Z, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with enzyme activity in the Caohai Wetland of the Guizhou Plateau. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1479-1485.]
- [6] 田昆.云南纳帕海高原湿地土壤退化过程及驱动机制.长春:中国科学院研究生院东北地理与农业生态研究所,2004. [TIAN K. Mechanism and process of soil degradation in Napahai Wetland on Yunnan Plateau. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, 2004.]
- [7] 黎杨.贵州高原草海湿地退化对土壤有机碳及酶活性分布的影响.贵阳:贵州师范大学,2017. [LI Y. Effects of degradation of Caohai Wetland on distribution of organic carbon components and enzyme activity in Guizhou Plateau. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017.]

- [8] 汤洁, 赵晴, 王思宁, 等. 吉林西部盐碱地水田水稻不同生长期土壤酶活性与有机碳含量的关系. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1425-1430. [TANG J, ZHAO Q, WANG S N, et al. Correlation of soil enzyme activities with soil organic carbon content in Saline-alkali paddy field. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(9): 1425-1430.]
- [9] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系. 环境科学学报, 2009, 29(2): 406-412. [WAN Z M, SONG C C, YANG G S, et al. The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the Sanjiang Plain. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 406-412.]
- [10] 虎高勇, 李俊臻. 甘肃尕斯海湿地及其生物多样性特征. 甘肃林业科技, 2011, 36(3): 24-28. [HU G Y, LI J Z. Gahai Wetland of Gansu and its biodiversity characteristics. Journal of Forestry Science and Technology, 2011, 36(3): 24-28.]
- [11] 徐鹏彬, 邓建明, 赵长明. 甘肃尕斯海湿地不同海拔草地群落组分及物种多样性研究. 草业学报, 2012, 21(2): 219-226. [XU P B, DENG J M, ZHAO C M. Study on grassland community characteristics and species diversity along altitudinal gradients in the Gahai Wetland, Gansu province. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 219-226.]
- [12] 马维伟, 王辉, 王跃思, 等. 甘南尕斯海泥炭沼泽地退化过程土壤特征和水源涵养功能的变化. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1531-1541. [MA W W, WANG H, WANG Y S, et al. Changes of soil properties and water conservation function in the degradation process of Gahai Peat Bog in Gannan. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1531-1541.]
- [13] 尹亚丽, 王玉琴, 鲍根生, 等. 退化高寒草甸土壤微生物及酶活性特征. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3881-3890. [YIN Y L, WANG Y Q, BAO G S, et al. Characteristics of soil microbes and enzyme activities in different degraded alpine meadow. Chinese Journal of Application Ecological, 2017, 28(12): 3881-3890.]
- [14] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化. 草业学报, 2014, 23(3): 8-19. [HU L, WANG C T, WANG G X, et al. Changes in the activities of soil enzymes and microbial community structure at different degraded successional stages of alpine meadows in the Headwater region of Three Rivers, China. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 8-19.]
- [15] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区马尾松林土壤—凋落物层酶活性对凋落物分解的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2228-2237. [GE X G, XIAO W F, ZENG L X, et al. Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2228-2237.]
- [16] 徐秋芳, 朱志建, 俞益斌. 不同森林植被下土壤酶活性研究. 浙江林业科技, 2003, 23(4): 10-12. [XU Q F, ZHU Z J, YU Y B. Study on enzymatic activities of soil under different types of vegetation. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2003, 23(4): 10-12.]
- [17] 王笛, 马风云, 姚秀粉, 等. 黄河三角洲退化湿地土壤养分、微生物与土壤酶特性及其关系分析. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 94-98. [WANG D, MA F Y, YAO X F, et al. Properties of soil microbes, nutrients and soil enzyme activities and their relationship in a degraded wetland of the Yellow River Delta. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(5): 94-98.]
- [18] 许延昭, 马维伟, 李广, 等. 尕斯海湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳动态变化特征. 水土保持学报, 2018, 32(3): 205-211. [XU Y Z, MA W W, LI G, et al. Dynamic characteristics of soil light and heavy fraction organic carbon during vegetation degradation in Gahai Wetland. Journal Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 205-211.]
- [19] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 等. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究. 草业科学, 2002, (9): 1-5. [MA Y S, LANG B N, LI Q Y, et al. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow River source region. Peatacultural Acience, 2002, (9): 1-5.]
- [20] MA W W, ABDUL-RAUF M A, WANG Y S, et al. Greenhouse gas emissions as influenced by wetland vegetation degradation along a moisture gradient on the Eastern Qinghai-Tibet Plateau of North-West China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 112(3): 335-354.
- [21] 李忠和. 吉林西部稻田土壤微生物及酶活性对碳变化响应机制研究. 长春: 吉林大学, 2014. [LI Z H. The response mechanism of soil microbes and enzyme activity on carbon variations of paddy soil in Western Jilin. Changchun: Jilin University, 2014.]
- [22] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素: 以后寨河喀斯特小流域为例. 自然资源学报, 2018, 33(6): 1056-1067. [HUANG X F, ZHOU Y C, ZHANG Z M. Characteristics and affecting factors of soil organic carbon under land uses: A case study in Houzhai River Basin. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 1056-1067.]

- [23] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 尕海沼泽化草甸湿地不同地下水位土壤理化特征的比较分析. 草地学报, 2018, 26(2): 341-347. [WU J Q, MA W W, LI G, et al. Comparative analysis of physicochemical property of soil with different groundwater level in Gahai Swamp Meadow Wetland. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 341-347.]
- [24] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 等. 若尔盖高原退化湿地土壤有机碳储量. 水土保持研究, 2017, 24(5): 27-32. [ZHOU W C, CUI L J, WANG Y F, et al. Soil organic carbon storage in the degraded wetlands in Zoigê Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 27-32.]
- [25] 秦嘉海, 张勇, 赵芸晨, 等. 祁连山黑河上游不同退化草地土壤理化性质及养分和酶活性的变化规律. 冰川冻土, 2014, 36(2): 335-346. [QIN J H, ZHANG Y, ZHAO Y C, et al. Soil physicochemical properties and variations of nutrients and enzyme activity in the degrading grassland in the upper reaches of the Heihe River, Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 335-346.]
- [26] 李媛媛. 黔中石灰岩土壤酶和灌木林植物物种多样性研究. 贵阳: 贵州大学, 2008. [LI Y Y. Study on soil enzyme and plant species diversity of shrub in limestone area of Central Guizhou. Guiyang: Guizhou University, 2008.]
- [27] 赵仁竹, 汤洁, 梁爽, 等. 吉林西部盐碱田土壤蔗糖酶活性和有机碳分布特征及其相关关系. 生态环境学报, 2015, 24(2): 244-249. [ZHAO R Z, TANG J, LIANG S, et al. Distribution of soil organic carbon and invertase activity and its correlation in Saline-alkali paddy field in West Jilin. *Ecology and Environmental Science*, 2015, 24(2): 244-249.]
- [28] 马维伟, 李广, 王立, 等. 植被退化对尕海湿地枯落物分解的影响. 水土保持通报, 2018, 38(1): 29-35. [MA W W, LI G, WANG L, et al. Effects of vegetation degradation on litter decomposition in Gahai Wetland. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 29-35.]
- [29] 马维伟, 王跃思, 李广, 等. 尕海湿地植被退化过程中植被—土壤系统有机碳储量变化特征. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3900-3906. [MA W W, WANG Y S, LI G, et al. Variation characteristics of organic carbon storage in vegetation-soil systems during vegetation degradation succession in the Gahai Wetland, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 3900-3906.]
- [30] 黄蓉, 王辉, 马维伟, 等. 尕海洪泛湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征. 水土保持学报, 2014, 28(5): 221-227. [HUANG R, WANG H, MA W W, et al. Soil physicochemical properties characteristics during degradation process of the flooding wetland in Gahai. *Journal Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 221-227.]
- [31] 李林海, 邱莉萍, 梦梦. 黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3355-3360. [LI L H, QIU L P, MENG M. Responses of soil enzyme activities to re-vegetation in gully Loess Plateau of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3355-3360.]
- [32] 李鑫, 马瑞萍, 安韶山, 等. 黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2282-2290. [LI X, MA R P, AN S S, et al. Characteristics of soil organic carbon and enzyme activities in soil aggregates under different vegetation zones on the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2282-2290.]
- [33] 吴俐莎, 唐杰, 罗强, 等. 若尔盖湿地土壤酶活性和理化性质与微生物关系的研究. 土壤通报, 2012, 43(1): 52-59. [WU L S, TANG J, LUO Q, et al. Study on the relationship between soil enzyme activities and soil physico-chemical properties with microorganism of degraded soil from Zoige Wetland. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 52-59.]
- [33] 杨萌, 岳天, 李永夫, 等. 常绿阔叶林改造为板栗林对土壤氮磷钾库及酶活性的影响. 自然资源学报, 2017, 32(5): 765-777. [YANG M, YUE T, LI Y F, et al. Effects of converting evergreen broad-leaved forests to Chinese chestnut forests on soil nitrogen, phosphorous and potassium pools and enzyme activity. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 765-777.]
- [34] VAN-BRUGGEN A H C, SEMENOV A M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 13-24.
- [35] SENGU Y, HIROKI M, TERUI S, et al. Variation in microbial function through soil depth profiles in the Kushiro Wetland, Northeastern Hokkaido, Japan. *Ecological Research*, 2015, 30(4): 563-572.
- [36] 塔娜. 杉木人工林不同发育阶段土壤纤维素酶活性变化规律及机理的研究. 北京: 北京林业大学, 2012. [TA N. The variation characteristics and mechanisms of soil cellulose activity in different developing stages of Chinese fir plantations. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.]
- [37] 于昊天, 黄时豪, 刘亚军, 等. 鄱阳湖湿地土壤酶及微生物生物量的剖面分布特征. 环境科学研究, 2017, 30(11): 1715-1722. [YU H T, HUANG S J, LIU Y J, et al. Profile distribution characteristics of soil enzymes and microbial bio-

- mass in the Poyang Lanke Wetland. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(11): 1715-1722.]
- [38] 耿玉清, 王冬梅. 土壤水解酶活性测定方法的研究进展. *中国生态农业学报*, 2012, 20(4): 387-394. [GENG Y Q, WANG D M. Research advances on the measurement methods for soil hydrolytic enzymes activities. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2012, 20(4): 387-394.]
- [39] 高洁. 四川若尔盖湿地退化成因分析与对策研究. *四川环境*, 2006, (4): 48-53. [GAO J. Degradation factor analysis and solutions of Ruergai Wetland in Sichuan. *Sichuan Enviroment*, 2006, (4): 48-53.]

Changes of organic carbon and related soil enzyme activities during vegetation degradation in Gahai Wetland

MA Wei-wei, SUN Wen-ying

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the effects of soil organic carbon (SOC) and soil enzyme activities during the vegetation degradation process, the field experiments were conducted in marsh meadow of Gahai Wetland on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau. The main results were as follows: vegetation degradation significantly affected SOC content and soil enzyme activity, reduced SOC content and enzymatic reaction efficiency, and this effect varied with soil depth. The weighted mean values of organic carbon content and soil enzymes activity in 0-100 cm layers varied in different stages of vegetation degradation of marsh meadow, following an order of non-degradation > light degradation > moderate degradation > heavy degradation. In different soil layers, the organic carbon content in 20-40 cm soil layer was moderate degradation > light degradation, and the activity of amylase and cellobiose in 0-10 cm soil layer was moderate degradation > light degradation. In 20-100 cm soil layer, the activity values of invertase were the highest in heavy degradation stage, and the activity values of fiber disaccharidase showed heavy degradation > moderate degradation. With increasing soil layers, SOC content, invertase and fiber disaccharidase activity decreased significantly ($P < 0.05$), while amylase and cellulase activities showed a fluctuating downward trend on the whole, and enzyme activity value increased slightly in the > 40 cm soil layer.

Keywords: marsh meadow; vegetation degradation; soil enzymes; soil organic carbon