

DOI: 10.5846/stxb201409221877

舒媛媛, 黄俊胜, 赵高卷, 包维楷, 李根前, 庞学勇. 青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分影响. 生态学报, 2016, 36(2): - .
Shu Y Y, Huang J S, Zhao G J, Bao W K, Li G Q, Pang X Y. Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): - .

青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分影响

舒媛媛^{1,2}, 黄俊胜^{2,3}, 赵高卷¹, 包维楷², 李根前¹, 庞学勇^{2,*}

1 南林业大学, 昆明 650224

2 国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041

3 国科学院大学, 北京 100049

摘要:为评价不同树种人工林对土壤酶及养分的影响,选择立地条件和营林方式相同的 4 种人工林(连香树 [CJ]、油松 [PT]、落叶松 [LK] 和华山松 [PA])为研究对象,以落叶灌丛 (QC) 为对照,比较不同树种人工林地土壤酶活性和土壤养分的变化。结果显示:(1)造林降低了土壤酸性磷酸酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性,但人工造林后土壤脲酶活性增加;(2)造林也明显影响了土壤养分,与对照林地相比,除 CJ 人工林土壤中磷 (P) 略高外,造林地土壤有机碳 (TOC)、氮 (N)、水可提取有机碳 (WEOC) 和氮 (WEO-N)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 均降低;(3)不同的人工林树种之间土壤养分及酶活性也存在一定的差异性,CJ 和 LK 人工林土壤 C、N、P 及相关酶活性明显不同于 PT 和 PA 人工林;(4)土壤酶与养分变化有一定的相关性,除转化酶和多酚氧化酶反应较迟钝外,其它酶对环境反应较敏感。综合分析表明,在川西地区选择高密度单一树种造林并没有改善土壤养分和酶活性,在该地区选择落叶或阔叶树种造林可使土壤肥力恢复。

关键词:青藏高原东缘; 不同树种; 人工林; 土壤养分; 土壤酶活性; 生态恢复

Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China

SHU Yuanyuan^{1,2}, HUANG Junsheng^{2,3}, ZHAO Gaojuan¹, BAO Weikai², LI Genqian¹, PANG Xueyong^{2,*}

1 University of Southwest Forestry, Kunming 650224, China

2 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization of Chinese Academy of Sciences, and Ecological Restoration and Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Afforestation is known to be the main source of restoration of degraded soil fertility and a driving force of soil processes. Plant species affect quantity and quality of carbon resources in the rhizosphere, which influence the composition and diversity of microbial community in these environments. Different plant species promote proliferation of different microbial communities by releasing different amounts and types of root exudates. Moreover, plants may directly or indirectly affect soil nutrient availability by altering soil enzyme activities through releasing extracellular enzymes and/or altering microbial community that is known to be major contributors of enzyme activities in soil. However, few studies have been conducted to elucidate the effects of afforestation with different tree species on enzyme activities and nutrients in soil. To

基金项目:国家基金项目 (31270492), 国家“十二五”科技支撑计划子课题 (2011BAC09B04-02); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05070306)

收稿日期: 2014-09-22; 修订日期: 2015-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pangxy@cib.ac.cn

evaluate the changes in enzyme activities and nutrients in soil after 26 years (1987—2013) of afforestation with different tree species, four plantations stands with dominant tree species (e.g., *Cercidiphyllum japonicum* [CJ], *Pinus tabulaeformis* [PT], *Larix kaempferi* [LK], and *Pinus armandii* [PA]) were selected, and a native broad-leaf forest (QC) was used as control. Four plantations were cultivated under similar site conditions and same planting patterns. Seven soil enzymes including soil urease, acid phosphatase, invertase, β -glucosidase, dehydrogenase, catalase, and polyphenol oxidase, their activities, and soil nutrients were determined. Our results showed that: (1) Afforestation significantly influenced soil enzyme activities. For example, compared with QC, afforestation with CJ, PT, LK, and PA decreased soil acid phosphatase, β -glucosidase, dehydrogenases, and catalase activities, whereas activity of soil urease was significantly higher in CJ and LK plantations than in other stands; (2) Afforestation also significantly affected soil nutrient content. Except for total phosphates, soil total organic carbon, total nitrogen, water extractable carbon and nitrogen, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N were significantly lower in the four plantations than in the QC stand; (3) Enzyme activity and nutrient availability was higher in LK and CJ plantations, than in PT and PA plantations; (4) Soil enzyme activities were correlated to soil nutrients depending on specific enzymes. Except for invertase and catalase, activities of other five soil enzymes examined in this study were sensitive to changes in soil environment, especially to the nutrient content. Our results suggested that high-density afforestation with monoculture decreased soil nutrients and soil enzyme activities. Additionally, deciduous or broad-leaved tree species (e.g., LK or CJ) can be appropriate for restoration of soil fertility by afforestation and structure modification of monoculture plantation. We concluded that soil enzymes are a good indicator of change in soil fertility induced by afforestation with different tree species or land use change.

Key Words: eastern Qinghai-Tibetan Plateau; tree species; plantation; soil nutrients, soil enzyme activities; ecological restoration

川西人工林是青藏高原东缘最具代表性的植被类型之一,20世纪80年代以来,该地区原始林被逐渐砍伐破坏,造成水土流失严重,养分日趋贫瘠、生态系统遭到严重破坏,生态功能下降等问题。结合天然林保护和退耕还林(草)工程,在采伐迹地灌丛的基础上进行了大规模的人工造林^[1],目前已形成多种针叶或阔叶为优势的同龄林^[2-3]。但是由于这些人工林存在林分结构单一、物种多样性贫乏、林地土壤酸化从而导致肥力下降、生态服务功能弱、病虫害风险大等问题^[4-8]。尽快提高人工林生态功能,维持高效的人工林生态系统一直是当前该地区的重要任务。改善现有人工林生态服务功能的前提是弄清各人工林的土壤肥力状态,特别是土壤养分及酶活性等是林分生长发育的基础,而这一一直较少受到关注。

土壤酶是土壤中的生物活性物质及生物化学过程的积极参与者,是联系“植物-土壤酶-土壤养分”的联系纽带,在土壤生态系统的物质循环和能量转化中具有重要作用^[9-11],能较客观地反映土壤质量的变化状况^[12-13],间接影响到土壤中碳、氮、磷等元素的循环。土壤养分是植物生长发育的基础,植被对土壤养分有效性及生物学过程具有重要决定性的作用。土壤酶活性的变化规律不仅与群落的演替有关,而且与植物的类型及养分有效性有关^[14]。不同人工林树种对土壤养分的吸收利用和土壤的反馈作用是树种竞争取胜的一个重要的驱动机制^[15],植物通过凋落物分解或根分泌物调节根际土壤养分有效性及土壤酶活性^[16]。不同人工林植被类型下的土壤酶活性和肥力不同^[17-18],混交林则能提高土壤养分有效性和酶活性^[18-19]。另外,不同的植被优势群落结构差异明显,对微气候的影响也将不同,进而间接影响到土壤酶活性和养分的有效性,庞学勇等^[20]研究表明,针叶人工林相比阔叶人工林林下微气候环境不同,其吸水程度和分解程度缓慢会导致林地有大量的养分滞留。因此我们假设通过阔叶树种造林替代当地落叶灌丛,能促进土壤养分恢复,酶活性增加;相反,使用针叶纯林造林,将造成土壤肥力退化,养分循环受阻,酶活性降低。通过研究不同树种或植被下土壤酶活性及养分有效性的关系将有助于提高树种对土壤肥力的改善认识,同时也有助于低效人工林的结构调整和土壤肥力恢复对管理和调控人工林和土壤生态恢复有着重要的意义。

本研究选择人工造林 26 年后,立地条件和营林方式相同的 4 种人工林,并以自然恢复的乡土灌丛为对照,通过对不同树种林下土壤碳、氮、磷养分特征及酶活性比较分析,探明不同树种造林恢复对土壤养分有效性及酶活性的影响,比较各人工林间土壤养分及酶活性的差异,监测或指示其土壤于生态恢复中的健康或退化状况,分析其原因,为土壤生态恢复提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究位于岷江上游大沟流域—中国科学院茂县山地生态系统定位研究站(103°54'E,31°42'N,海拔 1826 m)站区。该区气候类型属山地温带气候,年日照时数 1373.8 h,年日照百分率 31%;年均温 9.3 °C,极端最高气温 30.9 °C,极端最低气温-13.5 °C,最冷月 1 月平均气温-0.9 °C,最热月 7 月平均气温 18.6 °C,≥10 °C 年有效积温 954.1 °C,无霜期 215 天;年降雨量 825.2 mm,年蒸发量 968.7 mm,年均相对湿度 81.1%。自然植被以次生阔叶灌丛为主,80 年代初的大面积植被恢复重建形成了大面积人工林,仅川西地区郁闭成林人工林面积就有 $4.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[4],土壤类型主要为褐土^[9]。本研究选择的四种人工林分别为油松(*Pinus tabulaeformis*) [PT]、华山松(*Pinus armandi*) [PA]、落叶松(*Larix kaempferi*) [LK]、连香树(*Cercidiphyllum japonicum*) [CJ],以次生灌丛为对照。油松和华山松为常绿针叶树种,落叶松为落叶针叶树种,而连香树为落叶阔叶树种,次生灌丛(QC)主要以落叶槲栎(*Quercus aliena*)和川榛(*Corylus heterophylla* var. *sutchuenensis* Franch.) 为主。人工林与次生灌丛样地彼此相邻,其地形和土壤条件相似。人工林恢复重建前,主要植被类型为针阔混交林破坏后形成的次生山地落叶阔叶灌丛和箭竹灌丛,1985 年砍伐次生灌丛后,1986 年打窝种植,人工林树苗为 3—4 年生小树苗,初植密度为 3300 株/hm²,后期根据成活状况,进行适当补植。人工林后期管理措施均相同,生长期间没有添加任何肥料。

1.2 实验设计

1.2.1 样地基本情况

于 2013 年 7 月进行背景调查选择背景一致的油松、华山松、落叶松、连香树和次生灌丛样地,包括林木生长参数,海拔,坡度和坡位等(表 1)。

所有林地郁闭度均较高,均保持在 80%—98%间,其中华山松最高(98%),落叶松最低(80%)。各植被的胸径和树高呈显著正相关,即胸径和树高都表现为落叶松>连香树>华山松>油松>灌丛,各替代树种生长显著优于灌丛。其中,生长最佳的落叶松树高和胸径分别是灌丛的 3.8 倍和 2.5 倍。年凋落物现储量大小为华山松($5.1 \times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)>落叶松($4.8 \times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)>灌丛($4.4 \times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)>油松($4.2 \times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)>连香树($3.6 \times 10^3 \text{ kg hm}^{-2}$)。可见,人工林替代灌丛后,生物量等指标显著增加。

表 1 研究区不同次生植被样地基本特征

Table 1 The basic information of different secondary vegetations in this study area

人工林类型 Forest type	海拔/m Elevation	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	郁闭度 Canopy density	树高/m Tree height	胸径/cm DBH	年凋落物量/($\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$) Annual litter fall
连香树(CJ)	2050	西北	14°	0.88	10.2	11.4	3.6
油松(PT)	2060	西北	10°	0.95	8.4	10.0	4.2
华山松(PA)	2080	西北	7°	0.98	9.8	11.1	5.1
落叶松(LK)	2085	西北	17°	0.80	11.3	12.9	4.8
灌丛(QC)	2000	西北	25°	0.85	3.0	5.2	4.4

CJ:连香树(*Cercidiphyllum japonicum*);PT:油松(*Pinus tabulaeformis*);PA:华山松(*Pinus armandii*);LK:落叶松(*Larix kaempferi*);QC:落叶阔叶灌丛 Native broad-leaf forest

1.2.2 土样采集方法

在相似地形条件下,选择 4 个不同树种人工林和 1 个次生灌丛作为研究林地,在每一个林地内,分别随机

设置5块不连续样地,样地之间间隔至少为50 m,每一样地内设置1个乔木调查样方(10 m×10 m),在每一个样方内按上、中、下坡位分别设3个土壤采样点,在每个取样点用直径5 cm的不锈钢土钻分0—10 cm和10—20 cm层进行土样采集,采用十字交叉法,对同一样方同一层次土壤样品充分混合后,取1000 g左右混合样。将野外采集的土壤样品去除细根和石块过2 mm孔筛,分成两份,一份鲜土置4℃下保存用于酶活性和其它需要鲜土壤样品指标的测定,所有鲜样指标均在10天内室内分析。另一份置于阴凉干燥通风处风干,用于土壤pH,土壤有机碳(TOC)、全氮(TN)和全磷(TP)等指标的测定。

1.2.3 测定方法

(1)土壤理化性质测定参照《土壤农化分析手册》^[21-23]。土壤pH采用水土比为2.5:1的酸度计测定;土壤有机碳TOC和全氮TN采用干烧法-元素分析仪法;TP采用酸溶钼锑抗比色法;土壤水溶性有机碳(Water extractable organic carbon, WEOC)和水溶性有机氮(Water extractable organic nitrogen, WEON)用土水比1:5的去离子水浸提后,采用TOC分析仪测定;土壤铵态氮(NH₄⁺-N)采用靛酚蓝比色法;硝态氮(NO₃⁻-N)采用紫外分光光度法。

(2)土壤酶活性测定参照《土壤酶测定方法及其应用》^[24]。脲酶采用苯酚-次氯酸钠比色法^[22];酸性磷酸酶采用磷酸对硝基酚比色法;转化酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法; β -葡萄糖苷酶采用对硝基酚比色法;脱氢酶采用甲醇比色法;过氧化氢酶采用0.02 M KMnO₄滴定法;多酚氧化酶采用0.01 M I₂滴定法;需要说明,土壤酶活性测定只分析了0—10 cm土壤层。

1.3 数据统计

根据土壤TOC, TN和TP,我们分别计算了不同人工林土壤地C/N, C/P和N/P比。对同一土壤层不同植被类型间土壤养分及酶活性指标我们采用单因素方差分析(One-way ANOVA),其差异性检验采用最小二乘法(Least significant difference, LSD)检验法,显著性水平为p<0.05。土壤酶活性与土壤养分等指标的相关分析采用person相关分析法。所有统计检验均用SPSS 19.0软件完成,所有图均在Origin 8软件内完成。

2 结果与分析

2.1 不同树种造林对土壤碳、氮、磷的影响

在相似的地形、土壤条件及管理措施下,不同树种造林形成人工林后对土壤理化性质产生明显的影响(表2),但土壤pH在各植被类型之间差异不显著(P>0.05),各人工林pH为5.5—6.0之间,土壤为弱酸性。

表2 不同植被类型间土壤化学性质比较

Table 2 Soil chemical properties in the different plantations and shrub land

林地 Forest type	土层 Soil depths	pH	有机碳/(g/kg) Organic C	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	C/N	C/P	N/P
灌丛 QC	0-10cm	5.84(0.25) a	54.57(9.76) a	5.07(0.51) a	0.50(0.01) b	10.71(0.80) ab	109.01(19.29) a	10.11(1.03) ab
	10-20cm	6.01(0.26) a	29.50(2.86) a	3.15(0.30) a	0.35(0.07) ab	9.37(0.26) b	84.93(10.03) a	9.07(1.06) a
连香树 CJ	0-10cm	5.44(0.07) b	39.55(2.31) b	3.55(0.14) b	0.57(0.09) a	11.16(0.36) a	72.64(8.23) b	6.50(0.59) c
	10-20cm	5.40(0.07) ab	24.06(1.67) b	2.39(0.17) b	0.50(0.05) a	10.02(0.38) ab	48.72(6.52) d	4.85(0.51) c
油松 PT	0-10cm	5.08(0.10) c	23.48(2.78) c	2.15(0.18) c	0.2(0.02) d	10.84(0.49) a	112.39(9.32) a	10.35(0.93) a
	10-20cm	5.13(0.08) b	13.89(1.03) c	1.39(0.10) c	0.16(0.01) c	10.02(0.38) ab	84.81(4.30) b	8.47(0.48) ab
华山松 PA	0-10cm	5.32(0.09) bc	25.93(1.67) c	2.44(0.10) c	0.26(0.02) c	10.60(0.39) ab	102.31(17.49) a	9.64(1.37) ab
	10-20cm	5.29(0.21) b	15.33(1.89) c	1.63(0.12) c	0.23(0.01) b	9.35(0.67) b	65.91(10.54) c	7.02(0.70) b
落叶松 LK	0-10cm	5.60(0.15) ab	39.00(5.35) b	3.53(0.40) b	0.38(0.04) bc	11.01(0.37) a	106.15(11.48) a	9.62(0.74) b
	10-20cm	5.45(0.17) ab	22.27(2.84) b	2.20(0.21) b	0.31(0.01) b	10.07(0.51) a	74.03(8.16) bc	7.31(0.54) b

CJ:连香树(*Cercidiphyllum japonicum*); PT:油松(*Pinus tabulaeformis*); PA:华山松(*Pinus armandii*); LK:落叶松(*Larix kaempferi*); QC:落叶阔叶灌丛 Native broad-leaf forest;表中括号内的数值表示为标准差n=5;后面字母相同表明其同一土层树种间差异未达到显著水平 $\alpha = 0.05$

造林后,人工林地土壤C、N含量明显低于对照样地(P<0.05)(表2),如与QC土壤C(54.57 g/kg)和N含量(5.07 g/kg)相比,CJ、LK、PA和PT人工林土壤C含量分别下降27.6%、28.5%、52.5%和57.0%,土壤N

含量分别下降 29.98%、57.59%、51.87%和 30.37%。在不同的人工林中,LK 和 CJ 人工林土壤 C、N 含量明显高于 PA 和 PT 人工林;造林也明显影响了土壤 P 的含量($P<0.05$),除 CJ 人工林土壤 P 明显高于 QC 样地外,LK 人工林土壤 P 与 QC 没有明显差异,而 PA 和 PT 人工林土壤 P 含量明显低于灌丛样地,所以人工林土壤 P 含量的顺序为 CJ 人工最高,LK 人工林次之,PA 人工林大于 PT 人工林。造林并没有明显影响土壤 C/N($P>0.05$),但明显影响了土壤 C/P 和 N/P 比($P<0.05$),CJ 人工林土壤 C/P 和 N/P 明显低于对照的灌丛样地和其它人工林,主要原因可能为 CJ 人工林土壤有较高的 P 含量。

不同土层间(0—10 cm 和 10—20 cm)土壤 C、N 和 P 也存在明显地差异($P<0.05$),主要表现为 0—10 cm 层土壤 C、N 和 P 含量明显高于 10—20 cm 层(表 2),结果表明:CJ、PT、PA、LK 及 QC 的 10—20 cm 层土壤 C 含量分别较 0—10 cm 层低 39.16%、40.84%、40.87%、42.89%和 45.97%;土壤 N 含量较表层分别低 32.67%、35.34%、33.19%、37.67%和 40%;土壤 P 含量较表层分别低 12.28%、50%、11.53%和 40%。可见,人工造林后,尽管土壤 C、N 和 P 含量减少,但 0—10 cm 和 10—20 cm 之间的差异减少,可能与土壤层间养分迁移有关。

2.2 不同树种造林对土壤 WEOC 和 WEON 影响

除土壤 10—20 cm 层 WEON 外,造林明显影响了土壤 WEOC 和 WEON($P<0.05$)。CJ 和 PT 人工林土壤 WEOC 含量明显低于灌丛样地(图 1A);同样所有人工林土壤 WEON 也明显低于灌丛样地(图 1B)。在人工林土壤间,PA 人工林土壤 WEOC 明显高于其它人工林样地且和 LK 差异较小,其它人工林间没有明显差异;而土壤 WEON 在各人工林间没有明显地差异。土壤 WEOC 和 WEON 在各层次间差异不明显($P>0.05$)。

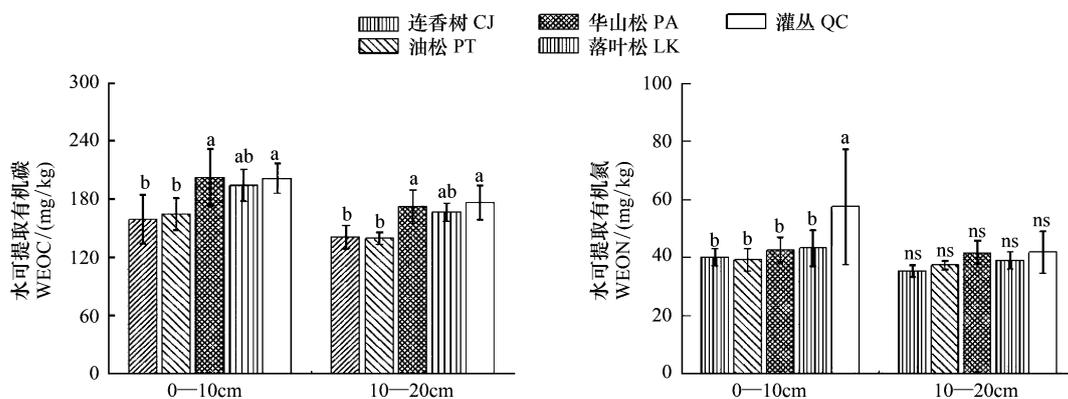


图 1 不同人工林及灌丛土壤可溶性有机碳(WEOC)和可溶性有机氮(WEON)比较

Fig. 1 Soil water extractable organic carbon (WEOC) and water extractable organic nitrogen (WEON) in the different plantations and shrub land

CJ:连香树(*Cercidiphyllum japonicum*);PT:油松(*Pinus tabulaeformis*);PA:华山松(*Pinus armandii*);LK:落叶松(*Larix kaempferi*);QC:落叶阔叶灌丛 Native broad-leaf forest

同一土层中,不同小写字母表示树种间存在明显的差异 $P<0.05$; ns: 无显著差异, ns, not significant.

2.3 不同树种造林对土壤有效 N($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 的影响

土壤速效氮对人工林生态系统的维护具有重要的作用,它不仅与土壤理化性质有关,而且影响着土壤酶与土壤微生物的活性。造林明显影响了土壤无机 N($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量(图 2A 和 2B)。人工造林明显降低了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量($P<0.05$),在不同人工林中,PA 人工林的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显高于 PT 人工林;同样,造林也明显降低了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量($P<0.05$),在不同人工林中 PT 和 PA 人工林土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 明显低于 CJ 和 LK 人工林。

在人工林各样地和对照样地中,0—10 cm 层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量略高于 10—20 cm 层, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 土层的差异大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。

2.4 不同树种造林对土壤酶活性影响

除土壤转化酶活性外,不同人工林替代灌丛后显著影响了土壤酶活性(图 3A-G) ($P<0.05$)。总体上,除

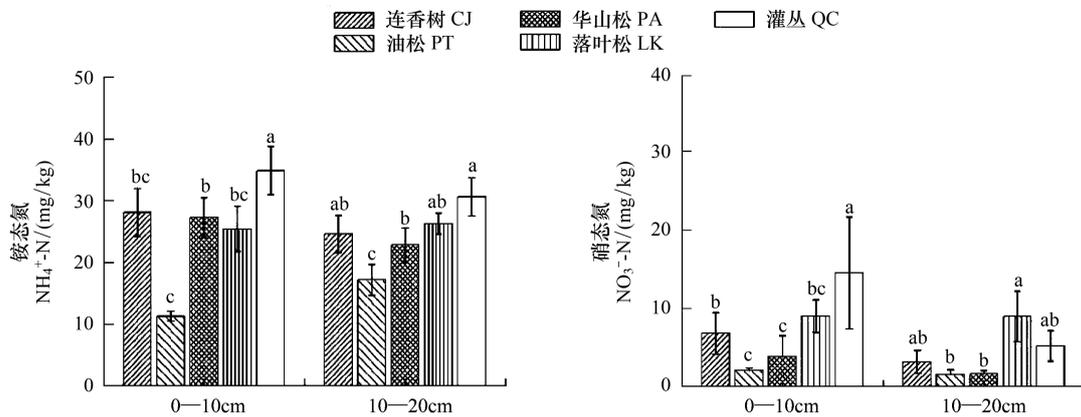


图 2 不同人工林及灌丛土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 比较

Fig. 2 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the different plantations and shrub land

CJ, 连香树 *Cercidiphyllum japonicum*; PT, 油松 *Pinus tabulaeformis*; PA, 华山松 *Pinus armandii*; LK, 落叶松 *Larix kaempferi*; QC, 落叶阔叶灌丛 Native broad-leaf forest.

同一土层中,不同小写字母表示树种间存在明显的差异 $P < 0.05$, The different small letters indicate significant difference across tree species in the same soil depth $P < 0.05$.

脲酶、转化酶和多酚氧化酶外,土壤酸性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶和过氧化氢酶活性在 QC 均高于各人工林地。

人工造林明显影响了土壤脲酶活性 ($P < 0.05$) (图 3A),除 LK 人工林与灌丛土壤脲酶活性没有明显差异外,CJ 和 PA 人工林土壤脲酶活性明显高于 QC 样地,PT 人工林明显低于 QC 样地;在不同人工林之间,土壤脲酶活性也差异明显 ($P < 0.05$),其活性在各人工林间呈现 $\text{CJ} > \text{PA} > \text{LK} > \text{PT}$,CJ 和 PA 人工林土壤脲酶活性显著大于其他树种人工林。土壤酸性磷酸酶活性在各人工林间呈现 $\text{LK} > \text{PT} > \text{CJ} > \text{PA}$,CJ 和 PA 人工林明显低于灌丛样地 ($P < 0.05$),其它各林间没有明显差异 (图 3B)。人工造林没有影响土壤转化酶活性 ($P > 0.05$) (图 3C),但各人工林间有显著差异 ($P < 0.05$),PT 人工林显著高于 CJ 和 PA 人工林,不同人工林土壤转化酶活性为 $\text{PT} > \text{LK} > \text{CJ} > \text{PA}$ 。人工造林明显影响了土壤 β -葡萄糖苷酶活性 ($P < 0.05$) (图 3D),除 CJ 人工林没有差异外,LK、PT 和 PA 人工林土壤 β -葡萄糖苷酶活性明显低于 QC 样地,各人工林之间没有明显的差异。土壤脱氢酶活性与土壤 β -葡萄糖苷酶在各林间表现一致,人工造林明显降低了土壤脱氢酶活性 ($P < 0.05$),但各人工林之间没有明显的差异 (图 3E)。与土壤脱氢酶一样,人工造林明显降低了土壤过氧化氢酶活性 ($P < 0.05$),且各人工林之间存在明显的差异 (图 3F),为 $\text{LK} > \text{CJ} > \text{PT} > \text{PA}$ 。除 CJ 人工林土壤多酚氧化酶活性明显低于 QC 样地、PT 和 PA 人工林外,其它林间土壤多酚氧化酶活性没有明显差异 (图 3G)。

2.5 土壤酶活性与土壤理化性质的相关关系

土壤酶活性与土壤理化性质相关分析显示,除土壤转化酶与理化性质没有显著相关外,其余所检测土壤酶活性部分与土壤理化性质有显著相关关系 (表 3)。

3 讨论

3.1 造林树种差异对土壤碳、氮、磷的影响

不同人工林树种可通过影响森林生态系统结构和功能,通过影响林地微环境、凋落物产生量与分解,以及根系的周转等过程,进而对土壤 C、N、P 有不同程度的影响^[11,20]。本研究显示人工植树造林 26 年后,各人工林土壤 C、N、P 含量显著低于对照的灌丛样地 (表 2),同时人工林土壤 WEOC 和 WEON 也明显低于灌丛样地 (图 1),这也造成人工林土壤可利用 N ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 降低 (图 2)。单优势种人工林导致林地结构单一,林地小气候恶化 (如土壤水分低),物质循环受阻等可能是人工林土壤养分全面低于对照的灌丛样地的原

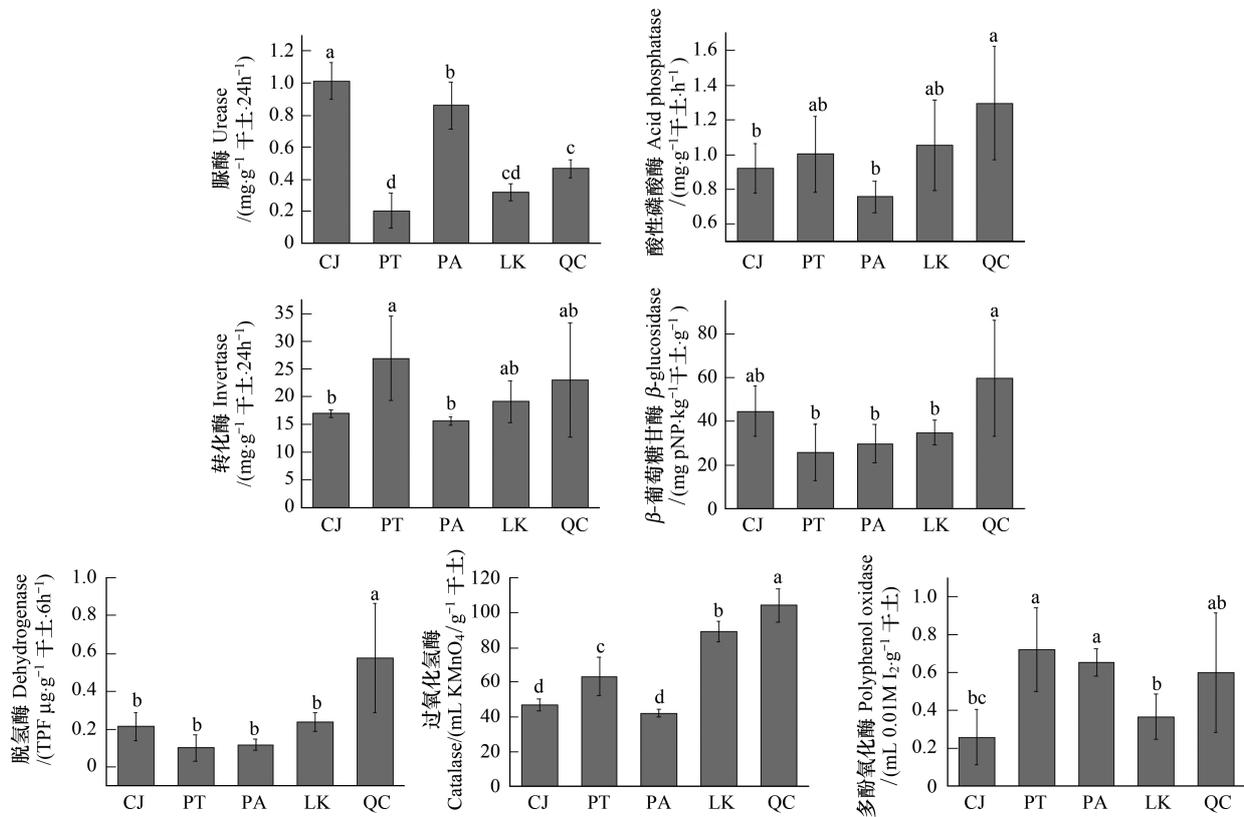


图3 不同人工林及灌丛土壤脲酶(A),酸性磷酸酶(B),转化酶(C), β -葡萄糖苷酶(D),脱氢酶(E),过氧化氢酶(F)和多酚氧化酶(G)活性比较

Fig. 3 Soil urease (A), acid phosphatase (B), invertase (C), β -glucosidase (D), dehydrogenase (E), catalase (F) and polyphenol oxidase (G) activities in the different plantations and shrub land

CJ:连香树(*Cercidiphyllum japonicum*);PT:油松(*Pinus tabulaeformis*);PA:华山松(*Pinus armandii*);LK:落叶松(*Larix kaempferi*);QC:落叶阔叶灌丛 Native broad-leaf forest;不同小写字母表示不同树种间存在明显的差异 $P < 0.05$

表3 土壤酶活性与土壤理化指标的相关关系

Table 3 The correlation of between soil enzymes activities and physic-chemical properties

指标 Index	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	转化酶 Invertase	脱氢酶 Dehydrogenase	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	过氧化氢酶 Catalase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase
Soil moisture	0.19	0.30	0.05	0.68**	0.79**	0.48**	-0.28
pH	0.05	0.38	0.11	0.60**	0.77**	0.69**	-0.31
OC	0.12	0.62**	0.06	0.90**	0.82**	0.65**	-0.25
TN	0.11	0.57**	0.01	0.88**	0.77**	0.664**	-0.29
TP	0.46*	0.24	-0.23	0.53*	0.63**	0.19	-0.65**
WEOC	-0.05	0.19	-0.15	0.31	0.27	0.32	0.18
WEON	-0.03	0.48*	0.34	0.79**	0.64**	0.54**	0.25
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.50**	0.07	-0.38	0.60**	0.56**	0.20	-0.30
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.05	0.41	0.14	0.86**	0.63**	0.69**	-0.16

* , $P < 0.05$; ** , $P < 0.01$. Soil moisture: 土壤湿度; pH: 土壤酸碱度; OC: 有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; WEOC: 水可提取有机碳; WEON: 水可提取有机氮; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 硝态氮

因^[20]。前期研究表明,人工林样地年凋落物量与灌丛样地没有明显差异,但在凋落物贮量上,人工林样地,特别是PA和PT人工林样地无论是数量和凋落物厚度上都明显大于灌丛样地^[20,22],这也部分证实了凋落物的归还或周转明显慢于灌丛样地,这也导致以凋落物为载体的C、N、P元素的归还人工林慢于灌丛样地。

尽管各人工林替代灌丛后,土壤 C、N、P 等养分低于灌丛样地,但在各人工林之间也存在差异(表 2)。研究显示落叶人工林(CJ 和 LK)土壤 C、N、P 显著高于常绿针叶纯林(PA 和 PT)。首先,不同树种凋落物分解、转化速率与贮量存在明显差异,人工林年凋落物量在各人工林间存在明显差异,尽管针叶人工林年凋落物量高于落叶人工林(表 1),但各人工林树种中凋落物分解速率呈现针叶人工林较落叶人工林慢^[20],因此,本研究中针叶人工林大量凋落物贮存于地被而难于返还,落叶人工林内土壤 C、N、P 高于针叶常绿纯林可能与大量养分保存在枯枝落叶层难于返还土壤和被植物利用有关^[20]。其次,树种差异对土壤 C、N、P 的影响也导致土壤 WEON、WEOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等活性养分不同。不同植被类型和土壤有机质数量是决定 WEOC 含量的主要因素^[25],CJ 人工林凋落物分解快,土壤有机质含量高,虽然可能贡献高的土壤 WEOC,但明显高的土壤水分加剧了土壤 WEOC 淋溶流失的可能^[26]。最后,树种差异对土壤 C、N、P 的影响另一个原因是植物根系分泌物引起的土壤酶活性差异导致的^[27]。落叶 LK 和 CJ 人工林土壤酶活性高于针叶人工林(PA 和 PT),说明落叶人工林下土壤可供酶利用的底物明显的高于常绿人工林,可利用土壤酶的底物差异是不同人工林土壤养分发生变化的重要驱动机制之一。

土壤 WEON、WEOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在不同的人工林之间也存在明显差异(图 1 和 2),但与土壤 C、N、P 不同的是含量高的人工林,其土壤 WEON、WEOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不一定高。如 CJ 人工林在土壤 C、N、P 含量最高,但 WEOC 和 WEON 含量却很低(图 1A),可能与阔叶林地土壤酶活性强(图 3),夏季有机质分解强烈,微生物活动也最旺盛,土壤 WEOC 和 WEON 处于不断产生和消耗的动态平衡中,阔叶人工林产生水解 WEOC、WEON 多,被微生物和土壤酶消耗的也多, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有效吸收旺盛;同时,取样时为 8 月,正值叶凋落物分解和淋溶的高峰期,PA 和 PT 人工林由于地面贮存了大量凋落物,相反,CJ 由于前期的快速分解,地面较少有存量凋落物,导致 CJ 人工林含有较低的土壤 WEOC。因此,不同树种特性对土壤养分的影响是不同的,本研究表明人工造林选择落叶阔叶树种较针叶树种有更好的土壤改善效果。

3.2 造林树种差异对土壤酶活性影响

不同人工林土壤酶活性含量的差异主要受土壤生态条件、土壤类型、植被恢复阶段、土壤微生物、土壤肥力等多因素影响^[14-15,28-30]。本研究人工造林 26 年后,各人工林下土壤酶活性明显不同于对照灌丛样地,同时,不同的人工树种之间也存在一定的差异性,CJ 和 LK 人工林土壤 C、N、P 及相关土壤酶活性明显不同于 PT 和 PA 人工林(图 3)。土壤酶活性大小与土壤 C、N、P、可溶性 C 和 N、有效氮等有较一致的相关性(表 3),说明土壤酶活性对土壤 C、N、P 及 WEON、WEOC、有效氮等养分的含量有一定的贡献。

土壤脲酶是催化有机氮类化合物转化为无机氮类的酶类,它对含氮化合物具有活化作用^[24,31]。CJ 和 PA 人工林土壤脲酶活性高于 QC 样地(图 3A),土壤脲酶与全氮、WEON、铵态氮、硝态氮呈有一定的正相关性(表 3),表明该类人工林在生长季 N 素物质循环周转快,有机 N 转化为无机 N 比较多,用于植物吸收利用。土壤酸性磷酸酶能够酶促含 P 的有机化合物矿化,造林导致土壤酶活性低,但各人工林之间没有明显的差异(图 4B),说明人工造林导致土壤磷素改善(如 CJ 人工林)或土壤中磷素满足植物的吸收利用,但需要测定土壤有效 P 的含量进一步研究证实。而转化酶对土壤有机质的转化和增加可溶性具有重要作用^[24,31],相对于灌丛样地,人工造林并没有明显影响土壤转化酶活性,但 PT 人工林土壤转化酶活性明显高于 PA 和 CJ 人工林,说明 PT 人工林急需将土壤有机质转化为 WEOC 或 WEON,供应微生物生长或增加土壤养分的有效性供给植物生长,可从 PT 人工林内较低的土壤 WEOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 间接得到证实(图 1A 和图 2)。QC 及各人工林土壤 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶、过氧化氢酶活性与土壤 C、N、P 及 WEON、WEOC 有极显著的正相关性(表 3),说明其大小的变化能反应土壤肥力的特征,可用于指示土壤肥力的变化。多酚氧化酶与土壤有机质等形成密切相关,是促进腐殖质等酚类物质降解,与土壤腐殖化程度呈负相关,本研究显示人工林土壤过氧化氢酶与土壤 C、N、P 及 WEON、WEOC 呈负相关,且 CJ 和 LK 人工林土壤过氧化氢酶明显高于 PT 和 PA 人工林,说明落叶人工林(如 LK 和 CJ)土壤腐殖化程度高于针叶纯林(PA 和 PT),指示 PA 和 PT 人工林土壤粗腐殖质较多,土壤腐殖化程度较低,土壤肥力质量差^[22,31],进而说明 LK 和 CJ 人工林土壤有机质优于 PA 和 PT

人工林。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与土壤脲酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶呈极显著相关关系表明,土壤酶活性与土壤养分状况密切相关,同时也说明树种差异影响土壤酶的变化。总之,人工造林后土壤酸性磷酸酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢活性有不同程度的降低,土壤脲酶活性增加(图 3),表明人工造林对土壤肥力有一定影响,在各人工林间,土壤酶活性的变化是依赖具体的树种特性。

4 结论

(1)人工造林降低了土壤 C、N、P 等养分含量,除脲酶活性增加外,土壤酸性磷酸酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢活性也有不同程度的降低,说明在现存的人工林土壤肥力并没有得到根本改善,可能由于人工林初植密度过大、林分结构不合理和林下生物多样性低等原因导致的,要提高林地生态服务功能,急需对现有低效人工林的结构进行调整和改善。

(2)不同的人工林树种之间土壤养分和酶活性也存在差异性,CJ 和 LK 人工林土壤 C、N、P 及相关酶活性明显不同于 PT 和 PA。因此,在进行人工造林时尽量避免单一树种造林,在对低效林高密度人工林结构改造时,补植树种应尽量增添落叶或阔叶树。

参考文献(References):

- [1] 包维楷, 乔永康, 陈庆恒. 岷江上游典型油松人工幼林的生态环境效应. 山地学报, 2003, 21(6): 662-668.
- [2] 鲍文, 包维楷. 岷江上游中山区次生灌丛与人工油松林土壤理化性质比较研究. 水土保持通报, 2004, 24(5): 10-13.
- [3] 刘庆, 尹华军, 吴彦. 川西米亚罗亚高山地区云杉林群落结构分析. 山地学报, 2003, 21(6): 695-701.
- [4] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦等. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变. 生态学报, 2004, 24(2): 261-267.
- [5] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 林波, 吴彦, 何海, 包维楷等. 川西亚高山人工云杉林地有机物和养分库的退化与调控. 土壤学报, 2004, 41(1): 126-133.
- [6] 孙书存, 高贤明, 包维楷, 王中磊. 岷江上游油松造林密度对油松生长和群落结构的影响. 应用与环境生物学报, 2005, 11(1): 8-13.
- [7] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波等. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [8] 吴宁, 刘庆. 山地退化生态系统的恢复与重建——理论与岷江上游的实践. 成都: 四川科学技术出版社, 2007.
- [9] Richard G Burns, Richard P Dick. Enzymes in the Environment: Ecology, Activity and Applications. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [10] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 何维明等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系. 林业科学, 2001, 37(4): 124-128.
- [11] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. 林业科学, 2004, 40(2): 152-157.
- [12] Fu B J, Liu S L, Chen L D, Lü Y H, Qiu J. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape. Ecological Research, 2004, 19(1): 111-118.
- [13] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤酶活性和养分特征. 生态环境, 2008, 17(5): 2050-2058.
- [14] 杨万勤, 钟章成, 韩玉萍. 缙云山森林土壤酶活性的分布特征、季节动态及其与四川大头茶的关系研究. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1999, 24(3): 318-324.
- [15] Verónica Acosta-Martínez, Leo Crusz, David Sotomayor-Rmírez, Luis Pérez-Alegría. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 35-45.
- [16] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性. 林业科学, 2010, 46(1): 136-141.
- [17] 何斌, 温远光, 袁霞, 梁宏温, 刘世荣等. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究. 林业科学, 2002, 38(2): 21-26.
- [18] 孙翠玲, 郭玉文, 佟超然, 徐兰成, 王珍. 杨树混交林地土壤微生物与酶活性的变异研究. 林业科学, 1997, 33(6): 488-497.
- [19] 孙翠玲, 朱占学, 王珍, 佟超然. 杨树人工林地力退化及维护与提高土壤肥力技术的研究. 林业科学, 1995, 31(6): 506-512.
- [20] Pang X Y, Bao W K. Effect of substituting plantation species for native shrubs on the water-holding characteristics of the forest floor on the eastern Tibetan Plateau. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(3): 289-299.
- [21] 劳家桢. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1998: 234-321.
- [22] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [24] Jin K, Sleutel S, Buchan D, De Neve S, Cai D X, Gabriels D, Jin J Y. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 115-120.
- [25] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [26] 王清奎, 汪思龙, 高宏, 刘艳, 于小军等. 土地利用方式对土壤有机质的影响. 生态学杂志, 2005, 24(4): 360-363.
- [27] Zhang Y M, Wu N, Zhou G Y, Bao W K. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Applied Soil Ecology, 2005, 30(3): 215-225.
- [28] 廖利平, 汪思龙, 高洪. 杉木与亚热带主要阔叶造林树种凋落物的分解. 应用生态学报, 2000, 11(增刊): 141-145.
- [29] 李媛媛, 周运超, 邹军, 周玮, 房小晶, 王瑶等. 黔中石灰岩地区典型灌木林土壤酶活性与植物物种多样性研究. 水土保持研究, 2010, 17(3): 245-249.
- [30] 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特石漠化山地不同类型人工林土壤的基本性质和综合评价. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1050-1060.
- [31] 江元明, 庞学勇, 包维楷. 岷江上游油松与云杉人工林土壤微生物生物量及其影响因素. 生态学报, 2011, 31(3): 801-811.