

川西米亚罗林区不同林分类型土壤养分性质研究

霍小鹏^{1,2}, 张兴华³, 李贤伟², 张健², 张毅¹

(1. 西南油气田分公司 安全环保与技术监督研究院, 成都 610213;

2. 四川农业大学 生态林业工程省级重点实验室, 四川 雅安 625014; 3. 金堂县林业局, 四川 金堂 610400)

摘要:采用野外调查、取样和室内实验分析相结合的方法,研究了川西米亚罗林区9种林分类型林地土壤养分特征。结果表明:(1)9种林分类型土壤pH均小于5.6,属于酸性土壤;林地土壤有机质含量大小顺序为:冷杉林(FF)>40a云杉—落叶松林(D)>70a云杉林(F)>40a云杉林(C)>灌木林(SF)>桦木林(BF)>40a落叶松林(B)>25a云杉—落叶松林(A)>55a云杉林(E);冷杉林土壤全N含量最大,25a云杉—落叶松林最小;(2)9种林分类型中,40a落叶松林地全K含量最大,40a落叶松—云杉林土壤速效K含量最大;(3)9种林分类型中,40a落叶松林地全P含量最大,速效P含量以55a云杉林为最大;(4)9种林地中,土壤pH与土壤有机质极显著负相关,与土壤全N显著负相关;土壤有机质含量与全氮极显著正相关,与土壤有效磷和全钾显著负相关;土壤全钾和全磷分别与土壤速效钾和有效磷相关性不显著。

关键词:米亚罗; 林分类型; 土壤养分

中图分类号:S714.2,S714.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0058-05

Study on the Soil Nutrient in Different Forest Types in Miyaluo Forest Area of Western Sichuan

HUO Xiao-peng^{1,2}, ZHANG Xing-hua³, LI Xian-wei², ZHANG Jian², ZHANG Yi¹

(1. Safety Environment & Technology Supervision Research Institute, Southwest

Oil & Gasfield Company, Chengdu 610213, China; 2. Key Laboratory of Ecological Forestry

Engineering in Upper Reaches of Yangtze River of Sichuan Province, Sichuan Agricultural University,

Ya'an, Sichuan 625014, China; 3. Forestry Bureau of Jintang County, Jintang, Sichuan 610400, China)

Abstract: In this paper, by using the method of soil sampling and laboratory analysis, the soil nutrient of different forest types in Miyaluo forest area of western Sichuan have been investigated. The results showed that: (1) the order of the soil organic matter contents in the different forest types was fir forest(FF)>40 a *Picea bai fouriana*—*Larix kaempferi* plantation(D)>70 a *Picea bai fouriana* plantation(F)>40 a *Picea bai fouriana* plantation(C)>shrub forest(SF)>birch forests(BF)>40 a *Larix kaempferi* plantation(B)>25 a *Picea bai fouriana*—*Larix kaempferi* plantation(A)>55 a *Picea bai fouriana* plantation(E), and the maximum soil total N content in different forest types was found in FF; (2) the maximum soil total K content in different forest types was observed in B, the maximum soil available K content was found in D; (3) the maximum soil total P content was observed in B in the different forest types, and the maximum soil available P content was found in E; (4) there was great significant negative correlation between soil pH and soil organic matter content, and negative correlation between soil pH and soil total N. The significant positive correlation was found between soil organic matter content and soil total N, and soil available P and soil total K had negative correlation with soil organic matter content. There was no obvious correlation between soil total K and available K, as well as soil total P and soil available P.

Key words: Miyaluo; forest type; soil nutrient

土壤是在气候、植被、地形、母质等因子综合作用下形成的,不同的植被类型影响着土壤养分的积累、

收稿日期:2011-10-18

修回日期:2011-11-17

资助项目:国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A11);国家自然科学基金项目(30771717);教育部重点学科博士点基金(20050626001)

作者简介:霍小鹏(1984—),男,陕西省延安市人,硕士,主要从事生态影响评价研究。E-mail:huoxiaopeng1128@yahoo.com.cn

通信作者:李贤伟(1963—),男,四川省达州人,教授,博士生导师,主要从事森林生态与恢复生态研究。E-mail:lxw@sicau.edu.cn

分布与循环,而土壤养分含量又是植被生长的重要影响因子^[1-2]。森林土壤由矿物和有机质组成,是植物生长繁育的基底,提供植物必需的水、肥、气、热等生活条件。森林植被是影响土壤理化性质的重要因素,充分了解植被与土壤性质间的相互关系,是森林经营的基础。因此,研究不同林型下土壤性状的变化规律及差异,对了解森林与土壤之间的关系,合理利用森林和森林土壤资源,建立良性循环的森林系统具有重要意义^[3]。随着生态环境问题的日趋尖锐,人们越来越重视对土壤与植被之间关系的研究^[4]。不同学者对不同地区不同林分类型或植被类型土壤养分效应开展了大量研究^[2,5-7],虽然结果不尽相同,但大都认为同一地区不同林型间土壤养分相差较大,土壤养分受植被类型影响较明显。

川西亚高山林区是长江上游重要的水源涵养林区,是中国半壁江山的“水塔”,是西南及长江上游地区重要的生态屏障,被誉为庇护四川及长江流域的“绿色万里长城”^[8]。上个世纪天然林被大规模砍伐后实施了封育及人工更新,形成了不同恢复阶段的人工林、次生林和人工与天然更新共同作用的林分镶嵌分布状态。目前,该区研究主要集中在人工云杉林土壤性质^[9-12]、土壤微生物及酶活性^[13-15]和土壤水文效应^[16-18]等方面,然而对于该地区不同林分类型土壤养分效应的研究报道尚不多见。笔者对川西亚高山不同林分类型土壤养分状况进行了测定与分析,旨在探讨该区域不同林分类型与土壤养分状况间的关系,了解不同林分类型土壤养分规律,为进一步改进不同林型营林技术,更为林分结构调整及森林生态系统的更新、恢复与重建提供依据。

1 研究区概况

研究地区位于四川省阿坝州理县米亚罗林区,地

理坐标 31°24′—31°55′N、102°35′—103°4′E,海拔 2 850~4 200 m,属于青藏高原向四川盆地过渡的高山峡谷区。气候受着青藏高原地形的决定性影响,属于季风山地气候,夏季湿润多雨,冬季寒冷干燥。年均气温 6~12℃,1 月份平均气温 -8℃,7 月份平均气温 12.6℃,≥10℃的年积温为 1 200~1 400℃。年降水量为 600~1 100 mm,年蒸发量为 1 000~1 900 mm。成土母岩主要为千枚岩、板岩和白云岩等残坡积风化物,土壤自低到高依次为棕壤(2 700~3 300 m)、暗棕壤(3 300~3 600 m)、棕色针叶林土(3 600~3 850 m)。原生森林分布于海拔 2 400~4 200 m,以亚高山暗针叶林为主,乔木优势树种为川西云杉 [*Picea likiangensis* (Franch) Pritz var. *balfouriana* (Rehd. et Wils.) Hillier ex Slavin]、岷江冷杉 (*Abies faxoniana* Rehd. et Wils.)、桦木 (*Betula platyphylla* Suk.)等。1955 年以后,砍伐迹地上陆续开展了粗枝云杉(*Picea asperata* Mast.)、日本落叶松(*Larix kaempferi* Lambert Carriere)为主的人工更新。主要灌木有散生栒子(*Cotoneaster divaricatus* Rehd. et Wils.)、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii* Koehne)、紫花卫矛(*Euonymus porphyreus* Loes.)等。

2 研究方法

2.1 样地选择

在米亚罗林区选取有代表性的 25 a 云杉—落叶松林(A)、40 a 落叶松林(B)、40 a 云杉林(C)、40 a 云杉—落叶松林(D)、55 a 云杉林(E)、70 a 云杉林(F)、冷杉林(FF)、桦木林(BF)和灌木林(SF)共 9 种林分类型为研究对象。每种林分类型设置 20 m×20 m 的标准地,对各标准地进行每木检尺,并调查标准地内植物种类、数量、群落年龄和生物量。同时调查标准地的坡度、坡向和土壤类型。各标准地基本概况见表 1。

表 1 标准地基本概况

类型	优势树种	林龄/ a	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	平均树 高/m	平均胸 径/cm	郁闭度	密度/ (株·hm ⁻²)	来源
A	落叶松、云杉	25	3090	31	SW	6.7	9.3	0.9	1578	人工
B	落叶松	40	3158	40	E	13.2	14.2	0.7	1196	人工
C	云杉	40	3205	21	E	12.9	13.4	0.7	1202	人工
D	落叶松、云杉	40	3680	10	NW	12.2	12.8	0.8	1223	人工
E	云杉	55	3090	20	E	18.1	23.4	0.8	856	人工
F	云杉	70	3762	27	N	24.6	30.2	0.5	576	人工
FF	冷杉	>120	3856	16	SE	28.5	42.3	0.7	675	天然
BF	桦木	45	2809	35	SW	9.4	12.3	0.7	1024	次生
SF	灌木	25	3666	18	SE	1.4	1.6*	0.8*	3524	次生

注:A,B,C···,F 分别表示 25 a 云杉—落叶松林,40 a 落叶松林,40 a 云杉林,40 a 落叶松—云杉林,55 a 云杉林,70 a 云杉林;FF:冷杉林,Fir forest;BF:桦木林,Birch forest;SF:灌木林,Shrub forest,下同。

2.2 土壤采集

在上述标准地上、中、下选取有代表性的 3 个采样点,去除地表凋落物,在每一个采样点分层(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm)取样,按照四分法取约 1 kg 鲜土(3 个采样点每层混匀),装袋贴好标签,带回实验室后测定土壤养分。

2.3 分析方法与数据处理

2.3.1 样品测试 土壤 pH 值采用酸度计法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化比色法测定;全 N 采用重铬酸钾—硫酸消化法测定;全 K 采用 NaOH 碱熔—原子吸收分光光度法测定;速效 K 采用 1 mol/L 乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法测定;全 P 采用 NaOH 碱熔—钼锑抗比色法有效磷的测定;有效 P 采用 0.03 mol/L 的 NH_4F 和 0.025 mol/L 盐酸浸提法测定^[19]。

2.3.2 数据统计分析 利用 Excel 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 不同林分类型土壤 pH 值

酸碱度是森林土壤最为重要的化学特性之一,受土壤母质、气候和植被等条件的制约,是指示土壤形成、发育和演替过程的一个重要指标。土壤 pH 变化直接影响着土壤中养分存在的形态,而且还能显著影响土壤理化性质、土壤动物群落和微生物群落的结构和功能以及植物的生长发育等。

由图 1 可以看出,9 种林分类型土壤 pH 均 < 5.6 ,属于酸性土壤,这与雨水的淋溶作用及与表层有机物在降解过程中生成大量酸性物质积累有关^[20]。从土壤剖面 pH 垂直分布看,除林分类型 A, D, E, SF 外,其它林地土壤剖面 pH 值均具有从表层到下层逐渐增大的趋势。

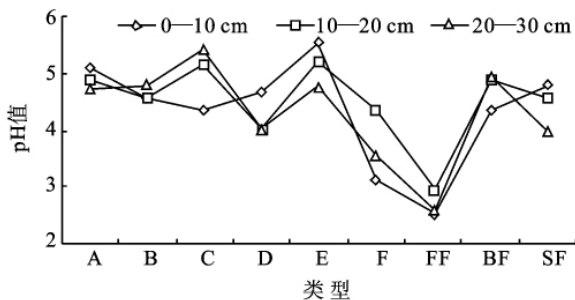


图 1 不同林地土壤 pH 变化

3.2 不同林分类型土壤有机质

土壤有机质是评价土壤肥力的一项重要指标,它既是植物矿质和有机营养的源泉,又是土壤微生物的

能源物质。它不仅能增加土壤的保肥和供肥能力,提高土壤养分的有效性,而且能促进团粒结构的形成,改善土壤的通透性、蓄水能力及通气性,增加土壤的抗蚀性等。

由图 2 分析可知,冷杉林地有机质含量最大,55 a 云杉林地最低,9 种林分类型土壤剖面有机质平均含量大小顺序为:冷杉林(FF) $>$ 40 a 云杉—落叶松林(D) $>$ 70 a 云杉林(F) $>$ 40 a 云杉林(C) $>$ 灌木林(SF) $>$ 桦木林(BF) $>$ 40 a 落叶松林(B) $>$ 25 a 云杉—落叶松林(A) $>$ 55 a 云杉林(E)。可见,在 0—30 cm 土层中,人工林地土壤有机质含量总体上随林分年龄增加而增大,而天然林地土壤有机质含量变化则不明显。在表层(0—20 cm)中,25 a 云杉—落叶松林土壤有机质含量为冷杉林的 38.0%,比冷杉林减少了 62.0%;当土层深度为 20—30 cm 时,40 a 云杉—落叶松林土壤有机质最大,为 55 a 云杉林的 3.15 倍。此外,从图 2 还可以看出,9 种林分均以表层土壤有机质含量最大,随着土层深度的增加,有机质含量下降。

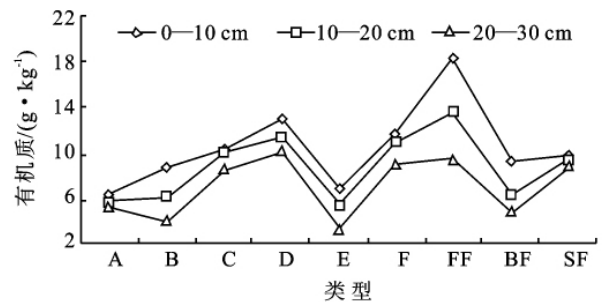


图 2 不同林地土壤有机质含量比较

土壤有机质的这种分布状况主要是由不同的林分类型的凋落物量及凋落物分解速率差异引起的,而凋落物的分解速率又受凋落物自身性质与土壤温度的影响。冷杉林高有机质含量与林地长年累积较厚的枯枝落叶密不可分;55 a 云杉林因大幅度间伐后林分密度显著降低,有机质含量随年凋落量降低而减小;桦木林和灌木林地有机质含量高于其它一些针叶是其凋落量易分解的缘故。

3.3 不同林分类型土壤氮素含量

土壤全 N 包括所有形式的有机和无机氮素,其含量是土壤氮素养分的贮备指标,综合反映了土壤的氮素状况。土壤中的氮素以生物为主要来源,随死亡的生物有机体进入土壤,以有机形态储存起来,故土壤氮素含量与土壤有机质的关系较为密切。

由图 3 可见,在 9 种林分土壤剖面全 N 含量平均值大小顺序为:FF $>$ D $>$ C $>$ SF $>$ B $>$ F $>$ BF $>$ E $>$ A;其中,25 a 云杉—落叶松土壤全 N 含量最低,冷杉林

含量最大;表层土壤中,25 a 云杉—落叶松林地全 N 含量仅为冷杉林的 23.0%;在 20—30 cm 土层中,25 a 落叶松—云杉林地全 N 含量比冷杉林下降了 78.0%。此外,9 种林分表层土壤全 N 含量都高于心土层,且并随着土层的加深,土壤全 N 含量的总体差异逐渐减小。在天然林中,冷杉林全 N 含量表现最好,这主要是因为其土壤有机质含量高,而土壤全 N 量的分布特征和动态在很大程度上又取决于土壤有机质含量的变化^[20];在人工林中,40 a 云杉—落叶松林凋落物易分解,土壤有机质含量高,所以土壤全 N 含量高于其它人工林地,这也说明了混交林可以有效地改善林地土壤养分状况。

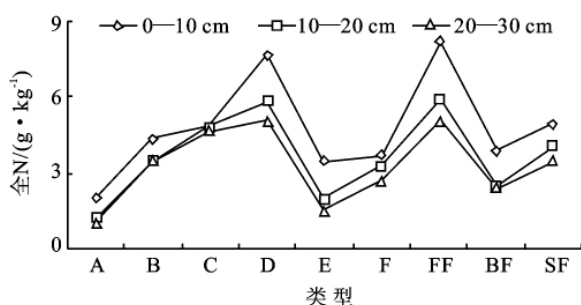


图3 不同林地土壤全 N 含量比较

3.4 不同林分类型土壤钾素含量

土壤钾是植物光合作用、淀粉合成和糖类转化所

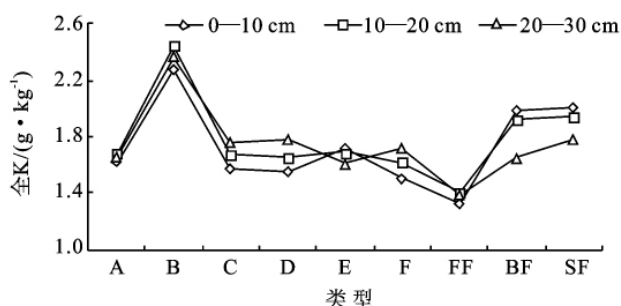


图4 不同林地土壤钾素含量比较

3.5 不同林分类型土壤磷素含量

磷在土壤中主要以有机和无机两种形态存在,其含量与母质中的矿物成分、土壤质地、剖面层次等有关。土壤全 P 在一定程度反映了土壤中磷素的贮量

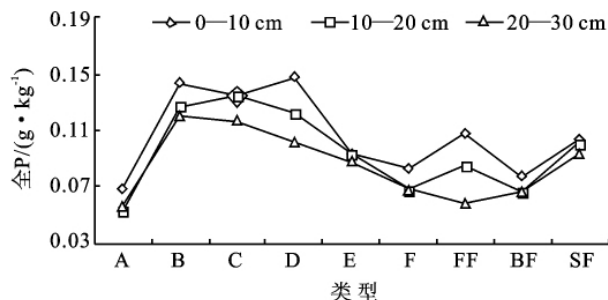
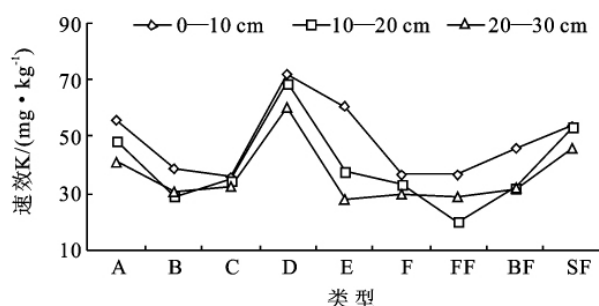


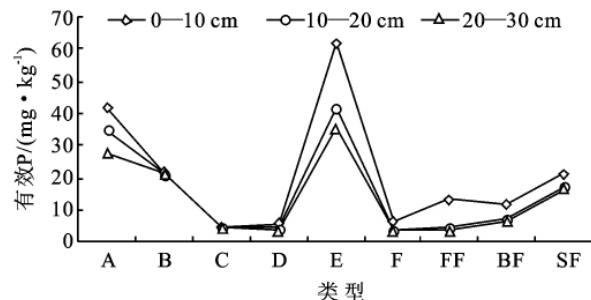
图5 不同林地土壤磷素含量比较

必须的元素,也是衡量土壤肥力的一个重要指标。土壤中的钾主要有矿物钾、缓效钾和速效性 K 等 3 种形态。其中,土壤速效 K 可以直接被植物吸收利用,可以反映土壤钾素供应能力,可以作为判断是否需要施肥的依据。

由图 4 可见,9 种林分土壤剖面全 K 含量平均值大小顺序为: B>SF>BF>C>E>D>A>F>FF; 其中,40 a 落叶松林表层土壤全 K 含量最大,为冷杉林的 1.73 倍;20—30 cm 土层中,冷杉林全 K 含量最低,比含量最高的 40 a 落叶松林下降了 41.4%。9 种林分土壤剖面速效 K 含量平均值大小顺序为: D>SF>A>E>BF>C>F>B>FF; 40 a 落叶松—云杉林表层土壤速效 K 含量最高,为冷杉林的 2.50 倍;20—30 cm 土层中,55 a 云杉林最小,为含量最高的 40 a 落叶松—云杉林的 46.2%。对比不同剖面土壤钾素含量变化可知,土壤速效钾含量均随土壤深度的增加而减小,而土壤全 K 含量却随土层深度加深变化不明显;其中, A, B, C, D, F 和 FF 林分类型 0—20 cm 土层全 K 含量低于 20—30 cm 土层含量,而 E, BF 和 SF 林分类型土壤全 K 含量变化则相反。土壤钾素的这种含量变化说明林地土壤钾素含量除了受雨水的淋洗作用影响外,还与土壤质地、成土母质、生物等因素有关。



和供应能力,但其并不能作为土壤磷素供应的指标,而土壤有效 P 能相对反映土壤磷素供应水平高低,可以作为判断是否需要施肥的依据,在实际生产中有重大意义。



由图 5 可见,40 a 落叶松林土壤全 P 含量最大。在表层和 20—30 cm 土层中,40 a 落叶松林地全 P 含量分别为 25 a 云杉—落叶松林的 2.22 倍和 2.14 倍;9 种林地土壤剖面全 P 含量平均值大小顺序为:B>D>C>SF>FF>E>F>BF>A。9 种林分类型中,土壤速效 P 含量以 55 a 云杉林为最大,其表层土壤有效 P 含量为 40 a 云杉林的 10.55 倍;在 20—30 cm 土层时,55 a 云杉林土壤速效 P 含量为冷杉林的 10.24 倍;9 种林分类型土壤剖面速效 P 含量平均值大小顺序为:E>A>B>SF>BF>FF>C>F>D。不同林分全 P 和速效 P 含量都表现为表土层高于心土层,这种含量变化可

能受气候、地表植被和其它一些生物因素的影响。

3.6 林地表层理化性质相关性分析

依据 9 种林分类型土壤养分含量测定结果,对其土壤养分进行相关性分析,结果见表 2。由表 2 可以看出,土壤 pH 与土壤有机质含量极显著负相关,与土壤全 N 显著负相关,但与其它养分相关性不显著;土壤有机质含量与全 N 极显著正相关,与土壤有效 P 和全 K 显著负相关;土壤全 K 和全 P 分别与土壤速效 K 和有效 P 相关性不显著,说明土壤总的磷素和钾素含量不能直接表征土壤钾元素和磷元素的有效利用性。

表 2 土壤养分指标间的相关性分析

土壤养分	pH	有机质	全 N	全 K	速效 K	全 P	有效 P
pH	1						
有机质	-0.747**	1					
全 N	-0.503*	0.877**	1				
全 K	0.461	-0.501*	-0.275	1			
速效 K	0.334	0.098	0.224	-0.022	1		
全 P	0.211	-0.256	-0.125	-0.003	-0.123	1	
有效 P	0.541	-0.532*	-0.464	0.150	0.285	0.250	1

注: * 表示在 $\alpha=0.05$ 下显著, ** 表示在 $\alpha=0.01$ 下显著。

4 结 论

(1) 9 种林分类型土壤 pH 均 <5.6 , 土壤有机质含量大小顺序为: 冷杉林(FF) > 40 a 云杉—落叶松林(D) > 70 a 云杉林(F) > 40 a 云杉林(C) > 灌木林(SF) > 桦木林(BF) > 40 a 落叶松林(B) > 25 a 云杉—落叶松林(A) > 55 a 云杉林(E); 25 a 云杉—落叶松林地全 N 含量最低, 冷杉林含量最大, 大小顺序为: FF > D > C > SF > B > F > BF > E > A。

(2) 9 种林分类型中, 40 a 落叶松林土壤全 K 含量最大, 冷杉林最小, 大小顺序为: B > SF > BF > C > E > D > A > F > FF; 40 a 落叶松—云杉地土壤速效 K 含量最大, 大小顺序为: D > SF > A > E > BF > C > F > B > FF。

(3) 9 种林分类型中, 40 a 落叶松林地最大土壤全 P 含量, 大小顺序为: B > D > C > SF > FF > E > F > BF > A。55 a 云杉林土壤速效 P 含量最大, 大小顺序为: E > A > B > SF > BF > FF > C > F > D。

(4) 土壤 pH 值与土壤有机质含量极显著负相关, 与土壤全 N 显著负相关; 土壤有机质含量与全 N 极显著正相关, 与土壤有效 P 和全 K 显著负相关; 土壤全 K 和全 P 含量分别与速效 K 和有效 P 相关性不显著。

参考文献:

[1] Mc Quilkin W E. The natural establishment of pine in abandoned fields in the Piedmour Plateau Region [J].

Ecology, 1940, 21(2): 135-147.

- [2] 姜红梅, 李明治, 王亲, 等. 祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 166-170.
- [3] 薛立, 吴敏, 徐彦, 等. 几个典型华南人工林土壤的养分状况和微生物特性研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 1017-1023.
- [4] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950.
- [5] 黄志宏, 田大伦, 周光益, 等. 广东南岭不同林分类型土壤养分状况比较分析[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 63-67.
- [6] 吕明亮, 陈养飞, 方佐昭, 等. 柯城区不同林分类型生态公益林土壤理化性质初步研究[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(2): 70-73.
- [7] 余雕, 朱盼盼, 程苗苗, 等. 太白山不同林分土壤肥力状况比较研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 7-12.
- [8] 杨玉波, 李承彪. 四川森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [9] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 等. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 261-267.
- [10] 庞学勇, 胡泓, 乔永康, 等. 川西亚高山云杉人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 1-7.
- [11] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 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[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 126-133.
- [12] 胡泓, 刘世全, 陈庆恒, 等. 川西亚高山针叶林人工恢复过程的土壤性质变化[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(4): 308-314.

(下转第 66 页)

4.2 结论

(1) 紫色土小流域水土流失严重,伴随着水土流失的发生,土壤总有机碳及碳组分含量呈现小流域上部<小流域中部<小流域下部这一分布特征。说明在该小流域内下部作为上、中部水土流失的一个“汇”其总有机碳及碳组分含量均最高。

(2) 由于紫色土区农业耕作活动频繁,坡顶部分因农业耕作活动导致小地形改变减缓了土壤侵蚀强度,使小流域内同一坡面不同坡位土壤总有机碳及碳组分含量均呈现坡脚>坡顶>坡中这一分布特征。小流域内不同坡向由于水热等资源分配不同,阴坡和阳坡在土壤总有机碳及碳组分含量上有显著差异,具体表现为阳坡<阴坡。小流域内不同土层深度土壤总有机碳及碳组分含量均随土层的加深而降低。因此在紫色土区开展退耕还林还草工程,增加坡面植被是减少水土流失,增加土壤碳贮量的有效措施。

参考文献:

- [1] 李春艳,邓玉林,孔祥东. 沱江流域不同土地利用方式紫色土有机碳储量特征[J]. 水土保持学报,2007,21(2): 93-95.
- [2] 郭胜利,车升国,梁伟,等. 黄土高原沟壑区王东沟小流域土壤有机碳空间分布[J]. 生态学报,2010,30(1):52-59.
- [3] Wander M M, Traina S J, Stinner B R. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,58(4):1130-1139.
- [4] Coleman D C, Reid C P P, Cole C. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems[J]. Advances in Ecological Research,1983,13:1-55.
- [5] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-Fraction organic matter in soils from long-term crop-rotations[J]. Soil Science Society America Journal,1992,56(6):1799-1806.
- [6] 向成华,栾军伟,骆宗诗. 川西沿海梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J]. 生态学报,2010,30(4):1025-1034.
- [7] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of 'fertile islands' in the desert ecosystem[J]. Journal of Arid Environments, 1989,16(3):257-262.
- [8] 许文强,罗格平,陈曦. 干旱区绿洲—荒漠过渡带灌丛土壤属性研究[J]. 应用生态学报,2006,17(4):583-586.
- [9] 孙文义,郭胜利,宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响[J]. 自然资源学报,2010,25(3):443-453.
- [10] 刘兆云,章明奎. 侵蚀—沉积连续地形中土壤碳库的空间分异[J]. 水土保持通报,2009,29(3):61-64.
- [11] De Jong E, Kachanoski R G. The importance of erosion in the carbon balance of prairie soils[J]. Can. J. Soil Sci.,1988,68(1):111-119.
- [12] 魏孝荣,邵明安,高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. 环境科学,2008,29(10):2879-2884.
- [13] 唐家良,周麟,罗贵生,等. 岷江上游干旱河谷区阳坡土壤性质空间分异特征[J]. 山地学报,2009,27(5):531-537.
- [14] Khanna P K, Ludwig B, Baubus J, et al. Assessment and significance of labile organic C pools in forest soils [C]//Lal R, Kimble J M, Follett R F, et al. Assessment methods for soil carbon. Boca Raton: Florida Lewis Publishers,2001:167-182.
- [15] 冯瑞芳,杨万勤,张健,等. 模拟大气 CO₂ 浓度和温度升高对亚高山冷杉(*Abies faxoniana*) 林土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2007,27(10):4016-4026.
- [16] 孙辉,吴秀臣,秦纪洪,等. 川西亚高山森林土壤过氧化氢酶活性对升高温度和 CO₂ 浓度的响应[J]. 土壤通报,2007,38(5):891-895.
- [17] 吴秀臣,孙辉,杨万勤,等. 川西亚高山红桦幼苗土壤蔗糖酶活性对温度和大气二氧化碳浓度升高的响应[J]. 应用生态学报,2007,18(6):1225-1230.
- [18] 霍小鹏,李贤伟,张健,等. 川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究[J]. 水土保持研究,2009,16(6):192-195.
- [19] 霍小鹏,李贤伟,张健,等. 川西亚高山人工针叶林枯落物持水与土壤渗透性能[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(5):540-546.
- [20] 张远东,刘世荣,罗传文,等. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征[J]. 生态学报,2009,29(2):627-635.
- [21] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化性质[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987.
- [22] 杨万勤,张健,胡庭兴,等. 森林土壤生态学[M]. 成都:四川科学技术出版社,2006.

(上接第62页)