

庐山不同林分类型土壤活性有机碳及其 组分与土壤酶的相关性

于法展, 张忠启, 沈正平, 尤海梅

(江苏师范大学 城市与环境学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:土壤活性有机碳直接参与土壤生物化学转化过程, 影响土壤酶活性, 对土壤养分有效化作用明显。以庐山 3 种不同林分类型下土壤为研究对象, 通过对不同林分下土壤活性有机碳及其组分与土壤酶活性状况进行相关分析。结果表明: (1) 3 种林分类型下 WSOC 和 DOC 平均含量排序均为阔叶林>针阔混交林>针叶林, 而 ROC 由大到小依次为针阔混交林>阔叶林>针叶林; 针阔混交林下 MBC 平均含量较高, 针叶林下 MBC 平均含量较低。 (2) 3 种林分类型下土壤蔗糖酶活性排序为针阔混交林>阔叶林>针叶林; 纤维素酶和酸性磷酸酶活性的大小顺序为针叶林>针阔混交林>阔叶林; 针阔混交林下脲酶活性最低, 阔叶林最高; 针阔混交林下多酚氧化酶活性最高, 阔叶林最低; 过氧化氢酶活性高低序列为阔叶林>针阔混交林>针叶林。 (3) 3 种林分类型下土壤蔗糖酶、纤维素酶等水解酶与土壤活性有机碳各组分的相关性较好, 多酚氧化酶、过氧化氢酶等氧化酶与土壤活性有机碳各组分之间没有表现出明显的相关性。

关键词:林分类型; 土壤活性有机碳; 土壤酶活性; 庐山

中图分类号: S159.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0078-05

Correlation of Soil Active Organic Carbon and Its Components as Well as Soil Enzyme Under Different Forests in Lushan

YU Fazhan, ZHANG Zhongqi, SHEN Zhengping, YOU Haimei

(College of Urban and Environmental Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Soil active organic carbon is directly involved in soil biochemical conversion, which affects soil enzyme activities and plays an important role in soil available nutrient contents. The relationship between soil active organic carbon, its components and soil enzyme under three types of forests in Lushan were analyzed. Results are as follows. Firstly, the average WSOC and DOC contents decreased in the order: broadleaved forest>mixed wood>coniferous forest, while the ROC contents from high to low level is mixed wood>broadleaved forest>coniferous forest. The average MBC under mixed wood was much more than those under the other two forests and coniferous forest was the lowest. Secondly, soil intertase activity under three types of forest decreased in the order: mixed wood>broadleaved forest>coniferous forest. Urease activity and polyphenol oxidase activity varied in the same order as that of soil invertase activity. cellulase and acid phosphatase activity from high to low level is coniferous forest>mixed wood>broadleaved forest, while catalase activity decreased with an opposite order. Thirdly, components of soil active organic carbon under three types of forests were closely related to soil invertase and cellulose activity but no obvious positive correlation was noted between components of soil active organic and polyphenol oxidase and catalase activity.

Keywords: types of forest; soil active organic carbon; activity of soil enzyme; Lushan

土壤活性有机碳(LOC)是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化及矿化, 并对植物和土壤微生物活性较高的那部分有机碳, 直接参与土壤生物化学转化过程, 在土壤养分循环中具有重要作用^[1]。LOC 包括众多高度游离的有机质, 如植物残渣、根类和真菌菌

丝、微生物量以及易被微生物利用和转化的有机质的多相混合物, 常可用水溶性有机碳(WSOC)、溶解性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和易氧化有机碳(ROC)等来进行表征^[2]。土壤酶来自土壤中微生物和高等植物, 也来自土壤动物和进入土壤的有机物

质,在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面扮演着重要角色^[3]。由于土壤酶是土壤有机质降解、矿质化和养分循环等的主要调节物质,因此,有关 LOC 的生态过程和功能研究实际上已经离不开土壤酶系统的研究。近年来,国内外对 LOC 和土壤酶活性分别进行的相关研究较多,主要集中以下方面^[4-11]:不同林分下土壤活性有机碳库研究;森林土壤有机碳含量及空间分布特征;土壤活性有机质及其与土壤质量的关系;不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化;人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系;模拟氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机碳和微生物量碳的影响;人工林土壤酶活性与养分的相关性;酸雨长期淋溶对土壤酶活性的影响等。但在定性研究 LOC 与土壤酶的相关性方面较少,且研究结果有一定的局限性。本文以庐山内典型林分类型下土壤为研究对象,系统深入研究不同林分类型下 LOC 及其组分与土壤酶活性之间的关系,旨在为评价区域森林土壤质量以及保持森林土壤生物化学肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庐山位于江西省北部九江市南郊,距九江市约

13 km,西北滨长江,东南临鄱阳湖,其地理坐标为 115°50′—116°10′E,29°28′—30°53′N,总面积 30 493 hm²,主峰大汉阳峰海拔 1 474 m,高出四周平原约 1 440 m。庐山地处亚热带东部季风区域,具有鲜明的季风气候特征;并且是一座中山,面江临湖,山高谷深,与周围平原地区相比较,具有鲜明的山地气候特征。山上典型林分类型有:(1)阔叶林类型,主要有常绿阔叶林、常绿—落叶阔叶混交林、落叶阔叶林三大植被型;(2)针叶林类型,目前主要有马尾松林、黄山松林、杉木林、柳杉林、日本扁柏林等,基本为人工林,少数为半人工林;(3)针阔混交林类型,通过人工方式种植的大量针叶林,有些与林内的阔叶树逐步演替成为针阔混交林,在山上不同海拔均有不同程度的分布,马尾松与常绿阔叶树组成的针阔混交林多分布在海拔 600 m 以下,黄山松与落叶阔叶树组成的针阔混交林多分布在海拔 900 m 以上。庐山发育的土壤从山麓到山顶依次分布:海拔 400 m 以下的红壤和黄壤、400~1 000 m 的山地黄壤、1 000~1 200 m 的山地黄棕壤以及 1 200 m 以上的山地棕壤。

1.2 土样采集与测定方法

2013 年 8 月在阔叶林、针叶林、针阔混交林 3 种不同林分类型下设立测试样地,随机采样调查其基本情况见表 1。

表 1 庐山不同林分类型下测试样地基本情况

采样地点	林分类型	土壤类型	主要树种	海拔/m	坡向	坡度/(°)
大月山上	阔叶林	山地棕壤	短柄枹、化香、灯台树	1250	NW	30~40
白鹿洞西		红壤	青冈栎、苦槠、香樟	360	SW	15~20
庐林桥下	针叶林	山地黄棕壤	柳杉、日本扁柏	1000	SW	25~35
石门涧下		山地黄壤	杉木	750	NW	20~30
天狗洞下	针阔混交林	山地黄棕壤	黄山松、茅栗、四照花	1100	NE	35~40
观音桥旁		山地黄壤	马尾松、苦槠、大叶栲	540	SE	15~25

其样地面积根据亚热带山地植被研究中的最小面积法,阔叶林取为 40 m×50 m,针叶林取为 20 m×25 m,每个样地设置 3 次重复,按混合法采集 0—20 cm 的土壤样本。土壤样品带回实验室后,分成 2 份,1 份鲜样去杂、过筛后贮藏于 4℃的冰箱内,采样结束后进行 WSOC,DOC 和 MBC 的测定;另 1 份风干、去杂、过筛后供 ROC 和土壤酶活性分析。WSOC 和 DOC 的测定采用有机碳分析仪法;MBC 的测定采用氯仿熏蒸法;ROC 的测定采用分光光度计法。具体测定方法参照《土壤微生物量测定方法及其应用》^[12]。土壤酶分析指标与测定方法:蔗糖酶活性采用水杨酸比色法测定;纤维素酶活性采用葡萄糖氧化法测定;脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定;酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定;过氧化氢酶活性用高锰酸

钾滴定法测定。具体测定方法参照《土壤农化分析》^[13]。样点布局空间数据与试验数据的统计输入其林地土壤资源动态数据库,采用 SPSS 软件对所获得数据进行差异性检验和相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型 LOC 及其组分

LOC 及其组分在不同程度上可以反映土壤有机碳的有效性和土壤质量,对土壤碳素的循环与转化有重要意义,并且与土壤生产力和肥力水平密切相关^[11]。3 种不同林分类型 LOC 及其组分的测试结果列于表 2。

WSOC 作为森林土壤生态系统中一种活跃的有机碳成分存在土壤生境中,它既是土壤生化过程中的重要产物,又是土壤微生物成长和腐解有机碳的主要

能源;而 DOC 主要来源于淋溶的和微生物分解的有机质^[8]。由表 2 可知,阔叶林下 WSOC 和 DOC 含量最高(0.156,0.247 g/kg),针叶林下 WSOC 和 DOC 含量最低(0.092,0.148 g/kg),3 种不同林分类型 WSOC 和 DOC 平均含量排序均为阔叶林>针阔混交林>针叶林。由于阔叶林下土壤微生物活性强,分解产生的水溶性有机物质较多,这与地上林分类型的生物归还能力有关。MBC 是土壤有机碳中变化较敏感的有机碳之一,可以反映森林土壤能量循环和养分转移与运输状况,在森林生态系统的生化过程中具有重要作用^[5]。由表 2 比较得出,针阔混交林下 MBC 平均含量较高(0.316 g/kg),针叶林下 MBC 平均含量较低(0.297 g/kg),但 3 种林分类型 MBC 平均含量相差不大。这与山上林分类型受人为干扰有关,人

为活动削弱了植被对土壤微生物活动的影响作用,林分类型的不同,并没有导致其明显的差异。ROC 主要受土壤微生物和土壤酶共同作用,它可以敏感地表征土壤有机碳中出现的短暂波动,较准确地显示出土壤有机碳含量发生的细小变化^[14]。由表 2 可知,针阔混交林下 ROC 平均含量最高(9.03 g/kg),针叶林下 ROC 平均含量最低(5.24 g/kg),其 ROC 由大到小依次为针阔混交林>阔叶林>针叶林。这与林下土壤微生物和土壤酶活性关系密切。

2.2 不同林分类型土壤酶活性

土壤有机碳是土壤酶的载体,其含量高低影响着土壤酶的组成和数量,而土壤酶的活性与土壤微生物密切相关。庐山不同林分类型土壤酶活性状况的测试结果见表 3。

表 2 庐山不同林分类型 LOC 及其组分(平均值±标准差)

g/kg

林分类型	WSOC	DOC	MBC	ROC
阔叶林	0.156±0.004Ab	0.247±0.025Aa	0.311±0.016Aa	7.61±1.03Aa
针叶林	0.092±0.001Bc	0.148±0.009Bb	0.297±0.020Bb	5.24±0.91Bc
针阔混交林	0.129±0.012Aa	0.195±0.017Aa	0.316±0.045Aa	9.03±2.72Ab

注:表中同列的不同大写字母表示差异达极显著水平($p<0.01$),不同小写字母表示差异达显著水平($p<0.05$)。下同。

表 3 庐山不同林分类型土壤酶活性状况(平均值±标准差)

mg/g

林分类型	蔗糖酶	纤维素酶	脲酶	酸性磷酸酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶
阔叶林	22.97±8.68Aa	12.68±4.23Ab	1.61±0.27Aa	1.77±0.05Ab	0.13±0.02Ab	11.05±2.36Aa
针叶林	19.73±5.02Ab	20.35±8.16Bc	1.33±0.14Aa	2.82±0.13Aa	0.18±0.07Aa	5.93±0.60Bb
针阔混交林	25.19±7.34Aa	16.71±5.78Aa	0.96±0.07Ab	2.14±0.18Aa	0.23±0.01Aa	9.28±1.43Aa

蔗糖酶是一种参与碳循环的重要酶,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用^[15],它不仅能表征土壤生物学活性强度,也可以作为评价土壤熟化程度和土壤肥力的一个重要指标^[16]。由表 3 比较可知,针阔混交林下土壤蔗糖酶活性明显高于其他 2 种林分,说明针阔混交林地提供植物与微生物碳源的能力比较强。纤维素酶是具有纤维素降解能力酶的总称,它们协同作用分解纤维素,是参与碳素生物循环的一种水解酶,对维持生态系统平衡稳定起着重要的作用^[17]。由表 3 可知,3 种林分类型下土壤纤维素酶活性的大小顺序为针叶林>针阔混交林>阔叶林,这是因为柳杉、杉木等针叶林下枯枝落叶中的木质素含量较高,土壤纤维素酶比较活跃。脲酶能促进尿素的水解,使其转化为氨被植物所利用,它在林木生长的营养转化方面起着基础功能的作用,其活性可以表征土壤的氮素供应情况^[18]。由表 3 可知,针阔混交林下土壤脲酶活性最低(0.96 mg/g),阔叶林下土壤脲酶活性最高(1.61 mg/g)。说明阔叶林下土壤有机氮的转化过程明显快于针阔混交林,阔叶林下土壤氮素供应状况最好。磷酸酶活性是评价土壤磷素生物转化方向与强度

的指标,能在一定程度上表征土壤有效磷的水平^[19]。从表 3 比较得出,不同林分类型下土壤酸性磷酸酶活性高低序列为针叶林>针阔混交林>阔叶林。针叶林下土壤磷酸酶酶促作用能加速土壤有机磷的脱磷速度,提高磷的有效性,其酸性磷酸酶活性最高。多酚氧化酶活性大小与腐殖质的形成和碳素的营养释放密切相关,在土壤芳香族有机化合物转化为腐殖质的过程中起着重要作用,通常用以衡量腐殖化程度^[20]。由表 3 可知,不同林分类型下土壤多酚氧化酶活性有较明显的差别,其中针阔混交林下多酚氧化酶活性最高(0.23 mg/g),阔叶林下多酚氧化酶活性最低(0.13 mg/g),这说明针阔混交林地表层腐殖质颜色深暗,土壤腐殖化程度较高。过氧化氢酶直接参与土壤中物质转化和能量流动的一种重要的氧化还原酶,其活性大小在一定程度上可以表征土壤生物氧化过程的强弱^[21]。从表 3 比较得出,阔叶林下过氧化氢酶活性(11.05 mg/g)显著高于针阔混交林和针叶林,其活性大小排序为阔叶林>针阔混交林>针叶林,这是由于针阔混交林和针叶林下凋落物分解速度较慢,其林下土壤解除呼吸过程中产生的过氧化氢较少。

2.3 LOC 各组分与土壤酶活性之间的相关性

采用 SPSS 软件对庐山不同林分类型所获得数据

据进行 LOC 各组分与土壤酶活性之间的相关分析列于表 4。

表 4 庐山不同林分类型 LOC 各组分与土壤酶的相关性

阔叶林	蔗糖酶	纤维素酶	脲酶	酸性磷酸酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶
WSOC	0.932**	0.906**	−0.401	0.896**	0.238	−0.151
DOC	0.821**	0.891**	−0.032	0.811**	0.306	−0.046
MBC	0.425	0.649*	−0.165	0.642*	0.428	−0.007
ROC	0.674*	0.883**	−0.372	0.294	0.145	−0.024
针叶林	蔗糖酶	纤维素酶	脲酶	酸性磷酸酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶
WSOC	0.956**	0.845**	−0.601*	0.437	0.303	0.178
DOC	0.920**	0.689*	−0.343	0.381	0.258	−0.211
MBC	0.817**	0.807**	−0.179	0.136	0.417	−0.357
ROC	0.925**	0.567*	−0.054	−0.074	0.386	0.213
针阔混交林	蔗糖酶	纤维素酶	脲酶	酸性磷酸酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶
WSOC	0.826**	0.918**	−0.562*	0.496	0.392	−0.049
DOC	0.878**	0.717*	−0.235	0.577*	0.243	−0.131
MBC	0.559*	0.875**	−0.102	0.314	0.562*	−0.222
ROC	0.830**	0.647*	−0.289	0.163	0.218	0.118

注: $n=18, df=16, r_{0.05}=0.559, r_{0.01}=0.807$; ** 相关性在 0.01 水平; * 相关性在 0.05 水平。

由表 4 可知,阔叶林下土壤蔗糖酶与 WSOC,DOC 相关关系表现出极显著水平($p<0.01$),与 ROC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$),与 MBC 具有一定相关性,但未到达显著水平;纤维素酶与 WSOC,DOC 以及 ROC 相关关系均表现出极显著水平($p<0.01$),与 MBC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);酸性磷酸酶与 WSOC,DOC 相关关系表现出极显著水平($p<0.01$),与 MBC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);脲酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶与土壤活性有机碳各组分的相关性均未达到显著水平。针叶林下土壤蔗糖酶与 WSOC,DOC,MBC 和 ROC 相关关系都表现出极显著水平($p<0.01$);纤维素酶与 WSOC,MBC 相关关系表现出极显著水平($p<0.01$),与 DOC,ROC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);脲酶与 WSOC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);酸性磷酸酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶与土壤活性有机碳各组分的相关性均未达到显著水平。针阔混交林下土壤蔗糖酶与 WSOC,DOC 和 ROC 相关关系表现出极显著水平($p<0.01$),与 MBC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);纤维素酶与 WSOC,MBC 相关关系均表现出极显著水平($p<0.01$),与 DOC,ROC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);脲酶与 WSOC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);酸性磷酸酶与 DOC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);多酚氧化酶与 MBC 相关关系呈现出显著水平($p<0.05$);过氧化氢酶与土壤活性有机碳各组分的相关性均未达到显著水平。

比较以上 3 种林分类型中 LOC 各组分与土壤酶活性的相关性差异可看出,土壤酶参与了土壤有机碳的一切转化过程,蔗糖酶、纤维素酶等水解酶与 LOC 各组分的相关性较好,多酚氧化酶、过氧化氢酶等氧化酶与 LOC 各组分之间没有表现出明显的相关性,酸性磷酸酶与 LOC 各组分的相关性在不同林分中存在较明显的差异。造成这一状况的原因,与不同林分类型、外部环境条件等有关。

3 结论与讨论

- (1) 3 种林分类型下 WSOC 和 DOC 平均含量排序均为阔叶林>针阔混交林>针叶林,而 ROC 由大到小依次为针阔混交林>阔叶林>针叶林;针阔混交林下 MBC 平均含量较高,针叶林下 MBC 平均含量较低。
- (2) 3 种林分类型下土壤蔗糖酶活性排序为针阔混交林>阔叶林>针叶林;纤维素酶和酸性磷酸酶活性的大小顺序为针叶林>针阔混交林>阔叶林;针阔混交林下土壤脲酶活性最低,阔叶林下脲酶活性最高;针阔混交林下多酚氧化酶活性最高,阔叶林下多酚氧化酶活性最低;过氧化氢酶活性高低序列为阔叶林>针阔混交林>针叶林。
- (3) 3 种林分类型下土壤蔗糖酶、纤维素酶等水解酶与 LOC 各组分的相关性较好,多酚氧化酶、过氧化氢酶等氧化酶与 LOC 各组分之间没有表现出明显的相关性,而酸性磷酸酶与 LOC 各组分的相关性在不同林分中存在较明显的差异。

(4) LOC 在各种土壤酶的作用下,能释放出特定的植物营养,在短期内增加土壤的易分解氧化组分,影响 WSOC 的含量,为土壤微生物活动提供能源。因此,土壤酶活性不仅仅与土壤肥力状况有关,还与植物营养的有效性有关。

(5) WSOC 和 MBC 是研究 LOC 的主要指标,能够敏感地反映森林经营过程中的有机碳动态。另外,酸性磷酸酶与 LOC 各组分的相关性在不同的林分类型中存在明显差异,造成这一状况的原因有待于今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 庞学勇,包维楷,吴宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009,15(3):390-398.
- [2] 丘清燕,梁国华,黄德卫,等. 森林土壤可溶性有机碳研究进展[J]. 西南林业大学学报,2013,33(1):86-96.
- [3] 胡亚林,汪思龙,黄宇,等. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2005,25(10):2662-2668.
- [4] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学,2005,41(1):10-13.
- [5] 张剑,汪思龙,王清奎,等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. 中国生态农业学报,2009,17(1):41-47.
- [6] 王春阳,周建斌,夏志敏,等. 黄土高原区不同植物凋落物可溶性有机碳含量及其降解[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3001-3006.
- [7] 袁颖红,樊后保,刘文飞,等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机碳和微生物量碳的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(2):138-143.
- [8] 张甲,陶澍,曹军. 土壤中水溶性有机碳测定中的样品保

存与前处理方法[J]. 土壤通报,2000,31(8):174-177.

- [9] 王清奎,汪思龙,冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报,2005,25(6):1299-1305.
- [10] 曾从盛,王维奇,徐欢欢. 艾比湖湿地土壤活性有机碳及其对厌氧条件下碳分解的影响[J]. 亚热带资源与环境学报,2011,6(2):10-16.
- [11] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报,2005,25(3):513-519.
- [12] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2005.
- [14] 徐秋芳. 森林土壤活性有机碳库的研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [15] 吴旭东,张晓娟,谢应忠,等. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J]. 草业学报,2013,22(1):245-251.
- [16] 薛立,邝立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报,2003,40(2):280-285.
- [17] 陈彩虹,叶道碧. 4 种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(6):64-68.
- [18] 贾若凌,李丽,刘香玲,等. 荔枝果园土壤脲酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 河南农业科学,2011,40(6):79-81.
- [19] 陈立新,杨承栋. 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生长关系的研究[J]. 林业科学,2004,40(3):12-18.
- [20] 李慧杰,徐福利,林云,等. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):53-59.
- [21] 姜海燕. 大兴安岭兴安落叶松林土壤微生物与土壤酶活性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

(上接第 77 页)

- [15] 杨丽雯,张永清. 4 种旱作谷类作物根系发育规律的研究[J]. 中国农业科学,2011,44(11):2244-2251.
- [16] 王巧利,贾燕锋,王宁,等. 黄土丘陵沟壑区自然恢复坡面植物根系的分布特征[J]. 水土保持研究,2012,19(5):16-22.
- [17] 闫培君,吴彤,王琰. 乌兰察布市土壤钙积层对林木根系分布和林木生长影响情况研究[J]. 内蒙古科技与经济,2011(9):63-64.
- [18] 王闰平,陈凯. 中国退耕还林还草现状及问题分析[J].

水土保持研究,2006,13(5):188-192.

- [19] Reubens B, Poesen J, Danjon F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review[J]. Trees,2007,21(4):385-402.
- [20] 余德亿,卢和顶. 福建高速公路生物护坡草坪的建植与养护[J]. 草业科学,2001,18(5):45-49.
- [21] 程龙飞,李林燕. 库区坡面植被水土保持生态建设模式[J]. 水土保持研究,2010,17(5):251-253.