

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.01.002

红碱淖湖土壤退化的不同阶段酶活性研究

赵远¹, 乔燕月¹, 周际海², 冀云¹, 王晓林¹, 齐今笛¹

(1.常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164;2.南昌工程学院 水利与生态工程学院,江西 南昌 330108)

摘要:选取红碱淖湖退化不同阶段的土壤,探索在不同阶段采样点选择和采样深度选择对土壤酶活性的影响,检测在不同阶段土壤中的具有代表性的酶:过氧化氢酶、脱氢酶和磷酸酶,对这3种酶活性分布特征以及饱和含水量、细胞呼吸值进行监测。研究表明:红碱淖湖土壤酶活性与有机质存在正相关关系;湖泊退化后,其酶活性间的相关性会受到退化的影响,退化程度低的受破坏程度小于退化程度高的地方。

关键词:湖泊退化;退化程度;土壤酶活性;细胞呼吸;饱和含水量

中图分类号:X 172

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2019)01-0008-07

Enzyme Activities at Different Stages of Soil Degradation in Hongjiannao

ZHAO Yuan¹, QIAO Yanyue¹, ZHOU Jihai², JI Yun¹, WANG Xiaolin¹, QI Jindi¹

(1.School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;2.School of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330108,China)

Abstract:In the study, different stages of soils from Hongjiannao were selected to explore the effect of sampling point selection and sampling depth on soil enzyme activities. The representative enzymes of Hongjiannao in different stages of soil were detected: catalase, dehydrogenase and phosphatase; the activity distribution characteristics of these three enzymes and saturated water content, cell respiration value were monitored. The results show that is a positive correlation between soil enzyme activity and organic matter in Hongjiannao Lake; After degradation of the lake, the correlation between enzyme activities will be affected by degradation, and the destroy of low degradation is less than the destroy of high degradation.

收稿日期:2018-09-17。

基金项目:国家科技支撑计划课题(2015BAC02B02-01);江苏省重点研发专项资金(社会发展)(BE2015670)。

作者简介:赵远(1968—),男,安徽滁州人,博士,研究员。E-mail: zhaoyuan@cczu.edu.cn

引用本文:赵远,乔燕月,周际海,等.红碱淖湖土壤退化的不同阶段酶活性研究[J].常州大学学报(自然科学版),2019,31(1):8-14.

Key words: lake degradation; degree of degradation; soil enzyme activities; cellular respiration; saturated water content

截至2015年12月,位于黄河流域的中国最大的沙漠淡水湖——红碱淖,因人为因素和自然降水减少,湖面面积已“缩水”了25.5 km²,繁殖栖息于此的濒危珍禽遗鸥生存堪忧。著名湿地生态专家、湿地国际中国办事处主任陈克林曾说过:红碱淖属于国家级的重要湿地,目前面临的最大问题是注水河流遭到拦截,严重影响了湖水的补充和湖泊的自净能力。他警告说历史上因人为与气候因素干扰的罗布泊已干涸沦为荒漠^[1-2]。如果不采取紧急措施,未来几十年内红碱淖很可能完全干涸,会成为“第二个罗布泊”^[3],因此对红碱淖土壤酶活性展开研究是必要的。

土壤酶是存在于土壤中各类酶的总称,是一种生物催化剂,是一类具有特殊催化能力的较稳定的蛋白质。其一般吸附在土壤胶体表面或呈复合体存在,部分存在于土壤溶液中^[4-5]。土壤酶参与土壤中各种生物化学过程,其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^[6]。而细胞呼吸可以代表土壤代谢的强度,一般以微生物的呼吸作用(CO₂的释放量为强度指标)来衡量土壤微生物的总活性;测定饱和含水量值是因为水分是天然土壤的一个重要组成部分,它不仅影响土壤的物理性质,制约着土壤中养分的溶解,转移和微生物的活动,是构成土壤肥力的一个重要因素。本研究将土壤酶活性与红碱淖湖日益突出的生态环境问题的解决相结合,应用酶活性的敏感性作为指标,解决其环境问题是本研究的重点^[7]。

本研究旨在通过研究不同阶段红碱淖土壤的采样点和深度选择,监测不同阶段红碱淖土壤中的过氧化氢酶、磷酸酶、脱氢酶、细胞呼吸值、饱和含水量值以及结果分析,明确了解红碱淖不同阶段的土壤特征^[8];以土壤酶活性表征其土壤C,N,P等养分的循环状况,鉴定土壤肥力;评价土壤生产力。检测过氧化氢酶、脱氢酶和磷酸酶这3种酶活性分布特征时,同时检测土壤饱和含水量和细胞呼吸值,通过后者检测出该采样点处微生物活性、有机质含量,探索酶活性与有机质的关系。

1 材料与方法

1.1 实验仪器

振荡机、分光光度计、烧碱石棉过滤器、DJ-1A大功率磁力搅拌器、SK-1型快速混匀器、自动平衡离心机、KQ5200DB型数控超声波清洗器、气相色谱、液相色谱仪、制冰机、YQX-II厌氧培养箱等。

1.2 实验试剂

过氧化氢酶实验:0.3%过氧化氢溶液;0.002 mol/L高锰酸钾溶液;1.5 mol/L硫酸。

脱氢酶实验:0.5 mol/L三(羟甲基)氨基甲烷-盐酸缓冲液;0.5%氯化三苯基四氮唑(TTC)溶液;三苯基甲腈标准溶液;甲醇^[9]。

磷酸酶实验:甲苯;磷酸苯二钠;缓冲液;pH=9.0硼酸盐缓冲液;0.5% 4-氨基安替吡啉溶液;2.5%铁氰化钾;酚原液;酚工作液^[10]。

细胞呼吸实验:0.1 mol/L氢氧化钠溶液;0.05 mol/L盐酸溶液;酚酞乙醇溶于指示剂;1 mol/L氯化钡溶液^[11]。

1.3 采样方法

目前,国际上对土壤退化分类还没有一个权威的标准,但从全世界范围看,最为广泛的退化分类是

从退化程度上将土壤退化分为轻度、中度、强度和极强度 4 类。从研究区选取 A, B, C, D, E, F, G, H 这 7 个采样单元, 其中 A 为轻度退化阶段, B, C, D 为强度退化阶段, E, F 为中度退化阶段, G, H 为极强度退化阶段; 也可划分为 B, C, D 为中度退化阶段, E, F, G, H 为完全退化阶段。

本研究采用蛇形采样法进行采样(如图 1), 采样单元平均面积为 6.67~13.33 hm², 每处采样点采样量 1 kg 左右。按土壤发生层次采样, 作土壤剖面样品。从 A 区域点选取 0~45 cm 深, 5 cm 为一间断自上而下逐层采集土样; B, C, D, E, F, G, H 这 7 个区域点选取 0~100 cm 深, 10 cm 为一间断, 自上而下逐层采集土样^[12]。

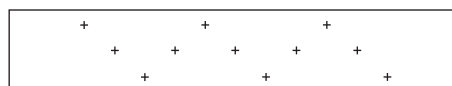


图 1 土壤采样点分布

1.4 实验方法

测定过氧化氢酶: 用定量滴定酶促反应后剩余的过氧化氢量来表示酶活性, 反应式为: $2\text{KMnO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow 2\text{MnSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + 8\text{H}_2\text{O} + 5\text{O}_2$ 。

测定脱氢酶: 氯化三苯基四氮唑(TTC)是标准氧化电位为 80 mV 的氧化还原色素, 溶于水中成为无色溶液, 但还原后即生成红色而不溶于水的三苯甲腈(TPF), TPF 比较稳定, 不会被空气中的氧自动氧化, 所以 TTC 被广泛地用作酶试验的氢受体, 用 TTC 还原量表示脱氢酶活性^[13]。

测定磷酸酶: 采用磷酸苯二钠法测定, 以磷酸苯二钠为基质, 酶解释放出的酚, 使得在磷酸酶的作用下, 水解基质所生成苯酚的量来表示磷酸酶活性^[14]。

测定细胞呼吸: 采用滴定法, 利用一定浓度 NaOH 溶液吸收土壤呼吸所释放出的 CO₂, 然后用标准 HCl 溶液滴定剩余的 NaOH 量, 根据 NaOH 溶液消耗量, 计算出释放的量 CO₂。

测定饱和含水量: 将土壤样品置于 105±2 °C 下烘至恒重^[15], 根据其烘干前后质量之差, 计算出土壤水分含量。

2 结果与讨论

2.1 过氧化氢酶

图 2 表示同一点不同深度的过氧化氢酶活性影响有着显著的差异, 每点曲线图都存在最高值, 表示其点过氧化氢酶活性最高, 同样, 每个图中也存在最低值, 表明其点过氧化氢酶活性最低, 且微物的含量少。其中也有很多点数值较平稳, 表明其过氧化氢酶活性差异不明显。过氧化氢酶活性随深度变化由两个因素综合作用, 影响如下:

土壤环境中水、盐、pH、营养条件等的变化: 水、盐含量和 pH 过高或过低都会抑制过氧化氢酶活性; 但在一定适宜范围内, 过氧化氢酶活性会随 pH 增高而增大。

根系的发育程度和伸展深度: 在根系的数量多和密度大的地方, 过氧化氢酶活性可能较高; 以浅根系为主的植物可能会导致过氧化氢酶活性在土壤表层或次表层较高, 而深根系植物使土壤深部过氧化氢酶活性较高。

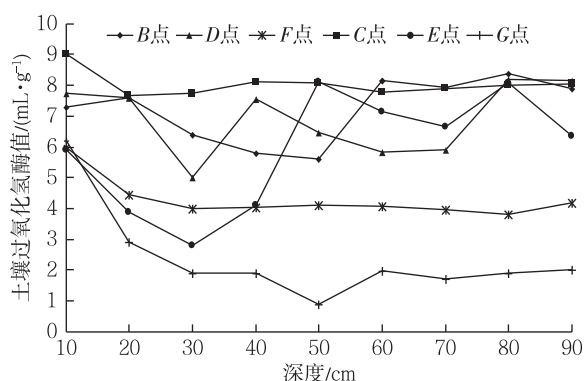


图 2 不同点不同深度过氧化氢酶活性

过氧化氢酶活性随深度变化是这 2 个因素综合作用的结果,而对于处于不同退化阶段的湖泊,其土壤过氧化氢酶活性的变化为轻度退化的湖泊土壤过氧化氢酶活性最高,其次为中度退化的湖泊土壤,完全退化的湖泊土壤的过氧化氢酶活性最低,并表现出极显著性差异,其原因是完全退化阶段的湖泊土壤微生物的种类和数量较少,退化土壤植被的结构和生物量发生了变化,从而使得土壤酶活性降低,对土壤微生物的活动和数量产生影响,且随着退化程度的加重,无论在何种土壤深度,各种土壤微生物的数量均呈下降趋势,表层土壤有机质、全氮含量丰富,利于土壤动物、土壤微生物和植物根系的生命活动,所以未退化湖泊表层土壤过氧化氢酶活性较高;而对于 E, F, G, H 的土层,随着退化程度的加剧,土壤过氧化氢酶活性变化不是很大,这是因为土壤具有较强的抗拒退化的能力,即使重度退化的地方,土壤肥力仍然维持一定水平。

2.2 脱氢酶

由图 3 的 6 组曲线图可知,同一点不同深度的土壤脱氢酶值存在周期性变化,并且不止一个峰值出现,这说明同一点不同深度的土壤脱氢酶活性存在差异,主要与土壤氮含量有关,若土壤氮含量越高,土壤酶活性则越高。能客观反映不同的退化程度。图 3 呈现的 6 组曲线图中,都表现了在氮素循环转化过程中,土壤酶活性随着氮素营养逐渐衰减而随之降低;由土壤垂直剖面上看,随着土层加深,土壤氮含量与土壤酶活性均呈下降趋势,土壤酶活性与土壤氮含量存在一定相关。土壤会由于土壤氮含量和土壤酶活性的降低而导致其退化程度的加深。

从图 3 中 B, C, D 这 3 点曲线图可看出, D 点在 60 cm 处出现最大峰值,高于其他点深度的值,表明此处的脱氢酶活性最大。B 点和 C 点也出现的峰值都比 D 点小,但土壤脱氢酶值随着土壤深度的增加,呈现下降趋势,酶活性也相应降低,但处于平稳的下降。从 E, F, G 这 3 点曲线图可看出,在 E 点的 40 cm 出现峰值,在 F 点的 50 cm 出现峰值,在 G 点的 60 cm 出现峰值,但这 3 点的不同深度的峰值几乎是一样的,各个点的脱氢酶值在浅层土壤中都不高,过了峰值以后,呈现下降趋势,但下降趋势较平稳。B, C, D 这 3 点处的土壤处于半退化阶段,而 E, F, G 这 3 点处于完全退化阶段,但这 6 点不同深度值的差异性不大,说明脱氢酶受土壤有机质、微生物等因素影响程度不高。

2.3 磷酸酶

磷酸酶可以促进水解有机化合物。实验表明,土壤微生物在土壤含磷有机物矿化中起着重要作用。一些高等植物也具有磷酸酶活性,土壤磷酸酶活性可以表征土壤肥力。土壤磷酸酶通常在 $\text{pH}=7.0$ 下测量,并表示为 1 g 的土壤作用于基质 24 h 释放出的 P_2O_5 量,及释放出基质有机部份量表示^[16]。

图 4 中,不论是哪个样点折线图,不同深度的都有最高值和最低值,在最高值处表明土壤微生物的活动强,有机质、全氮、全磷含量丰富,有机质是土壤酶的主要载体,而在最低值处时,土壤有机质、全氮等含量就会非常少,导致土壤磷酸酶活性

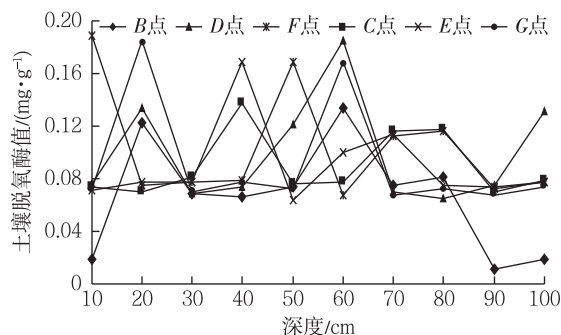


图 3 不同点不同深度脱氢酶活性

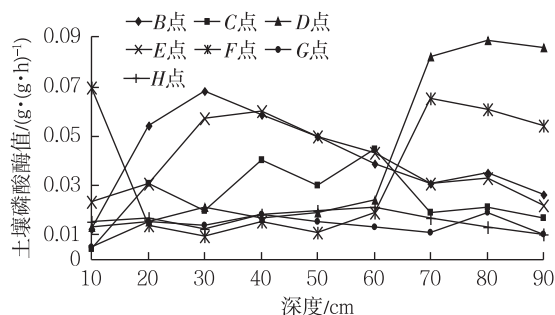


图 4 不同点不同深度磷酸酶活性

下降。从 *B, E* 两点可以看出,随着土壤剖面深度的增加,土壤有机质含量降低,土壤酸性磷酸酶活性也随之降低,磷酸酶活性土壤有机质含量呈正相关^[17]。

G 点、*H* 点变化相对来说比较平稳,由于这两点是已经处于完全退化阶段的土壤,这些土壤中,水分含量低,影响了酶促作用及土壤微生物化学反应强度,且此处的土壤温度相对于那些未退化地段土壤温度高,微生物种群和数量减少,表现为较低的磷酸酶活性,完全退化地区的土壤磷酸酶活性很低,而在半退化和未退化阶段土壤磷酸酶活性大。*D* 和 *F* 点柱状图,与其它点柱状图有差别,在 70, 80, 90 cm 时表现出最高值,可能是分布在这里的酶作用底物的碳、氮、磷源很丰富,微生物种类在此处比较多,微生物量很大,微生物活性高。其他深度土壤的值很低,表明土壤中几乎不含有机质,而有机质是土壤酶的主要载体。从整体上看,有机质含量随深度增加是不断波动的,且呈现周期性波动,磷酸酶活性总的趋势是下降的^[18]。

2.4 土壤细胞呼吸

土壤细胞呼吸受土壤含水量,土壤温度,降水,凋落物,土壤 C, N 含量等非生物因子以及植被类型,叶面积指数(LAI),根系生物量等生理因素和人类活动的综合影响。土壤呼吸速率和酶促作用主要由土壤生物区域的 CO₂ 的产生速率控制。结果表明,土壤温度,土壤水分,根系生物量,凋落物,微生物群落,土壤质地和根氮含量是影响土壤呼吸中的重要因素^[19]。

图 5 表示的是不同点不同深度土壤酶呼吸结果分析。

水和细胞呼吸之间的关系:水是一种良好的溶剂,生物体内的有机物必须溶解在水中,才能分解。从图 5 可以看出,峰值表明土壤含水量高,呼吸作用强。但对其他趋向下降趋势点来说,土壤中的水含量不高,影响土壤中的氧气量,从而影响了根的呼吸作用。一定范围内,随着含水量的增加,细胞呼吸强度增加,随着含水量的减少,细胞呼吸强度减少^[20]。

氧气浓度和细胞呼吸之间的关系:由图 6 可知,当氧浓度逐渐增加时,呼吸作用逐渐减弱。一定范围内,随着氧浓度的增加,细胞呼吸速率增加,呼吸频率也增加,但超过一定限度后,氧浓度增加,呼吸频率不但不会增加,但还会下降。

温度和细胞呼吸之间的关系:影响呼吸的主要外部因素是温度,温度通过影响细胞呼吸而影响酶的呼吸。通常,在一定温度范围内,随温度升高,呼吸强度增加。在图 5 中,最高值可能发生在 *C* 点或 *D* 点,因为这两点正处于半退化阶段,温度高,酶活性强,呼吸作用消耗大,而在 *E, F, G, H* 点,无论什么深度的值都不大,表明这 4 点温度不高,细胞呼吸作用不大。因为这些点处于完全退化阶段,微生物活动作用不强,而土壤呼吸速率与温度之间多呈正相关关系。

2.5 饱和含水量

土壤含水量及其 pH 分布特征:通常, pH 越大,土壤含水量越高,而当 pH 接近或达到最大初始损

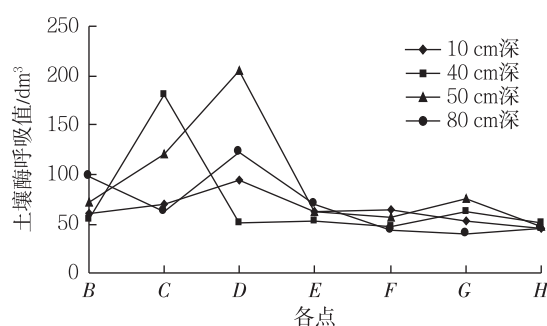


图 5 不同点不同深度土壤酶细胞呼吸值

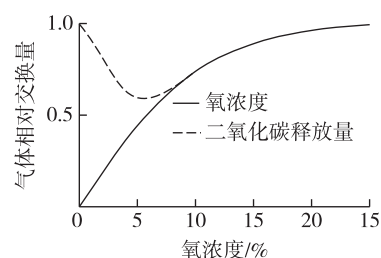


图 6 不同氧浓度下的 CO₂ 的释放量与 O₂ 的吸收量的关系曲线

失值时,土壤水分含量接近或达到饱和,从图 7 可看出,A,B,C,D,E,F,G,H 点的土壤饱和含水量可以看出土壤含水量最高的是 G 点的 20 cm 处,在最低点 F 的 60 cm 处,同一点不同深度的含水量差异很小,而不同点不同深度的饱和含水量不同。总体上,不同点处土壤饱和含水量值分别为 A,B,C,D,E,F,G,H。主要原因是随着土壤退化程度变化,土壤饱和含水量也随之变化,在 A 点土壤饱和含水量明显比其他点土壤饱和含水量值高,因为 A 点在浅水中,土壤水分多,微生物类型多而复杂。并且 B,C 和 D 点的土壤饱和含水量相对减少,因为这 3 点的土壤处于半退化阶段,土壤水略小于浅水的值,在 E,F,G 和 H 点,土壤饱和含水量小于半退化阶段,表明土壤水分分布不均匀,随着湖泊退化的不同阶段的土壤水分变化,土壤饱和含水量发生改变。退化的湖泊土壤,温度迅速上升,加速水的损失,保水能力差。

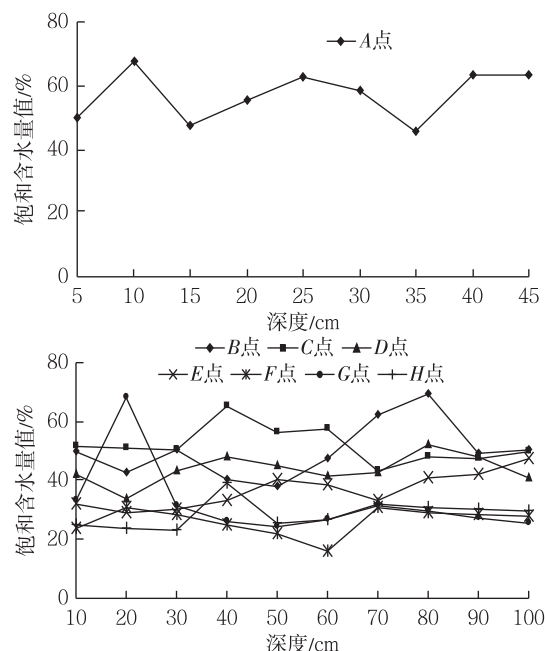


图 7 不同点不同深度土壤酶饱和含水量值

2.6 不同程度退化阶段土壤酶活性的研究

土壤酶活性与湖泊不同退化程度的关系:土壤过氧化氢酶,脱氢酶和酸性磷酸酶活性在 3 种不同退化阶段有差异。土壤酶活性随着降解程度的增加而降低,随土层深度的增加而降低,并且有明显差异。

过氧化氢酶在不同降解阶段土壤中的活性不同,湖泊土壤中过氧化氢酶的活性在表层土壤中最高,其次是中度退化的湖泊土壤,最低的为完全退化的湖泊土壤。完全退化的湖土有明显的差异是由于土壤微生物的种类和数量受一定条件影响下,退化土壤植被的结构和生物量发生了变化,从而土壤酶活性的降低,对土壤微生物活动和数量有着影响。随着退化程度的增加,土壤微生物数量在任何土壤深度中都有所减少,表层土壤有机质和总氮含量丰富,有利于土壤动植物、微生物和植物根系的生理活动,且未退化湖泊的表土中过氧化氢酶的活性较高。对于 E,F,G 和 H 的土壤层,过氧化氢酶活性随退化程度加剧而产生的变化不明显,可能是因为土壤具有很强的抗退化能力,即使土壤肥力的严重退化但肥力保持在一定水平。

从未退化到严重退化的湖泊土壤,土壤有机质分解能力增强,土壤磷酸酶活性随土壤深度逐渐减小,差异明显。主要是由于土壤磷酸酶在土壤生物化学过程中所扮演角色决定。它是一种水解类酶,水解土壤有机质分子中的酰胺键,其活性与土壤微生物量,有机质含量,总氮和水解氮含量正相关,因此土壤中的有机质丰富,其酶活性也必须高。未退化湖泊土壤的土壤腐殖层较厚,有机质处于积累状态,较高的有机物含量使相应的磷酸酶活性达到最高。对于不同的变化趋势,与过氧化氢酶的原因相同,中性磷酸酶在各层土壤中的活性降低,与土壤脱氢酶活性变化趋势相同。上述研究表明,湖泊的退化导致过氧化氢酶,脱氢酶和磷酸酶活性的明显降低。

土壤酶活性垂直变化特点:土壤酶活性在不同降解阶段,无论是氧化还原酶的过氧化氢酶,还是酸性磷酸酶和脱氢酶,都以未退化表层土壤活性最高,过氧化氢酶在未退化、不完全退化和完全退化的湖泊土壤中土壤酶活性比例为 5.13,8.96,7.56,5.66,5.96,6.23,5.16。表土土壤磷酸酶的比例为 0.024,0.001,0.018,0.020,0.003,0.004,0.017。表土土壤脱氢酶的比例为 0.002,0.064,0.067,0.072,0.164,0.076。土

壤酶活性随着土壤深度的增加而降低,与土壤主要养分含量呈相同趋势。主要因为土壤表面的有机质含量高,具有足够的营养来源支持微生物的生长,微生物生长、代谢旺盛,呼吸强度加大,表层的土壤酶活性较高。土壤生物的正常活动随土壤深度的加深受到限制;随着土壤剖面的加深,有机质的含量急剧下降。pH 变大,土壤生物量降低。土壤温度下降,土壤水分下降,限制了土壤生物产生代谢酶的能力。这些因素的综合作用下,土壤酶活性随土层深度的增加而逐渐减小。在湖泊退化不同阶段,随着土壤深度的增加,过氧化氢酶,脱氢酶和酸性磷酸酶有显著差异,后两种酶也有明显差异。

3 结 论

红碱淖土壤酶活性与有机质存在正相关关系,酶的综合作用使得土壤肥力得以体现;各种酶之间存在着不同程度的正相关关系,体现出酶在土壤肥力转化过程中具有共性关系的特点,可利用土壤酶活性进行土壤质量的综合评价。湖泊退化后,其土壤酶活性间的相关性受到退化的影响,退化程度高的受破坏的程度大于退化程度低的地方。这说明湖泊退化后其土壤微生物间的相互依赖、相互协调关系受到显著影响,从而影响湖泊生态系统的碳、氮循环和土壤肥力水平。

参考文献:

- [1]张宇,乌恩.长江中下游湖泊沉积物酶活性及其与富营养化的关系[J]. 应用与环境生态学报,2011,17(2):196-201.
- [2]李双,陈硕,张家武.红碱淖湖泊沉积记录的近五十年来环境变化[J]. 安徽农业科学,2010,38(5):2534-2537,2576.
- [3]刘晓清,王亚萍.陕西红碱淖湖泊水体富营养化评价[J]. 人民黄河,2014,36(12):76-78.
- [4]梅守荣.土壤酶活性及其测定[J]. 上海农业科技,2010,9(1):17-18.
- [5]石春芳,王志勇,冷小云,等.土壤磷酸酶活性测定方法的改进[J]. 实验技术与管理,2016,33(7):48-49.
- [6]周礼恺.土壤酶的活性[J]. 土壤学进展,2005,8(4):9-15.
- [7]南丽丽,郭全恩,曹诗瑜,等.疏勒河流域不同植被类型土壤酶活性动态变化[J]. 干旱地区农业研究,2014(1):31-34.
- [8]沈菊培,陈利君.土壤磷酸酶活性对施肥-种植-耕作制度等响应[J]. 土壤通报,2005,36(4):622-627.
- [9]宋梅,赵炳潮.潮土长期雨养对土壤酶活性和微生物功能多样性影响[J]. 土壤,2014(5):29-30.
- [10]耿玉清,白翠霞,赵广亮,等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):139-143.
- [11]秦纪洪,张文宣,王琴,等.亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征[J]. 土壤学报,2013(6):43-45.
- [12]时新玲,王国栋,杨凌.土壤含水量测定方法研究进展[J]. 712100 中国农村水利水电,2003(10):27-30.
- [13]李宁云,田昆,陆梅,等.澜沧江上游典型退化山地土壤酶活性研究[J]. 西南林学院学报,2006,4(2):29-31.
- [14]杜红霞,刘增文,潘开文,等.外源性 C, N 干扰对森林土壤酶活性的影响[J]. 西北林学院学报,2006,21(2):35-38.
- [15]杨万勤,王开运.森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学,2004,40(2):152-159.
- [16]万忠梅,宋长春.土壤酶活性对生态环境等响应研究进展[J]. 土壤通报,2009,40(4):951-956.
- [17]刘善江,夏雪,陈桂梅,等.土壤酶等研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(21):1-7.
- [18]杨萌,李永夫,李永春,等.集约经营对毛竹林土壤碳氮库及酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(11):3455-3462.
- [19]刘广深,徐东梅,许中坚,等.用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报,2003,40(5):756-762.
- [20]邱莉萍,刘军,王益权,等.土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(3):277-280.
- [21]WRIGHT A L, REDDY R. Phosphorus loading effects on extracellular enzyme activity in everglades wetland soils [J]. The Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2):588-599.

(责任编辑:李艳)