

华西雨屏区不同植被类型对土壤氮磷钾及有机碳含量的影响^①

胡慧蓉^{1,2}, 胡庭兴^{1*}, 谭九龙¹, 迟西文¹

(1 四川农业大学林学院, 四川雅安 625014; 2 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224)

摘要: 华西雨屏区位于四川盆地与青藏高原结合过渡地带, 是长江流域的重要生态屏障, 也是退耕还林重点工程区。通过野外调查与实验室分析, 对该区 30 年的桉木林、水杉林、柳杉林、慈竹林、次生林与荒草地等 6 种植被类型的土壤剖面全量氮磷、速效氮磷钾和有机碳的变化特征进行研究。结果表明: ①不同植被类型土壤氮磷钾含量有差异, 表土层差异明显。表层 0~20 cm 土壤全量氮磷含量为桉木林>慈竹林>柳杉林>水杉林>次生林>荒草地, 速效氮磷钾合计总含量为桉木林>次生林>水杉林>柳杉林>慈竹林>荒草地, 森林植被下土壤氮磷钾含量高于荒草地, 其中, 桉木林土壤全量氮磷与速效氮磷钾含量分别为: 1.80 g/kg、7.94 g/kg、73.15 mg/kg、64.97 mg/kg 和 183.45 mg/kg, 高于其他林地表土。②土壤有机质与全氮储量在表土层与剖面中变化趋势一致, 为桉木林>慈竹林>柳杉林>水杉林>荒草地>次生林; 全磷储量变化稍有不同, 但桉木林与慈竹林仍为最高, 而次生林最低。③所有林地土壤有机碳含量与有机碳密度均有明显的表聚性, 但垂直剖面变化趋势不明显。土壤有机碳密度在表土层与全剖面的变化趋势一致为桉木林>柳杉林>慈竹林>荒草地>水杉林>次生林。④紫色土区植被类型与土壤母质对林地土壤肥力的形成与发展有重要影响, 经过 30 年的植被恢复, 桉木林在土壤肥力发展与固碳能力方面均有明显优势, 针叶树中柳杉好于水杉。

关键词: 植被类型; 氮; 磷; 钾; 土壤有机碳; 表聚性

中图分类号: S714.2

陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的基础, 是全球变化研究的核心, 土壤又是陆地生态系统的核心, 是连接大气圈、水圈、生物圈与岩石圈的纽带。土壤有机碳影响、制约着土壤理化性质和生物学性质, 对土壤质量及其肥力的保持具有重要意义^[1-2]。据报道, 全球土壤有机碳库约为 3 340 Pg C^[3], 在全球碳循环中具有非常重要的作用。森林是陆地生态系统的主要组成成分, 世界森林植被碳库约 359 Pg C, 森林土壤碳储量 787 Pg C, 约为前者的 2.2 倍, 森林土壤碳库对全球碳循环的影响十分显著^[4]。森林生态系统碳积累的速度与相应的树种类型和气候环境密切相关, 水热条件、土壤肥力、林分状况等因素在不同程度上决定着森林土壤有机碳的储存动态^[5-6]。近年来, 有关森林土壤有机碳储存的研究报道已较多^[7-8], 但我国地域辽阔, 现有研究结果难以充分反映广大森林分布区的土壤实情。据 FAO 的 2001 报告, 中国人工林面积居世界第一, 人工林成为中国森林碳汇的主要贡献者^[5]。四川省地处青藏高原东缘, 是我国西南林区的主体, 全省林地面积约 $2.32 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 森林

覆盖率 20.37%, 位居全国第五^[9], 人工林生态系统类型多样, 面积较大, 对四川森林碳汇具有很大贡献^[10-11]。本研究以长江流域重要生态屏障的一部分, 地处四川西部的华西雨屏区为研究对象, 调查研究几种植被类型土壤养分与有机碳的剖面分布特征, 从土壤的角度探讨适宜的森林植被模式, 为筛选具有增加森林土壤有机碳储量和提高其土壤肥力功能的造林树种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地与青藏高原结合的过渡地带, 地处长江流域重要生态屏障的华西雨屏中心区雅安市雨城区, 地理位置 $28.51^\circ \sim 30.56^\circ \text{N}$, $101.56^\circ \sim 103.23^\circ \text{E}$, 海拔 600~750 m, 山体东西走向, 低山浅切割地形。年平均气温 $14.1 \sim 17.9^\circ \text{C}$, 年平均降雨量 1 700 mm。冬无严寒, 夏无酷热, 四季分明、雨量充沛, 属亚热带湿润季风气候。区内主要出露中生代侏罗系、白垩系等紫色地层, 山麓缓坡地带近代

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC09B05)资助。

* 通讯作者(hutx001@aliyun.com; 465603658@qq.com)

作者简介: 胡慧蓉(1964—), 女, 云南昆明人, 博士, 教授, 主要研究方向森林土壤与环境。E-mail: hhrxl@163.com

河流冲积物堆积。受亚热带生物气候条件的影响,岩石风化强烈,地带性土壤为黄壤。受人为影响较大,紫色幼年土壤呈斑块状分布。土壤自然肥力较高,山地土壤特征较明显,土层厚薄不均。该区域植被恢复于 20 世纪 70 年代末至 80 年代初,植被恢复前山体上部为林木稀疏分布、以灌丛为主的天然次生林,中下部为当地农民开垦种植的农地。通过“七五”、“八五”长江防护林建设的退耕还林、封山育林等措施,模拟自然植被群落特征,采取自然更新与人工造林相结合的方式,形成乔、灌、草多重覆盖的植物群落。主要有次生常绿阔叶林、针阔混交林,以及柳杉、水杉、巨桉、香樟、桉木、竹类、果树等多种人工林。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查

2010 年秋,采用相邻样地比较法,在区内选择人工恢复树龄 28~30 年的桉木(*Alnus cremastogyne*)林、

水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林、慈竹(*Neosinocalamus affinis*)林,和由保留木自然恢复的以三角枫+杉木(*Acer buergerianum*+*Cunninghamia lanceolata*)为优势种的次生林植被类型为研究对象,进行不同植被恢复模式对土壤碳氮特征影响的评估,同时选择周边立地条件相似的荒草地为对照。各样地所处区域坡向基本一致,土壤为白垩系灌口组紫色砂泥岩轻度发育而成的紫色幼年土,物理风化明显,土壤黏而板结。次生林、荒地、水杉、柳杉分布区域海拔较低(610~660 m),坡度较平缓,坡积母质上发育的土壤较深厚(50 cm 以上)。海拔较高(670~740 m)的上坡位置为桉木与慈竹分布区,地表起伏,残积母质上发育的土壤土层浅薄。本研究按典型性和代表性原则,分别在各林分中设置面积为 20 m×20 m 的标准地,每个植被类型重复 3 次,对标准样地进行基本调查并做每木检尺,样地基本情况见表 1。

表 1 研究区标准地基本情况
Table 1 The basic situation of the study plots

植被类型	林分密度(株/hm ²)	树高(m)	胸径(cm)	郁闭度(°)	海拔(m)	坡向(°)	坡度(°)	主要灌木草本	备注
次生林	1 600	10.5	16.4	0.7	650	NW5	<2	老鸦泡、鸭跖草、常春藤	凋落物不均
桉木林	1 200	13.2	13.7	0.6	730	NW35	16	老鸦泡、荨麻、常春藤	凋落物较多
水杉林	1 400	22.3	18.3	0.8	610	NW5	5	鸭跖草、土牛漆	凋落物稀少
柳杉林	1 500	13.9	12.5	0.7	610	NW5	5	鸭跖草、问荆、土牛漆	凋落物稀少
慈竹林	500	12.5	6.2	0.6	680	NW10	35	无	凋落物厚层
荒草地	—	—	—	—	650	—	—	千里光、酸浆草、莲子草	平坦过渡区

注：慈竹林的林分密度单位为：丛/hm²。

1.2.2 土壤样品采集 在每个标准样地内选取有代表性的地点挖掘土壤剖面,共 18 个土壤剖面,观测记载土壤剖面形态,按深度 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 划分土层,环刀法分层测定土壤自然含水率与土壤密度(SD),采集土壤样品(约 500 g)带回实验室,剔除杂物与细根,经风干过筛备用。

1.2.3 实验室分析测试 土壤养分分析：土壤 pH 用酸度计法测定；以双酸法制备土壤待测液,自动定氮仪蒸馏测定土壤全氮(TN),钼蓝比色法测定土壤全磷(TP)；土壤碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定；土壤速效磷(AP)以 Olsen 法测定；土壤速效钾(AK)以火焰光度法测定(LY/T1228~1239—1999)。

土壤有机碳测定与有机质的计算：土壤有机碳(SOC)以重铬酸钾容量法测定,土壤有机质(SOM)为 SOC 与换算系数 1.724 的乘积(LY/T1237—1999)。

有机碳密度的计算：土壤有机碳密度(SCD)是单位面积一定深度土壤层中有机碳的储量,土壤剖面内某土层的 SCD 计算公式： $SCD_i = C_i \times SD_i \times H_i \times (1 -$

$G_i)/100$ ；式中： SCD_i 为土壤有机碳密度,kg/m²； C_i 为第 i 层土壤中有机碳平均含量,g/kg； SD_i 是相应土壤层的土壤密度,g/cm³； H_i 是该土壤层的厚度,cm； G_i 是该土层中石砾的体积百分数,%；100 为 cm 与 m 的换算系数^[12]。本研究所采集土壤样品中,不含石砾,因此 G_i 项为 0。土壤剖面 1 m 深,面积为 1 m² 的 SCD 总和为剖面各层 SCD 平均值的总和,kg/m²^[8,13]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2007 进行数据整理,SPSS 18.0 软件进行数据统计分析,单因素方差分析(one-way ANOVA)和差异显著性检验(Duncan 法)($P<0.05$),采用 Pearson 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型对土壤氮磷钾含量的影响

由表 2 可见,土壤全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)与速效钾(AK)的含量在各林地土壤中表现稍有不同,总体上表土高于底土,这与植

被覆盖有利于土壤肥力恢复与提高的基本理论是一致的。

2.1.1 不同植被类型对土壤全氮、全磷的影响 对比各林地土壤相同土层的 TN 含量, 桉木林始终较高, 以表层(0 ~ 20 cm)土壤尤为明显。表土层的 TN 含量桉木林(1.80 g/kg)是慈竹林的(1.27 g/kg)约 1.5 倍, 是柳杉林、水杉林、荒草地与次生林等的 2 倍多。桉木林 TN 含量显著高于柳杉林表土层($P < 0.05$)、水杉林上层土壤 0 ~ 40 cm、荒草地(除 40 ~ 60 cm 土层不显著)和次生林全剖面土壤层 0 ~ 100 cm, 充分体现了桉木林作为固氮树种对土壤氮素具有较好的维持能力。慈竹林土壤 TN 含量略低于桉木林土壤而高于其他林地土壤, 且显著高于次生林土壤(除表层以外)($P < 0.05$), 这可能与竹林须根较多, 凋落物归还量大, 有利于养分的积累有关。柳杉林、水杉林与荒草地各层土壤 TN 含量较为接近, 而次生林土壤 TN 含量最低($P > 0.05$), 可能是因为次生林树种较多, 结构较复杂, 林木生长旺盛, 对营养需求更大, 从而消耗更多氮素。

土壤 TP 含量的变化趋势与 TN 含量相似, 但桉木林与慈竹林土壤全剖面的 TP 含量(5.97 ~ 7.94 g/kg)均显著高于其他林地($P < 0.05$), 这可能有以下两方面的原因: 一方面与两种林分分布区地势较高, 造林时坡改平台对土壤扰动较大, 土壤受紫色成土母质影响明显, 从而有更丰富的矿质养分释放补充有一定关系; 另一方面意味着两种林分的种植有利于土壤 TP 的积累与保存。其他林地表层土壤的 TP 含量较为接近(3.47 ~ 3.94 g/kg), 亚表层以下土壤(20 ~ 100 cm)中 TP 含量有小范围波动(2.23 ~ 4.06 g/kg)。就各林地同一土层而言, 荒草地与次生林地土壤 TP 含量都显著低于桉木林、慈竹林与柳杉林土壤($P < 0.05$), 且次生林土壤同样表现最低。以上结果表明, 不同植被类型对土壤 TN、TP 含量的影响不同, 桉木林与慈竹林下土壤 TN、TP 含量有较高水平, 柳杉林和水杉林土壤 TN、TP 含量居中而柳杉林优于水杉林, 荒草地与次生林下土壤 TN、TP 含量较低且次生林表现更明显。

表 2 不同植被类型下土壤的 N、P、K 含量
Table 2 Contents of soil N, P and K under different vegetation types

植被类型	土层(cm)	pH	TN (g/kg)	TP (g/kg)	AN (mg/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)
次生林	0 ~ 20	4.54(0.06)a	0.77(0.08)a	3.59(0.39)a	81.89(10.79)a	58.05(21.47)a	74.84 ab
桉木林		7.59(0.21)c	1.80(0.47)b	7.94(0.31)b	73.15(23.92)a	64.97(22.18)a	183.45 c
水杉林		4.86(0.28)ab	0.80(0.07)a	3.90(0.67)a	48.09(9.46)a	42.69(15.97)a	122.37 bc
柳杉林		4.59(0.25)a	0.93(0.18)a	3.94(0.50)a	69.52(16.96)a	40.71(11.13)a	76.82 ab
慈竹林		8.34(0.02)d	1.27(0.07)ab	6.74(1.23)b	67.53(4.88)a	18.63(2.60)a	85.44 ab
荒草地		5.23(0.16)b	0.78(0.04)a	3.47(0.09)a	60.14(5.39)a	35.01(4.20)a	39.48 a
次生林	20 ~ 40	4.77(0.12)a	0.41(0.08)a	2.48(0.13)a	38.27(11.52)ab	12.60(4.82)a	46.46 ab
桉木林		8.17(0.26)c	0.79(0.07)c	6.53(0.24)c	58.02(18.46)b	29.23(15.08)a	91.07 c
水杉林		5.25(0.32)ab	0.49(0.04)ab	2.96(0.28)ab	15.09(0.86)a	14.89(4.32)a	76.41 c
柳杉林		5.12(0.18)ab	0.60(0.03)abc	3.33(0.21)b	31.60(2.59)ab	16.88(3.55)a	68.90 bc
慈竹林		8.59(0.06)c	0.71(0.08)bc	7.06(0.09)c	26.81(7.64)ab	12.52(0.52)a	70.82 bc
荒草地		5.55(0.25)b	0.51(0.09)ab	2.42(0.39)a	27.82(10.11)ab	12.87(2.60)a	36.21 a
次生林	40 ~ 60	4.84(0.05)a	0.38(0.05)a	2.23(0.17)a	35.71(6.03)a	13.40(3.25)a	33.26 a
桉木林		8.09(0.22)c	0.62(0.02)b	5.97(0.45)c	20.16(3.19)a	13.82(1.50)a	72.68 b
水杉林		5.41(0.36)ab	0.50(0.03)ab	3.26(0.47)ab	18.41(7.56)a	18.99(6.24)a	76.81 b
柳杉林		5.30(0.24)ab	0.58(0.08)b	3.60(0.57)b	29.06(8.08)a	26.20(10.57)a	64.96 b
慈竹林		8.56(0.06)c	0.56(0.06)b	6.95(0.18)c	16.74(5.52)a	12.85(1.35)a	82.52 b
荒草地		5.61(0.18)b	0.44(0.07)ab	2.44(0.13)ab	25.16(5.43)a	11.21(1.92)a	30.59 a
次生林	60 ~ 100	4.95(0.11)a	0.32(0.06)a	2.34(0.59)a	24.08(10.00)a	14.46(3.03)a	30.54 a
桉木林		8.07(0.23)b	0.60(0.02)c	6.07(0.24)c	19.13(4.16)a	14.36(0.65)a	74.38 b
水杉林		5.62(0.41)a	0.56(0.09)bc	3.31(0.38)ab	21.02(8.10)a	28.75(12.20)a	74.61 b
柳杉林		5.56(0.36)a	0.52(0.07)bc	4.06(0.50)b	23.08(8.11)a	23.30(4.03)a	68.76 b
慈竹林		8.56(0.02)b	0.54(0.06)bc	6.82(0.28)c	16.90(4.70)a	11.29(1.98)a	82.76 b
荒草地		5.54(0.13)a	0.38(0.03)ab	2.77(0.24)a	17.33(6.74)a	15.97(2.52)a	36.78 a

注: 1)括号内数值为标准误, 下表同; 2)同列不同小写字母表示同一土层不同植被类型间差异在 $P < 0.05$ 水平显著, $n = 72$ 。

2.1.2 不同植被类型对土壤速效氮磷钾的影响 土壤 AN、AP、AK 含量的变化与 TN、TP 稍有不同。

0 ~ 40 cm 上层土中 AN 含量差异较小, 次生林与桉木林表土层中 AN 含量略高(73.15 ~ 81.89 mg/kg), 柳

杉林与水杉林土壤 AN 含量居中,而水杉林最低(48.09 mg/kg) 水杉林亚表层土壤中 AN 含量仍然最低,其含量约为桉木林土壤的 26%,差异达显著水平($P<0.05$),表明水杉林对土壤氮素营养的吸收利用较多。其他林地土壤 AN 含量相近(表层 60.14~69.52 mg/kg,亚表层 27.82~38.27 mg/kg),与桉木林和水杉林相比都没有呈现显著变化。各样地下层 40~100 cm 土壤的 AN 含量均较低而接近(变幅 17~35 mg/kg),其原因是凋落物归还分解、林木根系分布、土壤生物活动等都主要发生于上层土壤。

各林地土壤 AP 含量在表层呈现一定的波动,变幅 18.63~64.97 mg/kg,桉木林最高,次生林次之,柳杉林、水杉林和荒草地仍然居中,而慈竹林最低,表明桉木林与次生林土壤磷的有效化过程较明显,而慈竹林对土壤 AP 的吸收利用需求较大。值得注意的是,表层土壤 AP 的统计结果并未显示显著性差异,这与用于计算表中平均值的 3 个采集样本间 AP 存在较大变异有关,而产生这一现象的主要因为可能源于紫色土中游离铁铝对可溶性磷不同程度的吸附固定。各样地其余各层土壤 AP 含量较低(变化范围 11.29~29.23 mg/kg),且差异不显著,这可能与林木和土壤对 AP 的双重吸收固定有关。

本研究各林地土壤中 AK 的含量普遍较高,主要原因是成土母质紫色砂泥岩中含有较多的含钾矿物(如长石、云母)。各林地表土层 AK 含量(74.84~183.45 mg/kg)均高于荒草地(39.48 mg/kg),且桉木林(183.45 mg/kg)与水杉林(122.37 mg/kg)土壤均与之差异显著($P<0.05$)。亚表层以下土壤 AK 含量除次生林外均显著($P<0.05$)高于荒草地(36.21 mg/kg),暗示植被的恢复对紫色岩的风化成土与养分的释放累积有积极作用。而次生林地亚表层以下土壤中 AK 的含量

较低(30.54~46.46 mg/kg),可能是由于林分层次结构较复杂,地下根系对养分的吸收利用较大,而通过凋落物分解归还的养分主要集中在了表层土壤中。

总结以上分析可以看出,不同植被类型对土壤速效养分的影响主要出现在表土层,桉木林下土壤速效养分同样具有较高的水平,次生林对土壤氮磷养分的有效化作用较为明显,水杉林对土壤 AN 的吸收较多而对钾的释放有利,慈竹林对土壤 AP 的需求较大,而荒草地土壤速效养分普遍偏低。

2.2 不同植被类型对土壤养分库的影响

表 3 数据显示,不同植被类型土壤养分库不同。全剖面土壤中,土壤有机质(SOM)储量为:桉木林>柳杉林>慈竹林>荒草地>水杉林>次生林,桉木林 SOM 储量(177.49 t/hm²)最大,几乎是次生林(98.22 t/hm²)的 2 倍,水杉林与荒草地的 SOM 也较低(105.52~113.14 t/hm²)。土壤 TN 储量由大到小依次为:桉木林>慈竹林>柳杉林>水杉林>荒草地>次生林,仍以桉木林土壤最大,其 TN 储量(11.45 t/hm²)比次生林(5.66 t/hm²)同样高出 2 倍。与 TN 相比,土壤 TP 的储量稍有不同,由大到小依次为:慈竹林>桉木林>水杉林>柳杉林>荒草地>次生林,发育于残积母质,土壤 pH 呈中至弱石灰性(无石灰反应)、岩成土特征突出的慈竹林与桉木林林地土壤 TP 储量最高,分别为 102.58 t/hm²(慈竹林)和 85.40 t/hm²(桉木林),而其余由坡积母质发育的林地土壤 pH 呈酸性,土壤 TP 储量较低,在 33.73~51.76 t/hm²,仅分别为慈竹林与桉木林土壤的 33%~50% 与 40%~61%。综上,土壤剖面中 SOM 与氮素养分的积累与植被类型有较密切关系,而岩成土壤矿质养分(如磷、钾等)的积累储存可能受到植被类型与成土母质双重因素的影响。

表 3 不同植被类型土壤剖面 SOM、TN、TP 储量(t/hm²)
Table 3 Storages of SOM, TN and TP in whole soil profiles under different vegetation types

植被类型	SOM		TN		TP	
	0~20 cm	0~100 cm	0~20 cm	0~100 cm	0~20 cm	0~100 cm
次生林	41.35(42.1)	98.22	1.73(30.5)	5.66	8.01(23.7)	33.73
桉木林	97.97(55.2)	177.49	4.46(38.9)	11.45	19.64(23.0)	85.40
水杉林	41.23(39.1)	105.52	2.26(26.7)	8.44	11.01(22.7)	48.46
柳杉林	65.63(44.2)	148.64	2.55(29.7)	8.59	10.81(20.9)	51.76
慈竹林	61.74(45.9)	134.50	3.59(33.5)	10.71	18.97(18.5)	102.58
荒草地	42.74(37.8)	113.14	2.07(28.0)	7.38	9.16(22.1)	41.39

注:括号内数值为同一林地表层(0~20 cm)土壤养分占剖面(0~100 cm)总量的质量分数。

由于受凋落物影响,各林地表土层 SOM 储量均较高,由高到低依次为:桉木林>柳杉林>慈竹林>荒草地>次生林~水杉林,与全剖面 SOM 储量有大

致相似的变化趋势,最大的桉木林是最小的次生林与水杉林的 2.4 倍。但从表土层 SOM 储量占全剖面的质量分数来看,桉木林、慈竹林、柳杉林、次生林、

水杉林、荒草地分别为:55.2%、45.9%、44.2%、42.1%、39.1%、37.8%,约为总量的 1/3 ~ 1/2,均表现出较好的表聚性,且林地较荒草地明显。表层土壤的 TN 储量变化与 SOM 储量和全剖面 TN 的变化趋势一致,其数值范围在 1.73 ~ 4.46 t/hm² 间,占总量的质量分数(26.7% ~ 38.9%)与 SOM 相比略显偏低,其中桫欏木林与慈竹林较高(33.5% 与 38.9%)而水杉林与荒草地相对较低(26.7% 与 28.0%)。表层土壤 TP 的储量变化与全剖面 TP 储量变化稍有不同,由高到低按顺序为:桫欏木林>慈竹林>水杉林>柳杉林>荒草地>次生林,表明桫欏木林与慈竹林表土仍有较高的 TP 储量,所有林地表土 TP 储量占全剖面总量的质量分数在 18.97% ~ 23.7% 之间。综上表明,所有林地 SOM 的表聚作用明显,氮素有一定的表聚性,而磷素的表聚作用不明显。

2.3 不同植被类型对土壤有机碳含量及密度的影响

2.3.1 不同植被类型土壤的有机碳及 C/N

由图 1 可以看出,不同植被类型对 SOC 含量的影响主要表现在表层土壤,亚表层以下 SOC 含量差异不大,但也初具表高下低的垂直剖面变化趋势。各植被类型的表土层 SOC 含量大小顺序分别为:桫欏木林>柳杉林>慈竹林>次生林>荒草地>水杉林,桫欏木林表土的 SOC

含量 22.97 g/kg,显著高于其他林地表层土($P<0.05$),分别是柳杉林、慈竹林、次生林、荒草地和水杉林表土层 SOC 的 1.6、1.8、2.1、2.4、2.7 倍。水杉林表土层 SOC 含量最低,为 8.48 g/kg,仅为荒草地(9.39 g/kg)的 90%,这种情况可能与不同植被类型地表植被覆盖,凋落物累积,以及土壤理化性质不同有关。桫欏木根系具有固氮根瘤菌,林冠层较稀疏,但林下灌草茂密,土壤湿度较大而温度偏低,好气微生物活性较差,从而为凋落物积累创造了一定条件;慈竹林下凋落物量大且厚薄不均,平铺于地表形成一层与表土有明显界线的落叶层,对水分下渗产生一定阻隔作用,同时竹根密集分布于 0 ~ 40 cm 以上土层,表土层干而板结,下层土壤发育度低,对有机碳的积累均有一定影响;次生林的树种较多,表土理化性质较好,有利于微生物活动和凋落物分解,短期内对有机碳的积累有一定制约;水杉林与柳杉林下灌草与落叶均较稀少,且人为活动频繁,不利于 SOC 的积累。各林地亚表层以下 SOC 含量急剧下降,其数值在 2.5 ~ 5.8 g/kg 范围内窄幅变化,表明 30 年的植被恢复时间仍然较短, SOC 主要集中保存于土壤表层,植被生长对下层土壤的影响相对较弱,因而总体上 SOC 含量的垂直剖面变化表现不明显。

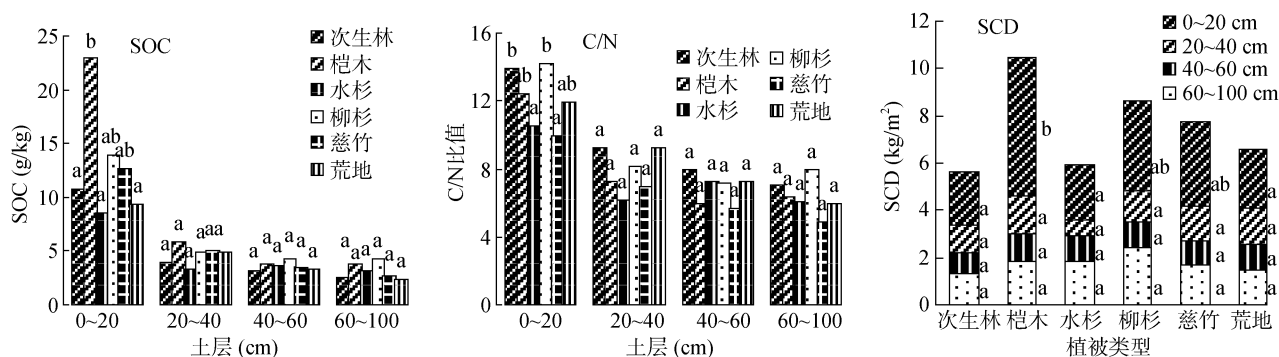


图 1 不同植被类型土壤总有机碳(SOC)、碳/氮比(C/N)、土壤有机碳密度(SCD)的剖面分布

Fig. 1 Soil organic carbon (SOC), carbon / nitrogen ratio (C/N) and soil carbon density (SCD) of profile distribution under various vegetation types

土壤的 C/N 比值变幅相对较窄,各林地的土壤剖面中 C/N 值在 4.8 ~ 14.2 范围内变化,表土最高(9.9 ~ 14.2),40 cm 以下土壤 C/N 值为 4.8 ~ 7.9。总体上 C/N 值的变化趋势与 SOC 相似,剖面垂直变化不明显,与荒草地相比,植被恢复对土壤 C/N 比值影响不显著($P<0.05$)。

2.3.2 不同植被类型的土壤有机碳密度

由于 SOC 含量与土壤密度(SD)随植被类型不同而呈现差异,土壤有机碳密度(SCD)的变化与植被类型也有密切关系,各种植被下土壤全剖面 SCD 大小顺序为:桫欏木林(10.49 kg/m²)>柳杉林(8.63 kg/m²)>慈竹林(7.78 kg/m²)>

荒草地(6.56 kg/m²)>水杉林(5.94 kg/m²)>次生林(5.67 kg/m²),垂直剖面上 SCD 的变化趋势与表土相似。桫欏木林下 SCD 最高,其土壤剖面中 SCD 总量约为其他林地的 1.2 ~ 1.8 倍,表土层的 SCD (5.86 kg/m²)是柳杉林与慈竹林表土的约 1.5 倍,是次生林、水杉林、荒草地表土的约 2.5 倍且差异达到显著性水平($P<0.05$),表现出较好的 SOC 储存功能。各林地 SCD 的土壤剖面垂直变化不明显,表层 SCD 明显高于其他土层,其数值占全剖面总量的 40% ~ 56%,这与表土 SOC 含量有密切关系。相比之下,荒草地表土层 SCD 约占全剖面总量的 38%,20 cm 以下各土层 SCD 分别

占全剖面总量的 16%~24%,且剖面垂直变化幅度较小,这与其植物种类及其根系分布特点有关。

3 讨论

3.1 植被类型与土壤养分的关系

森林具有蓄积养分与提升土壤肥力的能力,不同的树种及其群落结构,具有不同的肥土能力。有研究报道,植被恢复可以改善土壤理化及生物学性质^[14-15]。不同的植被类型,对土壤理化性质的改善程度也有不同,阔叶林、针阔混交林较针叶林具有更为明显的促进作用^[16]。同时,植被恢复对土壤的影响随着时间的延长而不断加深^[17],土壤反应与林木生长和土壤肥力密切相关^[18]。本研究中,发育于由紫色砂泥岩风化堆积的坡积母质上的林地(次生林、水杉林、柳杉林、荒草地)土壤均为酸性反应, pH 4.6~5.6;而紫色砂泥岩裸露,在其风化浅的残积母质上发育的林地(桉木林与慈竹林)土壤 pH 7.6~8.6,各林地土壤剖面的 pH 均为表层略低于下层,这对土壤养分的释放供给有一定影响。从养分状况来看,桉木林与慈竹林土壤 TN、TP 含量高于其他林地,显示出较好的土壤养分积累作用。较高含量的速效氮磷钾出现在桉木林与次生林表土层,这可能与阔叶林凋落物的分解有关^[19]。柳杉与水杉两种针叶林对土壤养分的积累与释放作用,与荒草地相比差异不大,可能与植被恢复时间较短,林下灌木草本植物稀疏单一,凋落物积累较少等有密切关系^[14,20]。同时,这两种针叶树种较阔叶林密度大,冠幅小,生长快,在四川属典型的速生针叶树种,因此对土壤的消耗较大。若植被恢复时间延长,对土壤肥力的促进与提高是有利的^[14]。

3.2 植被类型与土壤养分库的关系

长江上游紫色土退耕还林区土壤退化特点明显,土壤酸化,有机质、氮、磷、钾贫乏,是土壤营养性退化的主要表现^[18,21]。人工林地力衰退可能是单一树种对地力的消耗与对立地本身的不适应,以及人为管理方法不当的结果^[19],此外在林木生长过程中,有相同的营养结构与养分吸收特性,因此对土壤养分库的影响与天然林不同。但亚热带的人工林生物循环特点与天然林相同,生长期的林木吸收量大于归还量^[18],从而引发土壤养分库的减少。这一现象有可能出现在以下情况中:单一树种形成的凋落物,特别是缺乏林下植物的情况下,有机质成分一致,缺乏多样性,其凋落物积累、分解与掺和缓慢,从而导致养分再循环缓慢;成熟阔叶林林内大多通风透光,林下植物种类丰富,凋落物成分复杂易于分解腐烂,养分积累受到影响;在寡营养森林中,营养主要集中于保持土壤肥

力能力高的植被中,而富营养森林中土壤是保持营养的主要场所^[15,19]。李强等^[22]通过对川西北 3 种天然常绿阔叶林下土壤的研究认为,母质、土壤发育过程、植被类型及其特征是影响土壤养分库的重要因素。林龄 130 年的原始青冈栎+栲树+薯豆成熟林、80 年的次生润楠+桉木+楠木成熟林、35 年的次生绿叶石栎+光皮桦+细齿铃木幼林,3 种天然林下土壤 0~80 cm 土层 SOM、TN、TP 储量分别为:282.27、12.87、13.59 t/hm²,370.69、15.58、7.74 t/hm²,154.12、8.42、10.69 t/hm²,且 SOM 与 TN 储量密切相关。本研究结果显示,30 年的人工林与次生林 SOM 储量远低于上述 35 年次生幼年天然林,但受成土母质影响的 TP 储量却高出许多。不同林分类型土壤养分(SOM、TN、TP)储量的变化有一定差异,若以上述三者之和统计,总的趋势为:桉木林>慈竹林>柳杉林>水杉林>荒草地>次生林,固氮树种桉木林对土壤养分库的构建有明显的积极作用。针叶树种由于生长快,林下植被缺乏,土壤养分的储存能力较弱,而次生林群落结构复杂,林木种类较多且生长量大,林窗散落,林下表土水气热较为协调,凋落物分解快,更多的养分储存在植被中,短期内土壤养分储存量较低^[15,19]。综上所述,成土母质对幼年土壤养分库(尤其 TP)有一定影响,林分类型及其特征对土壤养分库的大小有着决定性的作用^[22]。

3.3 植被类型与土壤有机碳和碳密度的关系

植被恢复可以提高 SOC 含量,但由于物种组成在一定程度上决定了 SOC 的分解转化^[23],因此不同植被类型对 SOC 含量的影响不同^[24]。总的表现为,森林 SOC 剖面特征明显,人工林下 SOC 表聚现象突出^[7]。作为土壤有机碳储量指标的 SCD 的大小主要取决于 SD 与 SOC 大小,不同的植被类型,植物根系分布、凋落物动态、土居动物以及土壤发育程度等不同,SD 也不同,因此 SCD 在土壤剖面中的变化与 SOC 的变化趋势不一定一致。根据李克让等^[25]的生物地球化学模型估算,当前中国植被和土壤平均碳密度分别为 1.47 kg/m²和 9.17 kg/m²,其数值因气候、植被和土壤类型等影响而差异明显。四川森林植被与土壤平均有机碳密度分别为 3.74 kg/m²和 19.05 kg/m²^[26]。本研究结果显示,不同植被类型间 SOC 含量存在明显差异,固氮树种桉木的种植对 SOC 含量的提高有较为显著的促进作用。SOC 表聚现象突出,而垂直剖面变化的表现不明显。与 SOC 的变化稍有不同,各样地 SCD 在表土层和全剖面中的变化趋势较一致,且桉木林仍为最高,而次生林成为最低,这与不同植被类型下各土壤层 SD 的变化有关。且除桉木林 SCD 略高于全

国 SCD 平均水平外,其他所有林地均未达到全国及四川的平均水平,一方面说明研究区 SOC 储量相对较低,另一方面也暗示着该区 SOC 储存具有较大提升空间。受表土 SOC 含量高的影响,几种植被类型的表层和上层 0~40 cm SCD 也很高,占全剖面 SCD 的质量分数分别在约 40%~56% 与 51%~71%,同样显示了较强的表聚性。表聚性高是森林 SOC 储存稳定性较差的表现,容易受人为干扰和水土流失影响而降低^[7]。因此,进行植被恢复的同时,加强森林保护,尤其是对生长旺盛期的幼、中龄林的保护,无疑对增加森林 SOC 储存具有积极的作用。

4 结论

(1) 受植被类型与成土母质的影响,6 种样地土壤养分呈现差异,表层土壤最为明显。按大小排序,不同林分下表土层的 TN、TP 养分(合计)为:桉木林>慈竹林>柳杉林>水杉林>次生林~荒草地,AN、AP、AK 养分(合计)按大小顺序排列有:桉木林>次生林~水杉林>柳杉林>慈竹林>荒草地,但就单个养分而言,水杉林土壤 AN 含量与慈竹林土壤 AP 含量较低而容易引发缺素症。桉木林土壤养分条件最好,有森林植被的土壤养分条件好于荒草地土壤。

(2) SOM 与 TN 的储量变化在表土层与剖面中均有相同趋势,由大到小依次为:桉木林>慈竹林>柳杉林>水杉林>荒草地>次生林;TP 的储量变化在表土层按大小排序有:桉木林>慈竹林>水杉林>柳杉林>荒草地>次生林,各林地剖面中的储量变化稍有波动,但次生林仍是最低的。各林地 SOM 表聚性明显,氮素也相应呈现一定的表聚性,磷素的表聚现象不明显。

(3) 各林分表层 SOC 含量按大小顺序分别为:桉木林>柳杉林>慈竹林>次生林>荒草地>水杉林,桉木林显著高于其他林地,所有林地 SOC 含量均有表高下低现象,但垂直剖面变化趋势不明显。C/N 变化趋势与 SOC 相似。

(4) 受 SOC 和 SD 变化的影响,表土层与全剖面的 SCD 均呈现一致的变化趋势,按大小排序有:桉木林>柳杉林>慈竹林>荒草地>水杉林>次生林。40%~56% 的 SCD 出现在林地表土层,呈现明显的表聚现象,与 SOC 变化趋势完全一致。

(5) 华西雨屏区地处长江上游紫色土分布区,植被类型与土壤母质对林地土壤肥力的形成与发展有重要影响。在退耕还林中进行树种选择时,若以改良林地理化性状、恢复植被生态功能为目的,阔叶树种

优于针叶树;在短期植被恢复当中,桉木是良好的造林树种,慈竹具有一定优势,针叶树种中柳杉好于水杉。30 年的植被恢复时间较短,土壤养分与有机碳有较高表聚性。加强森林保护,对提高土壤肥力与增加土壤有机碳储量具有积极的作用。

参考文献:

- [1] Sombroek WG, Nachtergaele FO, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils[J]. *Ambio*, 1993, 22: 417-425
- [2] IPCC. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. A Special Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [3] Tarnocai C, Canadell JG, Schuur EAG, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23: GB2023
- [4] Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J. Carbon pool and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263: 185-190
- [5] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292: 2 320-2 322
- [6] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973
- [7] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆. 川西低山丘陵区主要人工林土壤有机碳密度研究[J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(3): 5-9
- [8] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43
- [9] 杨小建, 王金锡, 杨慈元. 四川森林资源动态变化与提高森林质量的初步研究[J]. *四川林业科技*, 2006, 27(6): 72-79
- [10] 万雪琴, 胡庭兴. 四川人工林现在及发展趋势[J]. *四川农业大学学报*, 2002, 20(3): 288-294
- [11] 黄从德, 张健, 杨万勤, 张国庆. 四川人工林生态系统碳储量特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1 644-1 650
- [12] Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(8): 156-159
- [13] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151-163
- [14] 谢宝平, 牛德奎. 华南严重侵蚀地植被恢复对土壤条件影响的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2000, 22(1): 135-139
- [15] 盛炜彤, 杨承栋. 关于杉木林下植被改良土壤性质效用的研究[J]. *生态学报*, 1997, 17(4): 377-385
- [16] 邓仕坚, 张家武, 陈楚莹, 高虹, 苏勇, 李锦芳, 罗桂标, 赖仲才. 不同树种混交林及其纯林对土壤理化性质影响的研究[J]. *应用生态学报*, 1994, 4(2): 126-132

- [17] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 卜耀军, 焦菊英. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 11(11): 2 025–2 029
- [18] 崔国发. 人工林地力衰退机理及其防止对策[J]. 世界林业研究, 1996(5): 61–69
- [19] 徐化成. 森林地力的动态特性和人工林的地力下降问题[M]. 人工林地力衰退研究. 北京: 中国科技出版社, 1992: 3–10
- [20] 杨玉盛, 李振问, 俞新妥, 何宗明. 南平溪后杉木林取代杂木林后土壤肥力变化的研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(3): 236–242
- [21] 何毓蓉, 张丹, 宫阿都. 长江上游退耕还林区的土壤退化与肥力重建[J]. 山地学报, 2000, 12(6): 526–529
- [22] 李强, 马明东, 刘跃进, 刘闯, 丁虹旭, 陈幕初, 陈英. 川西北几种常绿阔叶林土壤碳库和养分库的比较[J]. 水土保持学报, 2007, 12(6): 114–118
- [23] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 1(1): 99–105
- [24] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 冉华. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2 536–2 544
- [25] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 1(1): 72–80
- [26] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵. 四川森林植被碳贮量的时空变化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2 687–2 692

Effects of Different Vegetation Types on Soil Nitrogen, Phosphorus, Potassium and Organic Carbon in Rainy Area of West China

HU Hui-rong^{1,2}, HU Ting-xing^{1*}, TAN Jiu-long¹, CHI Xi-wen¹

(1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China; 2 College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: The rainy area of western China is located in the transition zone of Sichuan Basin and Tibetan Plateau. It is an important ecological barrier of the Yangtze River Basin and also a key region for the project of returning farmland into forest. Six vegetation types, such as *Alnus cremastogyne* stand(AC), *Neosinocalamus affinis* stand(NA), *Cryptomeria fortunei* stand(CF), *Metasequoia glyptostroboides* stand(MG), secondary forest(SF) and sward were investigated in order to understand the effect of vegetation restoration on soil by 30 years. Soil samples of each type of vegetation were collected and analyzed. Results showed as follows: In different vegetation types, contents of soil nitrogen(N), phosphorus(P) and potassium(K) were different, and significant differences were observed in topsoil (0–20cm), the contents of both total N (TN) and total P (TP) showed the trend as AC > NA > CF > MG > SF ≈ GL. Sum of contents of available N (AN), available P (AP) and available K (AK) showed the trend as AC > SF ≈ MG > CF > NA > GL. The contents of N, P and K in forest soils were higher than those in sward soils. Among them, contents of TN, TP and AN, AP, AK in the topsoil of AC were 1.80 g/kg, 7.94 g/kg, 73.15 mg/kg, 64.97 mg/kg and 183.45 mg/kg, respectively, higher than those of other forest lands. Soil organic matter (SOM) and TN storages showed a similar trend in the topsoil and profiles as AC > NA > CF > MG > GL > SF. TP storage was slightly different, but which in AC and NA still were the highest and in SF was still the lowest. In all woodland, SOC concentration and soil organic carbon density (SCD) showed obvious surface aggregation, but no obvious change in the vertical profile. Similar change trend of SCD was observed in topsoil and whole profile which was AC > CF > NA > GL > MG > SF. On the whole, in the purple soil region, vegetation type and soil parent material were two major factors on formation and development of soil fertility. It indicated that soil fertility and carbon fixation of AC forest were good, and the conifer forest CF was better than another one MG after 30 years vegetation recovery.

Key words: Vegetation types, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Soil organic carbon, Surface aggregation