

小兴安岭两种林型的土壤有机碳研究

沃晓棠, 田松岩, 韩丽冬, 邵英男, 刘玉龙

(黑龙江省森林工程与环境研究所)

摘 要:为阐明小兴安岭两种原始红松林土壤有机碳变化特征及其影响机制, 采样分析了云冷杉红松林与椴树红松林土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳及土壤理化性质。结果表明: 两种林型土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳含量垂直分布特征一致, 均自上向下逐渐减少; 土壤总有机碳与易氧化碳含量表现为: 云冷杉红松林 < 椴树红松林, 同海拔高度变化(云冷杉红松林 < 椴树红松林)一致(仅 10—20 cm 土层, 云冷杉红松林的两个因子高于椴树红松林, 但差异不显著), 两种林型土壤微生物量碳含量的差异在不同土壤层次有所不同, 但差异均不显著; 两种林型间土壤活性碳占总有机碳比率的差异在不同土层无一致的规律性; 两种活性碳、总有机碳与土壤全氮、C/N 之间为显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)正相关, 与土壤容重呈极显著负相关($p < 0.01$)。

关键词: 椴树红松林; 云冷杉红松林; 土壤有机碳

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)05-0013-05

Study on Soil Organic Carbon under Two Types of Vegetation in Small Xing'an Mountains

WO Xiao-tang, TIAN Song-yan, HAN Li-dong, SHAO Ying-nan, LIU Yu-long

(Heilongjiang Forestry Engineering and Environment Institute, Harbin 150081, China)

Abstract: To understand the characteristics of soil organic carbon and its correlations with soil properties in the two original *Korean pine* forests in Small Xing'an Mountains, *Korean Pine* and *spruce-fir* mixed forests, *Tilia amurensis*—*Pinus koraiensis* mixed forests were selected in this study, and soil samples were analyzed for soil total organic carbon (TOC), easily-oxidized carbon (EOC), microbial biomass carbon (MBC) and basic properties. Results showed that there was the same character in vertical distribution that the contents of soil TOC, EOC and MBC in the two forest types all decreased with soil depth. Exception of the depth of 10—20 cm, the contents of soil TOC and EOC ranged in order as follow: *Korean Pine* and *spruce-fir* mixed forests < *Tilia amurensis*—*Pinus koraiensis* mixed forests, it had the same trend as elevation gradient (*Korean Pine* and *spruce-fir* mixed forests < *Tilia amurensis*—*Pinus koraiensis* mixed forests). Levels of soil MBC varied in different soil depths for the two forest types. The EOC/TOC, MBC/TOC ratios varied. Soil EOC, MBC and TOC were all significantly related to total N and C/N, and were significantly negatively related to soil bulk density.

Key words: *Tilia amurensis*—*Pinus koraiensis* mixed forests; *Korean Pine* and *spruce-fir* mixed forests; soil organic carbon

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库, 在全球碳循环中扮演着源、汇、库的作用, 具有重要地位^[1]。在土壤碳库中, 土壤有机碳(SOC)是土壤养分的重要组

成部分, 不仅为植物生长提供碳源, 维持良好的土壤结构, 而且以 CO₂ 温室气体形式向大气释放碳, 其积累和分解直接影响着全球碳平衡^[2]。森林土壤有机

收稿日期: 2013-11-15

修回日期: 2014-01-08

资助项目: 黑龙江省省院科技合作项目(HZ201211); 国家自然科学基金面上项目(41275154); 黑龙江省财政厅自拟项目(2013-01SCZ); 黑龙江省财政厅自拟项目(2013-02SCZ); 黑龙江省财政厅自拟项目(2013-06SCZ)

作者简介: 沃晓棠(1976—), 女, 黑龙江省齐齐哈尔市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 森林生态学。E-mail: woxiaotang-zhao@163.com

通信作者: 田松岩(1963—), 男, 辽宁省大连市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 森林生态学。E-mail: Tiansongyan2011@126.com

碳库占全球土壤有机碳库的 39%，其贮量的微小变化都可能引起大气 CO₂ 浓度的显著变化^[3]。在全球气候变化背景下，森林土壤有机碳库已成为全球碳循环研究的重点之一。不同森林植被下土壤承接其凋落物和根系分泌物类型不同，形成的土壤有机碳库亦会有差别^[4]。因此，研究同一地区不同森林植被下土壤有机碳含量与分布特征，对评价森林土壤质量，管理土壤有机碳，应对全球气候变化具有重要意义。

近年来，一些学者就植被类型、地形、土壤理化性质、土地利用方式、经营管理措施对人工林土壤有机碳库影响等方面进行了相关研究^[5-9]，并取得了一定的成果，但关于我国天然林土壤有机碳库的系统研究和实测数据相对欠缺，特别是关于地处全球暖化敏感的中高纬度地区的小兴安岭林地土壤有机碳研究尤为欠缺。为此，本文以我国主要林区小兴安岭地区顶极群落——阔叶红松林为研究对象，探讨云冷杉红松林和椴树红松林土壤有机碳含量分布特征及其与土壤理化性质的关系，以期为估算区域森林土壤碳库及评价该地区不同森林植被类型对土壤有机碳库的影响提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黑龙江省伊春市丰林国家级自然保护区内，地处小兴安岭南坡，海拔 300~450 m，该

区属于中温带大陆性湿润季风气候，地理坐标为 48°02′—48°12′N，东经 128°58′—129°15′E，年平均气温为 -0.5℃，年降水量为 680~750 mm，无霜期为 100~110 d。地带性土壤为暗棕壤。丰林国家级自然保护区是中国目前保存最完整、最典型的原始红松林保护区，地带性植被为温带针阔叶混交林，主要乔木树种有：红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、红皮云杉(*Pinuc koraiensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)等。

1.2 样地设置与样本采集

2012 年 8 月在研究区域内确定云冷杉红松林、椴树红松林两种森林类型。每种森林类型内随机设置 3 个 20 m×30 m 固定样地，共计 6 个样地，样地基本情况见表 1。在每个固定样地内按对角线蛇形选择 12 个样点，每个样点用土钻分 0—10 cm，10—20 cm，20—30 cm 三层采集土样。将采集的土样低温保存带回实验室，分成两份，一份新鲜土样去杂后过 2 mm 筛进行微生物生物量碳(MBC)的测定，鲜土样的测定在 1 周内完成。另一部分自然风干、去杂、过 100 目筛进行土壤总有机碳(TOC)、易氧化碳(EOC)、全氮以及土壤基本理化性质等指标的测定。

表 1 样地基本情况

林 型	坡度/(°)	坡向	海拔/m	平均胸径/cm	灌木盖度/%	草本盖度/%	郁闭度/%
云冷杉红松林	13±2	南	348±27	25.09±6.09	30±5	80±5	85±5
椴树红松林	12±3	南	384±36	35.24±2.26	35±5	90±5	85±5

1.3 指标测定方法

土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[10]。土壤易氧化碳采用高锰酸钾氧化法测定^[10]。土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸提取法测定^[10]。土壤全氮采用凯氏定氮法测定^[10]。土壤 pH 值采用 pH 213 型酸度计测定，土壤容重采用环刀法测定，烘干法[(105±2)℃，12 h]测定土壤含水率^[8]。每个样品重复测定 3 次。

1.4 数据分析

采用方差分析(one-way ANOVA)检验森林类型和土层深度对土壤总有机碳含量、易氧化碳含量、微生物生物量碳含量的影响显著性(显著性水平设为 0.05)。采用(Pearson)相关性检验方法分析土壤总有机碳含量、易氧化碳含量、微生物生物量碳含量与土

壤理化性质的关系。应用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 统计分析软件对实验数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型土壤有机碳含量及垂直分布特征

2.1.1 土壤有机碳含量分布特征 两种森林类型土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳垂直分布特征相一致，即随土层深度增加而逐渐降低(表 2)。各林型土壤表层(0—10 cm)总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳含量与其它两层(10—20 cm，20—30 cm)之间差异显著($p<0.05$)。云冷杉红松林土壤总有机碳与易氧化碳在 10—20 cm 与 20—30 cm 土层之间差异显著($p<0.05$)，椴树红松林在两层之间差异不显著。两种林型土壤微生物生物量碳在 10—20 cm

层与 20—30 cm 层之间的差异相一致,均不显著。

2.1.2 不同森林类型土壤有机碳含量 两种林型土壤总有机碳、易氧化碳含量与微生物量碳含量范围分别为:29.64±2.08~107.23±10.38 g/kg,4.57±0.27~17.35±1.55 g/kg,149.82±30.16~836.13±60.32 mg/kg。不同森林类型的植物根系分布、凋落物以及利用方式不同,其同一土层不同林型的土壤有机碳含量不同。土壤易氧化碳与总有机碳含量因不同森林类型的差异有较好的一致性,即在 0—10 cm,20—30 cm 土层,椴树红松林土壤总有机碳与易氧化

碳含量均高于云冷杉红松林;在 10—20 cm 土层则相反。两种林型间土壤总有机碳含量差异在各土层中均不显著;土壤易氧化碳含量差异在土壤表层显著($p<0.05$),在其它土层不显著(表 2)。

不同土层土壤微生物生物量碳在两种林型之间差异略有不同。在 0—10 cm 土层,云冷杉红松林土壤微生物量碳含量(836.13 mg/kg)较高,椴树红松林(814.91 mg/kg)较低;在 10—20 cm,20—30 cm 土层,椴树红松林土壤微生物量碳含量均大于云冷杉红松林,但差异均不显著(表 2)。

表 2 不同森林类型土壤有机碳含量

土层 深度/cm	总有机碳/(g·kg ⁻¹)		易氧化碳/(g·kg ⁻¹)		微生物生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	
	云冷杉红松林	椴树红松林	云冷杉红松林	椴树红松林	云冷杉红松林	椴树红松林
0—10	104.06±13.25Aa	107.23±10.38Aa	16.51±0.86Ba	17.35±1.55Aa	836.13±60.32Aa	814.91±89.82Aa
10—20	51.46±6.89Ab	48.36±2.52Ab	8.56±0.82Ab	7.44±0.73Ab	275.23±22.61Ab	338.52±51.85Ab
20—30	29.64±2.08Ac	36.31±3.37Ab	4.57±0.27Ac	6.08±0.96Ab	149.82±30.16Ab	223.13±41.13Ab

注:表中所列为平均值±标准差,其后小写字母不同表示同一林分不同土层之间差异水平,大写字母不同表示同一土层不同林分之间差异水平($p<0.05$)。下表同。

2.2 土壤活性有机碳占总有机碳比率

两种林型土壤易氧化碳占总有机碳比例为 15.25%~18.00%,土壤微生物量碳占总有机碳比率为 0.54%~0.94%,易氧化碳占总有机碳比例高于微生物量碳所占比例。易氧化碳占总有机碳比例在垂直分布上的差异因森林类型而有所不同,云冷杉红松林沿土层垂直向下逐渐减少,且 0—10 cm,10—20 cm 土层显著高于 20—30 cm 土层($p<0.05$);椴树红松林在不同土层变化趋势不显著。两种林型土壤微生物量碳占总有机碳比率在垂直分布上有一致的变化规律,均沿土层垂直向下逐渐减少,其中,云冷杉红松林 0—10 cm 土层微生物量碳占总有机碳比率显著高于 10—20 cm,20—30 cm 土层($p<0.05$),椴树红松

林土壤微生物量碳占总有机碳比率在不同土层差异不显著(表 3)。

两种林型间土壤易氧化碳占总有机碳比率的差异因土壤深度而有所不同。在 0—10 cm 土层,云冷杉红松林显著高于椴树红松林($p<0.05$);在 10—20 cm 土层,云冷杉红松林高于椴树红松林,但差异不显著;在 20—30 cm 土层,椴树红松林显著高于云冷杉红松林($p<0.05$)。两种林型间土壤微生物量碳占总有机碳比率的差异在不同土层无一致规律,在土壤表层(0—10 cm),云冷杉红松林高于椴树红松林;在 10—20 cm 与 20—30 cm 土层则相反。各土层,椴树红松林与云冷杉红松林之间土壤微生物量碳占总有机碳比率差异均不显著(表 3)。

表 3 不同森林类型土壤活性有机碳占总有机碳比率 %

土层深度/cm	易氧化碳占总有机碳比率		微生物量碳占总有机碳比率	
	云冷杉红松林	椴树红松林	云冷杉红松林	椴树红松林
0—10	18.00±2.38Aa	16.33±0.31Ba	0.94±0.14Aa	0.79±0.10Aa
10—20	17.17±1.14Aa	15.25±0.90Aa	0.63±0.11Ab	0.70±0.09Aa
20—30	15.73±0.74Bb	16.77±0.88Aa	0.54±0.12Ab	0.62±0.09Aa

2.3 土壤有机碳与土壤养分的相关性

不同林型土壤全 N、碳氮比(C/N)、pH、土壤容重分析结果见表 4。随着土层的加深,两种林型土壤容重增大,土壤全氮减少。两种林型土壤 pH、C/N 垂直分布无一致规律性。各土层中,云冷杉红松林土壤全氮含量均低于椴树红松林,而土壤 C/N、容重则相反。

土壤总有机碳与活性有机碳之间及二者与土壤

理化性质之间相关分析表明,土壤易氧化碳与微生物量碳及二者与总有机碳均呈极显著正相关($p<0.01$)。土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳与土壤全氮呈极显著正相关($p<0.01$),与 C/N 呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)正相关,与土壤容重呈极显著负相关($p<0.01$)。土壤总有机碳与 pH 相关关系不显著,易氧化碳、微生物生物量碳与 pH 呈显著负相关($p<0.05$)(表 5)。

表 4 不同森林类型土壤主要生态因子

林 型	土层深度/ cm	总有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	C/N	pH	容重/ (g · cm ⁻³)
云冷杉红松林	0—10	104.06±13.25	6.48±0.04	16.03±1.30	5.33±0.16	0.79±0.05
	10—20	49.42±6.89	2.90±0.06	16.99±1.32	3.82±0.64	1.04±0.05
	20—30	29.64±2.08	1.46±0.04	20.22±1.80	4.17±0.68	1.27±0.07
椴树红松林	0—10	107.23±10.38	7.40±0.08	14.48±2.04	5.77±0.16	0.61±0.04
	10—20	49.55±2.52	3.62±0.06	13.66±1.58	4.13±0.71	0.91±0.06
	20—30	36.31±3.37	2.64±0.05	13.74±1.98	4.23±0.73	1.16±0.03

注:表中数据为平均值±标准误差。

表 5 土壤各指标的相关分析

指 标	全氮	C/N	pH	容重	易氧化碳	微生物生物量碳
总有机碳	0.618**	0.699**	-0.068	-0.426**	0.803**	0.749**
易氧化碳	0.539**	0.682**	-0.422*	-0.410**	1.000	0.751**
微生物生物量碳	0.687**	0.404*	-0.394*	-0.552**	0.751**	1.000

* * 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关。

3 讨 论

3.1 不同森林类型土壤有机碳含量的变化

林地土壤有机碳含量具有“表聚作用”^[11]。本文中同一林型 0—10 cm 土层的土壤总有机碳含量是 10—20 cm 土层的 2 倍,是 20—30 cm 土层的 3 倍,说明两种林型土壤有机碳含量的分布有很强的表聚性。路翔等^[12]研究发现,中亚热带 4 种森林类型 SOC 含量随土层深度增加逐渐降低。安晓娟等研究发现,亚热带天然次生林以及更新后 4 种类型的土壤有机碳含量都呈现出随土壤深度增加而逐渐降低的趋势^[13]。本文研究结果与这些研究结果相一致。本文中两种林型土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳含量均由土壤表层向下逐渐降低,在剖面上垂直分布差异性显著($p<0.05$),这主要是由于植物根系集中分布在土壤表层,凋落物和腐殖层以及土壤微生物的分解对土壤有机碳的贡献主要作用于地表,且随土壤深度的增加而减弱,因而土壤表层有机碳含量较高^[14]。

马和平等研究发现林地土壤总有机碳、易氧化碳和微生物量碳含量沿海拔梯度具有明显的变化规律,即随海拔升高逐渐增加。海拔升高,温度降低,土壤动物和微生物群落的活性相对较低,土壤有机质分解较慢,土壤呼吸强度减弱,有利于土壤有机碳的积累^[15]。本文中,土壤总有机碳与易氧化碳含量变化同海拔高度变化(椴树红松林>云冷杉红松林)一致(仅 10—20 cm 土层,云冷杉红松林的两个指标高于椴树红松林,但差异不显著),即海拔较高的森林类型,其土壤总有机碳与易氧化碳含量也较高。此结论同马和平等^[15]关于土壤易氧化碳与总有机碳含量随海拔高度降低而递减的研究结果一致,表明海拔和土壤深

度对总有机碳与易氧化碳含量具有显著影响。另一方面,椴树红松林作为针阔混交林,相较于云冷杉红松林(针叶混交林)具有较多的凋落物数量和根系分泌物,养分归还量大,分解转换较快,从而导致其土壤有机碳含量较针叶林高。

本文中两种林型之间差异在不同土壤层次上表现不一致,土壤表层(0—10 cm)云冷杉红松林土壤微生物量碳含量较高,椴树红松林较低,其它土层则相反,这与马和平等^[15]研究结果不一致,可能与土壤 pH 值高低有关,从表 5 可以看出,土壤微生物生物量碳与 pH 呈显著负相关。另一方面,椴树红松林地处海拔较高的山顶地带,较低的温度限制了土壤中好气性微生物的活动,有机质中能被微生物分解利用的部分相对较少,近而导致土壤微生物量碳较低。这进一步证明了,微生物量碳是土壤活性有机质中最活跃和最易变化的部分以及生物活性碳的复杂多变。综上,两种林型土壤微生物量碳含量的差异是森林类型、海拔、土壤环境等诸多因素共同作用的结果。今后还需进一步加强不同森林类型土壤微生物量碳动态及调控机理研究。

3.2 不同森林类型土壤活性有机碳占总有机碳比率

土壤活性有机碳占总有机碳比率能充分反映森林土地利用类型对土壤碳行为的影响^[16]。朱志建等研究表明易氧化碳是有机碳中稳定性相对较差的碳,易氧化碳占总有机碳的比率越高,说明养分循环越快,土壤稳定性越差,越不利于土壤有机质的积累^[17]。本文中,0—10 cm 与 10—20 cm 土层,云冷杉红松林易氧化碳占总有机碳比率均高于椴树红松林,且在土壤表层差异达显著水平($p<0.05$)。这就意味着云冷杉红松林土壤稳定性略逊于椴树红松林。

土壤微生物量碳含量与土壤有机碳总量的比值可以用来指示土壤碳的平衡、积累或消耗,预测土壤有机质长期变化或监测土地退化及恢复^[18]。本文中,两种林型间土壤微生物量碳占总有机碳比率的差异在不同土层无一致规律,在土壤表层(0—10 cm),云冷杉红松林高于椴树红松林,在10—20 cm与20—30 cm土层则相反,不同土层两种林型间差异均不显著。表明云冷杉红松林与椴树红松林土壤碳的平衡、积累或消耗及土地退化、恢复等能力相当,无显著差别。

3.3 土壤主要指标相关性

本文中易氧化碳与微生物生物量碳之间及二者与有机碳总量之间相关性均达极显著($p < 0.01$),表明不同林分类型土壤活性有机碳在很大程度上依赖于土壤总有机碳含量,另一方面,也说明活性碳之间关系密切。以上研究结果与姜培坤、朱志建等关于常绿阔叶林、马尾松林和人工杉木林土壤有机碳总量与各活性碳之间以及各类活性碳之间相关性均达到极显著水平的研究结果相一致^[4,17]。

路翔等研究显示中亚热带4种森林类型SOC含量与全N含量的相关性均为极显著^[12]。本文相关分析表明:土壤总有机碳、易氧化碳、微生物量碳与土壤全氮、C/N之间相关性达显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)。表明,土壤中氮水平的差异会影响微生物的分解、利用速度,在某种程度上控制土壤有机碳水平,因而,与总有机碳具有显著相关性的活性有机碳也与土壤全氮含量相关^[19]。另一方面,土壤中微生物通过调节凋落物分解速率调控土壤中碳的周转,是促使土壤中有机物和植物养分转化、循环的动力因素,土壤C/N是影响其群落结构变化的关键因子。因此,土壤C/N势必会影响土壤碳的形成和分解过程^[20-21]。另外,土壤有机碳含量与土壤容重呈极显著负相关,这与相关研究结论一致^[13,22]。

4 结论

(1) 两种林型土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳含量垂直分布特征一致,随着剖面深度的增加逐渐降低。

(2) 土壤总有机碳与易氧化碳含量变化同海拔高度变化(椴树红松林>云冷杉红松林)一致(仅10—20 cm土层,云冷杉红松林的两个指标高于椴树红松林,但差异不显著),即海拔较高的森林类型,其土壤总有机碳与易氧化碳含量也较高。两种林型土壤微生物量碳含量的差异在不同土壤层次上均不显著,且无一致规律性。

(3) 0—10 cm与10—20 cm土层,云冷杉红松林

易氧化碳占总有机碳比率均高于椴树红松林,且在土壤表层差异显著($p < 0.05$)。这就意味着云冷杉红松林土壤稳定性略逊于椴树红松林。两种林型间土壤微生物量碳占总有机碳比率的差异在不同土层无一致规律,且差异均不显著。表明小兴安岭地区云冷杉红松林与椴树红松林土壤碳的平衡、积累或消耗及土地退化、恢复等能力相当,无显著差别。

(4) 土壤总有机碳、易氧化碳、微生物生物量碳与土壤全氮、C/N之间呈显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)正相关,与土壤容重呈极显著负相关($p < 0.01$)。土壤易氧化碳与微生物量碳及二者与总有机碳均呈极显著正相关($p < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26(2): 88-94.
- [3] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,等. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量[J]. *林业科学*, 2012, 48(12): 1-9.
- [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] 谢涛,郑阿宝,王国兵,等. 苏北不同林龄杨树林土壤活性碳的季节变化[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1171-1178.
- [6] 王春梅,刘艳红,邵彬,等. 量化退耕还林后土壤碳变化[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(3): 112-119.
- [7] 王文静,王百田,吕钊,等. 山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 81-85.
- [8] Wang F E, Chen Y X, Tian G M, et al. Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(2): 181-189.
- [9] Wang Q K, Wang S L. Microbial biomass in subtropical forest soils: effect of conversion of natural secondary broad-leaved forest to *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(3): 197-200.
- [10] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,2000.
- [11] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 889-893.
- [12] 路翔,项文化,刘聪. 中亚热带4种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 169-173.

18.

[2] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,1995: 19-30.

[3] Zhang Jianguo, Li Huixia, He Xiaorong, et al. Impoverishment of soil nutrients in gully erosion areas in Yuanmou basin[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2003, 8(3B): 1034-1040.

[4] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559-568.

[5] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 等. 三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 159-161.

[6] 赵爱军, 许克翠, 彭业轩. 紫色土坡耕地栽种植物篱笆防治水土流失的试验初报[J]. 中国水土保持, 2004(11): 23-25.

[7] 吕惠明, 王恒俊, 谢永生. 不同土类坡耕地水土流失及其治理对策[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 61-63.

[8] 查世煜, 李秋洪. 三峡库区坡耕地的水土流失问题与对策[J]. 农业环境与发展, 1998, 15(2): 30-33.

[9] 孙景华, 杨玉阁, 张本家, 等. 辽北低山丘陵区坡耕地水土流失规律研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(4): 65-74.

[10] 水建国, 柴锡周, 张如良. 红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 33-36.

[11] 向万胜, 梁称富, 李位红. 三峡库区花岗岩坡耕地不同种植方式下水土流失定位研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 47-50.

[12] Kuylensstierna J L, Björklund G, Najlis P. Sustainable water future with global implications: everyone's responsibility [J]. Natural Resources Forum, 1997, 21(3): 181-190.

[13] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 366-374.

[14] 罗专溪, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 379-383.

[15] 刘瑞民, 杨志峰, 沈枕瑶, 等. 土地利用/覆盖变化对长江流域非点源污染的影响及其信息系统建设[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 16(3): 372-377.

[16] 唐莉华. 基于地貌特征的流域水—沙—污染物耦合模型及其应用[D]. 北京:清华大学, 2008.

[17] 杨红薇, 张建强, 唐家良, 等. 紫色土坡地不同种植模式下水土和养分流失动态特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 615-619.

[18] Kinnell P I A, Risse L M. USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1667-1672.

[19] Osenberg C W, Sarnelle O, Cooper S D, et al. Resolving ecological questions through meta-analysis: goals, metrics, and models[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1105-1117.

~~~~~

(上接第 17 页)

[13] 安晓娟, 李萍, 戴伟, 等. 亚热带几种林分类型土壤有机碳变化特征及与土壤性质的关系[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 53-58.

[14] 谢涛, 王明慧, 郑阿宝, 等. 苏北沿海不同林龄杨树林土壤活性有机碳特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 51-58.

[15] 马和平, 郭其强, 刘合满. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化[J]. 水土保持学报, 2012, 2(4): 163-171.

[16] 刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 431-437.

[17] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523-526.

[18] Haynes R J, Francis G S. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions[J]. Soil Science, 1993, 44(4): 665-675.

[19] 周焱, 徐宪根, 王丰, 等. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值( $qMB$ ,  $qCO_2$ ) [J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 265-269.

[20] Tripathi S K, Sumida A, Shibata H, et al. Leaf litter fall and decomposition of different above and below-ground parts of birch (*Betula ermanii*) trees and dwarf bamboo (*Sasa kurilensis*) shrubs in a young secondary forest in Northern Japan[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(2): 237-246.

[21] Dong N, Wang S L, Ouyang Z Y. Comparisons of carbon storages in *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* plantations during a 22-year period in southern China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(6): 801-805.

[22] 李平, 王国兵, 郑阿宝, 等. 苏南丘陵区 4 种典型人工林土壤活性有机碳分布特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 79-83.