

崇明岛土地利对土壤酶活性的影响

宁沐蕾¹ 高唤唤¹ 黄天颖¹ 喻文娟² 康宏樟^{1,3*}

(¹上海交通大学农业与生物学院,上海 200240; ²上海交通大学分析测试中心,上海 200240; ³国家林业局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站,上海 200240)

摘要 为了探讨不同土地利用方式对土壤酶活性的影响,以上海崇明不同年龄水杉林(16、25、35年生)、香樟林(20年生)和毁林地(曾为25年生柳杉林)为研究对象,并以附近的水稻田作为对照,分析不同土层(0~10、10~20和20~30 cm)的土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸单酯酶活性,探讨不同土地利用方式对土壤酶活性的影响。结果表明:(1)各土壤酶活性在不同土地利用方式条件下差异均达到显著水平($P < 0.05$),农田向林地转化能提高土壤酶活性,促进土壤性状的改善,而毁林会使之降低。(2)不同土地利用类型中造林树种、造林年份也是影响土壤酶活性的重要因素,林龄与土壤酶活性呈显著的线性相关关系,且香樟林土壤酶活性强于水杉林,对土壤微生物学性质的改善能力最佳。(3)土壤酶活性随着土壤深度的增加而逐渐降低,具有很强的表聚性。(4)同一土地利用方式下土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸单酯酶活性之间具有显著或极显著的相关性($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),而过氧化氢酶与其他酶活性的相关性相对较弱。

关键词 造林; 树种组成; 土壤深度; 土壤酶活性

Effects of land use patterns on soil enzyme activity in Chongming Island. NING Mu-lei¹, GAO Huan-huan¹, HUANG Tian-ying¹, YU Wen-juan², KANG Hong-zhang^{1,3*} (¹School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ²Instrumental Analysis Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ³Shanghai Urban Forest Research Station of State Forestry Administration of China, Shanghai 200240, China).

Abstract: In order to explore the change of soil enzyme activities under different land-use patterns, *Metasequoia glyptostroboides* (MG) forests (16-, 25-, 35-year-old), 20-year-old *Cinnamomum camphora* (CC) forest and deforested land (formerly a 25-year-old *Cryptomeria fortunei* forest) were investigated at Dongping National Forest Park in Chongming Island. With rice paddy field as a control, we assessed the effects of different land-use patterns on the activities of soil urease (URE), invertase (INV), catalase (CAT) and alkaline phosphatase (ALP) in 0–10, 10–20 and 20–30 cm soil layers. The results showed that: (1) The difference in the activities of the four enzymes under different land-use patterns was significant ($P < 0.05$). Returning farmland to forests increased soil enzyme activities and improved soil properties, but deforestation had opposite effects. (2) Afforestation tree species and afforestation duration were also important factors affecting soil enzyme activities. There was a significant linear correlation between stand age and soil enzyme activities. CC had higher soil enzyme activities than MG, and improved soil microbiological properties better. (3) Soil enzyme activities decreased with the increase of soil depth. (4) There were significant or very significant correlations between INV, ALP and URE activities in the same land-use type ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), while CAT activity showed relatively weak correlations with other enzymes.

Key words: afforestation; tree species composition; soil depth; soil enzyme activity.

国家自然科学基金项目(31270491)和国家重点研发计划项目(2016YFD0600206)资助。

收稿日期: 2016-11-30 接受日期: 2017-02-24

* 通讯作者 E-mail: kanghz@sjtu.edu.cn

崇明岛作为中国第三大岛屿,因其作为一个岛屿与外界交通的阻碍性,目前仍保留着以农业为主的区域发展格局。上海市市委市政府也明确提出,要以环境优先、生态优先为基本原则,将崇明岛规划、建设成为世界级的生态岛(王敏等,2010)。而生态建设引起的土地利用方式的变化会在不同程度上改变土壤环境状况并影响许多生态过程,其中合理的土地利用方式可改善土壤结构,增强土壤对外界环境变化的抵抗力,而不合理的土地利用方式则会导致土壤肥力退化,造成土壤质量下降,增强侵蚀,降低生物多样性。

鉴于微生物在整个生态系统所起的重要功能,越来越多的注意力已经集中到用土壤微生物参数来评价土壤质量上(杨葭等,2011),其中包括土壤酶活性。由于土壤酶活性对于土地利用变化反应非常敏感,比其他土壤理化指标更灵敏,因而可以作为较理想的土壤肥力指标(Ndiaye *et al.*, 2000)。相关研究也表明,土壤酶活性是土壤中生物学活性的总体现,可以表征土壤的综合肥力特征及土壤养分转化过程。其中脲酶作为土壤中最为活跃的水解酶类之一,反映了土壤的供氮能力,在土壤氮素循环中具有重要的作用(边雪廉等,2016)。土壤蔗糖酶是转化酶中的一种,与土壤中的养分含量关系十分密切,微生物数量和土壤呼吸强度对土壤蔗糖酶的影响较大,水解产物葡萄糖为植物与部分微生物提供营养源(梁毅等,2013)。而土壤过氧化氢酶是反映土壤中微生物活动强弱与氧化程度的一种氧化还原酶,其酶活性强弱体现了土壤能量和物质之间的转化(李振高等,2010)。土壤磷酸单酯酶在土壤磷的循环中起重要的作用,即它可以将土壤中的复杂有机磷水解成可被生物直接吸收的无机磷,从而缓解了土壤磷的限制(Nannipieri *et al.*, 2011)。因此,深入了解崇明岛不同土地利用方式对土壤酶活性的影响,为进一步探讨崇明岛地区较为合理的土地利用方式、提高该区域土壤质量提供理论依据。

高扬等(2013)采用地统计学方法研究了崇明岛的土壤酶分布特征,表明崇明岛酶活性的空间变异主要是由于耕作措施、种植制度等土地利用方式等随机因素引起的。本文以崇明典型的6种不同土地利用方式下的土壤为研究对象,主要针对土地利用改变、造林年份、造林树种、土壤深度等因素来探讨崇明岛不同土地利用方式对土壤中脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶及磷酸单酯酶4种土壤酶活性的影响,

进一步揭示由于土地利用方式的改变而引起的土壤环境的生物化学变化,为崇明的生态系统建设提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区设在上海市崇明岛,崇明岛位于 $121^{\circ}09'30''E-121^{\circ}54'00''E, 31^{\circ}27'00''N-31^{\circ}51'15''N$,东西长为80 km,南北宽为13~18 km,全岛面积为1267 km²。属亚热带季风性气候,四季分明,年平均气温15.2℃,全年日照数2094.2 h,无霜期229 d,多年平均降水量1025 mm,雨量主要集中在4—9月,崇明岛主要的土壤类型为冲积母质上发育而成的盐碱土、淋溶土和半水成土,土壤质地主要为轻壤土或重壤土,pH在7.5~8.1。

于2016年4月,在上海城市森林生态系统定位观测研究站的崇明东平国家森林公园观测点,选取了不同林龄水杉林(16、25、35年生),香樟林(20年生)、毁林地(曾为25年生柳杉林,于6年前遭到砍伐)和水稻田6种典型的土地利用类型,各类型编号分别为SSY(16年生水杉林)、SSZ(25年生水杉林)、SSC(35年生水杉林)、XZ(20年生香樟林)、HLD(毁林地)、SD(水稻田),各样地均是在农田的基础上发育而成,土壤母质、地形、气候等土壤的本底条件基本一致,因此土地利用方式在空间上的变化可以在一定程度上代替时间尺度上的变化,为研究土地利用变化提供了理想条件。每一种土地利用类型均设置3块20 m×50 m的标准样地作为重复,调查记录各样地的经纬度、林龄、平均胸径、栽植密度等基本状况,各样地具体情况见表1。

1.2 样品的采集与预处理

土壤样品采集按照“S”型采样法在每一样地设置9个采样点,每一个采样点分别用直径为2.5 cm的土钻取0~10、10~20、20~30 cm的土层,同一样地、同一土层的土壤混合在一起,用自封袋带回实验室立即处理:首先去除样品内残留的根和粗砂砾,而后经自然风干后,通过研磨过2 mm土壤筛,用于测定土壤的理化性质及各类酶活性。

1.3 样品分析方法

土壤酸碱度测定采用pH计法(水:土=2.5:1);土壤有机碳及全氮的含量测定通过用H₂SO₄中和土壤中的无机碳,用元素分析仪来测得剩下的有机碳和全氮的含量。土壤速效磷测定采用0.5 mol·L⁻¹

表 1 试验样地概括

Table 1 Basic information of the sample plots

样地 编号	经度 E (°)	纬度 N (°)	优势 树种	林龄 (年)	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	栽植密度 (株·hm ⁻²)	土壤颗粒组成(%)		
								黏粒	粉粒	沙粒
SSY-01	121.4893	31.6854	水杉	16	22.3	14.5	440	18.2	27.1	54.7
SSY-02	121.4895	31.6866	水杉	16	15.8	10.1	880	17.5	26.8	55.7
SSY-03	121.4898	31.6877	水杉	16	12.1	9.6	900	16.4	27.2	56.4
SSZ-01	121.4901	31.6888	水杉	25	20.7	17.5	760	22.4	25.0	52.7
SSZ-02	121.4896	31.6889	水杉	25	21.5	17.4	440	20.0	24.4	55.6
SSZ-03	121.4892	31.6877	水杉	25	20.4	16.4	640	19.3	24.1	56.6
SSC-01	121.4759	31.6878	水杉	35	27.4	27.0	510	22.1	29.6	48.3
SSC-02	121.4770	31.6866	水杉	35	28.7	28.4	440	20.9	27.8	51.4
SSC-03	121.4768	31.6855	水杉	35	28.3	26.5	440	19.9	29.0	51.2
XZ-01	121.4804	31.6894	香樟	20	17.3	6.7	300	24.8	24.6	50.7
XZ-02	121.4802	31.6883	香樟	20	18.7	6.5	350	22.5	26.9	50.5
XZ-03	121.4800	31.6876	香樟	20	21.0	6.8	250	22.5	24.1	53.4
HLD-01	121.4736	31.6898	无	-	-	-	-	13.5	21.0	65.5
HLD-02	121.4738	31.6904	无	-	-	-	-	12.9	20.9	66.2
HLD-03	121.4740	31.6909	无	-	-	-	-	11.9	21.3	66.8
SD-01	121.4728	31.6898	水稻	-	-	-	-	24.8	18.3	57.0
SD-02	121.4731	31.6910	水稻	-	-	-	-	22.9	19.1	24.4
SD-03	121.4724	31.6907	水稻	-	-	-	-	24.3	15.9	59.8

NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法 铵态氮、硝态氮的测定参照《土壤铵氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定: 氯化钾溶液提取-分光光度法》(2012) (表 2)。

本研究测定的土壤酶活性所采取的室内分析方法参考关松荫(1987)。脲酶活性采用靛酚蓝比色法,以 1 g 土壤在 37 °C 培养 24 h 释放出 NH₃-N 的量(mg·g⁻¹)表示。土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝

基水杨酸比色法,以 1 g 土壤在 37 °C 培养 24 h 后葡萄糖的量(mg·g⁻¹)表示。过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾滴定法,以每克干土 1 h 内消耗 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 体积数表示(以 mL 计)。磷酸单酯酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法,以 2 h 后 100 g 土壤中 P₂O₅ 的毫克数表示。全部分析测试过程在上海交通大学农业与生物学院与分析测试中心完成。

表 2 样地土壤基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of tested soils

土地利用方式	土层深度 (cm)	pH	有机碳 (mg·g ⁻¹)	全氮 (mg·g ⁻¹)	速效磷 (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 (mg·kg ⁻¹)
毁林地	0~10	7.80	19.50	1.70	10.10	5.77	1.76
	10~20	8.02	16.00	1.40	-	4.17	1.56
	20~30	8.14	14.20	0.90	-	1.68	1.13
水稻田	0~10	7.89	18.40	1.20	11.07	10.33	2.38
	10~20	7.98	16.30	1.10	-	5.20	1.85
	20~30	8.09	16.00	1.0	-	4.82	1.43
20 年生香樟林	0~10	7.78	23.80	2.00	13.21	11.69	1.50
	10~20	7.95	16.00	1.20	-	3.87	1.95
	20~30	8.15	14.90	0.90	-	2.40	2.37
16 年生水杉林	0~10	7.80	13.80	1.00	10.50	6.73	1.89
	10~20	7.90	12.80	0.90	-	4.88	2.53
	20~30	7.95	14.10	0.90	-	4.57	3.04
25 年生水杉林	0~10	7.77	21.40	1.60	12.32	13.71	2.73
	10~20	7.94	17.40	1.10	-	8.71	2.91
	20~30	8.10	14.60	0.90	-	6.32	3.50
35 年生水杉林	0~10	7.81	20.70	1.70	13.65	15.27	3.48
	10~20	8.00	15.30	1.30	-	4.13	3.71
	20~30	8.00	14.40	0.80	-	5.48	4.15

1.4 数据分析

采用 Excel 2010、SPSS 20.0 统计分析软件来进行数据分析,采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)比较不同土地利用方式以及不同土层间的土壤酶活性组间差异,采用 Pearson 统计方法来分析不同土壤酶活性之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式的土壤理化性质

土壤理化性质在不同土地利用方式下的分布特征如表 2 所示。0~10 cm 土层土壤有机碳含量以 20 年生香樟林最高,为 $23.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;全氮含量同样为 20 年生香樟林最高,为 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;速效磷的含量 35 年生水杉林最高,为 $13.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;硝态氮与铵态氮含量均以 35 年生水杉林最高,分别为 15.27 、 $3.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;与水稻田相比,各类养分呈现先略有降低而后增加的趋势;随着林龄的增加,各类养分均呈现不同程度;在两种造林植被中,20 年生香樟林的各类养分含量均显著高于各发育阶段的水杉林;而与 25 年生水杉林相比,除全氮含量外毁林

地的各类养分含量显著降低。而各用地方式 pH 均在 7.7~8.2,土壤属于中性偏碱性,与水稻田相比,除 16 年生水杉林在 0~10 cm 土层的 pH 值无显著差异,其他森林的各层土壤 pH 值都有所降低,可见退耕还林可改良土壤的盐碱性。相比 25 年生水杉林,毁林地 0~10 cm 土层土壤 pH 显著增加。

在土壤的垂直剖面上,各用地类型的养分大体上均呈现随土层加深而递减的规律,而土壤 pH 值呈现出随土层变深而递增的变化规律,且森林土壤的各类养分含量随土壤深度增加而递减的速度比毁林地和水稻田更快,降低幅度随着土层变深而逐渐减小。

2.2 土壤酶活性的垂直空间分布特征

6 种土地利用类型土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性的空间分布如图 1 所示,其中土壤脲酶除水稻田与毁林地的 10~20、20~30 cm 土层之间无显著差异($P>0.05$),35 年生水杉林 0~10 与 10~20 cm 土层之间无显著差异外($P>0.05$),其他土地利用类型的不同土层间均呈现显著差异($P<0.05$)。土壤蔗糖酶活性除 20 年生香樟林 0~10、

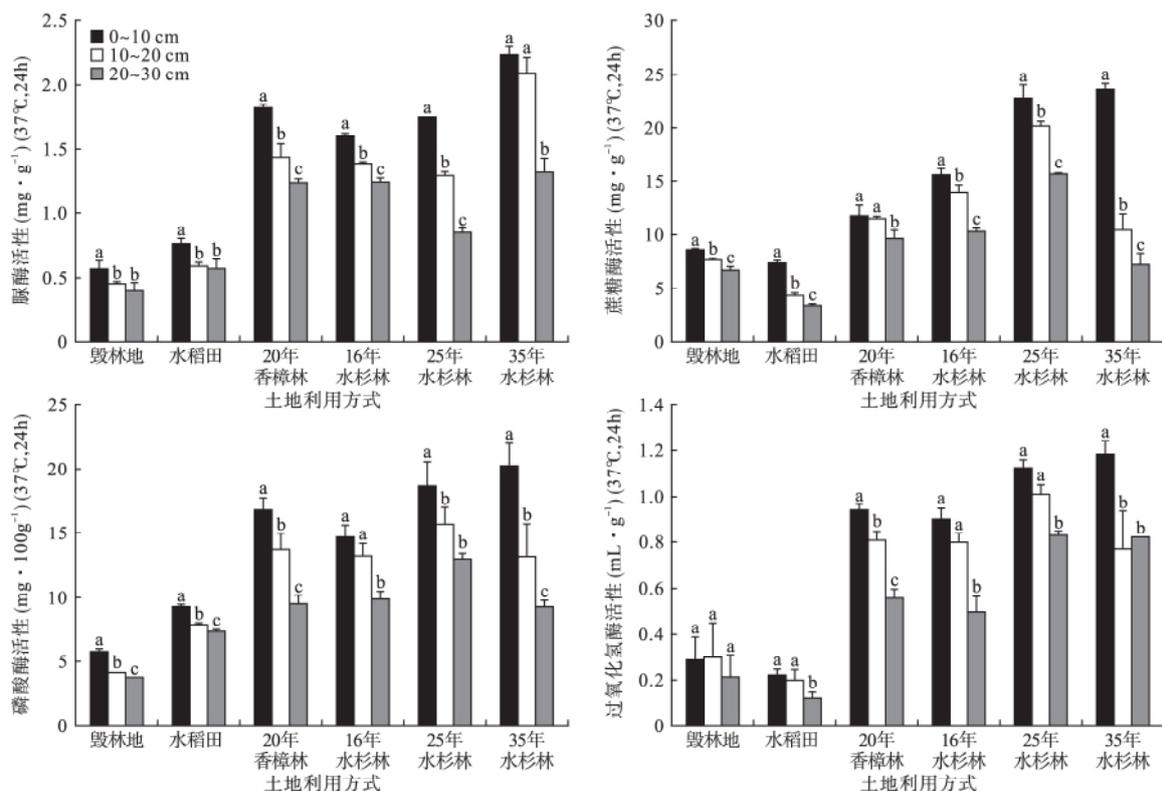


图 1 不同土地利用方式下土壤酶活性的垂直空间分布情况

Fig.1 Vertical spatial distribution of soil enzyme activities under different land use patterns

图中不同小写字母表示在同一土地利用方式下不同土层间的土壤酶活性差异显著 ($P<0.05$)。

10~20 cm 土层之间无显著差异 ($P>0.05$) ,其余土地利用类型的不同土层间均呈显著差异 ($P<0.05$) 。过氧化氢酶活性除毁林地、水稻田、16 年生水杉林、25 年生水杉林 0~10 与 10~20 cm 土层变化不明显之外 ($P>0.05$) ,其余土地利用类型的不同土层间均呈现显著差异 ($P<0.05$) 。磷酸单酯酶活性除 16 年生水杉林 0~10 与 10~20 cm 土层磷酸单酯酶活性变化不明显 ($P>0.05$) 、25 年生水杉林 10~20 与 20~30 cm 变化不显著 ($P>0.05$) 之外 ,其他土地利用类型的各土层之间的磷酸单酯酶活性变化都非常显著 ($P<0.05$) 。各类土壤酶的垂直空间分布特征非常明显: 随着土壤土层变深 ,土壤各类酶活性递减 ,表现为 0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm ,且土壤酶主要聚集于 0~10 cm 土层中。

2.3 不同土地利用方式对土壤酶活性的影响

由图 2 可见 ,在 4 种土地利用方式中脲酶活性的变化范围为 0.35~1.84 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,方差分析表明 ,不同土地利用方式下土壤脲酶活性差异显著 ($P<0.05$) 。各土层土壤的脲酶活性均表现为毁林地<水稻田<25 年生水杉林<20 年生香樟林 ,除 20

年生香樟林与 25 年生水杉林的土壤脲酶活性差异不显著外 ,其余不同土地利用方式之间差异均显著 ($P<0.05$) 。

土壤蔗糖酶活性的变化范围为 3.33~24.12 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中 0~10 cm 土层土壤蔗糖酶活性表现为: 水稻田<毁林地<20 年生香樟林<25 年生水杉林 ,除毁林地与水稻田之间的土壤蔗糖酶活性差异不显著外 ($P>0.05$) ,其余土地利用类型间差异均显著 ($P<0.05$) 。各土层蔗糖酶活性均为水稻田<毁林地<20 年生香樟林<25 年生水杉林。

4 种土地利用方式条件下土壤过氧化氢酶活性的变化范围为 0.08~1.15 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各土层过氧化氢酶活性均为水稻田<毁林地<20 年生香樟林<25 年生水杉林 ,除毁林地与水稻田的土壤之间不显著外 ($P>0.05$) ,其余土地利用类型间均有显著差异 ($P<0.05$) 。与水稻田相比 ,森林土壤的过氧化氢酶活性均显著增强 ($P<0.05$) ,而毁林地 (之前为 25 年生柳杉林) 与 25 年生水杉林相比 ,土壤过氧化氢酶活性显著减弱 ($P<0.05$) 。

4 种土地利用方式的土壤磷酸单酯酶活性的变

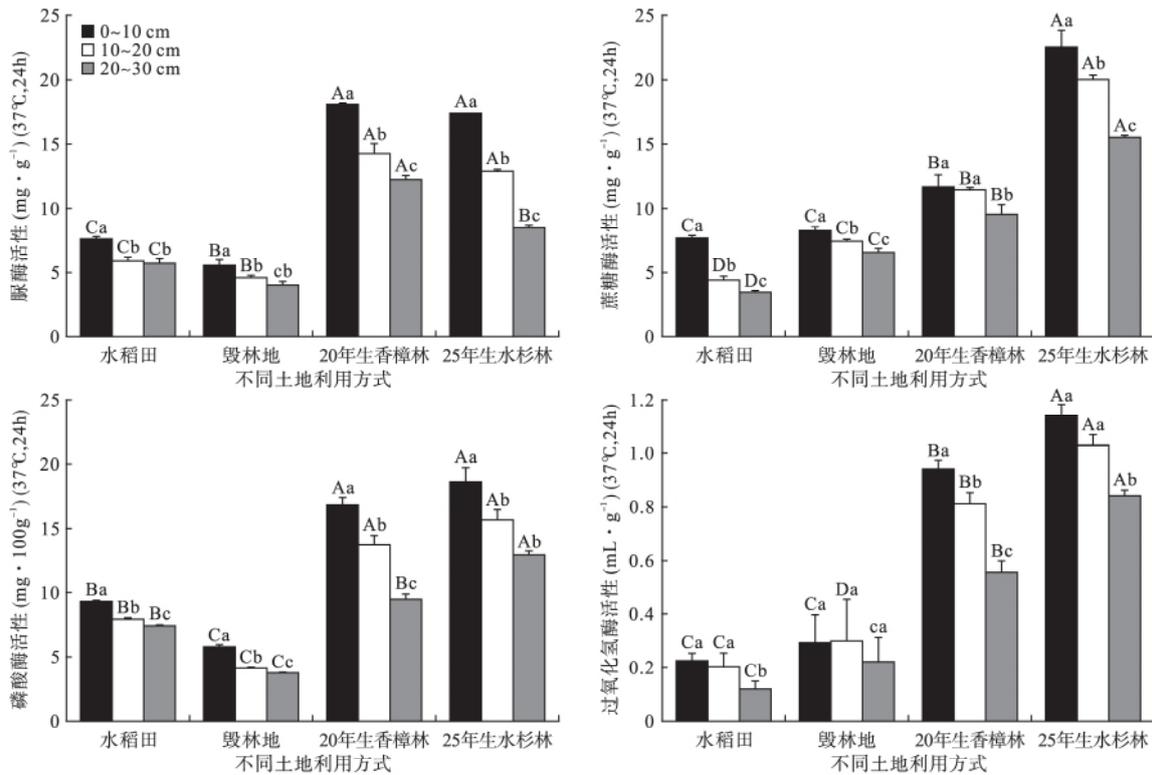


图 2 不同土地利用方式下土壤酶活性的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil enzyme activities under different land use patterns

图中不同大写字母表示在同一土层不同土地利用方式下的土壤酶活性差异显著 ,不同小写字母表示在同一土地利用方式下不同土层间的土壤酶活性差异显著 ($P<0.05$) 。

化范围为 3.68~20.43 mg·100g⁻¹。0~10 cm 土层磷酸单酯酶活性为: 毁林地<水稻田<20 年生香樟林<25 年生水杉林; 与水稻田相比, 除毁林地的磷酸单酯酶活性显著减弱外, 其他土地利用类型的土壤磷酸单酯酶活性均有显著增强($P<0.05$)。

2.4 人工林发育进程中土壤酶活性的变化特征

通过分析林龄和土壤酶活性在土壤剖面的相关性可知(表 3): 在土壤剖面 0~10 cm 层, 林龄和土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性的相关系数分别为 0.956、0.874、0.842、0.883, 均达到显著水平($P<0.05$) 相关性表现为 0~10 cm 土层大于 10~20 与 20~30 cm 土层, 10~20 与 20~30 cm 土层酶活性与林龄的相关性相对较弱, 其中 10~20 cm 土层脲酶与林龄的相关系数为 0.813, 20~30 cm 土层过氧化氢酶与林龄的相关系数为 0.616。在 0~10 cm 土层中, 随着林龄的增加土壤酶活性也随之增加。在土壤剖面的不同土层中, 林龄对土壤酶活性分布的影响存在差异。

2.5 不同造林树种对土壤酶活性的影响

通过比较 20 年生水杉林(回归方程计算得出)与 20 年生香樟林的各类酶活性(表 4), 可见不同造林树种的土壤酶活性分布的影响存在差异: 20 年生香樟林的表层土壤的脲酶、磷酸单酯酶均显著高于 20 年生水杉林, 而在蔗糖酶方面低于 20 年生水杉林, 但两者在过氧化氢酶方面无显著差异。

2.6 各类土壤酶活性之间的共性关系

通过对土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸单酯酶和过氧化氢酶 4 种酶活性之间进行相关分析表明(表 5), 同

表 3 林龄(x)与土壤酶活性(y)在不同土层深度的相关回归方程

Table 3 Correlation equation between stand age (x) and soil enzyme activity (y) in different soil depths

土壤酶活性	土层深度 (cm)	回归方程 $y=a+bx$	相关系数	显著水平 P
脲酶	0~10	$y=0.034x+1.006$	0.956	<0.05
	10~20	$y=0.038x+0.618$	0.813	<0.05
	20~30	$y=0.005x+1.017$	0.177	>0.05
蔗糖酶	0~10	$y=0.409x+10.240$	0.874	<0.05
	10~20	$y=0.078x+14.587$	0.233	>0.05
	20~30	$y=-0.176x+15.533$	0.388	>0.05
磷酸单酯酶	0~10	$y=0.289x+10.506$	0.842	<0.05
	10~20	$y=-0.002x+14.050$	0.008	>0.05
	20~30	$y=-0.305x+11.612$	0.161	>0.05
过氧化氢酶	0~10	$y=0.014x+0.704$	0.883	<0.05
	10~20	$y=-0.001x+0.848$	0.083	>0.05
	20~30	$y=0.013x+0.363$	0.616	<0.05

表 4 不同造林树种的土壤酶活性分布特征

Table 4 Distribution characteristics of soil enzyme activities in different tree species

土地利用方式	土层深度 (cm)	脲酶	蔗糖酶	磷酸单酯酶	过氧化氢酶
20 年生水杉林	0~10	1.69	18.42	16.29	0.98
	10~20	1.38	16.15	14.01	0.83
20 年生香樟林	0~10	1.81	11.74	16.84	0.94
	10~20	1.42	11.52	13.66	0.81
	20~30	1.23	9.62	9.49	0.56

表 5 酶活性间的相关系数

Table 5 Correlation coefficient among soil enzyme activities

土地利用类型		过氧化氢酶	蔗糖酶	磷酸单酯酶
水稻田	脲酶	0.650	0.909**	0.891**
	过氧化氢酶		0.674*	0.689*
	蔗糖酶			0.983**
毁林地	脲酶	0.451	0.775*	0.801**
	过氧化氢酶		0.311	0.219
	蔗糖酶			0.917**
20 年生香樟林	脲酶	0.860**	0.639	0.888**
	过氧化氢酶		0.888**	0.956**
	蔗糖酶			0.815**
16 年生水杉林	脲酶	0.877**	0.903**	0.884**
	过氧化氢酶		0.944**	0.867**
	蔗糖酶			0.949**
25 年生水杉林	脲酶	0.921**	0.967**	0.905**
	过氧化氢酶		0.942**	0.826**
	蔗糖酶			0.921**
35 年生水杉林	脲酶	0.424	0.751*	0.778*
	过氧化氢酶		0.815**	0.708*
	蔗糖酶			0.935**

一土地利用方式中, 4 种土壤酶活性之间均存在明显的相关关系, 尤其是在脲酶、蔗糖酶、磷酸单酯酶表现出高度一致的平行关系, 除在 20 年生香樟林中蔗糖酶活性和脲酶活性相关性不显著外, 在其他土地利用类型中这 3 种酶的相关系数均达到显著或极显著水平($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 而过氧化氢酶与其他酶活性的相关性相对较弱。以上分析表明, 崇明岛的土壤酶在促进土壤有机物转化中不仅显示专性特性, 同时也存在共性关系。

3 讨论

3.1 土地利用方式的改变对土壤酶活性的影响

本研究中, 土地利用方式的改变对土壤酶活性影响显著: 相比水稻田, 各林地的各类酶活性均显著提高, 而与各林地相比, 毁林地土壤各类酶活性均显

著降低,且土壤的有机碳、全氮、有效磷也呈现相同的变化趋势,表明土壤的养分在很大程度上决定了土壤酶活性的大小。据此推测,造林主要通过林木的凋落物和根系分泌物补充有机碳等酶促作用的底物,提高土壤酶活性,而毁林则由于土壤裸露,降低了土壤中的碳氮磷等养分,使土壤酶活性降低。赵明月等(2014)对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳状况的研究表明,林地比耕地有更高的土壤有机碳含量;Jaiyeoba(2003)研究表明,毁林会造成土壤碳氮磷流失,均与本文观点相符。崇明岛作为河口冲积岛,其用地方式的演变与其他地区有显著区别:首先通过围垦湿地造田,逐渐转变为农田,然后再向林地等功能用地转换。在这个演变过程中,围垦造田的措施保持了土壤中的团粒结构,对湿地土壤的酶活性有一定的改善作用(高扬等,2013),耕地连作则降低了土壤中的酶活性(陆利民等,2015),表明农田虽在崇明岛用地演替中扮演承上启下的重要作用,但从长远的角度看,不利于土壤性质的进一步提升,而农田向林地的转换对土壤性质的改善更加显著。

3.2 不同造林树种和年份对土壤酶活性的影响

本研究中,随着林龄增长,表层土壤的酶活性随之显著增强,且在森林发育过程中,土壤中的有机碳、全氮、有效磷等养分均随林龄的增加而增长,表明林龄的增长能通过影响增加土壤肥力间接提升土壤的酶活性,这与大多数关于林龄与酶活性关系的研究结论一致,故推测生长年限的增长伴随着环境参数的变化(生物量、凋落物和根系增多)(涂宏涛等,2015),造成了理化性质的差异(pH降低)及在土壤养分方面的改变(有机碳、全氮、有效磷增加),促进了土壤有机C、N循环。由于影响酶活性因子的多样性,在部分研究中酶活性随林龄的变化呈多样性,如葛晓改等(2012)研究了三峡库区不同林龄马尾松的酶活性,发现其土壤转化酶活性先降低后增加,纤维素酶、多酚氧化酶活性逐渐降低,而脲酶和过氧化物酶活性先增加后降低;罗飞等(2014)研究了不同林龄杉木林土壤酶活性季节动态,发现多酚氧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性表现为成熟林高于中龄林和幼龄林,而蔗糖酶活性随林龄增加呈先增加后降低的变化趋势;郭春兰(2014)研究了油茶林酶活性的时空变异,发现各类酶活性表现为幼龄林与中龄林、成熟林差异均显著,而中龄林与成熟林差异不显著。推测造成研究结果多样化的原因

可能是由于森林的林龄段、研究树种以及研究酶活性种类、研究区域的环境、采样季节等因子的综合影响,酶活性随着林龄增长的大体趋势都呈现为:在森林的生长前期,随着林龄增长,土壤会不断积累各种养分,土壤酶活性得到增强;而到了成熟林后期阶段,随着林龄的增加,森林会更趋郁闭,光照和水分条件变差,从而降低土壤的酶活性。

对比相同林龄的香樟林和水杉林的土壤酶活性可见:香樟林土壤的脲酶、磷酸单酯酶活性显著高于水杉林,而蔗糖酶活性显著偏低,过氧化氢酶活性无显著差异。针对不同的造林树种造成酶活性差异的原因,国内外许多报道从土壤的养分、生态效益等角度进行了研究。如杨文彬等(2015)研究了不同土地利用方式与植被覆盖、植被种类等因素的关系,表明不同的造林树种主要通过地表凋落物及根系的分泌物影响土壤养分的空间变异和土壤生物活性,从而影响土壤酶活性;朱莎(2016)比较了上海动物园、共青森林公园的香樟群落、水杉群落的土壤营养状况,发现香樟群落各指标大小基本均高于水杉群落。本研究中,香樟林的各类土壤养分均要强于针叶林,解释了本文中香樟林比水杉林的脲酶、磷酸单酯酶活性高的原因。而对于不同土地利用方式对过氧化氢酶活性的影响仍然没有定论,表现出较强的多样性,甚至有研究表明过氧化氢酶活性不受土地利用方式的影响。本研究中,香樟林和水杉林的过氧化氢酶活性无显著差异,因此关于不同植被对过氧化氢酶活性影响的规律还需进一步研究。研究表明,不同树种对土壤中蔗糖的分解的影响差异较大(王莹等,2010),而且随着林龄的增长,森林的土壤蔗糖酶活性应该得到提高。而本研究中,16年生水杉林却比20年生香樟林酶活性更高,可能是由土壤酶活性和微生物及有机碳转化之间关系的复杂性引起,具体的原因还有待研究。

3.3 不同土壤深度对土壤酶活性的影响

在土壤剖面分布上,4种酶活性虽然在不同土地利用方式垂直空间的变化幅度不同,但随土壤深度变化总体均呈现自上而下递减的规律,这与大多数国内外的相关报道相一致(Taylor *et al.*, 2002; 王理德等, 2016)。究其原因主要有三个方面:一是由于崇明岛土壤养分状况较差,微生物生长只能依靠土壤表面的凋落物和腐殖质来支持,土壤表层凋落物的分解需要大量的微生物参与,增强了表层土壤的酶活性,随着土壤变深,地下生物量减少、养分、土

壤温度、含水量均降低,限制了土壤生物产酶能力(Lavahun *et al.*, 1996);二是由于土壤表层有大量的林木的细根,细根越密集,其分泌的酶也越多,酶的活性相应就越高。以上因子的综合作用使得随着土壤深度加深,土壤酶活性逐渐降低;三是由于土壤酶活性与土壤有机碳等养分之间密切相关,而本研究中有有机质碳、全氮、有效磷等养分均呈现随土层变深而显著减少,影响了土壤酶活性的空间分布。此外,酶活性在不同用地方式垂直空间的变化幅度也不同,可能是由于不同用地方式的土壤上下层之间的凋落物分解强度以及腐殖质合成强度存在差异。任勃等(2009)的研究也表明,随着土层深度的增加,土壤酶活性受土地利用方式的影响逐渐减小。

4 结论

通过对崇明岛6种典型土地利用方式的4种酶活性进行研究,主要结论如下:土地利用方式改变对土壤酶活性影响显著,崇明岛的围垦造田在一定程度上改善了湿地的土壤环境,但不利于土壤的长远发展,农田向林地转化能进一步提高土壤酶活性,而毁林会使之降低。不同植被类型中造林树种、造林年份也是影响土壤酶活性的重要因素,随着林龄的增长,土壤酶活性总体上呈现显著增加的趋势,而香樟在土壤酶活性等生态效益方面要强于水杉林,在土壤垂直空间上,土壤深度对酶活性的影响也非常显著,随着土层越深,土壤酶活性呈现逐渐变弱的趋势。相关分析表明,土壤的4种酶活性之间总体呈现显著或极显著正相关,故采用4种酶构建的土壤的总体酶活性可以在很大程度上表征土壤的肥力状况。

参考文献

边雪廉,赵文磊,岳中辉,等. 2016. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展. *中国农学通报*, **32**(4): 171-178.

高扬,汪亚峰,何念鹏,等. 2013. 不同土地利用方式下崇明岛土壤酶与有机质空间分布特征. *农业环境科学学报*, **32**(1): 21-28.

葛晓改,肖文发,曾立雄,等. 2012. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系. *应用生态学报*, **23**(2): 445-451.

关松荫. 1987. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社.

郭春兰. 2014. 油茶林土壤微生物量氮和酶活性的时空变异与影响因素. *江西农业大学学报*, **36**(5): 940-947.

李振高,骆永明,滕应. 2010. 土壤与环境微生物研究法. 北京: 科学出版社.

梁毅,杨慧,曹建华,等. 2013. 不同土地利用方式下土壤养分和酶活性的变化. *广西师范大学学报*, **31**(1): 125-129.

陆利民,邵婷,赵晶,等. 2015. 浦东新区设施土壤连作障碍对土壤微生物及酶活性影响的研究. *上海农业科技*, (2): 99-100.

罗飞,谢书妮,张海燕,等. 2014. 酸雨区不同林龄杉木林土壤酶活性季节动态. *森林与环境学报*, **34**(2): 131-137.

任勃,杨刚,谢永宏,等. 2009. 洞庭湖区不同土地利用方式对土壤酶活性的影响. *生态与农村环境学报*, **25**(4): 8-11.

涂宏涛,万杰,孙玉军,等. 2015. 不同林龄杉木人工林根生物量及其相容性模型. *南京林业大学学报: 自然科学版*, **39**(6): 81-86.

王敏,熊丽君,黄沈发. 2010. 崇明生态岛建设生态环境指标体系研究. *上海环境科学*, **29**(2): 47-48.

王莹,王彦梅,陈龙池. 2010. 湖南会同地区森林植被转变对土壤微生物生物量碳和酶活性的影响. *生态学杂志*, **29**(5): 905-909.

王理德,姚拓,王方琳,等. 2016. 石羊河下游退耕地土壤微生物变化及土壤酶活性. *生态学报*, **36**(15): 4769-4779.

杨葳,王子芳,高明,等. 2011. 重庆市城郊区不同土地利用方式对土壤养分及酶活性的影响——以北碚区歇马镇为例. *中国农学通报*, **27**(11): 213-218.

杨文彬,耿玉清,王冬梅,等. 2015. 漓江水陆交错带不同植被类型的土壤酶活性. *生态学报*, **35**(14): 4604-4612.

赵明月,赵文武,钟莉娜. 2014. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例. *生态学报*, **34**(5): 1105-1113.

朱莎. 2016. 上海2种常见绿化树种群落土壤养分状况及酶活性分析(硕士学位论文). 上海: 华东师范大学.

Jaiyeoba IA. 2003. Changes in soil properties due to continuous cultivation in Nigerian semiarid Savannah. *Soil and Tillage Research*, **70**: 91-98.

Lavahun MFE, Joergensen RG, Meyer B. 1996. Activity and biomass of soil microorganisms at different depths. *Biology and Fertility of Soils*, **2**: 38-42.

Nannipieri P, Giagnoni L, Landi L, *et al.* 2011. Role of phosphatase enzymes in soil// Bünemann E, Oberson A, Frossard E, eds. Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. Berlin: Springer, **26**: 215-243.

Ndiaye EL, Sandeno JM, McGrath D, *et al.* 2000. Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, **15**: 26-36.

Taylor JP, Wilson B, Mills MS, *et al.* 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 387-401.

作者简介 宁沐蕾,女,1994年生,硕士研究生,主要从事森林生态学方面的研究. E-mail: ningmulei@126.com
责任编辑 魏中青