

DOI: 10.5846/stxb201608031600

何东进, 游惠明, 肖石红, 洪伟, 游巍斌, 刘进山, 蔡昌棠, 詹仕华, 胡哲森. 天宝岩长苞铁杉林倒木接触处土壤酶活性变化及其环境效应分析. 生态学报, 2017, 37(1): - .

He D J, You H M, Xiao S H, Hong W, You W B, Liu J S, Cai C T, Zhan S H, Hu Z S. Soil enzyme activities under fallen logs and their environmental gradient analysis in the *Tsuga longibracteata* forest, Tianbaoyan National Nature Reserve, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

天宝岩长苞铁杉林倒木接触处土壤酶活性变化及其环境效应分析

何东进^{1,*}, 游惠明², 肖石红¹, 洪伟¹, 游巍斌¹, 刘进山³, 蔡昌棠³, 詹仕华¹, 胡哲森¹

¹ 福建农林大学, 福州 350002

² 福建省林业科学研究院, 福州 350012

³ 永安天宝岩国家级自然保护区, 永安 366032

摘要: 倒木是森林生态系统中重要的结构性和功能性成分, 但分解过程十分缓慢, 目前有关土壤生物学特性对其分解影响机制的研究甚少。本文通过分析环境因子对选择天宝岩国家级自然保护区长苞铁杉林内倒木接触处土壤酶活性的影响, 探讨酶活性对倒木分解机制、土壤进程的影响及特定酶活性的时空分布格局。研究结果表明: 天宝岩长苞铁杉林内倒木接触处土壤酶活性的变异系数属中高等变异程度, 纤维素分解酶活性受环境影响最大, 蛋白酶受影响最小; 倒木的覆盖有利于提高土壤酶活性, 尤其是显著地提高了纤维素酶活性, 蛋白酶及脲酶活性随腐烂等级升高而降低, 纤维酶活性呈升高趋势; 在所有环境因子中, 土壤基质环境对土壤酶活性的解释量最大, 表明化学基质环境对土壤酶活性的影响不容忽视, 土壤酶活性随土壤 SOC、TN 含量的增加而升高, 随海拔升高而降低, 越往南坡, 土壤酶活性越高。研究揭示倒木分解与土壤酶活性之间相互促进、相互制约, 倒木的存在对驱动森林生态系统的碳循环有重要意义。

关键词: 长苞铁杉; 倒木; 土壤酶活性; 环境因子; 天宝岩国家级自然保护区

Soil enzyme activities under fallen logs and their environmental gradient analysis in the *Tsuga longibracteata* forest, Tianbaoyan National Nature Reserve, China

HE Dongjin^{1,*}, YOU Huiming², XIAO Shihong¹, HONG Wei¹, YOU Weibin¹, LIU Jinshan³, CAI Changtang², ZHAN Shihua¹, HU Zhesen¹

¹ Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

² Fujian Academy of Forestry, Fuzhou, Fujian 350012, China

³ Tianbaoyan National Nature Reserve Yong'an, Fujian 366032, China

Abstract: Fallen logs are essential structural and functional components of the forest ecosystem, but the decomposition of fallen logs is very slow. Until recently, there has been a lack of knowledge about the effect of fallen logs on soil biological properties. The objective of this study was to determine the temporal and spatial distribution patterns of soil enzyme activities under fallen logs and how they were influenced by environmental variables during log decomposition in the Tianbaoyan National Nature Reserve. A multivariate analysis was performed to investigate the connections between environmental variables and soil enzyme activity. This study took place in *Tsuga longibracteata* forest, which is in the Tianbaoyan National

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370624); 国家教育部博士科学点基金项目(20103515110005); 福建省自然科学基金资助项目(08J0116, 2011J01071)

收稿日期: 2016-08-03; **修订日期:** 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjhj1009@126.com

Nature Reserve, Fujian Province, China. In the forest, the coefficient of variance for soil enzyme activity shows a high degree of variation. The cellulase spatial distribution pattern showed the greatest change, whereas changes to protease, urease, and invertase activities were lower. The increase in decay class caused a decreasing trend in protease and urease activities, but cellulase activity increased. Soil enzyme activities were positively associated with soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN). Among the environmental variables, soil chemical properties had the greatest effect on soil enzyme activities, which suggested that soil chemical properties should be taken into account when assessing the effect of fallen logs on soil enzyme activity. These activities were positively associated with TN, SOC, elevation, and slope. We identified the interactive relationship between fallen logs and soil enzyme activities and showed that the presence of fallen logs plays an important role in forest C recycling.

Key Words: *Tsuga longibracteata*; fallen logs; soil enzyme activity; environmental variables; Tianbaoyan National Nature Reserve

倒木是森林生态系统中重要的结构性和功能性组成要素,不仅能够为森林生物多样性提供生境,而且还是重要的营养库,在森林生态系统的物质循环、能量流动、更新演替及土壤过程等方面扮演着重要角色,对森林生态系统的完整性和维持性具有重要意义^[1-2]。目前有关倒木的研究主要集中于数量特征^[3-8]、苗床作用^[9-10]、营养物质特征^[11-13]、生物多样性^[14-15]等方面,其中苗床作用和生物多样性方面的研究成为近年来研究的热点^[10,15-17],而有关倒木对土壤特性影响的研究较少^[18-20],且早年大多集中于对土壤化学特征的研究^[11,21-22],有关土壤生物特性及其对土壤进程的具体影响机制还缺乏探索^[19]。

土壤酶是土壤生物化学过程的主要调节者,参与着土壤环境的一切生物化学过程,与有机物质分解、营养物质循环、能量流动等密切相关,且酶促分解作用是物质循环过程的限制性步骤,其活性反映了土壤各种生物化学过程的强度和方向,是常被用来反应土壤质量和生态系统功能变化的敏感的生物活性指标^[23-24]。因此,在森林生态系统中对倒木接触处土壤酶活性的研究,不仅有利于了解其土壤过程,也能够为该区土壤质量和生态系统变化提供早期预警和敏感信息^[25]。

土壤酶是土壤中活跃的有机成分之一,其变化受外界环境影响较土壤化学特性大^[23]。本文拟通过4个季度的野外调查,探讨环境因子对倒木接触处土壤酶活性的影响,试图阐明两个问题:(1)倒木接触处土壤酶活性的变化特征如何?(2)环境因子如何影响倒木接触处土壤酶活性的变化,进而影响倒木分解及土壤进程。

1 研究区概况

福建省天宝岩自然保护区的长苞铁杉林,地理位置为北纬 25°55′—25°58′,东经 117°31′—117°33.5′,是戴云山余脉,为中低山地貌,属亚热带海洋性季风气候区。保护区由于地势高耸,峰峦叠嶂。保护区年平均温度 15℃左右,最冷月(1月)平均温度 5℃,最热月(7月)平均温度 23℃,全年≥10℃的活动积温在 4520—5800℃左右,年均降雨量 2039 mm,空气相对湿度 80%左右。土壤垂直分布大致是海拔 800 m 以下为红壤,800—1350 m 为黄红壤,1350 m 以上为黄壤。保护区包含我国中亚热带地区许多典型植被类型,属森林生态系统类型自然保护区,其中有大面积的长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)林和猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum*)林。长苞铁杉林分布面积达 186.7 hm²,纯林 20 hm²,居全国第一,其针阔混交林分布在天宝岩东北坡,海拔 1300—1500 m 是天然林,人为干扰较少,特别是 1350 m 以上基本上保持原始状态。

2 研究方法

2.1 样地选择与样品采集

在天宝岩自然保护区长苞铁杉的不同森林类型(包括长苞铁杉纯林(6)、长苞铁杉+青冈(*Cyclobalanopsis*

glauca) (6)、长苞铁杉+猴头杜鹃 (18)、长苞铁杉+糙花少穗竹 (*Oligostachyum scabriflorum*) (6)、长苞铁杉+毛竹 (*Phyllostachys heterocycla pubescens*) (6) 混交林) 内设置 10 m × 10 m 的样地共 42 块, 记录各样地的群落类型、海拔、坡度、坡向、坡位等自然因子, 对样地的倒木进行记录, 鉴定树种, 确定腐烂等级, 并逐株登记其胸径、基径 (或大头直径)、小头直径、高度等, 野外划分腐烂等级采用阎恩荣等^[26] 方法分为 5 级, 分别用 1、2、3、4、5 表示; 数量特征调查后按照 10 月 (秋)、1 月 (冬)、4 月 (春)、7 月 (夏) 定期定点采集各森林类型内标准倒木接触处土壤以及空旷地土壤带回实验室备用, 空旷地土壤为同一样地内半径为 2m 的周围均无倒木的林地土壤, 采集的土壤深度为 0-10 cm, 其中, 倒木接触处土壤的取样点位于每根倒木上中下部的中央地段的下方土壤, 混合 3 点处土壤代表该根倒木接触处土样。

2.2 土壤指标测定

①土壤基本理化性状按常规分析方法测定^[27]: pH 值采用 1:5 土液比浸提, 酸度计测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法, 全氮采用半微量开氏法; ②土壤酶活性测定^[28]: 脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法, 蛋白酶采用茚三酮比色法, 蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法, 纤维素酶采用硝基水杨酸比色法测定。

2.3 数据分析

采用 DPS 进行统计分析和检验, 利用 DPS 分析倒木接触处土壤酶活性四季变化规律, 借助变异系数 C_v 说明其变异情况, 根据变异程度分级, $C_v \leq 0.1$ 属于弱变异性, $0.1 < C_v < 1.0$ 属于中等变异性, $C_v \geq 1.0$ 属于强变异性^[29]。统计分析采用方差分析和多重比较来判断季节对倒木接触处土壤酶活性的影响。

运用软件 CANOCO4.5 完成对倒木接触处土壤酶活性的空间分布格局、环境因子与土壤酶活性分布关系的排序分析。由于 DCA 分析的标准离差 (SD) 梯度值小于 4.0, 因此, 采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 方法探讨倒木接触处土壤酶活性与环境因子的生态关系^[19,30]。本研究的环境因子包含以下 10 个变量: (1) 腐烂等级; (2) 海拔; (3) 坡度; (4) 坡向; (5) 坡位; (6) pH 值; (7) 土壤有机碳 (SOC); (8) 土壤全氮 (TN); (9) 季节; (10) 倒木的出现, 即有无倒木覆盖。其中, 坡位以数字表示, 1—4 分别代表表谷、下坡、中坡、上坡; 坡向以正北为起点 (即 0°), 顺时针旋转的角度表示, 以数字 1—8 分别表示各等级: 北坡 (337.5°—22.5°)、东北坡 (22.5°—67.5°)、西北坡 (292.5°—337.5°)、东坡 (67.5°—112.5°)、西坡 (247.5°—292.5°)、东南坡 (112.5°—157.5°)、西南坡 (202.5°—247.5°)、南坡 (157.5°—202.5°), 数字越大, 表示越向阳^[31-32]; 春、夏、秋、冬 4 季节分别赋值为 1、2、3、4; 海拔和坡度以实际测定数据进行分析计算; 土壤是否有倒木覆盖 (有赋值为 1, 无则为赋值为 0)。

3 结果与分析

3.1 倒木接触处土壤酶活性的季节变化

长苞铁杉林内倒木接触处土壤不同季节酶活性的变异系数 (表 1) 显示, 蛋白酶、脲酶、蔗糖酶活性均表现为中等程度的变异, 变异程度脲酶 > 蔗糖酶 > 蛋白酶, 春冬季的变异程度小于夏秋季, 不同季节间变异的波动大小服从脲酶 < 蛋白酶 < 蔗糖酶; 纤维素酶活性属中高等变异程度, 不同季节间的变异程度波动比其它酶大, 且呈现春冬季的变异程度大于夏秋季的相反趋势。图 1 为土壤酶活性与 RDA 第 1 和第 2 排序轴的关系, 圈

表 1 不同季节间倒木接触处土壤酶活性的变异系数

Table 1 Coefficient variance of soil enzyme activity under fallen logs at all seasons

土壤酶 Soil enzyme	对照 CK	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
样本数 (N)	28	57	57	57	57
蛋白酶 Protease	0.31	0.32	0.40	0.40	0.37
脲酶 Urease	0.59	0.59	0.63	0.64	0.62
纤维素酶 Cellulase	0.92	1.03	0.83	0.73	1.29
蔗糖酶 Invertase	0.39	0.36	0.51	0.43	0.33

点大小的分布情况反映了土壤酶活性的空间分布变异性的^[33],结果显示土壤酶活性的空间变异图(图 1)能够直观地反映土壤酶活性的空间分布格局及其变异程度,综合表 1 和图 1 可以看出:4 种土壤酶活性均表现为中等以上变异,说明倒木下土壤酶活性的变化受不同环境因子影响较大,其中纤维素酶的空间分布格局变化最大,表明该酶受环境影响的程度较脲酶、蛋白酶及蔗糖酶大。

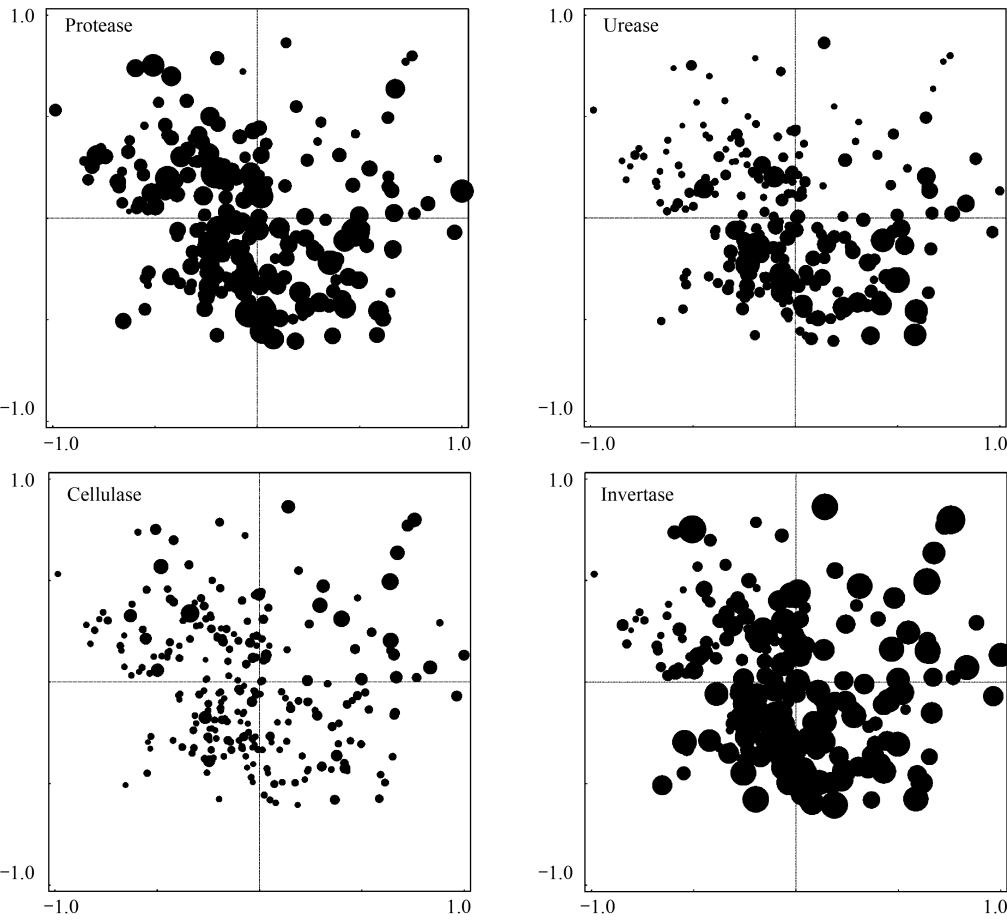


图 1 土壤酶活性的变化格局与环境因子前 2 个排序轴的关系

Fig.1 Relationships between variation patterns of soil enzyme activity and the first two axes of environment variables

倒木接触处土壤酶活性的四季变化(表 2)显示,脲酶、纤维素酶及蔗糖酶活性的四季变化差异极显著($P<0.01$),而蛋白酶活性变化差异不显著;蛋白酶和脲酶活性变化服从春季>冬季>夏季>秋季的规律,蔗糖酶活性变化为春季>冬季>秋季>夏季,纤维酶活性变化呈现秋季>冬季>夏季>春季

表 2 倒木接触处土壤酶活性的季节变化

Table 2 Soil enzyme activity under fallen logs at all seasons

土壤酶 Soil enzyme	对照 CK	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
蛋白酶 Protease($\mu\text{g/g}$)	80.97 $\pm$ 3.91a	90.67 $\pm$ 3.89a	84.98 $\pm$ 4.49a	82.44 $\pm$ 4.40a	88.09 $\pm$ 4.35a
脲酶 Urease(mg/g)	0.56 $\pm$ 0.13c	0.82 $\pm$ 0.06a	0.65 $\pm$ 0.05bc	0.57 $\pm$ 0.05c	0.78 $\pm$ 0.06ab
纤维素酶 Cellulase(mg/g)	0.55 $\pm$ 0.15b	0.67 $\pm$ 0.09b	0.68 $\pm$ 0.07b	1.50 $\pm$ 0.14a	0.92 $\pm$ 0.15b
蔗糖酶 Invertase(mg/g)	14.26 $\pm$ 2.01bc	16.73 $\pm$ 0.81a	12.79 $\pm$ 0.87c	14.28 $\pm$ 0.81bc	16.05 $\pm$ 0.71ab

同一行不同字母表示处理间差异显著 $P<0.05$

3.2 不同腐烂等级倒木接触处土壤酶活性变化

长苞铁杉林内不同腐烂等级倒木接触处土壤酶活性的变异系数(表 3)显示,蛋白酶、脲酶、蔗糖酶活性的变异系数属于中等变异程度,不同腐烂等级间变异系数的波动程度,蛋白酶<蔗糖酶<脲酶,变异程度脲酶>蔗糖酶>蛋白酶;纤维素酶活性属中高等变异程度,腐烂等级间的变异程度波动比其它酶大。

表 3 不同腐烂等级倒木接触处土壤酶活性的变异系数
Table 3 Coefficient variance of soil enzyme activity under fallen logs in different decay classes

土壤酶 Soil enzyme	腐烂等级 Decayclass					
	对照 CK	1	2	3	4	5
样本数(N)	28	40	48	48	48	44
蛋白酶 Protease	0.41	0.38	0.41	0.34	0.37	0.38
脲酶 Urease	0.52	0.67	0.54	0.53	0.47	0.87
纤维素分解酶 Cellulase	0.90	0.90	0.79	0.87	1.39	0.97
蔗糖酶 Invertase	0.52	0.46	0.46	0.43	0.34	0.39

不同腐烂等级倒木接触处土壤酶活性的变化(表 4)显示,腐烂等级间 4 种酶活性的差异不显著,蛋白酶及脲酶活性随腐烂等级升高而降低,纤维酶活性大致随腐烂等级升高而升高,蔗糖酶活性在第 3 腐烂等级处达到最大值。

表 4 不同腐烂等级倒木接触处土壤酶活性
Table 4 Soil enzyme activity under fallen logs in different decay classes

土壤酶 Soil enzyme	腐烂等级 Decay class					
	对照 CK	1	2	3	4	5
蛋白酶 Protease/(μg/g)	80.97±6.28a	88.87±4.88a	87.86±5.67a	86.51±4.21a	84.93±4.64a	84.60±4.85a
脲酶 Urease/(mg/g)	0.56±0.05a	0.77±0.08a	0.73±0.06a	0.69±0.05a	0.65±0.04a	0.70±0.09a
纤维素酶 Cellulase/(mg/g)	0.55±0.09b	0.61±0.08b	0.99±0.13a	1.04±0.13a	0.91±0.18ab	1.12±0.16a
蔗糖酶 Invertase/(mg/g)	12.36±1.22a	13.84±0.91a	14.19±1.03a	15.85±0.99a	15.32±0.75a	15.52±0.90a

3.3 环境因子对倒木接触处土壤酶活性的影响

本研究采用 Canoco 中的 Forward selection 对环境因子进行自动筛选,最后得到 7 个重要环境因子,分别为海拔、坡向、坡位、pH 值、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、倒木的出现,并得到图 2 的 RDA 分析结果,图 2 显示第 1 排序轴解释了土壤酶活性分布与环境因子之间关系的 58.5%,第 2 排序轴进一步解释了二者关系的 30.8%,也即第 1 排序轴和第 2 排序轴共同解释量达 89.3%。其中,环境因子对土壤酶活性的影响程度:土壤有机碳>pH 值>海拔>土壤全氮>坡位>坡向>倒木的出现,就环境因子的解释量而言,土壤化学特性(74.1%)>地形因子(24.7%),可见,土壤化学特性对土壤酶活性的差异起到了很好的解释。排序图上箭头的夹角表示相关性,长短表示贡献率的大小,从图 2 可以看出,倒木的出现与 4 种酶活性正相关,说明倒木的覆盖有利于提高土壤酶活性,4 种酶中蛋白酶活性受环境的影响最小,而纤维素分解酶受环境影响最大;倒木的出现与全氮含量显著相关;海拔(坡位)与蛋白酶、脲酶及蔗糖酶活性负相关。结合图 2 和表 5 可以看出,有机碳、全氮含量和倒木的出现与第一排序轴极显著正相关($P<0.01$),海拔和坡位与第二排序轴极显著正相关($P<0.01$),而 pH 值与第二排序轴极显著负相关($P<0.01$)。

表 5 环境因子与排序轴的相关系数
Table 5 Correlation coefficients of canonical correspondence analysis ordination axes with environmental variables

排序轴 Ordination axis	海拔 Elevation	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	pH	SOC	TN	倒木的出现 Logs presence
Axis1	-0.044	0.161 *	-0.034	-0.202	0.536 **	0.516 **	0.193 **
Axis2	0.229 **	-0.078	0.265 **	-0.494 **	0.202 *	-0.023	-0.012

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

4 讨论

4.1 倒木接触处土壤酶活性的时空分布

土壤酶是土壤组分中活跃的有机成分之一,其变化受外界环境的影响较土壤化学特性大^[23],酶活性与有

机物的分解紧密相关^[34]。本研究以腐烂等级、地形因子、土壤化学性质及季节等变量为环境因子,从空间和时间尺度上探讨倒木分解过程中,其接触处土壤酶活性的时空分布格局。结果表明环境因子不但导致土壤酶活性的时空变异,而且不同环境因子对土壤不同酶活性的影响程度不同,如不同季节间脲酶活性的变异程度波动较小,说明季节对其影响较小,同时该酶活性的空间分布格局显示其分布格局变化较大,受不同环境的综合影响较大;四季间纤维素酶活性的变异系数波动大,且空间分布格局变化较大,说明纤维素酶活性受环境的影响较大,从而也印证了与其它酶相比,纤维素酶对微生物群落变化的反应更为敏感^[35]。纤维酶活性呈现春、冬季的变异程度大于夏、秋季的相反趋势,可能由于纤维素酶对微生物群落变化的反应更为敏感^[38],本研究调查季内冬季低温且持续降雨导致土壤微生物量发生较大变化,且土壤微生物量通常在春季达到高峰,而在雪融化后下降^[36],二者共同作用,使得纤维素酶的活性在春冬两季呈现较大变异。本研究中秋季蛋白酶、脲酶及蔗糖酶活性均较低,可能由于秋季土壤有效氮含量的下降,使得某些土壤酶活性下降^[37]。

4.2 倒木接触处土壤酶活性与腐烂等级的关系

长苞铁杉林内不同腐烂等级倒木接触处土壤酶活性的变异规律(表3)与季节对酶活性的影响规律(表1)相类似,受选取变量的制约因素的影响,季节变量主要体现于温湿度,而腐烂等级还包含微生物及化学物质等影响,且时间尺度大于季节效应,导致腐烂等级间的变异波动有所不同;倒木分解过程中向下淋溶化学物质,会降低其下土壤的N含量^[38],土壤的N含量下降又间接影响土壤相关酶的活性^[11],使得与氮循环有关的蛋白酶和脲酶活性均出现随腐烂等级升高而下降的趋势;伴随腐烂等级的升高,积累于倒木下方的纤维素不断增加,相应的纤维酶活性也升高^[39],说明随腐烂等级升高,碳素循环加快,经倒木覆盖后土壤纤维素分解酶活性显著升高,可见,倒木在森林生态系统碳循环的驱动机制方面具有重要意义;Junninen等^[40]总结出中等腐烂等级倒木上的菌种多于低腐烂等级和高腐烂等级,且一些菌种能够利用有机碳,并产生有利于获取碳的酶^[39],由此可以推测蔗糖酶活性在中等腐烂等级(Ⅲ)处达到峰值;Marina等^[41]的研究发现,倒木有明显的邻近效应,能增强降解酶的活性。

4.3 倒木接触处土壤酶活性与环境因子的关系

森林生态系统中,养分的流失也将导致土壤酶活性的降低,进而影响碳氮等营养物质的循环及土壤进程的发展,在所有环境因子中,土壤基质环境对土壤酶活性的解释量最大,且脲酶、蛋白酶及纤维酶活性随土壤有机碳、全氮含量的增加而升高(图2),该结论与Iyyemperumal等^[35]及Yao等^[37]相符。Wang等^[19]研究显示树桩的年龄对土壤酶活性的解释量最低,土壤化学特性的解释量大于树桩,脲酶活性与土壤pH值正相关,这些结论与本研究类似(图2)。坡向与土壤酶活性正相关,说明越往南坡,越向阳,土壤酶活性升高的同时,也促进倒木的分解。整体看来,天宝岩长苞铁杉林倒木与土壤酶活性相互影响,倒木的覆盖,有利于提高土壤酶活性,既促进系统的物质循环和能量流动,也提高了系统的稳定性;倒木接触土壤酶活性的分布格局特征,某种程度上也反映了该研究区倒木分解特征的分布。

目前有关倒木分解对土壤性质的影响研究,大多集中于某些土壤化学物质的变化^[11-12,21-22],且较少探讨环境因子对该变化的影响机制^[19,42]。土壤酶活性与有机物的腐朽速率相联系^[43],研究倒木接触处土壤酶活

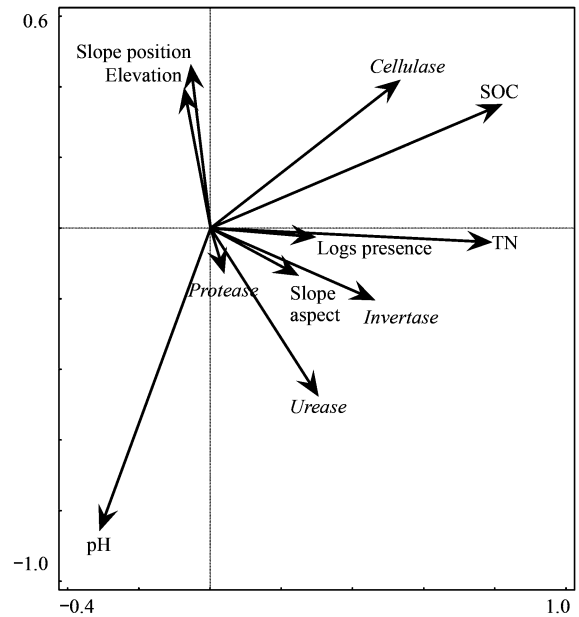


图2 土壤酶活性与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 2 The ordination diagram of RDA with soil enzyme activity and environmental variables

性的变化,不仅有利于了解土壤进程,也为了解倒木分解动态提供可靠依据。本研究在 Wang 等^[19]的基础上扩充环境因子,添加地形因子及季节因子,探讨环境因子对倒木接触处土壤酶活性变化的影响机制,研究虽有进一步深化,但仍存在有待完善的地方:(1) 由于土壤酶在有机物分解及碳、氮、磷和硫等营养元素的生物循环过程中起着重要的作用^[24,44],此次研究主要针对与 C、N 循环有关的土壤酶、土壤化学特性展开研究,未涉及磷、硫元素及与此有关的土壤酶;(2) 倒木的分解需要一个漫长的过程,现有多数报道显示木质体分解掉 95% 所需的时间均长于 10 a^[45],伴随分解进程的发展,其对森林土壤影响的深度和广度都在扩大,文章仅针对倒木接触处的土壤展开分析,借鉴现有研究^[19-20],有必要扩大研究范围,比较探讨倒木分解对倒木接触处、倒木附近及远离倒木处的土壤特性的影响效应;(3) 土壤酶主要来源于微生物^[46],微生物量的变化也显著影响着酶活性的变化,本研究未考虑微生物方面指标的影响,这些均有待后期研究可以继续扩展完善。

5 结论

本研究得出天宝岩长苞铁杉林内倒木接触处土壤酶活性的变异系数属中高等变异程度,纤维酶的空间分布格局变化最大,而脲酶、蛋白酶、蔗糖酶的变化较小;蛋白酶及脲酶活性随腐烂等级升高而降低,纤维酶活性呈升高趋势;蔗糖酶和脲酶与地形因子呈负相关,脲酶、蛋白酶及纤维酶活性随土壤有机碳、全氮含量的增加而升高,纤维酶活性与季节高度相关,在所有环境因子中,土壤基质环境对土壤酶活性的解释量最大,表明化学基质环境对土壤酶活性的影响不容忽视。

参考文献 (References):

- [1] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, Sollins P, Gregory S V, Lattin J D, Anderson N H, Cline S P, Aumen N G, Sedell J R, Lienkaemper G W, Cromack J R, Cummins K W. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 133-302.
- [2] Richardson S J, Peltzer D A, Hurst J M, Allen R B, Bellingham P J, Carswell F E, Clinton P W, Griffiths A D, Wiser S K, Wright E F. Deadwood in New Zealand's indigenous forests. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(11): 2456-2466.
- [3] 何东进, 何小娟, 洪伟, 覃德华, 刘进山, 蔡昌棠. 天宝岩猴头杜鹃林粗死木质残体数量特征. *福建林学院学报*, 2008, 28(4): 293-298.
- [4] Huang S L, Crabtree R L, Potter C, Gross P. Estimating the quantity and quality of coarse woody debris in Yellowstone post-fire forest ecosystem from fusion of SAP and optical data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1926-1938.
- [5] Sweeney O F M, Martin R D, Irwin S, Kelly T C, Halloran J O, Wilson M W, McEvoy P M. A lack of large-diameter logs and snags characterises dead wood patterns in Irish forest. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(10): 2056-2064.
- [6] 游惠明, 何东进, 洪伟, 游巍斌, 刘进山, 蔡昌棠, 王磊, 叶贤双. 海拔对天宝岩长苞铁杉林粗死木质残体分布的影响. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2011, 40(4): 365-369.
- [7] 李苏闽, 何东进, 朱乃新, 肖石红, 游巍斌, 刘进山, 蔡昌棠. 天宝岩自然保护区长苞铁杉混交林粗木质残体蓄水能力研究. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2331-2338.
- [8] 游惠明, 何东进, 刘进山, 蔡昌棠, 何小娟, 游巍斌, 朱乃新, 叶贤双, 王磊. 天宝岩 3 种典型森林类型 CWD 持水能力的比较. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(6): 621-626.
- [9] Fukasawa Y. Effects of wood decomposer fungi on tree seedling establishment on coarse woody debris. *Forest Ecology and Management*, 2012, 266: 232-238.
- [10] Bače R, Svoboda M, Pouska V, Janda P, Cervenka J. Natural regeneration in Central-European subalpine spruce forests: which logs are suitable for seedling recruitment. *Forest Ecology and Management*, 2012, 266: 254-262.
- [11] Hafner S D, Groffman P M. Soil nitrogen cycling under litter and coarse woody debris in a mixed forest in New York State. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 2159-2162.
- [12] Chen Y, Sayer E J, Li Z A, Mo Q F, Li Y W, Ding Y Z, Wang J, Lu X K, Tang J W, Wang F M. Nutrient limitation of woody debris decomposition in a tropical forest: contrasting effects of N and P addition. *Functional Ecology*, 2016, 30: 295-304.
- [13] Forrester J A, Mladenoff D J, Gower S T, Stoffel J L. Interactions of temperature and moisture with respiration from coarse woody debris in experimental forest canopy gaps. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 124-132.
- [14] 何东进, 何小娟, 洪伟, 刘勇生, 卞莉莉, 覃德华, 游惠明. 森林生态系统粗死木质残体的研究进展. *林业科学研究*, 2009, 22(5):

715-721.

- [15] Riffell S, Verschuyt J, Miller D, Wigley T B. Biofuel harvests, coarse woody debris, and biodiversity-A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(4): 878-887.
- [16] Browning B J, Jordan G J, Dalton P J, Grove S J, Wardlaw T J, Turner P A M. Succession of mosses, liverworts and ferns on coarse woody debris, in relation to forest age and log decay in Tasmanian wet eucalypt forest. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(10): 1896-1905.
- [17] Lassauce A, Paillet Y, Jactel H, Bouget C. Deadwood as a surrogate for forest biodiversity: meta-analysis of correlations between deadwood volume and species richness of saproxylic organisms. *Ecological Indicators*, 2011, 11(5): 1027-1039.
- [18] Bantle A, Borken W, Ellerbrock R H, Schulze E D, Weisser W W, Matzner E. Quantity and quality of dissolved organic carbon released from coarse woody debris of different tree species in the early phase of decomposition. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 287-294.
- [19] Wang Q K, Xiao F M, Wang S L, Xu G B. Response of selected soil biological properties to stump presence and age in a managed subtropical forest ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2012, 57: 59-64.
- [20] 游惠明, 何东进, 刘进山, 蔡昌棠, 游巍斌, 肖石红. 倒木覆盖对天宝岩国家级自然保护区长苞铁杉林内土壤理化特性的影响. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(3): 18-24.
- [21] Spears J D H, Lajtha K. The imprint of coarse woody debris on soil chemistry in the western Oregon Cascades. *Biogeochemistry*, 2004, 71(2): 163-175.
- [22] Zalamea M, Gonzalez G, Ping C L, Michaelson G. Soil organic matter dynamics under decaying wood in a subtropical wet forest: effect of tree species and decay stage. *Plant and Soil*, 2007, 296(1-2): 173-185.
- [23] Puglisi E, Del Re A A M, Rao M A, Gianfreda L. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1673-1681.
- [24] Banerjee S, Bora S, Thrall P H, Richardson A E. Soil C and N as causal factors of spatial variation in extracellular enzyme activity across grassland-woodland ecotones. *Applied Soil Ecology*, 2016, 105: 1-8.
- [25] Acosta-Martinez V, Zobeck T M, Gill T E, Kennedy A C. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(4): 216-227.
- [26] 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类. *生态学报*, 2005, 25(1): 158-167.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999: 296-338.
- [28] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [29] 郭德亮, 樊军, 米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1199-1208.
- [30] You H M, He D J, You W B, Liu J S, Cai C T. Effect of environmental gradients on quantitative characteristics of fallen logs in *Tsuga longibracteata* forest in Tianbaoyan National Nature Reserve, Fujian Province, China. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(6): 1118-1124.
- [31] 王文娟, 常禹, 刘志华, 陈宏伟, 荆国志, 张红新, 王金海. 大兴安岭呼中林区粗木质残体贮量及其环境梯度. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 773-778.
- [32] 刘妍妍, 金光泽. 地形对小兴安岭阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林粗木质残体分布的影响. *生态学报*, 2009, 29(3): 1398-1407.
- [33] 岳跃民, 王克林, 张伟, 陈洪松, 王敏. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤——环境关系研究. *环境科学*, 2008, 29(5): 1400-1405.
- [34] Rietl A J, Jackson C R. Effects of the ecological restoration practices of prescribed burning and mechanical thinning on soil microbial enzyme activities and leaf litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 50: 47-57.
- [35] Iyyemperumal K, Shi W. Soil enzyme activities in two forage systems following application of different rates of swine lagoon effluent or ammonium nitrate. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(2): 128-136.
- [36] Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Links between microbial population dynamics and nitrogen availability in an alpine ecosystem. *Ecology*, 1999, 80(5): 1623-1631.
- [37] Yao H Y, Bowman D, Shi W. Seasonal variations of soil microbial biomass and activity in warm-and cool-season turfgrass systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1536-1543.
- [38] Major J, Steiner C, Downie A, Lehmann J. Biochar effects on nutrient leaching // Lehmann J, Joseph S, eds. *Biochar for Environmental Management*. London: Earthscan, 2009: 227-249.
- [39] Geisseler D, Horwath W R. Relationship between carbon and nitrogen availability and extracellular enzyme activities in soil. *Pedobiologia*, 2009, 53(1): 87-98.
- [40] Junninen K, Komonen A. Conservation ecology of boreal polypores: A review. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 11-20.
- [41] Gonzalez-Polo M, Fernández-Souto A, Austin A T. Coarse woody debris stimulates soil enzymatic activity and litter decomposition in an old-growth

- temperate forest of Patagonia, Argentina. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 1025-1038.
- [42] Burke D J, Weintraub M N, Hewins C R, Kalisz S. Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 795-803.
- [43] Kappes H, Catalano C, Topp W. Coarse woody debris ameliorates chemical and biotic soil parameters of acidified broad-leaved forests. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(2-3): 190-198.
- [44] Qin S P, Hu C S, He X H, Dong W X, Cui J F, Wang Y. Soil organic carbon, nutrients and relevant enzyme activities in particle-size fractions under conservational versus traditional agricultural management. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3): 152-159.
- [45] Garrett L G, Kimberley M O, Oliver G R, Pearce S H, Beets P N. Decomposition of coarse woody roots and branches in management *Pinusradiata* plantations in New Zealand-A time series approach. *Forest Ecology and Management*, 2012, 269: 116-123.
- [46] Ahn M Y, Zimmerman A R, Comerford N B, Sickman J O, Grunwald S. Carbon mineralization and labile organic carbon pools in the sandy soils of a north Florida watershed. *Ecosystems*, 2009, 12(4): 672-685.