

黄土高原子午岭油松林管理方式对黑碳和颗粒有机碳积累的影响

肖朝霞,王金成,刘建新,王鑫

(甘肃省高校陇东生物资源保护与利用省级重点实验室,甘肃庆阳745000)

摘要:对黄土高原子午岭油松林不同管理方式下土壤的黑碳(BC)、有机碳(POC)和活性有机碳(LOC)的空间分布和积累进行了研究。结果表明,各种管理方式的油松林其 POC、LOC 和 BC 由表层至下层均呈显著的降低规律性。各种管理方式油松林 0~10 cm 土层以 BC>POC>LOC,10~20 cm 土层中,天然油松林和粗放管理型油松林 BC>POC>LOC,而精细管理型油松林为 POC>LOC>BC;天然油松林与粗放管理型油松林在各土层中 BC 在土壤有机碳总量(TOC)中所占份额无差异,而精细管理型油松林 BC/TOC 所占份额呈下降的规律。在油松林各种管理方式下由表层至下层 POC/TOC 呈下降规律,而 LOC/TOC 比例则呈升高规律。

关键词:油松林;黑碳;颗粒有机碳;活性有机碳;积累

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)04-0115-06

土壤有机碳在全球碳循环中起着关键的作用^[1]。自20世纪80年代以来,土壤有机碳库的分布及其转化日益成为全球陆地碳循环研究的热点^[2]。黑碳(Black C)和颗粒状有机碳(Particulate organic C, POC)是近年来提出研究和引起关注的两类土壤有机碳库^[3],而引起土壤有机碳库的最初变化主要是易分解、矿化,即活性有机碳(Labile organic C, LOC)也是重要的有机碳库,尽管这部分碳素占全碳的比例很小,但它们对土壤碳素的转化很重要^[4,5]。黑碳是一种在地球表面循环的非透明物质,是化石燃料或生物有机体不完全燃烧的产物,是由高芳香化碳、元素态碳或石墨化碳等构成,具有化学和微生物惰性,是土壤中稳定的有机碳库。黑碳是惰性碳,一般情况下会发生物理迁移,而不会发生明显的化学变化^[6]。张旭东等认为,BC可能是土壤腐殖质中高芳香化结构的组成成分,是构筑土壤可持续利用的前提,是化学性质上更稳定的具有芳香结构的土壤碳库。POC是指粒径大于53 μm的有机碳,是一类腐殖化程度较低,但活性较高的有机碳库,稳定性较低,比土壤总有机碳更易受人为管理措施的影响,因此它是土壤中较易调控的一类物质^[7~9]。土壤活性有机碳库是指在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、分解、易矿化,其

形态、空间位置对植物和微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素^[10]。由于土壤可被看作一种碳的源或汇,并且影响着大气中CO₂浓度,因此土壤有机碳的演变已成为农业和环境科学研究的热点^[3]。但目前的研究偏重于总储量的研究,很少涉及不同碳库的空间变化,因而难以预测它们在土壤中的稳定性。尤其对于土壤黑碳的研究,目前还处在起步和探索阶段,人们对BC的作用和机理,BC与土壤可持续利用的关系研究尚不系统,对其研究尚属空白领域。本文通过研究分析黄土高原子午岭地区油松林不同管理方式下土壤LOC、POC和BC的空间变异及其与土壤有机碳总量(TOC)之间的关系,特别为BC在稳定土壤有机碳库的功能方面提供一些例证,有助于生态环境研究中如气溶胶等大气污染物质研究的发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中部子午岭林区南端的正宁县中湾林场,土壤为灰褐土类石灰性灰褐土亚类。地理坐标东经108°27'~108°36',北纬35°25'~35°27',海拔1620~1662 m,属黄土堆积和河流侵蚀不断交替形成的黄土丘陵沟壑地貌,多年平均气温9.3℃,年降水量588.2 mm,其中7~9月份降水量占

收稿日期:2010-10-27

基金项目:陇东学院科学研究资助项目(XYZK0508)

作者简介:肖朝霞(1973—),女,甘肃天水人,实验师,主要从事生态学研究。E-mail: xzhx731105@163.com。

通讯作者:王鑫(1956—),男,教授,主要从事土壤与植物营养教学和研究。E-mail: qywangxin@126.com。

万方数据

63%, 年蒸发量 1 228.3 mm。由于受自然地理和气候条件的影响, 该区森林植被及其资源的分布、阴阳坡的差异很大^[11,12]。该区处于森林草原、半干旱草原过渡地带, 森林大部分系屡经破坏后而形成的天然次生林。子午岭林区以华北植物区系成分为主, 在中国植物区系上应隶属于泛北极植物区、中国—日本森林植物亚区, 华北地区的黄土高原亚地区^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与样品采集

2007 年 7 月, 在子午岭天然油松林区和不同经营方式的人工油松林区内

选择立地条件基本一致的具有代表性的样点(表 1), 将土壤表层的枯枝落叶层除去, 采用 S 形采样方法, 用土钻在每个采样点采取 0~10, 10~20, 20~40, 40~60, 60~80 cm 五个层次土样, 分别混合后装入塑料袋, 带回室内将采集的样品除去植物根系、石块等, 然后在室内常温下晾干、研磨、全部过 2 mm 筛, 袋装密封备用。测定所需的样品采用“四分法”取样^[14]。先全部通过 1 mm 孔径筛, 再从过 1 mm 孔径筛的土样中均匀取出 1/4, 通过 0.149 mm 孔径筛。

表 1 子午岭油松林土壤样品基本情况

Table 1 Basic condition of soil samples in Chinese pine forest in the Ziwojing forest region

代码 Code	林龄(a) Forest age	立地条件 Field condition	主要植被分布与管理措施 Dominant vegetation distribution & management mode
A	69	海拔 1 620~1 662 m, 坡向阴坡, E108°34', N35°26', 坡度 20°~28°, 密度 1 850~2 100 株/hm ²	纯天然油松林, 林下灌木主要有毛药忍冬、次生辽东栎、沙莱等, 物种简单, 草本植物极稀。
B	31~43	海拔 1 600~1 630 m, 坡向阴坡, E108°34'42", N35°26', 坡度 20°~28°, 密度 1 050~1 200 株/hm ²	人工油松林(粗放管理型), 伴生少量辽东栎、山杨, 林下灌木为短柄五加、单瓣黄刺玫、辽东栎、沙莱、茶条槭、水栒子、牛奶子及南蛇藤等, 密度中。草本植物种群多且密布。
C	31~43	海拔 1 590~1 620 m, 坡向阴坡, E108°34'42", N35°26', 坡度 20°~28°, 密度 1 950~2 150 株/hm ²	人工油松林(精细管理型), 密度 4 m×4 m 或 4 m×6 m, 部分砍伐乔木, 去除杂木, 伴生灌木有刺五加、单瓣黄刺玫、辽东栎、沙莱、茶条槭、水栒子、牛奶子和南蛇藤等, 密度大。草本植物密布。

1.2.2 分析方法

土壤有机碳总量(TOC)采用硫酸—重铬酸钾外加热法测定; 黑碳指土壤用 0.1 mol/L 重铬酸钾+2 mol/L H₂SO₄ 在 55℃ 下氧化 60 h 后残余的碳^[15], 用 TOC 与以上可氧化的碳量差值计算。测定方法简述如下: 称 2 份各约 0.5 g 左右过 2 mm 筛土样分别置于硬质试管中, 加入 0.1 mol/L 重铬酸钾+2 mol/L H₂SO₄ 混合液 25 mL, 在 55℃ 水浴中加热 60 h, 用标准硫酸亚铁滴定法测定残余的重铬酸量, 计算被氧化的有机碳量(A); 另称 2 份过 0.15 mm 筛土样用常规法测定有机碳总量(B), B 与 A 的差值即为 BC 含量。颗粒有机碳(POC)指粒径大于 53 μm 的土壤有机碳, 用 5 g/L 焦磷酸钠溶液振荡分散土样过 53 μm 土筛分离获得^[16], 其数量用重铬酸钾外加热法测定。活性有机碳(LOC)包含土壤有机质易被氧化和易水解的那部分, 用温和氧化剂和酸溶液提取的化学方法来测定土壤活性有机碳^[17], 即用 0.2 mol/L (1/6K₂Cr₂O₇)—1:3H₂SO₄ 混合液, 在 130℃~140℃ 下与土壤样品共煮 5 min, 然后用 0.2 mol/L (1/2FeSO₄) 滴定。

1.2.3 数据处理

利用 SPSS 16.0 统计分析软件, 万方数据

对实验数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 油松林不同管理方式对土壤理化性质的影响

油松林不同经营管理方式对土壤理化性状的影响见表 2。对总有机碳分别进行 F 检验, 结果表明, 不同土层之间 TOC 含量差异达极显著 ($F_A = 135.720 > F_{0.01}$, $P < 0.01$; $F_B = 117.499 > F_{0.01}$, $P < 0.01$; $F_C = 17.541 > F_{0.01}$, $P < 0.01$); 多重比较结果表明, 0~40 cm 各层之间均达显著差异, 40~60 cm 与 60~80 cm 之间差异不显著, 但 0~40 cm 各层与 40~60 cm、60~80 cm 差异均显著; 粗放管理型, 0~80 cm 各土层之间均达显著差异; 对于精细管理型, 0~10 cm 与 10~20 cm 差异显著, 20 cm 以下各层之间差异不显著, 而 0~10 cm、10~20 cm 与 20 cm 以下各层之间差异显著。不同管理方式之间各相同土层 TOC 差异不显著。pH 值各种管理方式均由表层至下层呈增高趋势, 但天然油松林均较人工油松林低, 两种人工油松林之间差异不明显。土壤容重各种管理方式由表层至下层也呈增高趋势。

表2 供试土壤的理化性质

Table 2 Physicochemical properties of soil samples

管理方式 Management mode	土层 Soil layer (cm)	总有机碳 Total organic carbon (g/kg)	pH	容重 Bulk density (g/cm ³)	含水量 Water content (%)	土壤 孔隙度 Soil porosity (%)
A	0~10	35.18a	6.88	0.96	22.93	63.8
	10~20	23.97b	7.00	1.02	19.90	61.5
	20~40	13.33c	7.05	1.13	17.21	57.4
	40~60	10.10d	7.16	1.17	12.77	55.8
	60~80	7.54d	7.21	1.16	13.47	56.2
B	0~10	32.14a	7.04	0.91	14.02	65.7
	10~20	25.22b	7.15	1.02	13.02	61.5
	20~40	18.69c	7.19	1.06	13.07	60.0
	40~60	14.10d	7.34	1.17	12.17	55.8
	60~80	11.01e	7.34	1.22	11.65	54.0
C	0~10	35.89a	7.06	0.86	18.40	67.5
	10~20	25.59b	7.16	0.95	17.35	64.2
	20~40	18.06c	7.20	1.03	15.14	61.1
	40~60	15.45c	7.33	1.07	14.51	59.6
	60~80	12.97c	7.35	1.13	14.82	57.4

注:表中数据天然油松林为6个样品的平均值,精细管理型为5个样品的平均值,粗放管理型为3个样品的平均值。用邓肯氏多重比较法进行检验(Duncan, $\alpha=0.05$, $P<0.05$)。下同。

Note: Data in the table are the means of 6 soil samples in Chinese pine forest, of 5 soil samples in fine management mode and of 3 soil samples in extensive management mode. The same as below.

2.2 油松林不同管理方式对不同土壤有机碳的影响

油松林不同管理方式对不同有机碳的影响结果见表3。对BC分别进行F检验,结果表明,各管理方式下不同土层之间BC含量差异达极显著($F_{\text{天然}}=38.243$, $F_{\text{粗放}}=20.407$, $F_{\text{精细}}=11.332 > F_{0.01}$, $P<0.01$);多重比较结果表明,天然油松林0~10 cm与10~20 cm,10~20 cm与20~40 cm土层之间BC含量差异达显著水平,而20~40 cm以下各土层之间差异不显著。粗放管理型,0~10 cm与10~20 cm BC含量差异达显著水平,10~20 cm与40~60 cm,20~40 cm与60~80 cm之间差异显著,而10~20 cm与20~40 cm,20~40 cm与40~60 cm之间差异不显著。精细管理型,0~10 cm与10~20 cm,10~20 cm与60~80 cm之间BC含量差异达显著水平,而20~40 cm与40~60 cm,60~80 cm之间差异不显著。对POC分别进行F检验,结果表明,各管理方式下不同土层之间POC含量差异达极显著($F_A=50.608$, $F_B=21.680$, $F_C=32.377 > F_{0.01}$, $P<0.01$);天然油松林,0~10 cm与10~20 cm,10~20 cm与20~40 cm土层之间POC含量差异达显著水平,而

20~40 cm以下各土层之间差异不显著。粗放管理型,0~10 cm与10~20 cm,20~40 cm以下各层之间差异均不显著,而0~10,10~20 cm与20~40 cm以下各层之间POC差异达显著水平。精细管理型,0~10 cm与10~20 cm,10~20 cm与20~40 cm,20~40 cm与60~80 cm之间差异达显著水平,而20~40 cm与40~60 cm,40~60 cm与60~80 cm之间差异不显著。对LOC分别进行F检验,结果表明,各管理方式下不同土层之间LOC含量差异达极显著($F_A=56.581$, $F_B=5.223$, $F_C=8.189 > F_{0.01}$, $P<0.01$);天然油松林,0~10 cm与10~20 cm,10~20、20~40 cm分别与40~60、60~80 cm,40~60 cm与60~80 cm土层之间LOC差异达显著水平,而10~20 cm与20~40 cm之间差异不显著。粗放管理型、精细管理型0~60 cm各层之间差异均不显著,但以上各层分别与60~80 cm比较LOC差异均达显著水平。

表3 油松林不同管理方式下土壤不同有机碳含量(g/kg)

Table 3 Different content of organic carbon under different management modes of Chinese pine forest

管理方式 Management mode	土层 (cm) Soil layer	颗粒有机碳 (POC) Particulate organic carbon	活性有机碳 (LOC) Labile organic carbon	黑碳(BC) Black carbon
A	0~10	14.6±1.13a	8.16±0.09a	16.79±1.41a
	10~20	7.88±1.06b	7.37±0.13ab	12.49±1.14b
	20~40	3.77±0.34c	6.97±0.15bc	6.00±0.85c
	40~60	2.72±0.40c	6.28±0.43c	4.56±0.52c
	60~80	1.76±0.26c	3.67±0.18d	3.32±0.52c
B	0~10	12.9±1.68a	7.32±0.08a	19.17±1.46a
	10~20	10.2±1.25a	7.11±0.07a	13.46±1.30b
	20~40	4.47±0.77b	7.03±0.13a	11.38±1.20bc
	40~60	3.04±0.46b	6.57±0.11a	8.73±0.41cd
	60~80	1.84±0.41b	5.62±0.63b	6.90±0.33d
C	0~10	10.8±0.69a	7.32±0.27a	14.12±2.41a
	10~20	7.93±0.96b	7.11±0.08a	6.60±2.18b
	20~40	4.54±0.77c	7.03±0.25a	3.98±0.79bc
	40~60	2.91±0.27cd	6.58±0.10a	2.42±0.65bc
	60~80	1.91±0.14d	5.62±0.77b	1.08±0.47c

2.3 油松林不同土层各种有机碳与TOC之间的空间分布及其关系

2.3.1 黑碳与总有机碳的关系 图1为不同油松林不同土层BC/TOC的比例。F检验结果显示,各种管理类型的油松林不同土层BC/TOC的比例差异均不显著($F_A=1.284$, $F_B=0.664 < F_{0.05}$, $F_C=2.887 < F_{0.05}$, $P>0.05$);天然与粗放管理型各层变

化规律很相似,均无显著差异。而精细管理型在 0~40 cm 各土层 BC/TOC 的比例呈下降趋势,20~80 cm 又呈上升趋势,全土层呈 V 字形分布。0~10 cm 与 20~40 cm、40~60 cm 差异显著,而 0~10 cm 与 10~20 cm、60~80 cm 土层之间差异不显著。而 10 cm 土层以下各层之间差异也未达到显著性差异。

由于黑碳在全球的生物地球化学循环中起到重要作用,引起了人们对土壤和环境黑碳研究的浓厚兴趣^[18,19]。据估测,全球每年通过生物体或化石燃料燃烧形成 50~200 Tg(1 Tg=1 012 g)黑碳,其中大约有 10% 是由于化石燃料的燃烧形成气溶胶^[19,20],而 80% 以上的黑碳残留在地表^[21],大的黑碳颗粒会逐渐分解为小的颗粒而被淋失到土壤剖面的下层,或者通过生物作用被转化成土壤有机碳库中胡敏酸等物质^[22,23],在有些土壤中黑碳能达到土壤有机碳的 45% 以上^[24~26]。由于黑碳的高度芳香化结构,使黑碳具生物化学和热稳定性^[27]。本研究结果表明,粗放管理型油松林对土壤黑碳保留贡献最大,各层土壤其所占总有机碳比例近 60% 以上,其次是天然油松林,黑碳所占总有机碳均在 45% 以上,而精细管理型可能由于受人为干扰的影响,0~10 cm 最高比例不到 40%,以下各层均低于 30%。但与浙江黄壤、红壤森林土壤比较^[3],子午岭油松林植被下灰褐土黑碳所占总有机碳比例高出 3~6 倍,说明黄土高原土壤黑碳含量及其所占有机碳的份额很高,对稳定土壤有机碳库和土壤可持续利用有重要作用。

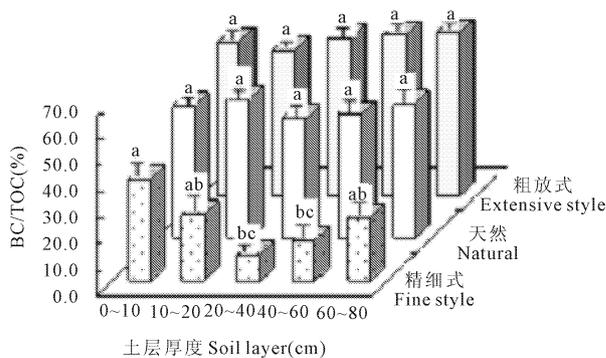


图 1 油松林不同管理方式 BC/TOC 所占份额

Fig.1 Proportion of BC/TOC on different management modes of Chinese pine forest

2.3.2 活性有机碳与总有机碳的关系 油松林不同管理方式 LOC/TOC 的比例关系见图 2。图示结果表明,天然油松林 LOC/TOC 的比例以 0~10 cm、10~20 cm 较低,且由表层至下层逐渐呈升高的规律;F 检验结果显示,天然油松林不同土层 LOC/TOC

的比例差异极显著 ($F_A = 45.206 > F_{0.01}$, $P < 0.01$); 0~10 cm 与 10~20 cm、20~40 cm 与 40~60 cm 土层差异不显著 ($P > 0.05$, 下同),而 0~10 cm、10~20 cm 与以下各土层差异显著,20~40 cm、40~60 cm 分别与 60~80 cm 土层差异显著 ($P < 0.05$, 下同)。粗放管理型 LOC/TOC 的比例由表层至下层亦呈升高的规律, F 检验结果显示,粗放管理型不同土层 LOC/TOC 的比例差异极显著 ($F_B = 17.627 > F_{0.01}$, $P < 0.01$); 0~10 cm 与 10~20 cm、10~20 cm 与 20~40 cm、40~60 cm 与 60~80 cm 土层差异不显著,而 0~10 cm 与 20 cm 以下各土层,10~20 cm、20~40 cm 分别与 40~60 cm、60~80 cm 土层差异显著。精细管理型与天然油松林的分布规律一致, F 检验结果显示,精细管理型不同土层 LOC/TOC 的比例差异显著 ($F_C = 4.559 > F_{0.05}$, $P < 0.05$); 0~10 cm 与 10~20 cm、10~20 cm 分别与 20~40 cm、40~60 cm、20~40 cm 与 40~60 cm 土层差异不显著,但 0~10 cm 分别与 20 cm 以下各土层、10~60 cm 各土层与 60~80 cm 土层差异显著。LOC 并不是一种单纯的化合物,它是土壤有机碳中具有相似特性即较高有效性的一部分有机碳^[28]。土壤活性有机碳比土壤有机碳更敏感于环境的变化^[29]。所以了解活性碳库的大小和动态变化,对调节土壤养分流有很大影响,对土壤管理措施响应明显,与土壤内在的生产力高度相关^[11]。活性有机碳在指示土壤质量和土壤肥力的变化时比有机质更灵敏,更能反映土壤理化性质。因此认为活性有机碳能够更准确、更实际地反映土壤肥力和土壤物理性质的变化;指示土壤的综合活力水平。土壤易氧化碳与全碳的比值可以度量土壤有机碳氧化的活性^[30,31]。本研究表明,各种油松林管理方式有表层至下层活性有机碳所占总有机碳的份额有极其相似的规律性,0~20 cm 土层各种管理方式均无差异,说明不同管理措施对油松林土壤活性有机碳无影响。而天然油松林在 20 cm 以下土层表现出与人工油松林的明显差异,这可能与天然油松林的林龄比人工林更长有关。

2.3.3 颗粒有机碳与总有机碳的关系 颗粒态有机碳是介于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间的暂时或过渡的有机碳组分,它比 TOC 更易受土地利用方式的影响^[32],颗粒有机物在土壤中周转速度较快,比腐殖化有机物快一个数量级以上,一般为几年到几十年^[33]。图 3 结果显示,各种经营管理方式的油松林 POC/TOC 的比例均呈明显的降低规律。F 检验结果显示,天然油松林不同土层 POC/TOC 的比例差异显著 ($F_A = 2.818 > F_{0.05}$, $P < 0.05$);多重

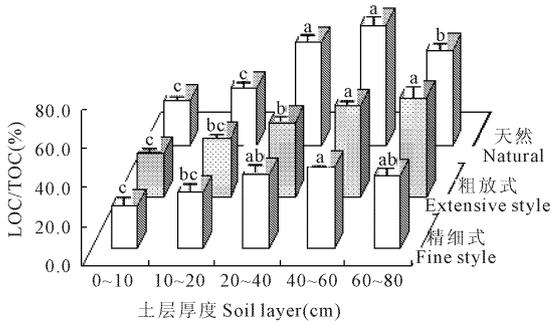


图 2 油松林不同管理方式 LOC/TOC 比例

Fig.2 Proportion of LOC/TOC on different management modes of Chinese pine forest

比较结果表明,天然油松林 0~10 cm 与 10~20 cm、10 cm 以下各土层差异均不显著,而 0~10 cm 与 20 cm 以下各土层之间差异显著; F 检验结果显示,粗放管理型不同土层 POC/TOC 的比例差异极显著 ($F_B=7.113 > F_{0.01}, P < 0.01$); 结果表明,粗放管理型 0~10 cm、10~20 cm 分别与 20 cm 以下各土层差异显著,而 0~10 cm 与 10~20 cm、20 cm 以下各土层之间差异不显著; F 检验结果显示,精细管理型不同土层 POC/TOC 的比例差异极显著 ($F_B=7.113 > F_{0.01}, P < 0.01$), 0~40 cm 各土层、20~40 cm 与 40~60 cm、40~60 cm 与 60~80 cm 之间土层差异不显著,而 0~10 cm、10~20 cm 分别与 40~60 cm、60~80 cm、20~40 cm 与 60~80 cm 土层差异显著。天然油松林以 0~10 cm POC/TOC 比例最高,粗放管理型以 0~20 cm 最高,精细管理型也以 0~20 cm 土层最高,说明人为管理对油松林土壤颗粒有机碳有较大影响。但是,精细式管理 0~20 cm 土层 POC/TOC 比例明显低于粗放式管理,进一步说明,颗粒有机碳所占总有机碳比例受人为干扰程度很大。

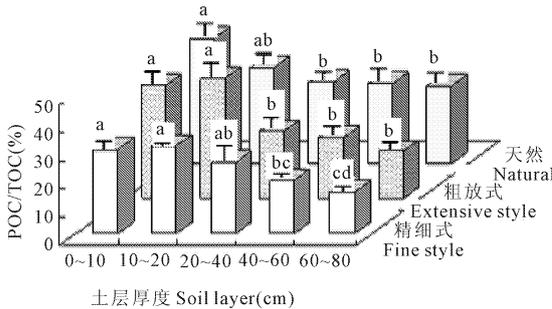


图 3 油松林不同管理方式 POC/TOC 比例

Fig.3 Proportion of POC/TOC on different management modes of Chinese pine forest

万方数据

3 小 结

1) 各种管理方式的油松林其 TOC、POC、LOC 和 BC 由表层至下层均呈显著的降低规律性,但 LOC 以天然油松林降幅较大,人工油松林降幅较小。在三种不同类型的有机碳中,各种管理方式油松林 0~10 cm 土层以 $BC > POC > LOC$, 10~20 cm 土层中,天然油松林和粗放管理型油松林 $BC > POC > LOC$, 而精细管理型油松林为 $POC > LOC > BC$, 说明人为干扰对此层有机碳分布的影响很大。

2) 天然油松林与粗放管理型油松林在各土层中 BC/TOC 所占份额无差异,说明其对黑碳的积累及形成稳定的有机碳库有重要贡献;有利于土壤资源的可持续利用;而精细管理型油松林 BC/TOC 所占份额呈骤然下降的规律,说明人为干扰不利于黑碳的形成与积累。

3) 从 POC/TOC 与 LOC/TOC 所占比例来看,在油松林各种管理方式下由表层至下层呈相反分布规律。即 POC/TOC 呈下降规律,而 LOC/TOC 比例则呈升高规律。人为管理可以提高土壤的颗粒有机碳含量,对颗粒有机碳有明显影响。

参 考 文 献:

- [1] Batjes N H. The total C and N in soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 151—163.
- [2] 王艳芬,陈佐忠, Larry T Tieszen. 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.
- [3] 张履勤,章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (4): 662—665.
- [4] Blair G J, Lefroy R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems [J]. Aust J Agri Res, 1995, 46: 1459—1466.
- [5] Jenkinson, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments [J]. Soil Sci, 1977, 123: 298—305.
- [6] 张旭东,梁超,诸葛玉平,等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用 [J]. 土壤通报, 2003, 34: 349—355.
- [7] Cambardella C A, Elliott E A. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 777—783.
- [8] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture [J]. Soil Science Society of American Journal, 1997, 61: 1382—1386.
- [9] Wander M M, Bidart M G. Tillage practice influences on the physical protection, bioavailability and composition of particulate organic matter [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32: 360—367.
- [10] 杨丽霞,潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (4): 502—506.
- [11] 张平仓,郑粉莉. 子午岭地区自然区域特征和土壤侵蚀的关系

- [J]. 中国科学院水利部水土保持研究所集刊, 1993, 17: 11—16.
- [12] 刘立品. 子午岭木本植物志[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998: 29—30.
- [13] 张希彪, 郭小强, 周天林, 等. 子午岭种子植物区系分析[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 267—274.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 21—320.
- [15] Aiken G R, Mcknight D M, Wershaw R L. Humic Substances in Soils, Sediment and Water: Geochemistry, Isolation and Characterization[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 329—370.
- [16] Zhang M K, He Z L. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an ultisol under rice cropping in southeast China [J]. Geoderma, 2004, 118: 167—179.
- [17] 沈宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 206—211.
- [18] Andreae M O, Andreae T W, Ferek R J, et al. Long-range transport of soot carbon in the marine atmosphere [J]. Sci Total Environ, 1984, 36: 73—80.
- [19] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles [J]. Science, 1990, 250: 1669—1678.
- [20] Kuhlbusch T A J, Crutzen P J. Toward a global estimate of black carbon in residues of vegetation fires representing a sink of atmospheric CO₂ and a source of O₂ [J]. Glob Biogeochem Cycles, 1995, 9: 491—501.
- [21] Kuhlbusch T A J, Crutzen P J. Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide [C]//Levine J S. Biomass Burning and Global Change. Cambridge MA: MIT Press, 1996: 160—169.
- [22] Bird M I, Grocke D R. Determination of the abundance and carbon isotope composition of elemental carbon in sediments [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61: 3413—3423.
- [23] Haumaier L. Elementarer Kohlenstoff — Quelle hocharomatischer Huminstoffe? [J]. Mitt Dtsch Bodenkundl Ges, 1993, 71: 225—228.
- [24] Golchin A, Clarke P, Baldock J A, et al. The effect of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter in a volcanic ash soil as shown by ¹³C NMR spectroscopy. II. Density fraction [J]. Geoderma, 1997, 76: 175—192.
- [25] Goldberg E D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution [M]. New York: John Wiley, 1985.
- [26] Haumaier L, Zech W. Black carbon—possible source of highly aromatic components of soil humic acids [J]. Org Geochem, 1995, 23: 191—196.
- [27] Middelburg J J, Nieuwenhuize J, Van Breugel P. Black carbon in marine sediments [J]. Mar Chem, 1999, 65: 245—252.
- [28] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展 [J]. 土壤肥料, 2000, (6): 3—7.
- [29] 高俊琴, 欧阳华, 白军红. 若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳垂直分布特征 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 76—79.
- [30] Bradley R L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available C and its relationship to rate increase in C mineralization [J]. Soil Biol Biochem, 1995, 27(2): 167—172.
- [31] Sparling G P. Relationship between the amount and the activity of the microbial biomass in dutch grassland soils: Composition of the fumigation-incubation method and the substrate-induced respiration method [J]. Soil Biol Biochem, 1993, 25(3): 530—538.
- [32] Amberdella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of some fraction from cultivated grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 123—130.
- [33] Carter M R. Analysis of soil organic matter storage in agroecosystems [C]//Carter M R, Stewart B A. Adv Soil Science: Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. London: CRC Lewis, 1996: 3—11.

Effects of management mode of Chinese pine forest on accumulation of black carbon and particulate organic carbon in the Ziwuling forest region of the Loess Plateau

XIAO Zhao-xia, WANG Jiu-cheng, LIU Jian-xin, WANG Xin

(Provincial University Key Laboratory of Protection & Utilization of Longdong Bio-resources in Gansu Province, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: Spatial distribution and the accumulation of BC, POC and LOC under different management modes of Chinese pine forest in the Ziwuling forest region of the Loess Plateau were investigated. The results indicate that there is a significant decreasing trend of BC, POC and LOC under different management modes of Chinese pine forest from its top layer to the lower layer. In the depth between 0~10 cm, there is a trend of BC>POC>LOC under all of management modes, as for the depth between 10~20 cm, there is a trend of BC>POC>LOC under natural Chinese pine forest and extensive management mode, but the trend in fine management mode presents POC>LOC>BC; Furthermore, there is no significant difference of BC/TOC at each soil layer under both natural Chinese pine forest and extensive management modes, but the trend of BC/TOC under fine management mode presents decrease. Meanwhile, there is a decreasing trend of POC/TOC from the top layer to the lower layer under all the management modes of Chinese pine forest, but as for LOC/TOC, it presents an increasing trend.

Keywords: 中国松林; 黑碳; 颗粒态有机碳; 活性有机碳; 积累量