

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180372

皆伐油松人工林天然更新对土壤肥力和酶活性的影响

孙启越¹ 谭红岩² 迟明峰² 吴丹妮¹ 张晓文¹ 贾茜¹ 张龙玉¹ 贾忠奎¹

(1. 北京林业大学林学院 国家林业和草原局油松工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 河北省平泉市国有黄土梁子林场, 河北 平泉 067506)

摘要:【目的】探讨油松人工林皆伐后天然更新成林的过程中对土壤肥力和酶活性的影响, 分析植物群落演替过程中土壤质量的变化规律, 为油松林的地力维护和可持续经营提供理论依据。【方法】采用演替时序法, 在河北平泉地区选择立地条件一致的中龄林(32年)、近熟林(40年)、成熟林(53年), 皆伐后不同时间(5年、10年、24年)的天然更新林及皆伐后8年撂荒地作为对照, 分0~10 cm、10~20 cm 土层测定土壤肥力和酶活性, 并对2组指标进行典型相关分析。【结果】(1)从中龄林到成熟林土壤质量持续提升, 其中在0~10 cm 土层土壤含水量、全氮含量和蔗糖酶活性分别提高了161.5%、379.1%和181.3%, 各指标在10~20 cm 土层也有显著提升($P < 0.05$)。 (2)皆伐后5年天然更新林与成熟林相比土壤肥力和酶活性差异不显著($P > 0.05$), 到伐后24年土壤肥力和酶活性逐渐下降, 与伐后5年相比, 土壤毛管持水量、全氮含量和蔗糖酶活性在0~10 cm 土层分别下降了24.4%、61.0%和28.8%, 在10~20 cm 土层各指标也均有明显下降($P < 0.05$), 但伐后24年土壤肥力和酶活性仍高于中龄林和近熟林。 (3)天然更新林的土壤肥力和酶活性显著高于撂荒地($P < 0.05$), 天然更新林在0~10 cm 土层土壤毛管持水量、有机质含量和脲酶活性相比撂荒地分别提高了43.7%、145.7%和116.6%, 在10~20 cm 土层各指标也显著高于撂荒地($P < 0.05$)。 (4)典型相关分析表明土壤酶活性与土壤肥力之间具有极显著相关性($P < 0.01$), 土壤肥力主要受土壤密度、毛管持水量、毛管孔隙度、有机质、全氮的影响, 而土壤酶活性主要受脲酶和蔗糖酶的影响。土壤肥力和酶活性的典型变量得分均表现为成熟林 > 伐后5年 > 伐后10年 > 伐后24年 > 近熟林 > 撂荒地 > 中龄林。【结论】油松人工林成熟林阶段土壤质量明显改善, 随着时间推移皆伐会造成一定程度的土壤肥力和酶活性下降, 但在皆伐迹地上及时实现植被恢复会显著减轻下降的程度, 且土壤质量明显好于同一发育阶段的人工林。皆伐油松人工林天然更新可以有效地缓解地力衰退的问题。

关键词: 油松人工林; 皆伐; 天然更新; 土壤肥力; 土壤酶活性

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522-(2019)06-0024-11

引文格式: 孙启越, 谭红岩, 迟明峰, 等. 皆伐油松人工林天然更新对土壤肥力和酶活性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6):24-34. Sun Qiyue, Tan Hongyan, Chi Mingfeng, et al. Effects of natural regeneration on soil fertility and soil enzyme activities in *Pinus tabuliformis* plantations after clearcutting [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 24-34.

Effects of natural regeneration on soil fertility and soil enzyme activities in *Pinus tabuliformis* plantations after clearcutting

Sun Qiyue¹ Tan Hongyan² Chi Mingfeng² Wu Danni¹ Zhang Xiaowen¹
Jia Xi¹ Zhang Longyu¹ Jia Zhongkui¹

(1. College of Forestry, Engineering Technology Research Center of *Pinus tabuliformis* of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Huangtuliangzi State-owned Forest Farm, Pingquan 067506, Hebei, China)

Abstract: [Objective] Long maintenance of soil quality after clearcutting is a primary research content of sustainable forest management in plantation. This study aims to explore the effects of natural regeneration of

收稿日期: 2018-11-15 修回日期: 2019-03-27

基金项目: 国家重点研发计划“油松速生建筑材料高效培育技术研究”(2017YFD0600501)。

第一作者: 孙启越。主要研究方向: 用材林培育。Email: sun7qiyue@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者: 贾忠奎, 副教授。主要研究方向: 用材林和林木种苗培育。Email: jiazk@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Pinus tabuliformis on soil fertility and enzyme activities after clearcutting, in the meantime, analyze the variation of soil quality during succession, which has great significance for maintaining the site productivity of *Pinus tabuliformis* plantation. [Method] The variations of soil fertility and enzyme activities in 0–10 cm and 10–20 cm soil layers were investigated through chronosequence approach in the *Pinus tabuliformis* plantation (middle age forest of 32 years, near-mature forest of 40 years and mature forest of 53 years), natural regeneration forest after clearcutting (5, 10, 24 years after clearcutting) and wasteland after cutting as a contrast to natural regeneration in Pingquan of Hebei Province. Canonical correlation analysis was conducted on soil fertility and enzyme activity indicators. [Result] (1) Soil fertility and enzyme activities were continuously improved from middle-aged forest to mature forest. Soil water content, total nitrogen content and invertase activity in 0–10 cm soil layer were increased by 161.5%, 379.1% and 181.3% respectively, and the indexes were also significantly increased in 10–20 cm soil layer ($P < 0.05$). (2) There was no significant difference in soil fertility and enzyme activity between 5 years natural regeneration forest after clearcutting and mature forest ($P > 0.05$). However, soil fertility and enzyme activities decreased gradually from 5 years after clearcutting. Compared 24 years with 5 years after clear cutting, soil capillary moisture capacity, total nitrogen content and invertase activity in 0–10 cm soil layer decreased by 24.4%, 61.0% and 28.8%, respectively, and the indexes in the 10–20 cm soil layer also decreased significantly ($P < 0.05$). However, soil fertility and enzyme activities in 24 years after cutting were still higher than middle-aged and near-mature forests. (3) The soil fertility and enzyme activities of natural regeneration forest were significantly higher than those of wasteland in 10 years after clear cutting ($P < 0.05$). Compared with wasteland, the soil capillary moisture capacity, organic matter content and urease activity of natural regeneration forest in 0–10 cm soil layer increased by 43.7%, 145.7% and 116.6%, respectively, the soil indexes in 10–20 cm soil layer were also significantly higher than those of wasteland as well ($P < 0.05$). (4) Canonical correlation analysis showed that there was an extremely significant correlation between soil fertility and enzyme activity ($P < 0.01$). Soil fertility was mainly affected by bulk density, capillary moisture capacity, capillary porosity, organic matter and total nitrogen, while soil enzyme activity was mainly affected by urease and invertase. The canonical variables of soil fertility and enzyme activity were as follows: mature forest > 5 years after cutting > 10 years after cutting > 24 years after cutting > near-mature forest > wasteland > middle-aged forest. [Conclusion] The soil quality of *Pinus tabuliformis* plantation was significantly improved at the mature forest stage. The certain extent declining of soil fertility and enzyme activity would be caused by clearcutting. However, timely vegetation restoration on clear cutting land will significantly reduce the degree of decline, and the soil quality was better than the plantation forest at the same developmental stage. Natural regeneration of *Pinus tabuliformis* plantation after clear cutting can effectively alleviate the problem of soil degradation.

Key words: *Pinus tabuliformis* plantations; clearcutting; natural regeneration; soil fertility; soil enzyme activity

实现人工林生产力的长期维持一直是林学界重点研究的课题^[1-2], 而皆伐后随着养分的移出如何维持地力则是目前众多研究关注的焦点, 已有研究表明在杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、落叶松 (*Larix gmelinii*)、桉树 (*Eucalyptus robusta*) 等树种的人工纯林皆伐后出现了地力衰退的问题^[3-5]。土壤是森林生态系统中物质循环和能量转换的重要场所, 是植物群落更新演替过程的载体, 植物的生长和变化也影响着土壤的理化性质、微生物组成及酶活性^[6]。地力衰退的实质是土壤质量的退化, 进而导致林分生产力降低^[7-9], 因

此通常把森林土壤质量作为生产力可持续性评价的重要参考依据^[10]。土壤物理性质反映土壤的水分特征、透气性和渗透性, 会影响土壤中养分的转化速率和存在状态, 从而对植物生长产生直接或间接的影响^[11]; 土壤酶参与催化土壤中发生的一系列生物化学反应, 将有机质转化为植物可用的养分^[12], 对酶活性的研究有助于了解土壤肥力状况和演变规律^[13-14]。将土壤物理性质、养分含量、酶活性综合分析可以较好的反映土壤质量。目前人工林土壤质量变化的研究多是对比不同发育阶段(幼龄林到成熟林)人工林土壤理化性质, 针对皆伐后土壤质量变化的研究还

不够深入。

油松(*Pinus tabulaeformis*)原产于我国,在我国的分布相当广泛,在松属(*Pinus*)马尾松而占第2位,是我国华北地区的主要造林树种,对水土保持、木材生产、荒山绿化等起到了非常重要的作用。油松由于喜光、抗寒,繁殖能力强,种子有一定飞散能力,是易实现天然更新的树种。河北平泉地区是油松人工林的一个重要分布区,当地油松人工林皆伐收获后,依靠油松自身天然更新的能力,在皆伐迹地实现植被恢复再次成林,避免了人为干扰,符合近自然经营的理念。本研究围绕皆伐后天然更新能否维持地力的问题,在河北平泉皆伐前人工林和皆伐后天然更新林分中开展土壤质量调查,分析植物群落演替过程中土壤质量的变化规律,探讨皆伐后天然更新对林地土壤肥力和酶活性的影响,旨在明确现有经营模式下油松林的地力是否存在衰退问题,为油松合理育林体系的建立提供依据,对实现油松林的可持续经营具有重要的理论和实践意义。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于河北省平泉市国有黄土梁子林场,地处燕山山脉末端辽河上游,地理位置为 $41^{\circ}10' \sim 41^{\circ}17'N$, $118^{\circ}39' \sim 118^{\circ}46'E$ 。该地区平均海拔660 m,地形以中低山和丘陵为主,属寒温带大陆性干旱季风山地气候,四季分明,年平均气温 $6.6^{\circ}C$,年平均降水量540 mm,70%降水在夏季。年日照2000~2900 h,年日照率65%,无霜期120~130 d。本地区

土壤类型主要为棕壤土,母质为花岗岩。乔木树种主要有油松、华北落叶松(*Larix principisrupprechtii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等,其中油松人工林面积达8901.85 hm^2 ,占当地人工林总面积的61.6%,油松人工林林下主要灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)、木香薷(*Elsholtzia stauntonii*)、榆(*Ulmus pumila*)、细叶小檗(*Berberis poiratii*)等,草本层主要有披针苔草(*Carex lanceolata*)、中华卷柏(*Selaginella sinensis*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、委陵菜(*Potentilla aiscolor*)、龙牙草(*Agrimonia pilosa*)、小红菊(*Dendranthema chanetii*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)等。

1.2 样地设置

采用演替时序研究法,经实地考察后于2018年4月在平泉黄土梁子林场选择立地条件一致的32年、40年、53年生人工林、伐后5年、10年、24年天然更新林及伐后撂荒地布设样地,样地面积 $20 m \times 20 m$,每种类型重复3次,共计样地21块。其中样地I、II、III为油松一代人工林,分别于1986、1978、1965年春造林,初植密度4400株/ hm^2 ;样地IV、V、VI是由一代成熟林分别于2013、2008、1994年实施皆伐(伐前林龄均为50年左右),皆伐后依靠天然更新再次成林形成的;样地VII是于2010年实施皆伐后形成撂荒地。从伐前32年、40年、53年生人工林到伐后5年、10年、24年天然更新林为一个完整的演替序列,撂荒地作为天然更新林的对照。样地基本概况见表1。

表1 样地概况

Tab. 1 General condition of sample plots

编号 No.	样地 Sample plot	保留密度/更新密度/(株· hm^{-2}) Reserved density/regeneration density/(tree· ha^{-1})	郁闭度 Canopy density	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average DBH/cm	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/($^{\circ}$)	土层厚度 Soil depth/cm
I	32年生人工林 32 years old plantation	2 500	0.69	8.4	10.5	750	N	20	50
II	40年生人工林 40 years old plantation	1 500	0.65	10.3	13.0	800	N	25	50
III	53年生人工林 53 years old plantation	900	0.67	11.9	17.6	700	N	20	50
IV	伐后5年天然更新 5 years of natural regeneration after clearcutting	4 800	/	1.7	/	700	N	15	50
V	伐后10年天然更新 10 years of natural regeneration after clearcutting	5 600	/	1.9	/	750	N	20	50
VI	伐后24年天然更新 24 years of natural regeneration after clearcutting	2 000	0.40	5.6	8.8	750	N	20	50
VII	伐后8年撂荒 8 years of wasteland after clearcutting	/	/	/	/	750	N	20	50

注:“/”代表该数据无法测得,N代表阴坡。Notes:“/” represents the data can not be measured, N represents northern slope.

1.3 土样采集与分析

样地土壤厚度 50 cm, 20 cm 以下土层含有大量石块, 本文研究具有代表性的 0~20 cm 土层土壤质量变化, 按 0~10 cm、10~20 cm 采集土样, 每个样地沿“S”型设置 5 个采样点, 用环刀和铝盒取样, 用于测定土壤物理性质; 用土钻取样, 同一样地同一土层混合装入袋中, 风干后过筛, 用于测定土壤化学性质和酶活性。所有土样的采集均在同一时间段, 且取样期间均未出现强降雨天气。

土壤含水量用烘箱法测定; 土壤密度、持水量、孔隙度用环刀法测定; pH 值用电位法测定; 有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定; 全氮采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法测定; 碱解氮用碱解扩散法测定; 全磷用浓硫酸消煮-钼锑抗比色法测定; 有效磷用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定^[15]; 过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法测定; 蔗糖酶用 3,5-二硝基水杨酸显色法测定; 脲酶用采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定; 磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定中性磷酸酶^[16]。每个土壤样品进行 3 次平行测定。

1.4 数据处理

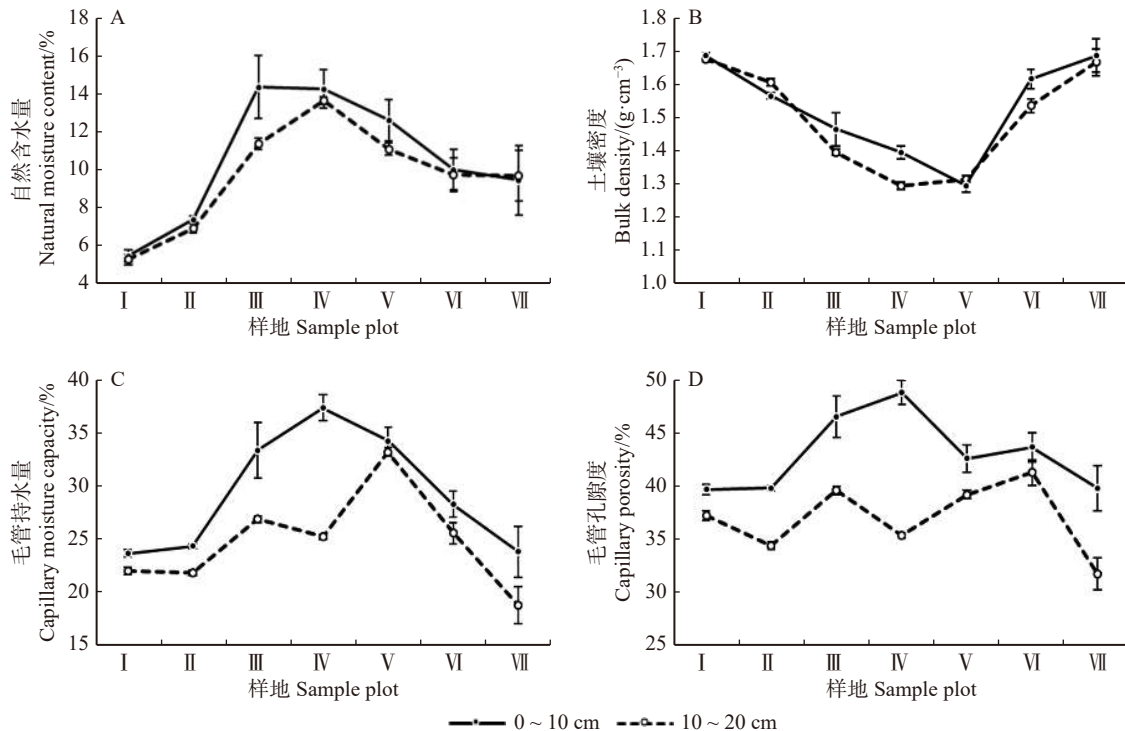
使用 Excel 2013 对数据进行初步整理和计算; 使用 SPSS19.0 对不同林分同一土层测定结果进行单因素方差分析(ANOVA); 用 R 软件进行典型相关分析, 分析土壤肥力与土壤酶活性指标间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 皆伐油松人工林天然更新对土壤物理性质的影响

由图 1 可以看出, 从中龄林到成熟林(32~53 年), 再到皆伐后随着时间推移(伐后 5~24 年), 土壤含水量、毛管持水量、毛管孔隙度均大体呈现出先上升后下降的规律, 土壤密度则表现为先下降后上升的趋势。不同林分样地中土壤含水量、毛管持水量、毛管孔隙度均表现出随土壤深度的增加而降低, 土壤密度随土壤深度增加而增大的趋势。方差分析结果显示不同样地间土壤物理性质的差异显著($P < 0.05$), 由中龄林到成熟林土壤物理性质持续提升, 土壤自然含水量、毛管持水量、毛管孔隙度在 0~10 cm 土层分别增加了 161.5%、41.2%、17.3%, 在 10~20 cm 土层也有显著性提升, 土壤密度在两个土层分别下降了 20.0% 和 14.9%, 土壤水分含量大幅提高, 通气、透水性能明显改善。

皆伐后 5 年天然更新林与成熟林相比土壤物理性质差异不显著, 而皆伐 5 年后随着时间推移土壤物理性质逐渐下降, 皆伐后 24 年与皆伐后 5 年相比, 土壤自然含水量、毛管持水量、毛管孔隙度在 0~10 cm 土层分别下降了 29.8%、24.4%、10.5%, 10~20 cm 土层中以上指标也出现了不同程度的下降, 皆伐后 24 年天然更新林与中龄林和近熟林相比土壤



A. 土壤自然含水量变化; B. 土壤密度变化; C. 土壤毛管持水量变化; D. 土壤毛管孔隙度变化。A, variation of soil moisture content; B, variation of soil bulk density; C, variation of soil capillary moisture capacity; D, variation of soil capillary porosity.

图 1 皆伐后林地土壤物理性质的变化

Fig. 1 Variations of soil physical properties of forest lands after clearcutting

物理性质较优,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤含水量分别比近熟林提高 35.2% 和 40.5%,说明皆伐会造成土壤含水量、持水量和孔隙度的下降以及土壤密度的增加,土壤物理状况总体呈现退化趋势,但仍处于较好的水平。在皆伐后同一时间段内(8~10 年),天然更新林与撂荒地间土壤物理性质差异显著,伐后 10 年天然更新林林地土壤含水量、毛管持水量、毛管孔隙度在 0~10 cm 土层相比撂荒地提高了 33.3%、43.7%、13.7%,土壤密度减小了 21.0%,在 10~20 cm 土层也表现为皆伐后天然更新林地土壤物理状况明显好于撂荒地,这说明皆伐后利用天然更新进行植被恢复可以有效减缓土壤物理性质的退化。

2.2 皆伐油松人工林天然更新对土壤养分的影响

由表 2 可知,除撂荒地外,其余样地间土壤 pH

表 2 皆伐后林地土壤 pH 的变化

Tab. 2 Variation of soil pH of forest lands after clearcutting

土层 Soil depth	样地 Sample plot						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
0~10 cm	6.26 ± 0.07b	6.18 ± 0.10b	6.02 ± 0.09bc	6.07 ± 0.12b	5.98 ± 0.06c	6.23 ± 0.06b	6.50 ± 0.10a
10~20 cm	6.34 ± 0.08b	6.17 ± 0.11b	6.13 ± 0.08b	6.22 ± 0.13b	6.09 ± 0.05b	6.30 ± 0.06b	6.57 ± 0.09a

注:表中数据为平均值 ± 标准误,数据后不同小写字母表示同一土层各指标在不同林分样地间差异显著($P < 0.05$)。Notes: the data is "average value ± standard error". Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant difference among different forest sample plots ($P < 0.05$).

伐后 5 年天然更新林与成熟林的土壤养分含量差异不显著,而从伐后 5 年到伐后 24 年土壤养分含量出现了明显的下降,除碱解氮外其余指标的差异均达到显著水平($P < 0.05$),其中在 0~10 cm 土层有机质、全氮含量分别下降 49.8% 和 61.0%,在 10~20 cm 土层有机质、全氮含量分别下降 54.8% 和 52.5%。伐后 24 年土壤养分含量与近熟林相比差异不显著,但显著好于中龄林,说明皆伐后随时间增加土壤养分逐渐下降,但不足以表明土壤肥力出现严重的衰退。伐后 10 年天然更新林地的土壤养分状况明显好于撂荒地,在 0~10 cm 土层土壤有机质、全氮、有效磷含量较撂荒地分别提高了 145.7%、75.4% 和 56.2%,且差异达到了显著水平($P < 0.05$),在 10~20 cm 土层土壤有机质、全氮、有效磷含量也显著高于撂荒地,这说明在皆伐迹地上及时天然更新可以有效减少养分的损失。

2.3 皆伐油松人工林天然更新对土壤酶活性的影响

由表 3 可以看出,从中龄林到成熟林,再到皆伐后,随着时间的推移土壤酶活性总体呈现出先上升后下降的规律,不同林分样地的土壤酶活性均随土壤深度的增加而降低,一般情况下表土层的有机质含量高,土壤酶活性也较强。对同一土层不同林分样地的土壤酶活性进行方差分析,结果表明除 0~10 cm 土层中不同样地间过氧化氢酶活性无显著差异外,

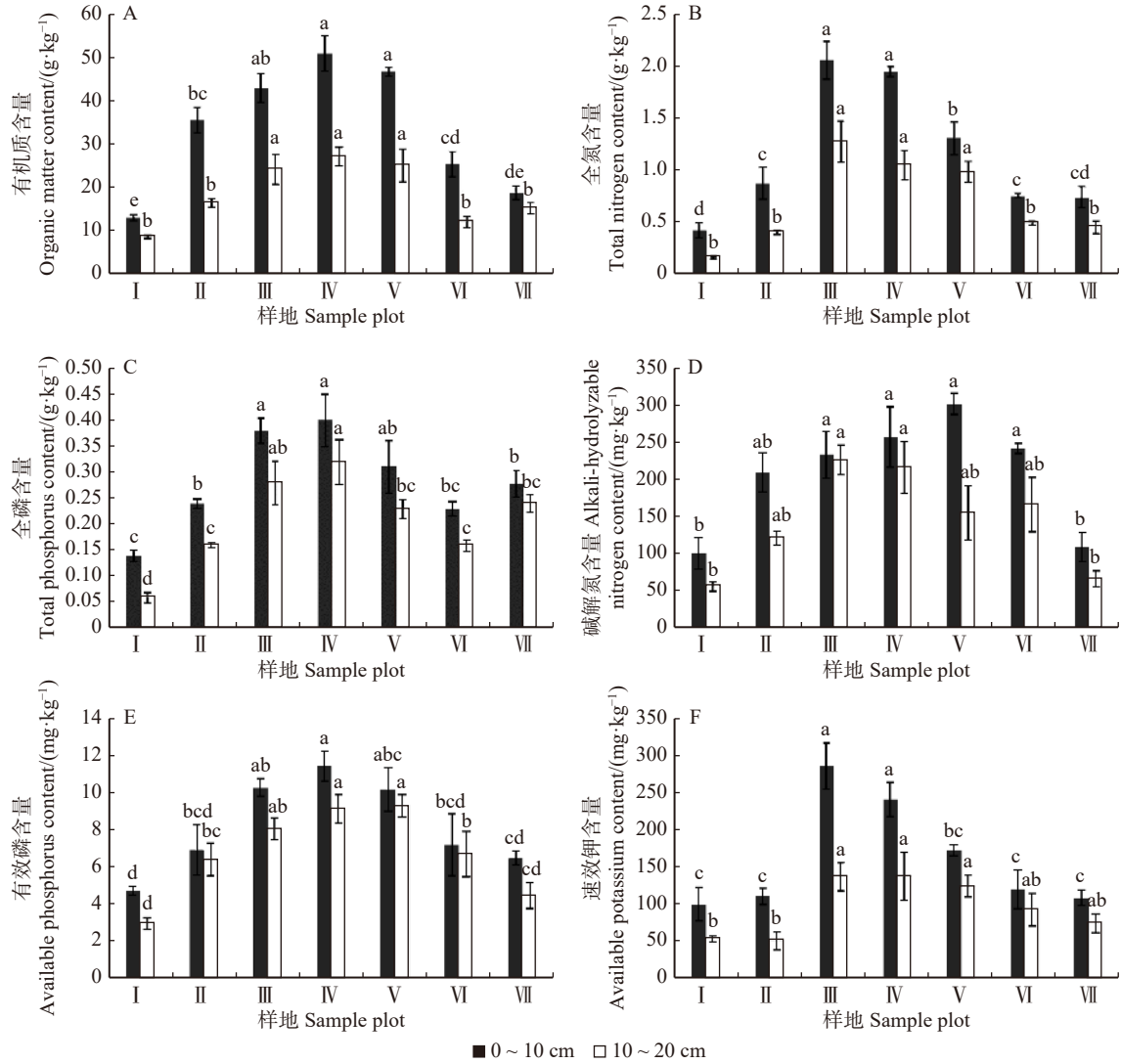
值的差异不显著($P > 0.05$),从中龄林到成熟林,再到皆伐后,随着时间的推移土壤 pH 大致呈现出先下降后上升的趋势。由图 2 可以看出,从中龄林到成熟林,再到皆伐后,随着时间的推移土壤养分含量总体呈现出先上升后下降的规律,不同林分样地的土壤养分含量均随土壤深度的增加而降低。经方差分析,不同样地间土壤养分含量差异显著($P < 0.05$)。成熟林与中龄林相比在 0~10 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别增加了 223.0%、379.1%、171.4%、130.1%、116.2%、181.6%,且差异显著($P < 0.05$),在 10~20 cm 土层以上指标也均有显著提升,说明皆伐前随林龄增加土壤养分含量显著提高。

其余土壤酶活性指标在不同样地间均有显著差异($P < 0.05$)。成熟林与中龄林相比在 0~10 cm 土层的土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性分别提高 30.8%、181.3%、129.0% 和 130.3%,在 10~20 cm 土层各土壤酶活性也均有显著提升,说明伐前随林龄增加土壤酶活性逐渐增强。

成熟林与伐后 5 年天然更新林的土壤酶活性差异不显著,从皆伐 5 年后起土壤酶活性呈下降趋势,伐后 24 年与伐后 5 年相比,土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性在 0~10 cm 土层分别下降了 13.6%、28.8% 和 26.7%,10~20 cm 土层中土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性分别下降了 55.6%、51.4% 和 31.7%,说明 10~20 cm 土层对土壤酶活性的变化更敏感。伐后 24 年天然更新林的土壤酶活性高于皆伐前中龄林和近熟林,与中龄林的差异显著($P < 0.05$),与近熟林的差异不显著。伐后 10 年天然更新林与撂荒地间土壤酶活性差异显著($P < 0.05$),在 0~10 cm 土层天然更新林林地土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性相比撂荒地分别提高了 75.5%、116.6% 和 74.2%,在 10~20 cm 土层土壤 4 种酶活性均显著高于撂荒地,说明皆伐后天然更新可以有效减缓土壤酶活性的降低。

2.4 土壤肥力与土壤酶活性的典型相关分析

本研究选择土壤过氧化氢酶(x_1)、脲酶(x_2)、蔗糖酶(x_3)、磷酸酶(x_4)等 4 个土壤酶活性指标作为一



A. 土壤有机质含量变化; B. 土壤全氮含量变化; C. 土壤全磷含量变化; D. 土壤碱解氮含量变化; E. 土壤有效磷含量变化; F. 土壤速效钾含量变化。不同小写字母表示同一土层各指标在不同林分样地间差异显著 ($P < 0.05$)。A, variation of soil organic matter content; B, variation of soil total nitrogen content; C, variation of soil total phosphorus content; D, variation of soil alkali-hydrolyzable nitrogen content; E, variation of soil available phosphorus content; F, variation of soil available potassium content. Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant difference among different forest sample plots ($P < 0.05$).

图 2 皆伐后林地土壤养分含量的变化

Fig. 2 Variation of soil nutrient contents of forest lands after clearcutting

组变量, 选择土壤含水量(y_1)、土壤密度(y_2)、毛管持水量(y_3)、毛管孔隙度(y_4)、pH 值(y_5)、有机质(y_6)、全氮(y_7)、碱解氮(y_8)、全磷(y_9)、有效磷(y_{10})、速效钾(y_{11})等 11 个指标作为反映土壤肥力的一组变量。对土壤肥力和酶活性各指标进行简单相关分析, 结果表明各指标间具有较强的相关性(表 4), 其中土壤密度、pH 值与土壤酶活性呈负相关, 其余土壤肥力指标均与土壤酶活性呈正相关。进而对两组变量进行典型相关分析, 建立土壤酶活性典型变量(u)和土壤肥力典型变量(v)的组合线性函数。

由 R 软件得出 4 对典型相关变量的相关系数, 分别为 $r_1 = 0.96$, $r_2 = 0.86$, $r_3 = 0.53$, $r_4 = 0.37$, 进行相关系数的显著性检验, 得出前 2 对典型变量的相

关系是极显著的($P < 0.01$), 第 1 和第 2 对典型变量的线性组合如下:

$$u_1 = -0.003x_1 - 0.026x_2 + 0.126x_3 + 0.068x_4 \quad (1)$$

$$v_1 = -0.025y_1 - 0.226y_2 - 0.385y_3 + 0.250y_4 + 0.015y_5 + 0.025y_6 + 0.082y_7 + 0.016y_8 + 0.009y_9 - 0.004y_{10} + 0.035y_{11} \quad (2)$$

$$u_2 = 0.060x_1 + 0.293x_2 - 0.195x_3 - 0.092x_4 \quad (3)$$

$$v_2 = 0.084y_1 + 0.005y_2 + 0.024y_3 + 0.031y_4 - 0.007y_5 + 0.165y_6 - 0.269y_7 + 0.011y_8 + 0.069y_9 + 0.038y_{10} - 0.089y_{11} \quad (4)$$

在第 1 对典型变量(u_1, v_1)中, 对土壤酶活性综合因子起主要作用的是蔗糖酶(x_3), 对土壤肥力综

表3 皆伐后林地土壤酶活性的变化

Tab. 3 Variation of soil enzyme activities of forest lands after clearcutting

样地 Sample plot	土层 Soil depth	过氧化氢酶活性 Catalase activity/(mL·g ⁻¹)	蔗糖酶活性 Invertase activity/(mg·g ⁻¹)	脲酶活性 Urease activity/(mg·kg ⁻¹)	磷酸酶活性 Phosphatase activity/(mg·kg ⁻¹)
I	0~10 cm	1.79 ± 0.28a	18.48 ± 0.89c	95.17 ± 9.97d	340.13 ± 7.82e
II		2.09 ± 0.07a	29.58 ± 5.33bc	138.63 ± 17.08cd	437.33 ± 11.70cd
III		2.34 ± 0.04a	52.00 ± 2.28a	217.98 ± 27.83ab	783.40 ± 12.14a
IV		2.29 ± 0.15a	47.03 ± 4.26a	213.55 ± 9.03ab	674.13 ± 34.96b
V		2.33 ± 0.08a	45.76 ± 1.50a	247.31 ± 15.07a	671.53 ± 27.98b
VI		2.30 ± 0.03a	33.50 ± 4.91b	184.59 ± 26.26bc	494.13 ± 21.74c
VII		1.96 ± 0.19a	26.08 ± 3.28bc	114.16 ± 6.66d	385.60 ± 17.32de
I	10~20 cm	1.14 ± 0.14c	8.37 ± 1.53b	52.15 ± 6.56d	202.23 ± 20.99c
II		1.30 ± 0.12bc	14.05 ± 1.23b	92.77 ± 7.04bc	256.27 ± 28.95bc
III		1.94 ± 0.06a	28.95 ± 5.13a	122.97 ± 11.10b	551.73 ± 28.25a
IV		2.08 ± 0.15a	36.47 ± 4.69a	190.62 ± 2.62a	491.40 ± 24.44a
V		2.16 ± 0.05a	30.53 ± 2.55a	161.61 ± 22.37a	448.07 ± 32.63a
VI		2.04 ± 0.07a	17.73 ± 1.99b	84.59 ± 4.10c	335.73 ± 12.84b
VII		1.50 ± 0.06b	12.11 ± 1.20b	86.28 ± 4.93c	272.20 ± 10.84bc

注:表中数据为平均值 ± 标准误,数据后标不同小写字母表示同一土层各指标在不同林分样地间差异显著($P < 0.05$)。Notes: the data is "average value ± standard error". Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant difference among different forest sample plots ($P < 0.05$).

表4 土壤肥力与土壤酶活性指标的相关关系

Tab. 4 Correlations between soil fertility and enzyme activities

指标 Index	过氧化氢酶 Catalase (x_1)	脲酶 Urease (x_2)	蔗糖酶 Invertase (x_3)	磷酸酶 Phosphatase (x_4)
含水量 Moisture content (y_1)	0.642	0.748	0.759	0.744
土壤密度 Bulk density (y_2)	-0.551	-0.772	-0.755	-0.735
毛管持水量 Capillary moisture capacity (y_3)	0.620	0.768	0.773	0.766
毛管孔隙度 Capillary porosity (y_4)	0.585	0.640	0.668	0.678
pH (y_5)	-0.392	-0.580	-0.568	-0.560
有机质 Organic matter (y_6)	0.639	0.869	0.836	0.772
全氮 Total nitrogen (y_7)	0.649	0.719	0.904	0.887
碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen (y_8)	0.672	0.639	0.721	0.647
全磷 Total phosphorus (y_9)	0.666	0.723	0.873	0.781
有效磷 Available phosphorus (y_{10})	0.605	0.628	0.587	0.560
速效钾 Available potassium (y_{11})	0.558	0.549	0.809	0.769

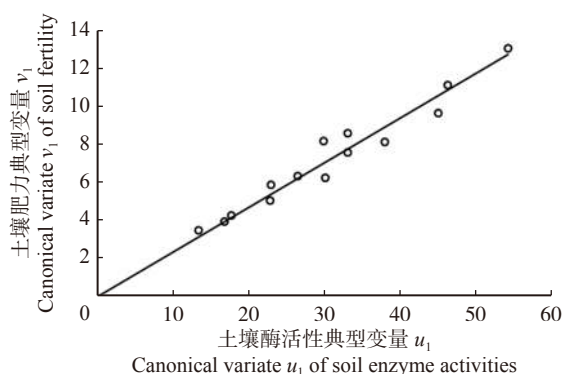
合因子起主要作用的是土壤密度(y_2)、毛管持水量(y_3)和毛管孔隙度(y_4);在第2对典型变量(u_2 、 v_2)中,对土壤酶活性综合因子起主要作用的是脲酶(x_2);对土壤肥力综合因子起主要作用的是有机质(y_6)和全氮(y_7)。说明土壤酶活性主要受脲酶、蔗糖酶的影响;土壤肥力受土壤密度、毛管持水量、毛管孔隙度、有机质和全氮的影响比较大。

典型变量的冗余分析结果显示,典型变量 u_1 可以解释 75.4% 的土壤酶活性变异,并能解释 60.4% 的土壤肥力变异,典型变量 v_1 可以解释 65.2% 的土壤肥力变异,并能解释 69.8% 的酶活性变异。将原

始数据代入第1对典型变量中,可得到典型变量 u_1 、 v_1 的得分(表5),根据不同林分样地的得分,可画出得分平面等值图,如图3所示。从图上可以看出2组变量呈线性相关,且拟合效果较好。不同样地两层土壤酶活性和肥力在综合因子 u_1 和 v_1 中的表现值大小呈现出一致的规律,由表3可以看出,随着土层的加深, u_1 和 v_1 数值出现明显降低,就不同样地而言, u_1 和 v_1 数值均表现出 III > IV > V > VI > II > VII > I, 即成熟林 > 伐后5年 > 伐后10年 > 伐后24年 > 近熟林 > 撂荒地 > 中龄林。这与上文皆伐天然更新对土壤物理性质、养分含量、酶活性影

表 5 各林分样地典型变量 u_1 、 v_1 得分Tab. 5 u_1 , v_1 scores for each sample plot

样地 Sample plot	土层 Soil depth	u_1 得分 u_1 score	v_1 得分 v_1 score
I	0 ~ 10 cm	22.98	5.89
II		29.85	8.18
III		54.15	13.08
IV		46.21	11.14
V		44.99	9.67
VI		33.02	8.59
VII		26.53	6.35
I	10 ~ 20 cm	13.45	3.48
II		17.78	4.29
III		37.96	8.13
IV		33.05	7.59
V		30.11	6.24
VI		22.86	5.06
VII		16.79	3.95

图 3 土壤肥力典型变量 v_1 与土壤酶活性典型变量 u_1 的相关关系图Fig. 3 Correlations between canonical variate v_1 of soil fertility and canonical variate u_1 of soil enzyme activities

响的分析结果一致,表明用典型相关分析能较好地解释土壤肥力与酶活性的相关关系。

3 讨论与结论

3.1 油松成熟林阶段土壤质量改善

从油松人工林生长周期来看,30~50年是油松人工林从中龄林发育到近熟林再到成熟林的过程。从本研究结果可以看出,成熟林(53年)与中龄林(32年)相比土壤物理性质、养分含量和酶活性均有显著的提高,这与陈雪等^[17]的研究结果一致。中龄林阶段油松进入胸径、树高快速生长期,林木间养分竞争激烈,土壤肥力消耗大,而通过凋落物分解向土壤返回的养分不足,因此土壤质量较差^[18]。随林龄增加土壤质量的改善可能与一定强度间伐后林分密度降低有关,林内出现大面积林窗^[19],林内光照增

强,林下植被增多,且进入成熟林阶段林木对土壤肥力消耗较低,土壤状况因此有所改善。党鹏等^[20]、邱新彩等^[21]的研究得出油松人工林随着林龄的增加土壤理化性质持续改良的结论,认为营造油松人工林可以显著提升土壤质量。本研究认为,相比中龄林,油松人工林在成熟林阶段土壤质量显著得到改善。

3.2 皆伐后天然更新对维持土壤质量有利

皆伐收获木材会带走林地内大量的养分,但一些研究表明在皆伐收获后未观察到显著的养分损失^[22-25],本研究得出了与之相一致的结果。这可能是因为皆伐后迹地的水、热条件较好,有利于凋落物层的分解,此外地表裸露、土壤温度增加,促进了微生物活动,有利于有机物质的分解,因此在皆伐后初期迹地上土壤质量与成熟林相比并未出现明显的下降,其中土壤养分含量和酶活性不但没有下降,反而有所提高,这也与陈立新^[26]的研究结果较为一致。

关于皆伐对土壤肥力较长期的影响,盛炜彤等^[27]和张鼎华等^[28]的研究表明,皆伐后林地养分损失较大,虽然会在短期内增加一些有效养分,使土壤肥力得到一定程度的改善,但由于大量有机质的损失和养分的迁移,最终林地土壤会呈现衰退的趋势。本研究中,皆伐后24年林内天然更新减少,土壤物理性质、养分含量和酶活性均出现了一定程度的下降。这可能是因为皆伐后剩余物和凋落物分解所积累的养分被植物吸收消耗,随着林分逐渐郁闭、光照减弱,凋落物分解速度逐渐降低,因此土壤质量开始出现下降。相关研究表明皆伐后损失的养分可以通过施肥和竞争植被控制得以补偿^[29-30],本研究皆伐后全氮含量下降明显,皆伐迹地可能存在氮流失^[31],建议补植豆科固氮树种或进行施肥。此外值得关注的是,本研究结果显示皆伐后24年天然更新林土壤质量总体好于皆伐前的近熟林,其中土壤物理性质差异显著,土壤养分含量和酶活性差异不显著,这说明油松人工林皆伐后土壤质量的下降并不像杉木等树种一样严重,何佩云等^[32]关于连栽马尾松土壤肥力变化的研究也得出同一发育阶段(幼龄林、中龄林)皆伐后林分土壤质量更好的结果。而随着时间的推移,油松人工林皆伐后依靠天然更新成林的土壤质量能否维持在较高的水平以保证林分的生产力仍需进一步长时间的观测。

皆伐会对森林环境造成较为严重的破坏,但从本文的研究结果看,油松人工林皆伐后依靠天然更新再次成林对土壤肥力与酶活性整体上是有益的。对照撂荒地,伐后天然更新林的土壤质量有明显的改善,且差异显著。在0~10 cm土层中,皆伐后8年撂荒地与成熟林相比毛管持水量、全氮、有效磷含

量分别下降了 16.9%、174.6%、57.7%，而皆伐 10 年后天然更新林与成熟林相比毛管持水量、全氮、有效磷含量仅下降了 2.8%、57.2%、1.0%。满秀玲等^[33]关于采伐与造林对土壤质量影响的研究也得出较一致的结果，皆伐后及时进行植被恢复可以充分利用迹地土壤的肥力，这些土壤养分如不能及时被植物吸收利用将会随着降水大量流失。王改玲等^[34]的研究得出油松可以促进土壤质量改善，本研究认为油松在皆伐迹地上的天然更新是缓解地力衰退的有效途径，在一定程度上实现了地力的自我维持。

3.3 土壤肥力与酶活性变化具有一致性

油松人工林皆伐前后不同样地的土壤质量随土层深度的增加而逐渐降低，尤其是土壤养分含量和酶活性具有明显的表聚效应，这与程瑞梅等^[35]和耿玉清等^[36]的研究结果较一致。这是因为 0~10 cm 土层腐殖质含量较大，微生物活动较活跃，且地表覆盖枯枝落叶，为表层土壤养分的积累和富集提供了良好的条件。自然条件下土壤酶活性是在一定 pH 范围内显示出来的，本研究中各样地 pH 值为 6.0~6.5 左右，符合所测土壤酶要求的最适 pH 范围。关于土壤酶活性与土壤肥力的相关性，大量研究表明，土壤酶与土壤肥力因子之间存在着显著的相关关系，不同种类的土壤酶活性与土壤肥力指标的相关性不同^[37-40]，这与本文的研究结果一致。本研究中，土壤肥力和酶活性在不同样地间的变化规律一致，典型相关分析结果显示土壤肥力主要受土壤密度、毛管持水量、毛管孔隙度、有机质、全氮的影响，土壤酶活性主要受脲酶和蔗糖酶的影响，它们所代表的典型变量之间具有极显著的相关性，这些指标可作为衡量土壤肥力和酶活性的关键因子。

参 考 文 献

- [1] 沈国舫. 集约育林-世界林业研究的主要课题 [J]. 世界林业研究, 1991(3): 1-6.
Shen G F. Intensive afforestation-the main topic of world forestry research[J]. World Forestry Research, 1991(3): 1-6.
- [2] Evans J. Sustainability of forest plantations: a review of evidence and future prospects[J]. International Forestry Review, 1999, 1(3): 153-162.
- [3] 杨玉盛. 杉木林经营模式及可持续利用的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 1997.
Yang Y S. Study on the management mode and sustainable utilization of Chinese fir forest[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 1997.
- [4] 温佐吾. 不同密度 2 代连栽马尾松人工林生产力水平比较 [J]. 浙江农林大学学报, 2004, 21(1): 22-27.
Wen Z W. Comparison of productivity between first and second rotation stands of *Pinus massoniana* planted in different densities[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2004, 21(1): 22-27.
- [5] 杨承栋. 中国主要造林树种土壤质量演化与调控机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Yang C D. Quality evolution and cultivation mechanism of soil for Chinese main afforestation plantation[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响 [J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 595-608.
Gu X, Zhang S J, Liu Z D, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon concentration and density in the mid-subtropical region of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(5): 595-608.
- [7] 杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子 [J]. 林业科学, 2016, 52(12): 1-12.
Yang C D. Decline of quantity and quality of soil organic matter is the key factor restricting the growth of plantation in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(12): 1-12.
- [8] 马祥庆, 黄宝龙. 人工林地力衰退研究综述 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1997, 21(2): 77-82.
Ma X Q, Huang B L. Advance in research on site productivity decline of timber plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 1997, 21(2): 77-82.
- [9] 段春华, 翟建平, 杜立民. 杨树人工林地力衰退研究现状及防止措施 [J]. 山东林业科技, 2009(2): 97-101.
Duan C H, Zhai J P, Du L M. Research status and preventive measures of poplar plantation degradation[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2009(2): 97-101.
- [10] Henri C J. Soil-site productivity of *Gmelina arborea*, *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* forest plantations in western Venezuela[J]. Forest Ecology & Management, 2001, 144(1): 255-264.
- [11] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [12] Bueis T, Turrión M B, Bravo F, et al. Factors determining enzyme activities in soils under *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* plantations in Spain: a basis for establishing sustainable forest management strategies[J/OL]. Annals of Forest Science, 2018, 75: 34 [2018-10-15]. <http://doi.org/10.1007/S13595-018-0720-Z>.
- [13] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价 [J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: concept, indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 901-913.
- [14] 张海鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 子午岭典型植被凋落叶-土壤养分与酶活性特征 [J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2262-2270.
Zhang H X, Zeng Q C, An S S, et al. Soil enzyme activities, soil and leaf litter nutrients of typical vegetation in Ziwoiling Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2262-2270.

- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [17] 陈雪, 马履一, 贾忠奎, 等. 影响油松人工林土壤质量的关键指标[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 46-51.
- Chen X, Ma L Y, Jia Z K, et al. Study of key indexes affecting soil quality in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(8): 46-51.
- [18] 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 油松人工林土壤质量的演变[J]. 林业科学, 2008, 44(9): 76-81.
- Li G L, Liu Y, Li R S, et al. Change of soil quality affected by forest age of *Pinus tabuliformis* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(9): 76-81.
- [19] 邵英男, 田松岩, 刘延坤, 等. 密度调控对长白落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(6): 51-59.
- Shao Y N, Tian S Y, Liu Y K, et al. Effect of density control on soil respiration in *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(6): 51-59.
- [20] 党鹏, 王乃江, 王娟婷, 等. 黄土高原子午岭不同发育阶段油松人工林土壤理化性质的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 115-121.
- Dang P, Wang N J, Wang J T, et al. Change of soil physical-chemical properties of *Pinus tabuliformis* plantations at different developmental stages in Ziwuling region of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Sciences Edition), 2014, 42(6): 115-121.
- [21] 邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 221-229.
- Qiu X C, Peng D L, Li W L, et al. Soil physicochemical properties of *Pinus tabuliformis* plantations of different ages in Yanqing, Beijing[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2018, 24(2): 221-229.
- [22] Johnson C E, Johnson A H, Huntington T G, et al. Whole-tree clear-cutting effects on soil horizons and organic-matter pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(2): 497-502.
- [23] Simard D G, Fyles J W, Pare D, et al. Impacts of clearcut harvesting and wildfire on soil nutrient status in the Quebec boreal forest[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(2): 229-237.
- [24] Hynes H M, Germida J J. A chronosequential approach to investigating microbial community shifts following clearcutting in Boreal Plain forest soils[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 42(12): 2078-2089.
- [25] Jang W, Pagedumroese D S, Keyes C R. Long-term soil changes from forest harvesting and residue management in the northern rocky mountains[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80: 727-741.
- [26] 陈立新. 落叶松人工林土壤质量变化规律与调控措施的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- Chen L X. Studies on changing rules of soil quality, adjustment and control measures in *Larix olgensis* plantations[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2003.
- [27] 盛炜彤, 范少辉. 杉木人工林的育林干扰对长期立地生产力的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(5): 37-43.
- Sheng W T, Fan S H. Impact of cultivation activities on the long term site productivity of Chinese fir plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(5): 37-43.
- [28] 张鼎华, 范少辉. 亚热带常绿阔叶林和杉木林皆伐后林地土壤肥力的变化[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(2): 115-119.
- Zhang D H, Fan S H. Changes of soil fertility in the evergreen broad-leaved and Chinese fir forest lands in sub-tropical after clear cuttings[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(2): 115-119.
- [29] Slesak R A, Harrington T B, Peter D H, et al. Effects of intensive management practices on 10-year Douglas-fir growth, soil nutrient pools, and vegetation communities in the Pacific Northwest, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 365: 22-33.
- [30] Zhao D, Kane M, Borders B E. Growth responses to planting density and management intensity in loblolly pine plantations in the southeastern USA Lower Coastal Plain[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68(3): 625-635.
- [31] 秦倩倩, 王海燕. 基于 Meta-analysis 的土壤氮素对采伐的响应研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 90-97.
- Qin Q Q, Wang H Y. Response of soil nitrogen to cutting intensity based on meta-analysis[J]. *Forest Research*, 2018, 31(4): 90-97.
- [32] 何佩云, 丁贵杰, 谌红辉. 连栽马尾松人工林土壤肥力比较研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(3): 357-362.
- He P Y, Ding G J, Shen H H. Comparison on soil fertilities of masson pine plantations of different generations[J]. *Forestry Research*, 2011, 24(3): 357-362.
- [33] 满秀玲, 屈宜春, 蔡体久, 等. 森林采伐与造林对土壤化学性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 1998, 26(4): 14-16.
- Man X L, Qu Y C, Cai T J, et al. Effect of forest harvesting and afforestation on chemical property of soil[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(4): 14-16.
- [34] 王改玲, 王青杵. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对土壤质量的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1487-1491.
- Wang G L, Wang Q C. Effects of artificial vegetation types on soil quality in loess hilly area in northern Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1487-1491.
- [35] 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 等. 三峡库区植被不同演替阶段的土壤养分特征[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 1-6.
- Cheng R M, Xiao W F, Wang X R, et al. Soil nutrient characteristics in different vegetation successional stages of Three Gorges Reservoir area[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(9): 1-6.
- [36] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京山地森林的土壤养分状况[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 169-175.
- Geng Y Q, Yu X X, Yue Y J, et al. Variation of forest soil

- nutrient content in mountainous areas, Beijing[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(5): 169-175.
- [37] 耿玉清, 白翠霞, 赵铁蕊, 等. 北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 7-11.
Geng Y Q, Bai C X, Zhao T R, et al. Soil enzyme activity and its relationship with the soil fertility in Badaling Mountain Area of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 7-11.
- [38] 李玥, 张金池, 李奕建, 等. 上海市沿海防护林下土壤养分、微生物及酶的典型相关关系 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 360-366.
Li Y, Zhang J C, Li Y J, et al. Canonical correlations of soil nutrients, microorganism and enzyme activity of coastal protective forest in Shanghai[J]. *Ecology and Environment Science*, 2010, 19(2): 360-366.
- [39] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 445-454.
Ye X F, Yang C, Li Z, et al. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 445-454.
- [40] 孙双红, 陈立新, 李少博, 等. 阔叶红松林不同演替阶段土壤酶活性与养分特征及其相关性 [J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 20-28.
Sun S H, Chen L X, Li S B, et al. Characteristics of soil enzyme activity and nutrient content and their correlations at different succession stages of broadleaf-Korean pine forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(2): 20-28.

(责任编辑 崔艳红
责任编辑 孟平)