

山西吕梁地区三种林分土壤养分与碳密度关系研究^{*}

曹晓阳¹, 王百田¹, 迟璐¹, 王文静¹, 聂森²

(1. 北京林业大学教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学经济管理学院博士后流动站, 北京 100083)

提 要: 通过在山西吕梁地区分别在山杨(*Populus davidiana* Dode)、落叶松(*Larix principisrupprechtii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)林内设置样地进行林分结构和土壤调查采样, 测定了土壤有机碳密度和养分含量, 分析了不同林分对土壤有机碳积累的差异性及其影响因素。结果表明: 该研究区三种林地土壤有机碳密度山杨林(57.08kg/m^2) > 落叶松林(16.54kg/m^2) > 油松林(6.71kg/m^2); 油松林、落叶松林土壤有机碳密度随着土层深度递减, 山杨林则在10-30cm土层土壤有机碳密度最低, 土壤表层与深层都具有富集作用。土壤中的TN、TP和有机质的含量与土壤有机碳之间的差异变化规律基本相同, 山杨林也表现出表层和深层含量较高的特点。相关分析结果说明三种林分类型土壤养分与土壤有机碳密度密切相关。

关键词: 山西吕梁; 土壤有机碳; 山杨(*Populus davidiana* Dode); 落叶松(*Larix principisrupprechtii*); 油松(*Pinus tabulaeformis*)

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

土壤有机碳密度在森林碳储量中占有重要地位, 森林土壤有机碳约占全球土壤有机碳密度的73%, 是陆地生态系统最大的有机碳库^[1-3], 其储量、分布及转化已成为全球有机碳研究的热点^[4]。土壤有机碳也是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标^[1, 4], 不仅影响土壤的物理特性和肥力, 还影响生物的生长和产量, 对于森林生态系统的发育具有密切关系^[5]。

山西中部吕梁地区属于华北暖温带落叶阔叶混交林地带, 山杨(*Populus davidiana* Dode)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、落叶松(*Larix principisrupprechtii*)林是该区域森林生态系统当中的重要森林类型, 也是我国北方森林生态系统的重要组成部分, 其土壤有机碳密度与土壤养分状态及其关系, 是我国森林生态系统碳储量评估的重要区域, 但是并未见到山西中部地区这些重要森林类型的土壤有机碳研究, 特别是土壤养分状态与有机碳密度之间的关系的方面的相关报道。因此, 文中试图通过分析该地区这三种林分的土壤养分和有机碳密度关系, 以揭示山西中部地区森林土壤碳储量状况, 探索土壤养分和碳密度在不同森林植被类型下的相互关系, 对完善森林碳汇监测与评估方法, 改善森林经营管理提供理论依据。

1 材料与研究方法

1.1 样地调查

吕梁市位于山西省中部西侧, 地理位置介于北纬 $36^{\circ}43'$ - $38^{\circ}43'$, 东经 $110^{\circ}22'$ - $112^{\circ}19'$ 之间, 属黄土丘陵沟壑区。境内地势北高南低, 垂直变化明显, 由东北向西南倾斜, 海拔1000-2000m。本地区大部分地表覆有薄厚不一的黄土, 其余为陡峻山地。境内气候属半干旱大陆性季风气候。年平均日照时数2351.7-2871.7h, 年均温 8.9°C , 10°C 年活动积温2246~3088 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期为133-178d。多年平均降水量502.5mm, 年平均蒸发量为1208mm。在光热降水条件控制下, 吕梁自然生态系统为森林草原景观, 其下发育的自然土壤为山地棕壤、灰褐土和草甸土, 自然土壤表层有机质含量在1.23%~8.65%之间。森林植被的主要优势种有山杨(*Populus davidiana* Dode)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)、白桦(*Betula*

^{*} 收稿日期: 2012-5-12; 修回日期: 2012-6-29。

基金项目: 中科院项目基金(编号: XDA05050203-04-01)资助。

作者简介: 曹晓阳(1988-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生。Email: shadowexy@163.com

通讯作者: 王百田。wbaitian@bjfu.edu.cn

platyphylla Suk)、白皮松(*Pinus bungeana* Zucc.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco)、锻树林(*Tilia tuan* Szyszyl. var. *tuan*) ,以及槐(*Sophora*) 和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.) 等树种。灌丛主要优势种有沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、绣线菊(*Spiraea*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.) 等。

样地选择与布设。依据典型性和代表性原则,在立地条件一致的地区分别选取所需要的天然林山杨、落叶松林、油松林样点,在样点中心附近选择同一森林类型设置 3 个重复样地。要求每个样地的布设面积为 1000m² (20m×50m),样地间距至少 100m。三种森林类型样点基本情况(表 1)。

土壤调查与采样。在每个样地内沿对角线分别挖取三个土壤剖面,作为土壤剖面观测与采样点。在每一个采样点上,按照 0-10cm、10-20cm、20-30cm、30-50cm、50-100cm,分 5 个层次分别采集样品带回实验室进行分析。同时按照相应土壤层次测定土壤容重、孔隙度等土壤物理参数。

表 1 样地基本概况

Tab. 1 Basic conditions of sample area

林分类型	林龄分类	郁闭度	林分高度 (m)	坡度 (°)	海拔 (m)	土壤容重 (g/cm ³)
油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	中龄林	0.6	16-18	5-12	1312-1382	1.20
落叶松(<i>Larix principisrupprechtii</i>)	中龄林	0.5-0.6	19-20	15-20	1850-2010	1.42
山杨(<i>Populus davidiana</i> Dode)	中龄林	0.6-0.7	13-17	6-15	1716-1823	1.21

1.2 分析方法

野外采回的土壤样品,首先剔除土壤以外的侵入体(如植物残根、昆虫尸体和砖头石块等)和新生体(如铁锰结核和石灰结核等),尽快风干。风干土样用木棍压碎后先过 10 目(2mm 筛孔),以四分法取适量样品磨细过 60 目(0.2mm 筛孔),供 C、N、P 分析测定使用。

按常规方法测定土壤全氮、全磷、有机碳含量。土壤有机质采用湿烧法即重铬酸钾-硫酸氧化法;土壤全氮采用凯氏法测定;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定。

SOC 储量计算公式为:

$$SOC_s = \sum_{i=1}^n (C_i \times \rho_i \times T_i) \times 10^{-1}$$

式中, SOC_s 为特定深度的土壤有机碳密度(t·ha⁻¹); C_i 为第 i 层土壤的 SOC 含量(g·kg⁻¹); ρ_i 为第 i 层土壤容重(g·cm⁻³); T_i 为第 i 层土壤厚度(cm); n 为土层数。

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中有机碳的贮量,某一土层 i 的有机碳密度(SOCD_i, kg/m²) 计算公式为:

$$SOCD_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) / 100$$

式中: C_i 为土壤有机碳含量(g/kg); D_i 为土壤容重(g/cm³); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为直径大于 2mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

因为所研究的土壤中直径≥2mm 的石砾所占体积比重都少于 5%,所以有机碳密度统计中没有考虑石砾含量。

数据处理采用 Excel2003 和 SPSS19.0 软件,图表制作采用 Excel2003 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳密度特点

三种不同森林类型,不论是单位体积土壤的碳含量(表 2)还是土壤有机碳密度(表 3),不仅不同森林类型之间有较大的差异,而且随土壤剖面深度变化也呈现出较大差异。

在不同林型土壤有机碳密度测定表明所研究的三种林分土壤碳密度的大小分别为:山杨林(57.08kg/m²) > 落叶松林(16.54kg/m²) > 油松林(6.71kg/m²)。显然山杨林的土壤有机碳密度远远超过其它两种林型,超过了同地带森林土壤的平均水平^[6,7]。从不同树种对土壤有机碳积累情况来看,山杨林相对生长速度较快,采伐周期比较短(当地一般 20-30 年),每年归还土壤中的生物量比较多,枯枝落叶、死亡根系

表 2 三种林分类型单位体积土壤有机碳含量 单位: kg/m³

Tab. 2 The soil organic carbon storage per unit volume of the forest soils

土层	油松	落叶松	山杨
0-10cm	10.6	52.7	68.8
10-20cm	4.7	21.1	29.7
20-30cm	7.4	16.0	28.4
30-50cm	6.6	13.6	43.55
50-100cm	6.2	9.7	71.34
平均	7.1	22.62	48.36

也容易分解,有利于土壤有机质的积累;落叶松和油松生长相对缓慢,采伐周期较长,枯枝落叶不容易分解,土壤有机质积累速度比较缓慢。

在所研究的土层深度范围内(0-100cm),三种林分的土壤有机碳密度剖面分布表现出随土壤深度加深,油松林、落叶松林土壤有机碳密度表现为递减的趋势,土壤上层有机碳密度分别占整个土层深度的54.1%、69.7%;而山杨林表现为递增趋势,土壤上层有机碳密度仅占整个土层深度的37.5%。显然落叶松林及油松林土壤有机碳的表聚性较山杨林明显,表土层存在有机碳富集现象。这与解宪丽^[8]等的研究中各林分土壤有机碳密度递减的结论不同,反映了山西中部山杨林土壤有机碳累积过程不同于其它森林类型,在较深土层内具有较强的富集现象。其原因可能是由于山杨林采伐周期比较短,经过多次采伐遗留土壤内的伐根腐烂分解后有利于深层土壤有机质的累积,而其它两种林分则采伐量小或者没有人工采伐过程。因此,森林经营活动对森林土壤有机碳的累积具有重要的影响。

2.2 土壤全量养分储量特点

表 4 三种林分的土壤养分储量 单位: g/kg

Tab.4 The soil nutrient storage of the stands

土层	油松			落叶松			山杨		
	全氮	全磷	有机质	全氮	全磷	有机质	全氮	全磷	有机质
0-10cm	2.37	0.33	18.96	5.60	0.77	60.07	10.21	0.70	105.79
10-20cm	1.36	0.22	7.08	2.58	0.75	27.48	4.09	0.65	42.86
20-30cm	1.24	0.17	10.38	1.52	0.21	16.61	4.14	0.41	41.07
30-50cm	1.00	0.10	8.98	1.48	0.25	16.25	5.48	0.83	61.36
50-100cm	0.94	0.06	8.11	1.43	0.26	11.69	8.14	1.09	93.95
平均	1.38	0.18	10.70	2.52	0.45	26.42	6.41	0.74	69.01

三种林分之间土壤的TN、TP、有机质含量差异,与土壤有机碳之间的差异变化规律基本相同,表现为山杨林>落叶松林>油松林,即有机碳密度越高的土壤中这些养分含量也越高,说明土壤的有机碳累积过程与土壤养分状况具有较密切关系。

土壤中的TN含量在油松林、落叶松林土壤中表现为在0-10cm土壤中含量最高,随着土层深度增加逐渐递减的规律,而落叶松林在20-30cm土壤中最低,在30cm以下呈现出增加的现象;土壤中TP含量在油松林、落叶松林土壤中0-30cm最高,随着土层深度增加剧减,而山杨林在50-100cm达到最高含量,而在20-30cm土层最低。土壤有机质含量在这三种森林类型中呈现出相似的规律。显然,油松林、落叶松林土壤养分的垂直分布规律与王绍强、周成虎^[9]等对于黄土高原的不同林分类型的土壤养分含量研究结果相似,而山杨林土壤养分在土壤剖面上的分布规律与大多数研究结果不同^[6]。

土壤全量养分储量不仅与植被演替过程相关,而且受到土壤厚度、质地、成土母质的矿物学特性等因素的影响。一方面山杨生长速度相对较快,枯枝落叶归还量比较大,腐烂根系较多,从而侵入土壤中的有机质较多,另一方面根系发达,土壤孔隙度较高,有利于土壤微生物的活动,促进土壤矿质元素的分解。

2.3 土壤全量养分储量与有机碳密度的关系

表 5 全氮、全磷与有机碳的相关关系

Tab.5 The correlation among total nitrogen, phosphorus and organic carbon

树种	回归关系	相关系数	标准误差
油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	TN = 0.338 + 0.108C	0.992**	0.279
	TP = 0.205 + 0.004C	0.836*	0.492
落叶松(<i>Larix principisrupprechtii</i>)	TN = -0.968 + 0.119C	0.964*	1.002
	TP = 0.036 + 0.018C	0.804*	0.391
山杨(<i>Populus davidiana</i> Dode)	TN = 0.786 + 0.085C	1.000**	0.366
	TP = -0.057 + 0.012C	0.993**	0.395

表中, TN 代表全氮, TP 代表全磷, C 代表有机质。

三种林分土壤有机碳与TN、TP相关性皆在显著水平以上(表5),其中山杨林、油松林土壤有机碳与TN相关性达到极显著水平,反映三种林分土壤的N、P全量养分储量与有机碳密度均密切相关,表明森林土壤有机碳的累积过程与土壤的N、P元素之间具有某种耦合作用,丰富的土壤营养元素可以促进土壤有机碳的储存量增加。武天云、胡新元^[10-12]等在黄土高原主要农业土壤中有有机碳性质与动态研究中也得出

表 3 三种林分类型土壤有机碳密度 单位: kg/m²

Tab.3 The soil bulk density of the forest soils

土层	油松	落叶松	山杨
0-50cm(上层)	3.58	11.69	21.41
50-100cm(下层)	3.12	4.85	35.67
合计	6.71	16.54	57.08

了土壤中 N、P 对植物有机碳的固定有密切关系的结论。不同林分受到植物特性、立地条件、群落特征等的影响,造成积累的生物量不同,植物生长越快,生物量积累越多,相应产生的回归量就多,土壤有机碳密度就高。N、P 作为植物生长所必需的营养元素,对植物的生物量具有重要限制作用,因此对土壤有机碳的变化储存规律也具有一定的敏感性,土壤 TN、TP 可以作为土壤有机碳密度的一种间接指示指标,具有一定的参考意义。

3 讨论

(1) 土壤作为一个不均匀的三维结构体,在垂直和水平方向上均呈现复杂的镶嵌性,加之植被、气候和生物与土壤的相互作用,使得土壤碳储量存在很大的变异性,导致土壤碳库的估算存在一定程度上的差异。在中国乃至全世界范围内陆地土壤碳库的估算方法有多种,国内对土壤有机碳密度研究起步较晚。李克让等^[9]利用 CEVSA 模型估算全国土壤有机碳密度平均为 $9.17\text{kg}/\text{m}^2$,其中落叶针叶林地为 $27\text{kg}/\text{m}^2$,落叶阔叶林地为 $18.04\text{kg}/\text{m}^2$;解宪丽^[8]等研究得出 $11.59\text{kg}/\text{m}^2$;熊毅等^[13]和张万儒^[14]等估算我国森林土壤平均碳储量为 $19.36\text{kg}/\text{m}^2$,其中落叶阔叶林平均为 $20.89\text{kg}/\text{m}^2$,温性针叶林为 $18.96\text{kg}/\text{m}^2$,落叶松林为 $16.65\text{kg}/\text{m}^2$,文中得出山西吕梁地区地下部分碳储量,落叶松林为 $16.54\text{kg}/\text{m}^2$,油松林最小为 $6.71\text{kg}/\text{m}^2$,其中山杨林最大 $57.08\text{kg}/\text{m}^2$ 。山杨林高出一般估算数据,这是由于所选取样地森林形成年代久远,历经多次采伐,且山杨生长迅速,生物量累积大,因此相应的土壤归还量大,有机碳积累多;其次油松林低于一般估算数据,与杨晓梅^[15]对于黄土高原的不同林分类型的碳储量研究结果相似。在所选取的三种林分类型中,山杨林的有机碳积累明显高于油松林及落叶松林,所以在森林的经营与管理中,应更加重视阔叶林在碳平衡与循环中的作用。

(2) 油松林、落叶松林不同林分土壤有机碳含量和土壤有机碳密度均随土壤深度增加显著减少,上层土壤有机碳含量贡献率最大,具有明显的垂直分布特征。这与 Hook 等^[16]对灌木、草原和森林土壤表层 20cm 有机碳占 1 m 深度土层中有机碳百分比与植被类型相关性研究取得了一致的结论,另外与杨金艳^[17]在东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量中研究也得到了类似的结果。根据 Baties^[18]各类型土壤碳贮量的研究 $0\sim 100\text{cm}$ 的土壤碳贮量中 $0\sim 30\text{cm}$ 所占的比例平均为 49%。对于山西吕梁地区土壤有机碳密度的分配 $0\sim 30\text{m}$ 的土壤碳贡献率平均为 44.16%,与其结果差异相近,但是山杨林在深层土壤 50–100cm 具有较高的碳密度,与以前的研究结果不同^[15]。

4 结论

(1) 三种林分土壤碳密度的大小分为:山杨林($57.08\text{kg}/\text{m}^2$) > 落叶松林($16.54\text{kg}/\text{m}^2$) > 油松林($6.71\text{kg}/\text{m}^2$),其中山杨林有机碳密度是最高的。

(2) 土壤 TN、TP 与土壤有机碳密度具有密切相关性,可以作为森林土壤有机碳密度的参考指示性指标。

(3) 山杨林土壤有机碳剖面分布规律具有表层富集和深层土壤富集的现象,油松林和落叶松林则表现为有机碳表层富集而随土层深度增加土壤有机碳递减的趋势。

参考文献

- [1] Post W M, Emanuel W R. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298: 156–159.
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem[J]. Science, 1994, 263: 185–190.
- [3] Schlesinger W H. Evidence from chrono sequence studies for a low carbon-storage potential of soil[J]. Nature, 1990, 48: 232–234.
- [4] 王艳芬, 陈佐忠, Larry T Ties Zen. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545–551.
- [5] 白静, 田有亮, 韩照日格图, 郭连生. 油松人工林地上生物量、叶面积指数与林分密度关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 82–83.
- [6] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518–522.
- [7] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙. 1981–2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804–812.
- [8] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687–699.
- [9] 王绍强, 周成虎, 李克让. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533–544.
- [10] 武天云, 胡新元. 黄土高原主要农业土壤有机碳性质与动态研究[Z]. 国家科技成果, 2006.
- [11] 王宝, 王百田. 晋西刺槐人工林生长分化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 48–50.

- [12] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 田晓玲, 崔哲伟. 晋西黄土区林草复合系统刺槐根系分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 77–79.
- [13] 熊毅. 我国土壤科学研究的回顾[J]. 土壤, 1984, 16(2): 41–45.
- [14] 张万儒, 等. 森林土壤定世研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [15] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 子午岭不同林地土壤有机碳及养分储量特征分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 130–134.
- [16] Hook P B, Burke I C. Biogeochemistry in a shortgrass landscape: Control by topography, soil texture and microclimate[J]. Ecology, 2000, 81(10): 2686–2703.
- [17] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学报, 2005, 11(3): 14–16.
- [18] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. Europe Journal of Soils Science, 1996, 47: 1512163.

The relationship between soil nutrient and carbon density of three forest stands in Lvliang, Shanxi

CAO Xiaoyang¹, WANG Baitian¹, CHI Lu¹, WANG Wenjing¹, NIE Sen²

(1. Ministry of Education; Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P. R. China; 2. Economic Management Institute of the Postdoctoral Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: By means of setting sample plots respectively in Aspen (*Populus davidiana* Dode), Larch (*Larix principisrupprechtii*) and Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) in Lvliang, Shanxi, the forests stand structure and soil were investigated and sampled, the soil organic carbon density and nutrient reserves were determined, in order to analyze the differences of accumulation of soil organic carbon and its influencing factors between different stands. The results showed the organic carbon density of the forest soils in the study area is Aspen (57.08 kg/m²) > Larch (16.54 kg/m²) > Chinese pine (57.08 kg/m²); the soil organic carbon densities of Chinese pine and Larch decline with the soil depth, the soil organic carbon density of Aspen is the lowest in the 10–30 cm soil, and it is enrichment in both top soil and deep soil. The difference change rules between soil TN, TP and organic matter content and soil organic carbon are basically the same. Aspen also shows the characteristic that the content is higher in top soil and deep soil. Correlation analysis showed that the soil nutrient and soil organic carbon density of the three stands are closely correlated.

Key words: Shanxi Lvliang; soil organic carbon; *Populus davidiana* Dode; *Larix principisrupprechtii*; *Pinus tabulaeformis*