

文章编号: 1674-7054(2019)04-0387-09

尖峰岭热带山地雨林雨季土壤的 酶活性特征及其影响因子

许全¹, 杨怀^{2,3}, 杨秋¹, 蒋亚敏¹, 张书齐¹, 刘文杰¹

(1. 海南大学 热带农林学院, 海口 570228; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102;

3. 中国林业科学研究院 热带林业研究所 尖峰岭森林生态系统研究站, 海南 乐东 510520)

摘要: 以尖峰岭热带山地雨林为研究对象, 对雨季0~10 cm表层土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性进行分析, 结合地形、植被和土壤理化性质等资料, 利用冗余分析方法研究土壤酶活性的主要影响因子, 结果表明: (1) 雨季土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性分别在(15.36~60.94) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, (0.30~0.68) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, (4.77~9.90) $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和(0.61~1.13) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间。(2) 将58个小样方划分为平地、缓坡、中坡、山脊4种地形, 根据冗余分析中样方中土壤酶活性数据分布可知, 坡度对土壤酶活性大小影响很大, 雨季平地的脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性显著低于山脊($P < 0.05$)。土壤酶活性与植被资料和土壤理化性质的冗余分析结果表明, 土壤有机碳和全氮是影响土壤酶活性的主要因子。

关键词: 热带山地雨林; 土壤酶活性; 冗余分析; 环境因子

中图分类号: S 158

文献标志码: A

DOI: 10.15886/j.cnki.rdsww.2019.04.013

土壤酶是森林土壤生态系统的重要组成部分之一, 是连接森林植被与土壤养分的重要纽带^[1]。酶活性不仅能反映土壤微生物活性的高低, 而且能表征土壤养分转化和运移能力等^[2]。其中, 水解酶(如脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶等)和氧化酶(如过氧化氢酶)分别与土壤有机物质的分解过程和腐殖化过程紧密相关^[3]。水解酶主要参与活性碳组分分解, 而难分解的惰性组分, 则主要是由氧化酶分解^[4]。通过对水解酶和氧化酶活性的研究, 可以了解不同有机碳的分解情况, 而有机碳的分解需要多种酶的共同参与, 其酶活性的差异体现出微生物的养分需求。其中脲酶和酸性磷酸酶分别与营养元素氮、磷的转化相关, 蔗糖酶的活性反映土壤碳氮这两类有机化合物最基本的分解代谢强度, 参与土壤中碳氮的转化过程; 过氧化氢酶与水胁迫相关^[5]。土壤酶作为土壤质量的重要生物学指标, 不仅可以反映生态系统的变化, 还可以为资源管理者和政策制定者提供科学依据。

目前, 土壤酶活性的监测已成为森林生态系统研究中必不可少的内容^[6]。土壤酶活性与土壤理化性质的关系及其作用相关研究越来越深入, 研究范围也越来越广泛, 在猫儿山^[7]、川藏高山峡谷^[8]、磨盘山^[6]、缙云山^[9]、凉水自然保护区^[10]、西天目山^[11]和小兴安岭东南段^[12]等地区均有开展。另外, 植物群落结构和物种多样性对森林土壤酶活性也具有重要的影响^[13-15]。杨万勤等^[16]研究发现, 不同演替阶段的森林生态系统的植物多样性与土壤过氧化氢酶、蔗糖酶等呈显著正相关。研究者在森林土壤酶与土壤理化性质^[1,6,17-18]、植被群落结构^[7,16,19]和物种多样性^[20]的关系等方面的大量研究主要集中在温带和寒

收稿日期: 2018-12-20

修回日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(41663010); 海南大学科研启动项目(kydq1604, kyqd1605), 海南省自然科学基金(417050); 海南省研究生创新科研课题(Hys2017-108)

作者简介: 许全(1993-), 男, 海南大学热带农林学院2016级硕士研究生. E-mail: 534490080@qq.com

通信作者: 杨秋(1981-), 女, 讲师. 研究方向: 热带森林土壤碳氮循环和同位素水循环研究. E-mail: yangqiu0903@163.com

带,温带和寒带森林土壤往往受氮限制,而热带森林通常比高纬度森林土壤更受磷限制^[21]。因为热带地区的高风化率会导致岩石来源的营养物质(如磷)的流失^[22-23],土壤酶活性也会存在异同,且在不同气候带下,其温度和降水存在显著差异,而土壤酶的产生和代谢都受到温度和土壤湿度变化的影响^[24]。一般情况下,干旱和低温会降低微生物的生物量,降低潜在的酶活性,而适宜的水热条件对土壤酶活性起明显的促进作用。在热带山地雨林,利用冗余分析研究土壤酶活性与多类环境因子的相互关系研究较少,土壤环境因子提供了酶促反应的底物和环境,群落的结构中凋落物的分解能释放酶进入土壤。因此,探讨热带雨林土壤酶活性特征及其影响因子对不同气候类型下土壤资料的充实和森林土壤质量的监测管理具有重要意义。海南岛尖峰岭位于世界热带的北缘,其热带山地雨林属于由热带雨林向亚热带雨林过渡的类型^[25]。因其特殊的地理位置和气候环境,近年来吸引了很多学者的关注,在样地群落结构特征^[26]、不同空间尺度和径级水平的物种丰富度与个体密度关联^[27]、树种组成及分布格局^[20]、土壤有机碳密度空间分布^[28]等方面开展了大量的研究工作,但土壤酶活性特征及其影响因子的研究较少。因此,本研究以尖峰岭热带山地雨林 60 hm² 动态监测样地为研究对象,通过对雨季表层 0~10 cm 土壤的蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶进行分析,结合其土壤理化性质和植被资料,研究热带雨林土壤酶活性的影响因子及其内在联系,以期揭示土壤环境因子对土壤酶活性的影响,为样地的监测与管理以及热带山地雨林土壤质量评价提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于海南岛乐东县尖峰岭国家级自然保护区内 60 hm² 森林生物多样性动态监测样地(18.33°~18.95°N,108.68°~109.20°E);属低纬度热带岛屿季风气候,雨旱两季明显,雨季从 5~10 月,旱季从 11 月至翌年 4 月。根据海拔 820 m 处尖峰岭天池气象站 26 年的观测资料,该区域年降水量 2 449 mm,年均气温 19.8℃,≥10℃年积温 7 200℃,最冷月平均气温 14.8℃,最热月平均气温为 23.3℃^[29-30]。由于海拔和气候条件的变化,该区域土壤类型为砖黄壤-黄壤,土壤水分和腐殖质含量高^[31-32]。该区域生境异质性较高,物种组成丰富,结构复杂,冠层平均高度 28.0 m,且胸径(DBH)5 cm 和 10 cm 以上的乔木密度每公顷分别可达 171 种^[25]和 154 种^[33],以樟科(Lauraceae)、壳斗科(Fagaceae)、茜草科(Rubiaceae)等植物为主。现有森林覆盖率达 93.18%,林分生物现存量(包括凋落物现存量)达 6 455.2 t·hm⁻²,生物量年平均净积累 6.242 t·hm⁻²·a⁻¹^[34]。

1.2 样方设置与样品采集 在尖峰岭热带山地雨林 60 hm² 动态监测样地内参照 CTFS(Center for Tropical Forest Science)的土壤采样方案^[26],将整个样地划分为 1 500 个 20 m×20 m 的小样方,随机选取 60 个小样方(图 1),样方内的土壤类型为砖黄壤-黄壤。2016 年 6 月,采用直径为 5.0 cm 的土钻以五点法在每个样方采集新鲜表层土样(0~10 cm),并混合均匀,装入自封袋,带回实验室,4℃左右冷藏保存,用于土壤酶活性的分析。因有 2 个样品丢失,本次采样共计 58 个小样方的数据资料。同时,分取部分新鲜土壤样品,自然风干,过筛用于其他土壤理化指标分析,结果见表 1(部分数据来源于杨怀^[35])。

1.3 样品分析 参照关松荫等^[36]测定土壤酶活性:用 KMnO₄ 滴定法测定过氧化氢酶(CAT),以每克土壤消耗 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的毫升数表示 H₂O₂ 酶活性,以 mL·g⁻¹·h⁻¹ 表示;用苯酚-次氯酸钠比色法测定脲酶(Ure),以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃ 的毫克数表示脲酶活性,单位以 mg·g⁻¹·d⁻¹ 表示;用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶(Inv),以 24 h 后 1 g 土壤中生成葡萄糖的毫克数表示蔗糖酶活性,以 mg·g⁻¹·d⁻¹ 表示。用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶,酸性磷酸酶活性以每克土壤的酚毫克数表示磷酸酶活性,单位以 mg·g⁻¹·h⁻¹ 表示。每个土壤样品测定 3 次,取平均值。其他土壤理化性质的测定参考《土壤农化分析》^[37]。

1.4 数据处理 采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,用单样 Kolomogorov-Semirnov(K-S)方法进行正态分布检验,运用 R 软件中 vegan 包计算物种多样性指数,同时根据许涵等对尖峰岭热带山地雨林 60 hm² 动

态监测样地地形数据的测量,对地形数据(海拔、凹凸度、坡度)进行聚类分析,大致可以划分为平地、缓坡、中坡和山脊^[26],分别用 1,2,3,4 分别代表这 4 种地形。运用 Canoco 5.0 软件对土壤酶活性数据进行趋势对应分析,对不同物种进行分组和排序,计算第 1 排序轴的剃度范围,数值小于 3,则采用冗余分析^[38],冗余分析需要 2 个数据矩阵,将 4 种土壤酶活性作为 Canoco 5.0 软件中的 Species,即响应变量,将土壤环境因子作为 Canoco5.0 软件中的环境因子矩阵,对 4 种酶活性的数据进行中心化和标准化处理,对环境因子运用前向选择法和 Monte Carlo 检验法,以获得解释群落数据中具有显著差异的最小变量集,剔除了部分环境变量,剩余的环境因子可进行后续分析。

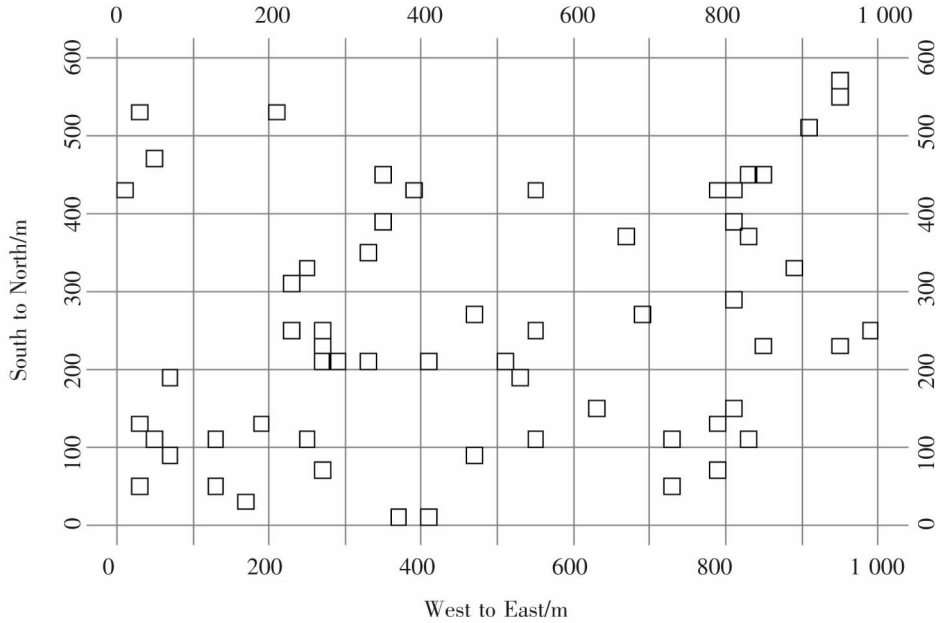


图 1 尖峰岭 60 hm² 动态监测样地中 60 个 20 m×20 m 的样方分布
Fig.1 The distribution of 60 20 m × 20 m quadrats in 60 hectares of forest dynamics plot (FDP) in Jianfengling

表 1 尖峰岭动态监测样地样方的土壤理化性质和植被特征
Tab.1 Soil physicochemical properties and vegetation characteristics of the sampling soil of 58 quadrats (20 m × 20 m each quadrat) in the forest dynamics plot (FDP) with 60 ha forest in Jianfengling

基本指标 Basic indicators	均值 mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准偏差 SD	变异系数/% CV
全磷/(g · kg ⁻¹)	0.13	0.09	0.17	0.02	14.97
全钾/(g · kg ⁻¹)	8.87	1.12	32.03	7.24	81.70
碱解氮/(mg · kg ⁻¹)	171.92	111.09	237.24	13.54	7.88
有效磷/(mg · kg ⁻¹)	2.94	1.33	4.17	0.46	15.73
有效钾/(mg · kg ⁻¹)	154.00	100.92	240.31	26.27	17.06
铵态氮/(mg · kg ⁻¹)	3.02	0.45	7.49	1.46	48.37
硝态氮/(mg · kg ⁻¹)	2.79	0.38	7.68	1.60	57.17
有机碳/(g · kg ⁻¹)	33.52	18.81	56.42	9.01	26.87
全氮/(g · kg ⁻¹)	1.58	0.89	2.75	0.44	28.08
Margalef 指数*	13.78	9.19	17.96	1.74	12.63
Simpson 指数*	0.96	0.84	0.98	0.02	2.52
Shannon-Weiner 指数*	3.86	2.99	4.23	0.26	6.66
Pielou 均匀度指数*	0.89	0.73	0.95	0.04	4.65

注: * 参见文献 [35]
Note: * comes from reference [35]

2 结果与分析

2.1 雨季土壤酶活性的统计学特征 土壤各取样点的各项指标存在较小的变动,且各项指标的变动存在较小差异(表2)。在4种酶活性中雨季土壤蔗糖酶变异性最大,脲酶变异性最小。从K-S检验看出,土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶的数据均呈正态分布($P > 0.05$)。

表2 60 hm² 森林动态监测样地土壤酶活性的统计分析结果($n=58$)

Tab.2 Statistical analysis of soil enzyme activity in the 60 ha forest dynamics plot

土壤酶 Soil enzyme	均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准偏 差 SD	变异系 数/% CV	K-S Z 值(P)
蔗糖酶/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Sucrase	27.39	15.36	60.94	8.71	31.80	0.66(0.78 ^a)
脲酶/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Urease	0.52	0.30	0.68	0.08	15.38	0.71(0.68 ^a)
过氧化氢酶/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Catalase	7.20	4.80	9.90	1.23	17.08	0.55(0.93 ^a)
酸性磷酸酶/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Acid phosphatase	0.89	0.61	1.13	0.12	13.48	0.68(0.75 ^a)

注: a, $P > 0.05$ 表明数据近似于正态分布

Note: a, $P > 0.05$ indicates that the data approximates a normal distribution

2.2 雨季土壤酶活性与环境因子的 RDA 分析 在约束性分析选择排序结果为0.2,采用RDA分析^[38]。对13个环境因子运用前向选择法和Monte Carlo检验法后,剔除变量为铵态氮、有效磷、土壤含水量和Margalef指数,剩余9个环境因子,即有机碳、全氮、pH值、碱解氮、全磷、硝态氮、Simpson指数、Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数,通过RDA排序,将土壤4种酶活性与环境因子排列在一定空间,使排序轴能够反映一定的生态梯度,以此解释酶活性的分布与环境因子间的生态关系和重要程度。其中,环境变量对响应变量总解释率为51.5%,土壤有机碳和全氮是影响土壤酶活性的主要环境因子,分别解释了36.9%和26.6%的空间变异($P < 0.01$)。第1排序轴和第2排序轴的解释量分别为39.42%和9.17%,前2个排序轴占影响土壤酶活性因子总方差的48.60%,土壤酶活性与环境因子关系的累计解释量达94.43%,较好地反映了土壤酶活性与环境因子的相关性,主要是受第1排序轴影响。第1、2排序轴中,土壤因子与土壤酶活性的相关系数分别为0.848和0.629,进一步反映出土壤酶活性与环境因子的关系密切。

表3 RDA 中环境因子对土壤酶活性空间变异的解释结果

Tab.3 Interpretations of environmental factors in RDA for spatial variability of soil enzyme activity

变异指标 Variation index	AX1	AX2	AX3	AX4
土壤酶活性特征解释量	0.394	0.092	0.025	0.004
土壤酶活性累计特征解释量/%	39.42	48.60	51.11	51.47
土壤酶活性与环境因子相关性	0.848	0.629	0.410	0.225
环境因子关系累计解释量	76.60	94.43	99.31	100.00

58个动态观测样地因地形状况的不同,分布在4个区域(图3),第1排序轴自左向右整体呈现出坡度的加剧,即第1排序轴反映了坡度的变化情况,雨季土壤酶活性的箭头方向与第1排序轴的方向一致,反映出这3个指标与土壤坡度变化呈正相关关系,与第1排序轴的夹角的大小排序为蔗糖酶>酸性磷酸酶>脲酶>过氧化氢酶,相关程度的大小为过氧化氢酶>脲酶>酸性磷酸酶>蔗糖酶。由图3可知,4类分布在不同地形特征的研究样地沿第1排序轴水平方向各样地位置临近,表明不同地形土壤酶活性的特征接近。对不同地形的土壤酶活性进行方差分析,得出山脊与缓坡、平地间雨季土壤酶活性呈显著差异($P < 0.05$)(表4)。

图4表明,9个环境因子中,有机碳、全氮和碱解氮箭头的连线最长,对土壤酶活性的解释率最高,有机碳与土壤脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶的夹角较小,且方向一致,呈正相关关系;蔗糖酶与碱解氮的夹角最小,呈正相关关系,即有机碳是影响土壤脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶的主导因子,碱解氮是影

响土壤蔗糖酶的重要因素。对9个环境因子进行蒙特卡罗检验,得到环境因子的重要排序,对环境因子进行边际效应检验,结果表明,雨季土壤有机碳等因子与土壤酶活性呈极显著相关关系,由大到小依次为土壤有机碳、全氮、pH值、Simpson指数、Shannon-Wiener指数、碱解氮、全磷、硝态氮和Pielou均匀度指数,且土壤有机碳和全氮与土壤酶活性呈极显著正相关($P < 0.01$),其贡献率分别为36.9%和26.6%。pH值、Simpson指数、Shannon-Wiener指数、碱解氮、全磷、硝态氮和Pielou均匀度指数与土壤酶活性呈显著正相关($P < 0.05$),其贡献率均小于8.9%。说明土壤有机碳和全氮是影响雨季土壤酶活性的重要因子。

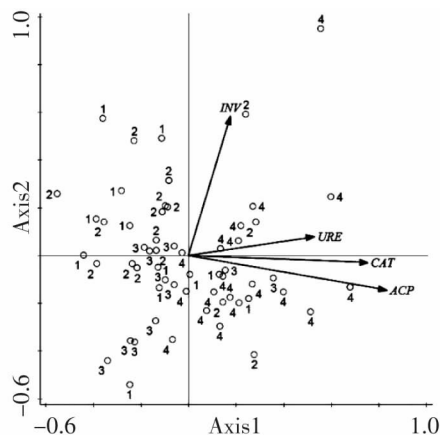


图3 土壤酶活性与样方之间的冗余分析

1.平地;2.缓坡;3.中坡;4.山脊;INV.蔗糖酶;
URE.脲酶;CAT.过氧化氢酶;ACP.酸性磷酸酶

Fig.3 RDA between soil enzyme activity and sample

1. Flat land; 2. Gentle slope; 3. Moderate slope;
4. Ridge; INV: Sucrase; URE: Urease; CAT: Catalase; ACP: acid phosphatase

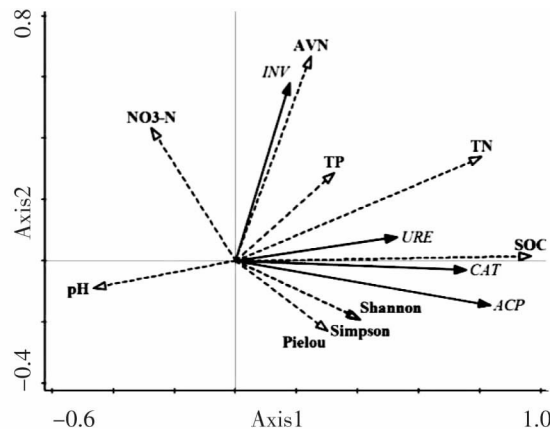


图4 土壤酶活性与环境因子的冗余分析

INV: 蔗糖酶; URE: 脲酶; CAT: 过氧化氢酶; ACP: 酸性磷酸酶; SOC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; AVP: 有效磷; AVN: 碱解氮; NO₃-N: 硝态氮; Shannon: Shannon-Wiener指数; Simpson: Simpson指数; Pielou: Pielou均匀度指数。其中空心箭头表示土壤环境因子,箭头连线的长短表示各指标对模型贡献率的大小,箭头之间的夹角表示两者之间的相关性,土壤酶活性与土壤环境因子的线越接近,表明土壤酶活性受其影响越大

Fig.4 RDA of soil enzyme activity and environmental factors

INV: Sucrase; URE: Urease; CAT: catalase; ACP: Acid phosphatase; SOC: Organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; AVP: Available phosphorus; AVN: Alkali nitrogen; N: Nitrate nitrogen; Shannon: Shannon-Wiener index; Simpson: Simpson index; Pielou: Pielou's index. The hollow arrow indicates the soil environmental factor. The length of the arrow connection indicates the contribution rate of each index to the model. The angle between the arrows indicates the correlation between the two. If closer to the soil environmental factor the soil enzyme activity is indicated to be more highly affected by the soil environmental factor

表4 不同地形状况下土壤酶活性及植被的特征与差异

Tab.4 Characteristics and differences of soil enzyme activities and vegetation under different topographic conditions

地形状况 Terrain	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Surase	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Urease	过氧化氢酶/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Catalase	酸性磷酸酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Acid phosphatase
平地 Flat	28.60 ± 9.19a	0.42 ± 0.07b	6.33 ± 1.02b	0.81 ± 0.09b
缓坡 Gentle slope	28.90 ± 8.01a	0.42 ± 0.10b	6.81 ± 1.17b	0.87 ± 0.14b
中坡 Moderate slope	24.68 ± 5.94a	0.43 ± 0.06ab	6.96 ± 0.84ab	0.87 ± 0.07b
山脊 Ridge	26.93 ± 10.38a	0.48 ± 0.06a	8.19 ± 1.02a	0.99 ± 0.06a

注: 同列不同小写字母表示不同地形下土壤酶活性之间的差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences in soil enzyme activities under different terrains ($P < 0.05$)

由表 5 可知,尖峰岭热带山地雨林表层土壤蔗糖酶活性较高,在(15.36~60.94) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,与戴云山^[1]、峨眉山^[39]、猫儿山^[7]、高山峡谷^[8]和磨盘山^[6]森林土壤蔗糖酶活性基本相当,略高于缙云山^[9]、凉水自然保护区^[10]、西天目山^[11]和小兴安岭东南段^[12]森林土壤,且不同地区的蔗糖酶的极差较大,可能与不同地区之间的气候、地形和植被差异有关。雨季脲酶的活性在(0.30~0.68) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,与表 5 中的戴云山^[1]、缙云山^[9]、猫儿山^[7]、帽儿山、秦岭山脉^[18]、西天目山^[11]和海南琼中天然林^[42]基本吻合,略低于高山峡谷^[8]、藏东南^[45]、小兴安岭东南段^[12]和三亚热带森林^[41]。雨季过氧化氢酶活性在(4.77~9.90) $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,与戴云山^[1]、缙云山^[9]、猫儿山^[7]和西天目山^[11]等地区土壤基本相当,略高于凉水自然保护区^[10]、帽儿山^[17]和磨盘山^[6],但低于小兴安岭东南段^[12]森林土壤。雨季酸性磷酸酶活性在(0.61~1.13) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,与高山峡谷^[8]、藏东南^[45]和三亚热带森林^[41]土壤基本吻合,远高于缙云山^[9]、凉水自然保护区^[10]、猫儿山^[7]、秦岭山脉^[18]和西天目山^[11]。4 种土壤酶活性与其他地区森林土壤酶活性的比较,反映出土壤酶活性分布的差异性。

表 5 60 hm^2 森林动态监测样地表层土壤酶与其他地区森林土壤酶活性的对比

Tab. 5 Comparison of soil enzyme activities in the surface soil of the forests between the forest dynamics plots (60 hm^2) and other areas

地区 Area	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Sucrase	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Urease	过氧化氢酶/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Catalase	酸性磷酸酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Acid phosphatase	样本数/个 Quadrats
尖峰岭	15.36~60.94	0.30~0.68	1.59~3.30	0.61~1.13	58
戴云山(福建省中部)	14.15~17.42	0.33~0.70	1.35~1.67	—	30
峨眉山	51.35~80.33	—	1.85~5.68	—	20
高山峡谷(四川阿坝藏族羌族自治州)	22.22~144.44	0.89~4.88	—	0.43~1.08	15
缙云山(重庆北郊)	1.37~1.73	0.09~0.69	0.98~2.33	0.11~0.24	12
凉水自然保护区(黑龙江伊春带岭区)	12.90~14.75	—	0.21~0.25	0.13~0.14	21
猫儿山(广西桂林)	21.68~80.19	0.16~0.46	1.37~2.92	0.14~0.23	12
帽儿山(长白山)	—	0.58~0.65	0.28~0.29	—	9
磨盘山(云南玉溪)	11.28~20.64	—	0.18~0.22	—	9
秦岭山脉	—	0.29~0.49	—	0.19~0.43	18
藏东南(青藏高原林芝地区)	—	1.00~1.67	—	0.72~0.91	20
西天目山(浙江省临安市)	2.57~7.85	0.38~0.77	1.40~3.06	0.03~0.06	9
小兴安岭东南段	1.46~1.69	7.23~9.82	4.35~5.15	—	6
三亚亚龙湾热带天堂森林	—	1.37~1.52	—	0.69~0.76	20
海南琼中天然林	—	0.36~1.44	—	—	—

注: “—”表示原文没有数据或数据的分析测定方法不同

Note: “—” means that there is no data or data using different methods

3 讨 论

2016 年雨季初期尖峰岭热带山地雨林土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶的活性分别在(15.36~60.94) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, (0.30~0.68) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, (4.77~9.90) $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, (0.61~1.13) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,蔗糖酶的变异系数最大,为 31.80%。将 58 个动态观测样地划分为平地、缓坡、中坡、山脊 4 种地形,根据冗余分析中样方与土壤酶活性分布可知,第 1 排序轴自左向右整体呈现出坡度的加剧,即第 1 排序轴反映了坡度的变化情况,且相关程度的大小即为过氧化氢酶>脲酶>酸性磷酸酶>蔗糖酶,其中雨季平地的脲酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性显著低于山脊($P<0.05$)。土壤酶活性与环境因子的冗余分析的结果表明,土壤有机碳和全氮是雨季影响土壤酶活性的重要影响因子,其贡献率分别为 36.9% 和 26.6%。

3.1 雨季土壤酶活性大小比较及其影响因素分析 在研究样地的表层土壤酶与其他地区森林土壤酶活性的对比结果中,不同地区的酶活性大小因土壤母质、植被、气候和地形等差异呈现出不同的变化特征。

其他地区的实验设计倾向于比较不同海拔和不同林型下森林土壤酶活性的变化特征,而缺乏对原始林 60 hm² 大样地土壤酶活性的相关研究。其他地区在不同实验条件下,可能因为地形和微环境等的改变,其酶活性本身存在异质性,而非实验条件的改变导致的差异,本研究可为样地的监测与管理提供参考。同时通过比较不同地区土壤酶活性的大小,对国内土壤酶活性的变化范围有一定的认识。

冗余分析中酶活性与环境因子的结果表明,本研究中影响土壤蔗糖酶活性的主要因子是土壤碱解氮,蔗糖酶的活性是反映土壤碳氮的这两类有机化合物最基本的分解代谢强度,参与土壤中碳氮的转化过程。有研究^[40]表明大部分碱解氮是由土壤有机质固定的,土壤有机质是土壤中最大的氮库,土壤有机质的分解主要决定了氮矿化和初级生产力。雨季土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶的主要影响因子是有机碳,这与武夷山^[19]、西天目山^[11]、峨眉山^[39]、小兴安岭^[12]、三亚亚龙湾热带天堂森林^[41]和海南琼中天然林^[42]等的研究结果一致。土壤有机碳与4种酶活性均存在极显著正相关,有学者^[43]研究表明土壤酶与土壤中有机质的分解及微生物的组成类型密切相关。杨式雄和陈宗猷^[19]对武夷山不同林型土壤研究发现,土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、转化酶与有机质显著相关。徐秋芳等^[11]在西天目山的研究表明,土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶与土壤全氮、有机质显著相关,但均与速效磷无显著相关。陈立明和满春秀^[12]对小兴安岭云杉林土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、转化酶活性均与有机质、速效钾含量极显著正相关。陈志芳等^[1]对戴云山4种不同海拔森林类型土壤酶研究发现,蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶与全氮、全磷、有效钾和有机碳含量呈极显著或显著正相关。不同地区研究结果的差异可能与地区环境有关。相关研究学者主要关注不同海拔梯度下酶活性的差异以及酶活性的时空分布特征,对酶活性综合指标与环境因子之间的关系少有关注。

3.2 地形条件和植被状况对雨季土壤酶活性的影响 地形数据包括海拔、坡度、凹凸度的处理,由土壤酶活性与样方之间的冗余分析关系可知,第1排序轴自左向右整体土壤酶活性随着坡度的增加而增强,且相关程度的大小为过氧化氢酶>脲酶>酸性磷酸酶>蔗糖酶。第1排序轴地形坡度的变化对过氧化氢酶、脲酶和酸性磷酸酶更敏感。因为地形因素的改变会导致温度和光照等多种环境因子的变化,从而形成的空间尺度上的生态尺度^[35],进而会导致土壤温度和湿度的改变会进一步影响土壤有机质的含量,适宜的温度和湿度有助于腐殖质的分解,提高土壤有机质含量,进而提高土壤酶活性。土壤酶活性与环境因子冗余分析的结果表明,雨季土壤有机碳和全氮是影响土壤酶活性的主要因子,土壤酶直接参与土壤的重要生态过程,对生态系统环境变化极度敏感,其活性强弱受多种环境因子影响^[38],土壤酶能分解大分子有机物,增加土壤养分的含量,全氮能促进根际微生物的生长,增强土壤中酶活性,同时土壤有机碳和土壤全氮是有机质重要的组成成分,土壤有机质不但是其他养分的重要来源和储藏场所,同时也是土壤酶活性的来源和储藏基地^[44]。

除养分元素和地形因素外,植被状况也对雨季土壤酶活性产生重要的影响,植被数据包括物种组成和物种多样性,本研究中计算出每个样方的 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数,其中 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数中物种组成的差异会导致土壤养分分布的不同,同时也会影响土壤微生物的群落组成及多样性。尖峰岭热带山地雨林属于天然林,受人为干扰较小,生态系统结构复杂,土壤养分的变化主要来源于凋落物的输入和氮沉降,养分格局的改变会影响土壤微生物的组成类型和活性大小,而土壤酶来源于植物根系和微生物的细胞分泌物及动植物残体分解物,它能够改变土壤中的矿质营养的状态^[46],即凋落物的输入对土壤中酶活性有重要影响。本研究通过 RDA 二维排序图反映出土壤酶活性与环境因子的极显著相关($P < 0.01$),为 RDA 分析应用于复杂的响应变量和环境变量之间提供参考,可以与其他研究方法结合,探索土壤酶活性与理化性质的作用机制。本研究虽然利用冗余分析筛选出敏感性土壤因子对样地的监测与管理,但土壤酶活性仅代表 2016 年雨季尖峰岭热带森林土壤酶的活性。

参考文献:

- [1] 陈志芳, 刘金福, 吴则焰. 戴云山不同海拔森林类型土壤理化性质与酶活性研究 [J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2014, 42(2): 10-14.
- [2] 白世红, 刘艳, 侯龙鱼, 等. 黄河三角洲撂荒地土壤氧化还原酶活性与化学性质通径分析 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 673-676.
- [3] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [4] CUSACK D F, SILVER W L, TOM M S, et al. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests [J]. Ecology, 2011, 92(3): 621-632.
- [5] 田幼华, 吕光辉, 杨晓东, 等. 水盐胁迫对干旱区植物根际土壤酶活性的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 158-163.
- [6] 舒蛟靖, 陈奇伯, 王艳霞, 等. 华山松人工林土壤酶活性与理化因子的通径分析 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 88-92.
- [7] 宋贤冲, 陈晓鸣, 郭丽梅, 等. 猫儿山不同海拔典型植被带土壤酶活性变化特征 [J]. 基因组学与应用生物学, 2016, 35(12): 3545-3551.
- [8] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1257-1264.
- [9] 赵聪, 李勇, 杨红军. 缙云山森林次生演替群落土壤微生物、酶活性和养分的研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(4): 46-50.
- [10] 谷思玉, 隋跃宇. 红松人工纯林、人工混交林和天然林几种土壤酶活性比较 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(4): 486-493.
- [11] 徐秋芳, 郑小平, 余文忠. 西天目山森林土壤酶活性的分析 [J]. 浙江林学院学报, 1997, 14(2): 142-146.
- [12] 陈立明, 满秀玲. 云冷杉林土壤酶活性与土壤养分的研究 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 94-99.
- [13] HOOPER D U, BIGNELL D E, BRORN V K, et al. Interactions between aboveground and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: Patterns, mechanisms, and feedbacks: We assess the evidence for correlation between aboveground and belowground diversity and conclude that a variety of mechanisms could lead to positive, negative, or no relationship—depending on the strength and type of interactions among species [J]. AIBS Bulletin, 2000, 50(12): 1049-1061.
- [14] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 1-7.
- [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] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系 [J]. 林业科学, 2001, 37(4): 124-128.
- [17] 李聪, 孙正峰, 曹宇, 等. 林区不同土地利用模式对土壤理化性质与酶学特性的影响 [J]. 森林工程, 2013, 29(3): 18-24.
- [18] 杨瑞, 刘帅, 王紫泉, 等. 秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨 [J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 1037-1046.
- [19] 杨式雄, 戴教藩, 陈宗献, 等. 武夷山不同林型土壤酶活性与林木生长关系的研究 [J]. 福建林业科技, 1994, 21(4): 1-12.
- [20] 李艳朋, 许涵, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林物种多样性空间分布格局的尺度效应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(9): 861-870.
- [21] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale [J]. Ecology letters, 2008, 11(11): 1252-1264.
- [22] MARTINELLI L, PICCOLO M, TOWNSEND A, et al. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: tropical versus temperate forests [J]. Biogeochemistry, 1999, 46(1-3): 45-65.
- [23] WALKER T, SYERS J K. The fate of phosphorus during pedogenesis [J]. Geoderma, 1976, 15(1): 1-19.
- [24] STEINWEG J M, DUKES J S, PAUL E A, et al. Microbial responses to multi-factor climate change: Effects on soil enzymes [J]. Frontiers in Microbiology, 2013(4): 146.
- [25] 方精云, 李意德, 朱彪, 等. 海南岛尖峰岭山地雨林的群落结构, 物种多样性以及在世界雨林中的地位 [J], 2004, 12(1): 29-43.
- [26] 许涵, 李意德, 林明献, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 ha 动态监测样地群落结构特征 [J]. 生物多样性, 2015, 23(2): 192-201.
- [27] 吴裕鹏, 许涵, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林不同空间尺度和径级水平的物种丰富度与个体密度关联 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(4): 325-333.
- [28] 郭晓伟, 骆土寿, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7878-7886.
- [29] ZHOU Z, LI Y, LIN M, et al. Change characteristics of thermal factors in tropical mountain rainforest area of Jianfengling,

- Hainan Island in 1980—2005 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(6): 1006–1012.
- [30] ZHOU Z, LI Y, LIN M, et al. Climate changes characteristics over tropical mountain rainforest in Jianfengling during the recent 26 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29: 1112–1120.
- [31] 蒋有绪, 卢俊培. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1991, 165.
- [32] 李意德, 陈步峰, 周光益. 中国海南岛热带森林及其生物多样性保护研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [33] 陈步峰, 林明献, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林近冠层 CO₂ 及通量特征研究 [J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2166–2172.
- [34] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 等. 尖峰岭热带山地雨林生物量的初步研究 [J]. 1992, 16(4): 293–300.
- [35] 杨怀. 海南热带山地雨林土壤碳氮空间格局及其影响机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [36] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [37] 鲍士旦, 秦怀英, 劳家桢. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- [38] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析 [J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2678–2685.
- [39] 胡霞, 蔡霜, 廖金花, 等. 峨眉山不同海拔森林土壤微生物和酶活性特征 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(1): 109–114.
- [40] KNOPS J, BRADLEY K, WEDIN D. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling [J]. Ecology Letters, 2002, 5(3): 454–466.
- [41] 蔡开朗, 麦志通, 曾德华, 等. 极小种群野生植物海南假韶子群落土壤特性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 102–108.
- [42] 于涌杰. 土地利用方式对中国东南部红壤微生物特性及氮转化作用的影响 [D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- [43] 吴旭东, 张晓娟, 谢应忠, 等. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征 [J]. 草业学报, 2013, 22(1): 245.
- [44] 陈彩虹, 叶道碧. 4 种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 64–68.
- [45] 斯贵才, 袁艳丽, 王建, 等. 藏东南森林土壤微生物群落结构与土壤酶活性随海拔梯度的变化 [J]. 微生物学通报, 2014, 41(10): 2001–2011.
- [46] 杨成德, 龙瑞军, 薛莉, 等. 东祁连山高寒草草地土壤微生物量及酶的季节动态 [J]. 中国草地学报, 2014(2): 78–84.

Soil Enzyme Activities and Their Influencing Factors in the Tropical Montane Rain Forest in the Rainy Season in Jianfengling, Hainan

XU Quan¹, YANG Huai^{2,3}, YANG Qiu¹, JIANG Yamin¹, ZHANG Shuqi¹, LIU Wenjie¹

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

2. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 3. Jianfengling Research

Station for Forest Ecosystem, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Ledong, Hainan 510520, China)

Abstract: Topsoil (0–10 cm) samples from 58 quadrates in the rainy season were collected from a 60 ha forest dynamics plot in Jianfengling, Hainan Province, and their enzyme activities such as sucrase activity, urease activity, catalase activity, and acid phosphatase activity were determined. The major factors affecting the enzyme activities were analyzed by using redundancy analysis, taking into account data on soil physical and chemical properties, vegetation, etc. Results showed that the activities of soil sucrase, urease, catalase and acid phosphatase in the rainy season were (15.36~60.94) mg · g⁻¹ · d⁻¹, (0.30~0.68) mg · g⁻¹ · d⁻¹, (4.77~9.90) mL · g⁻¹ · h⁻¹, (0.61~1.13) mg · g⁻¹ · h⁻¹, respectively. The 58 quadrates in the forest dynamics plot were divided into four terrains: flat slope, gentle slope, moderate slope and ridge. The distribution of the enzyme activities of the quadrates in the redundancy analysis showed that slope had a great effect on the soil enzyme activities, and that the flat terrain were significantly lower in the activities of urease, catalase and acid phosphatase activities than the ridge terrain during the rainy season ($P < 0.05$). The redundancy analysis of the relationship between soil enzyme activity and environmental factors showed that soil organic carbon and total nitrogen were the main factors affecting the soil enzyme activity.

Keywords: tropical montane rain forest; soil enzyme activity; redundancy analysis; environmental factors

(责任编辑: 钟云芳)