

文章编号:1004-8227(2010)12-1448-08

三峡库区林地土壤有机碳含量特征及效应

王云琦,王玉杰

(北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083)

摘要:对三峡库区典型林分林地土壤有机碳(SOC)含量特征及对土壤物理性质、土壤结构和土壤养分效应进行研究,以为三峡库区生态环境建设提供依据。结果表明:SOC含量表现为表层(A层)土壤(12.06~45.18 g/kg)明显大于下层土壤,大一个数量级。从土壤表层到底层,SOC含量呈明显下降趋势。由相同立地条件的灌木林改造而来的农地土壤(改造年限8 a)各层土壤SOC含量都有所降低,土壤表层SOC含量降低了10%,土壤平均有机碳含量降为灌木林地的66%。三峡库区SOC含量与土壤物理性质直接相关,SOC含量与土壤容重和土壤毛管孔隙度存在最为明显的线性关系($R^2=0.83, 0.83, n=19, p<0.01$)。土壤有机碳直接参与了土团聚体的形成,SOC含量与土壤团聚度和土壤团聚状况均有较好的相关关系($R^2=0.62, 0.76, n=19, p<0.01$)。各林地土壤中氮元素含量最高,速效氮含量约为速效磷的6倍,为速效钾的2.5倍。SOC与土壤主要营养元素(N,P,K)关系中,对N元素作用最明显,特别是速效氮($R^2=0.66, n=19, p<0.01$),对磷的矿化起主要作用,与钾元素关系不明显。土壤有机碳是决定N和P矿化的主导因子,从土壤表层到底层C/N比值呈下降趋势,C/P值约为C/N值的6倍。阳离子交换量(CEC)与土壤团聚度之间有明显的相关关系($R^2=0.49, n=19, p<0.01$)。SOC对CEC的作用主要通过改变土壤结构而实现。

关键词:三峡库区;土壤有机碳(SOC);物理性质;营养元素

文献标识码:A

土壤是陆地碳库的主要部分,更是全球变化研究所关注的焦点问题之一,同时土壤有机碳直接对土壤物理、化学和生物学性质产生直接作用,成为国内外土壤肥力和土壤质量研究与评价的主要内容。据研究,全球土壤0~1 m土层贮存有机碳约是大气CO₂量的2倍。土壤有机碳10%的变化,其数量相当于人类活动30 a排放的CO₂量^[1]。森林土壤有机碳储量约占森林生态系统有机碳库的2/3^[2],全球森林土壤有机碳库约占全球有机碳库的40%左右^[3],是陆地系统最大的有机碳库之一。土壤有机碳库特别是森林土壤有机碳库贮量的微小变化,都可引起大气CO₂浓度的显著改变^[4]。土地利用方式的变化可以通过土壤对碳的固定和矿化来降低或增加大气中CO₂的浓度^[5]。

三峡工程将对生态环境等产生较大影响,森林改善生态环境的积极作用众所周知,探求如何科学地利用和保护库区有限的森林土壤资源,减缓温室气体排放,增加土壤碳储存性能,提高土壤质量,对

三峡库区的生态恢复和治理起重要作用。

1 研究区概况

研究区位于三峡工程库区尾端,重庆市北碚区,嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区(106°22'E,29°45'N),最高处海拔951.5 m,相对高差600 m。缙云山的土壤以酸性(pH 4.0~4.5)黄壤及水稻土为主,水平地带为典型的中亚热带生物气候带,年均气温13.6°C,年均降水量1 611.8 mm,年均蒸发量777.1 mm。缙云山保护区内植物资源丰富,植被类型较多,有6个主要植被类型为常绿阔叶林、暖性针叶林、竹林、常绿阔叶灌丛,另外还有亚热带灌草丛和水生植被。主要优势树种为:马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、栲(*Castanopsis fargesii*)、华山松(*Pinus armandii*)、四川大头茶(*Gordonia acuminata*)和四川山矾(*Sym-*

收稿日期:2010-05-15;修回日期:2010-06-15

基金项目:国家林业局948项目(2007-04-01)和国家科技支撑计划项目(2006BAD03A1802)资助。

作者简介:王云琦(1979~),女,山西省灵石人,讲师,主要从事生态水文、土壤侵蚀等领域研究工作。E-mail:wangyunqi@bjfu.edu.cn

plocos setchuanensis) 等。

在该自然保护区内选取 4 个主要的林分类型：马尾松阔叶混交林、常绿阔叶林、楠竹林和常绿阔叶灌丛，以农地（经灌木林改造而来，改造年

限 8 a）作为对照，对其林地土壤有机碳（SOC）分布进行研究，并对有机碳对土壤物理性质、土壤结构及营养元素作用效应进行研究。林分基本情况见表 1 和表 2。

表 1 三峡库区典型林分基本情况

Tab. 1 Basic Information of Typical Forest Stands in Three Gorges Reservoir Areas

林分	立地因子			林分					枯落物	
	海拔(m)	坡向	坡度(°)	起源	龄级	郁闭度	下木盖度	地被物盖度	厚度(cm)	贮量(t/hm ²)
针阔混交林	760	西北	16~25	天然	VI	0.90	40%	30%	3.5	31.57
常绿阔叶林	825	西北	26	天然	VI	0.90	40%	20%	3.4	58.90
楠竹林	800	西北	11	天然	V	0.85	10%	80%	1.4	29.11
灌木林	860	西北	10	天然	V	0.95	60%	50%	4.5	86.85

表 2 三峡库区典型林分基本组成

Tab. 2 Basic Compositions of Typical Forest Stands in Three Gorges Reservoir Areas

林分	主要树种	主要下木种	主要地被物物种
针阔混交林	四川大头茶 <i>Gordonia acuminata</i> 马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	川桧 <i>Eurya fangii</i> 四川杨桐 <i>Adinandra bockiana</i> 光叶山矾 <i>Symplocos lanciifolia</i>	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> 狗脊蕨 <i>Woodwardia japonica</i> 里白 <i>Diplazium glaucum</i> 淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>
	四川山矾 <i>Symplocos setchuanensis</i> 四川杨桐 <i>Adinandra bockiana</i>	白毛新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i> 罗浮柿 <i>Diospyros morrisiana</i>	
常绿阔叶林	四川大头茶 <i>Gordonia acuminata</i> 白毛新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i> 四川杨桐 <i>Adinandra bockiana</i>	短刺米槠 <i>Castanopsis carlesii</i> 贵州鼠李 <i>Rhamnus esquirolii</i> 四川山矾 <i>Symplocos setchuanensis</i> 川桧 <i>Eurya fangii</i>	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> 狗脊蕨 <i>Woodwardia japonica</i> 淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>
楠竹林	楠竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	杜茎山 <i>Maesa japonica</i> 菝葜 <i>Smilax china</i> 地瓜藤 <i>Ficus tikoua</i>	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> 花叶冷水花 <i>Pilea cadierei</i> 竹叶草 <i>Oplismenus compositus</i> 鸭跖草 <i>Commelina communis</i> 蝴蝶花 <i>Iris japonica</i>
灌木林	赤杨叶 <i>Alniphyllum fortunei</i> 广东山胡椒 <i>Lindera kwangtungensis</i> 白毛新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i> 光叶山矾 <i>Symplocos lanciifolia</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> 川桧 <i>Eurya fangii</i> 日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i> 润楠 <i>Machilus pingii</i> 尖连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> 萱草 <i>Hemerocallis fulva</i> 野筒蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i> 小白草 <i>Conyza canadensis</i>

2 实验方法

分别在 5 个典型林分（针阔混交林、常绿阔叶林、楠竹林、灌木林和农地对照）设立标准样方（20 m × 20 m），按土壤自然形成剖面（土壤 A 层、AB 层、B 层和 C 层，其中灌木林土壤剖面为 A 层、AB 层和 B 层）分层取样，每个土壤样本作 3 个重复，共开挖 5 个土壤剖面，获取 19 个土壤层次，57 个土壤样本。采用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度，采用吸管法测定土壤机械组成和土壤微团聚体组成；有机碳采用重铬酸钾外加热法；土壤全氮采用半微量凯氏法；全磷采用碱熔-钼锑抗比色法；全钾采用碱融-火焰光度计法；速效氮采用碱解扩散法；有效磷采用 NH₄F-HCl 浸提-钼锑抗比色法；速效钾采用 CH₃COONH₄ 浸提-火焰光度法；土壤阳离子交换量（CEC）采用醋酸铵法。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳分布特征

三峡库区各典型林分土壤有机碳（SOC）含量表现为表层（A）层土壤（12.06~45.18 g/kg）明显大于下层土壤，大一个数量级。从土壤表层到底层，SOC 含量呈明显下降趋势，且变异系数较大，其中常绿阔叶林最大（1.65），楠竹林最小（0.94）（表 3）。这与林地表面丰富的枯落物储量有关，森林中绝大部分的有机残余物都积累在土壤表面，大量的地表枯落物也是表层土壤有机碳重要的碳源。

A 层土壤 SOC 含量表现为灌木林最大（45.48 g/kg），楠竹林最小（12.06 g/kg），这与枯落物储量灌木林最大（86.85 t/hm²）、楠竹林最小（29.11 t/hm²）直接有关。农地是由灌木林改造而来，改造年限 8 a，在合理的耕作措施下，农地 SOC 含量仍保持较高水平，但相比灌木林地依然有所下降，可见林地土壤起到更好的碳汇作用。AB 层为腐殖层与淀积

层的过渡层,土壤表现为灌木林和楠竹林 SOC 含量较高,这与此层依然受上层腐殖作用影响有关,同时受植物根系分布较浅直接影响。楠竹林侧根发达,根系量大,灌木林根系较浅,根系的分布直接影响有机碳的垂直分布,而死根的腐解归还为土壤提供了丰富的碳源。B 层土壤表现为针阔混交林 SOC 含量最高(2.26 g/kg),这与根系分布有直接关系。针阔混交林中针叶林根系分布较深,对深层土壤起到很好的结构改良作用,也利于微生物活动,植物、动物和微生物的遗体、分泌物成为重要碳源。C 层土壤 SOC 含量则主要与母质层矿化作用有关。

从表层到底层常绿阔叶林除表层土壤 SOC 含量较高外,其他各层 SOC 含量均较低,储量较丰富的枯落物增加了地表 SOC 的含量,但是,枯落物成分相对单一,而其根系分布范围较小,不利于土壤良好的结构形成,从而不利于生物活动,降低了 SOC 含量。农地土壤由 SOC 含量丰富的灌木林改造而来,但是改造几年后,各层土壤 SOC 含量都有所降低,土壤有机碳含量为灌木林地的 66%(表 3)。

3.2 土壤有机碳含量与土壤物理性质

土壤的容重与孔隙度是反映森林土壤物理性质的两项重要指标。土壤的孔隙状况反映土壤质地和

结构对水、气状况的影响,即土壤通气性、透水性和持水能力是土壤性状的重要指标。土壤有机碳是微生物活动的能量源泉,是土壤形成土壤团聚体的胶合剂和核心^[6],SOC 含量通过改变土壤质地对孔隙状况产生影响,通过影响土壤结构对土壤容重也产生重大影响。

三峡库区林地土壤从表层到底层土壤总孔隙度、非毛管孔隙度和毛管孔隙度均表现为下降趋势,这与 SOC 含量变化一致,但是变异系数明显小于 SOC 分布。经统计分析,SOC 含量(C)与土壤总孔隙度(P)存在明显的线性正相关关系, $P=0.78C+41.3(R^2=0.77, n=19, p<0.01)$ 。

单凭总孔隙度不能反映土壤孔隙性状及对土壤水、气状况的影响。土壤团聚体内部毛管孔隙分布为主,而土壤团聚体间以非毛管孔隙分布为主。SOC 含量(C)与土壤毛管孔隙度(P_c)关系显著: $P_c=0.64C+31.8(R^2=0.83, n=19, p<0.01)$,而与土壤非毛管孔隙度(P_N)非线性显著关系,表现为对数相关: $P_N=1.53\ln(C)+8.9(R^2=0.42, n=19, p<0.01)$ 。说明,SOC 含量对土壤非毛管孔隙度,即团聚体内部孔隙作用最为明显(表 4)。

从土壤表层到底层土壤容重表现为增加趋势,与 SOC 含量变化趋势相反,变异系数明显小于 SOC 分布。农地土壤从表层到底层容重迅速增加,变异系数(0.33)大于其他林地土壤,这与农地土壤表层易受人为耕作活动影响有关,而底层土壤与根系分布浅、粘粒沉积作用有关,可见林地土壤对整个土壤层结构改良作用好于农地土壤。SOC 含量(C)与土壤容重(D)也存在明显的线性关系: $C=-0.02D+1.6(R^2=0.83, n=19, p<0.01)$,SOC 含量越高,土壤容重越小(表 5)。

表 3 三峡库区典型林地土壤有机碳(SOC)含量(g/kg)

Tab. 3 Content of Soil Organic Carbon(SOC)of Typical Stands in Three Gorges Reservoir Area

土壤层次	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农地(对照)
A	26.80	18.44	12.06	45.18	40.43
AB	4.00	1.74	6.38	8.18	5.28
B	2.26	0.46	1.86	1.68	1.74
C	0.70	0.58	1.16	—	0.81
平均值	8.44	5.31	5.37	18.35	12.07
变异系数 CV	1.46	1.65	0.94	1.28	1.58

表 4 三峡库区典型林地土壤孔隙状况(%)

Tab. 4 Soil Porosity of Typical Stands in Three Gorges Reservoir Area

土壤层次	针阔混交林			常绿阔叶林			楠竹林			灌木林			农地(对照)		
	总孔隙	非毛管	毛管	总孔隙	非毛管	毛管	总孔隙	非毛管	毛管	总孔隙	非毛管	毛管	总孔隙	非毛管	毛管
A	63.0	15.9	47.0	55.9	12.4	43.5	58.5	14.5	44.0	73.3	16.9	56.4	72.0	10.8	61.2
AB	50.4	12.3	38.1	44.6	10.3	34.3	47.1	12.7	34.4	57.9	14.2	43.6	40.7	5.8	34.9
B	49.4	12.3	37.2	38.2	8.9	29.3	45.4	9.9	35.5	45.3	11.4	33.9	29.2	4.9	24.3
C	38.1	8.7	29.4	42.4	9.8	32.6	43.9	10.0	33.9	—	—	—	30.6	5.1	25.5
平均值	50.2	12.3	37.9	45.3	10.4	34.9	48.7	11.8	37.0	58.8	14.2	44.6	43.1	6.7	36.5
CV	0.20	0.24	0.19	0.17	0.14	0.17	0.14	0.19	0.13	0.24	0.19	0.25	0.46	0.42	0.47

表 5 三峡库区典型林地土壤容重状况(g/cm^3)

Tab. 5 Soil Volume Density of Typical Stands in Three Gorges Reservoir Area

	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农地(对照)
A	1.151	1.184	1.144	0.732	0.778
AB	1.394	1.489	1.458	1.174	1.447
B	1.511	1.689	1.538	1.458	1.868
C	1.716	1.529	1.642	—	1.626
平均值	1.443	1.473	1.446	1.121	1.430
CV	0.16	0.14	0.15	0.33	0.33

三峡库区各土地利用土壤自然含水量以楠竹林最低(9%),灌木林(14%)和农地(15%)较高。从表层到底层呈下降趋势,变异系数较孔隙变化和土壤容重大,楠竹林从表层到底层土壤自然含水量变异最小。经统计分析 SOC 含量(C)与土壤自然含水量(W)存在明显的线性关系: $W = 0.215C + 10.1$ ($R^2 = 0.67, n = 19, p < 0.01$)。说明土壤有机碳含量将通过对土壤物理性质作用对土壤水分供应状况起到有效的调节作用(表 6)。

表 6 三峡库区典型林地土壤自然含水量状况(%)

Tab. 6 Soil Natural Water Content of Typical Stands in Three Gorges Reservoir Area

土壤自然持水量	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农地(对照)
A	16.8	14.7	10.1	19.0	18.9
AB	11.7	10.0	7.6	13.8	15.7
B	11.9	8.4	9.1	9.0	13.0
C	8.5	9.1	9.2	—	13.0
平均值	12.2	10.6	9.0	14.0	15.1
CV	0.28	0.27	0.12	0.36	0.18

表 7 三峡库区典型林地土壤团聚状况(%)

Tab. 7 Soil Aggregation of Typical Stands in Three Gorges Reservoir Area

	针阔混交林		常绿阔叶林		楠竹林		灌木林		农地(对照)	
	团聚度	团聚状况	团聚度	团聚状况	团聚度	团聚状况	团聚度	团聚状况	团聚度	团聚状况
A	45.6	21.2	28.9	10.9	7.7	5.7	55.6	29.0	51.1	14.3
AB	35.2	7.6	10.0	5.4	14.7	8.8	47.2	15.2	39.8	7.0
B	14.7	5.4	10.8	6.9	11.9	7.6	8.9	6.6	12.5	3.8
C	9.2	5.1	10.8	5.7	8.6	4.7	—	—	8.4	4.4
平均值	26.2	9.8	15.1	7.2	10.7	6.7	37.2	16.9	28.0	7.4
CV	0.65	0.78	0.61	0.35	0.30	0.28	0.67	0.67	0.74	0.65

3.4 土壤有机碳含量与土壤养分元素

土壤养分主要源于土壤矿物质与土壤有机质,其次为地下水、入渗水和大气降水。土壤有机质的分解比岩石矿物风化的速度快,所以有机质提供的这些养分元素所占的比重也较大。森林土壤中的有机质经过物理的、化学的、生物的分解作用,最终形成了简单的无机物质,这些无机物质是森林中的生物(特别是

SOC 含量与土壤物理性质有直接关系,而与土壤毛管孔隙度与土壤容重作用关系最为密切。这可能是由于 SOC 作为土壤胶结剂而使土壤团聚体形成,从而影响土壤团聚体内部孔隙(毛管孔隙)分布,进而通过影响土壤结构而对土壤容重产生直接作用。

3.3 土壤有机碳含量与土壤结构

土壤结构是土壤功能的关键因素,土壤碳含量与土壤结构密切相关^[6]。土壤的团聚度(团聚度($\%$) = $\frac{\text{团聚状况}}{>0.05\text{mm 微团聚体分析值}} \times 100\%$)和团聚状况(团聚状况($\%$) = $>0.05\text{mm 微团聚体分析值} - >0.05\text{mm 机械组成分析值}$)反映了土壤结构的好坏^[7]。土壤有机碳的形成抵消了 CO_2 的排放,促进了土壤结构的形成并提高其稳定性^[8]。三峡库区林地土壤从表层到底层团聚度和团聚状况均有所下降,变异系数表现为楠竹林最小(0.30, 0.28),表明表层土壤结构优于下层土壤,楠竹林由于根系作用和土壤质地较粗影响,AB 层和 B 层土壤结构较好(表 7)。土壤有机碳(SOC)含量与土壤团聚度(A)和土壤团聚状况(S)均有较好的相关关系: $A = 0.99C + 13.4$ ($R^2 = 0.62, n = 19, p < 0.01$), $S = 0.41C + 5.3$ ($R^2 = 0.76, n = 19, p < 0.01$)。可见土壤结构的好坏, SOC 的参与起到重要作用。SOC 是形成团聚体的重要胶结剂^[6],可以有效地把土壤缠结在一起,再加上根系作用和动物的活动,使土壤具有良好的团聚体结构。

低等微生物)和林木本身的养料来源。土壤中全 P、全 N 和全 K 的含量能反映土壤营养库中养分总储量水平。微生物对土壤有机质的转化起着最主要和最积极的作用,有机碳是微生物活动的能源。

3.4.1 SOC 与土壤氮素含量

土壤中的氮素大多数是贮藏在土壤有机质中的有机态氮化合物。土壤的全氮量是衡量土壤氮素供

应状况的重要指标,森林土壤全氮量的消长与土壤有机质含量的变化一样,主要决定于各地区有机质的积累与分解作用的相对强度。三峡库区各土地利用土壤从表层到底层全 N 含量呈下降趋势,平均值以常绿阔叶林最高(1.91 g/kg)。SOC 与全氮(N)之间存在较为明显的线性关系: $N=0.05C+0.81$ ($R^2=0.45, n=19, p<0.01$)。由于影响微生物活动的因素对土壤全氮量具有较大的影响,而 SOC 是微生物活动的主要能源,从而 SOC 通过微生物活动影响全氮含量。

土壤中的速效性氮素是易淋失和被植物(包括微生物)吸收利用的,在土壤中含量低。三峡库区土壤速效性氮素约占到全氮量的 5%左右。从土壤表层到底层速效性氮素呈下降趋势,平均值以灌木林含量最高,楠竹林最小。在常绿阔叶林的 AB 层有

效氮素含量明显增加,说明常绿阔叶林淋溶作用相对要强。SOC 含量(C)与速效氮(N_e)之间存在比较明显的线性关系: $N_e=2.48C+36.1$ ($R^2=0.66, n=19, p<0.01$)。可见相比全氮含量,土壤有机碳对土壤中速效性氮素含量作用更直接,这与速效性氮素容易被微生物所吸收利用有直接关系。

氮是构成细胞的要素, SOC 与氮二者比值的大小(C/N),关系到微生物的繁殖和活动,影响有机质分解的速度。三峡库区各土地利用土壤从表层到底层 C/N 比值呈下降趋势,农地下降速度最快,变异系数达 1.36。SOC 含量(C)与 C/N 比值(V)之间存在明显的线性关系: $V=0.41C+2.27$ ($R^2=0.71, n=19, p<0.01$),而全氮含量(N)与 C/N 比值之间相关性很弱。这说明,决定 N 矿化的主导因子是土壤有机碳(表 8)。

表 8 三峡库区典型林地土壤氮素含量

Tab. 8 N Element Content of Typical Stands Soil in Three Gorges Reservoir Area

土壤层次	针阔混交林			常绿阔叶林			楠竹林			灌木林			农地(对照)		
	全 N (g/kg)	速效 N (mg/kg)	C/N	全 N (g/kg)	速效 N (mg/kg)	C/N	全 N (g/kg)	速效 N (mg/kg)	C/N	全 N (g/kg)	速效 N (mg/kg)	C/N	全 N (g/kg)	速效 N (mg/kg)	C/N
A	2.12	114.7	12.65	3.99	50.2	4.62	1.37	90.4	8.83	3.16	172.8	14.28	1.58	107.9	25.66
AB	1.25	50.4	3.20	1.77	103.2	0.98	0.81	50.9	7.84	0.56	56.8	14.72	1.26	40.9	4.17
B	0.80	29.1	2.83	1.37	78.3	0.34	0.81	44.0	2.30	0.43	27.0	3.89	0.64	19.8	2.70
C	0.37	12.1	1.86	0.50	13.8	1.17	0.50	31.7	2.33	—	—	—	0.58	36.4	1.39
平均值	1.14	51.6	5.13	1.91	61.4	1.78	0.87	54.2	5.32	1.38	85.5	10.97	1.02	51.3	8.48
CV	0.66	0.87	0.98	0.78	0.63	1.08	0.42	0.47	0.66	1.11	0.90	0.56	0.48	0.76	1.36

3.4.2 SOC 与土壤磷素含量

土壤中磷素的含量受土壤有机质的作用。有机磷在微生物的作用下,经过矿物质化转化为植物可利用的无机磷酸盐。三峡库区土壤中氮素含量约为全磷含量的 5 倍左右。从表层到底层,土壤中全磷含量也呈下降趋势,但是变异系数较全氮含量低。土壤全磷含量与 SOC 之间没有直接相关关系。

土壤速效磷只占全磷量的极小部分,三峡库区

各土地利用中速效磷含量占全磷含量的 1%,而约为土壤中速效氮元素含量 15%左右。土壤全磷量不能作为一般土壤磷素水平的确切指标,土壤速效磷含量是衡量磷素供应状况的较好指标。土壤速效磷含量从土壤表层到底层基本呈下降趋势,变异系数较全磷含量大。土壤速效磷含量与 SOC 之间相关关系也不明显(表 9)。

表 9 三峡库区典型林地土壤磷素含量

Tab. 9 P Element Content of Typical Stands Soil in Three Gorges Reservoir Area

土壤层次	针阔混交林			常绿阔叶林			楠竹林			灌木林			农地(对照)		
	全 P (g/kg)	速效 P (mg/kg)	C/P	全 P (g/kg)	速效 P (mg/kg)	C/P	全 P (g/kg)	速效 P (mg/kg)	C/P	全 P (g/kg)	速效 P (mg/kg)	C/P	全 P (g/kg)	速效 P (mg/kg)	C/P
A	0.22	1.90	124.55	0.66	11.80	28.16	0.34	5.75	35.90	0.26	3.05	176.86	0.23	1.45	179.08
AB	0.15	0.95	26.14	0.62	3.60	2.82	0.28	3.25	22.85	0.18	1.40	46.48	0.16	0.90	33.32
B	0.13	1.00	17.78	0.63	3.20	0.73	0.28	2.40	6.62	0.13	1.00	13.27	0.12	0.85	14.47
C	0.08	2.00	8.51	0.09	0.35	6.53	0.14	1.20	8.18	—	—	—	0.11	0.15	7.56
平均值	0.14	1.46	44.24	0.50	4.74	9.56	0.26	3.15	18.39	0.19	1.81	78.87	0.15	0.84	58.61
CV	0.40	0.39	1.22	0.55	1.04	1.32	0.33	0.61	0.75	0.35	0.60	1.10	0.35	0.64	1.38

C/P 值约为 C/N 值的 6 倍左右,说明微生物对磷的转化速度低。有机磷较有机氮化合物的生物活性小,分解速度更慢,矿化速度也更慢。土壤 C/P 比值(V_p)与 SOC 含量(C)有明显的相关关系: $V_p = 0.24C(R^2 = 0.88, n = 19, p < 0.01)$,这说明有机磷的矿化速度主要由 SOC 含量来决定。

3.4.3 SOC 与土壤钾素含量

土壤全钾量反映了土壤钾素潜在供应能力。土

壤速效钾则是土壤钾素的现实供应指标。三峡库区林地土壤速效钾含量约为全钾含量的 0.4%,而土壤速效氮含量约为速效钾的 2.5 倍(表 10)。从土壤表层到底层,土壤钾元素含量并没有呈明显的下降趋势。SOC 含量与土壤全钾含量和速效钾含量均没有明显相关关系。说明土壤有机碳含量并不会对土壤中钾元素含量产生影响。土壤中钾元素含量主要受成土母质作用及土壤水分的淋洗状况影响。

表 10 三峡库区典型林地土壤钾素含量

Tab. 10 K Element Content of Typical Stands Soil in Three Gorges Reservoir Area

土壤层次	针阔混交林		常绿阔叶林		楠竹林		灌木林		农地(对照)	
	全 K (g/kg)	速效 K (mg/kg)								
A	8.00	34.5	11.97	64.5	5.52	34.5	4.97	39.5	6.71	39.5
AB	5.49	34.5	14.27	19.6	5.71	14.6	6.98	24.6	8.94	34.5
B	7.98	24.6	13.49	22.1	6.95	17.1	5.22	14.6	7.73	14.6
C	6.26	17.1	9.01	9.6	5.97	19.6	—	—	6.98	14.6
平均值	6.93	27.7	12.19	28.9	6.04	21.5	5.72	26.2	7.59	25.8
CV	0.18	0.31	0.19	0.84	0.11	0.42	0.19	0.48	0.13	0.51

3.5 土壤有机碳与土壤阳离子交换量

土壤有机碳 SOC 反映了有机质分解强度和阳离子交换能力^[6]。土壤阳离子交换过程就是土壤胶体表面所吸附的阳离子与土壤自由溶液中的阳离子进行互相取代的过程,土壤有机质是重要的胶合剂,而 SOC 是土壤中重要的胶结剂核心。一种土壤阳离子交换量(CEC)的大小,代表了土壤可能保存的养分量,交换量大的土壤能保存速效养分的能力大,反之则小。三峡库区各林地土壤 CEC 从表层到底层总体上呈下降趋势,灌木林 CEC 交换能力最强,楠竹林最差。农地虽由灌木林改造而来,但是农地 CEC 明显比灌木林低,说明同样立地条件下,林地土壤比农地土壤保存速效养分的能力要强很多。三峡库区林地 SOC 含量与 CEC 之间直接相关关系存在但不是很明显(表 11)。这是由于 CEC 常与稳定的团聚体结构联系在一起。阳离子交换量(CEC)

(E)与土壤团聚度(A)之间有明显的相关关系: $E = 2.44A - 0.56(R^2 = 0.49, n = 19, p < 0.01)$ 。这说明, SOC 对 CEC 的作用主要通过改变土壤结构而实现的。

4 结论与讨论

三峡库区各典型林分土壤有机碳(SOC)含量表现为表层(A)层土壤(12.06~45.18 g/kg)明显大于下层土壤,大一个数量级。从土壤表层到底层, SOC 含量呈明显下降趋势,且变异系数较大,这与陈亮中等研究结果相一致^[9]。平均 SOC 含量以灌木林最大(18.3 g/kg),有研究对灌木林与阔叶林各类有机碳含量比较结果表明灌木林有机碳含量要高于阔叶林^[10],灌木林的土壤碳库作用不容忽视。由相同立地条件的灌木林改造而来的农地土壤(改造年限仅 8 年)各层土壤 SOC 含量都有所降低,土壤表层土壤碳含量就降低了 10%,土壤平均有机碳含量降低到灌木林地的 66%。而有研究推算森林转变为农田后的 1~2 a 内,表层(0~20 cm)土壤碳含量降低达 25%^[11],农田弃耕恢复为森林 50 a 后,碳含量才能达到原有水平的 75%^[12],可见,保护森林对于全球碳储量将产生重要作用。由于土壤剖面数较少,所以未对土壤有机碳密度进行分析。

三峡库区 SOC 含量对土壤物理性质有直接作用。SOC 含量(C)与土壤容重(D)也存在明显的线

表 11 三峡库区典型林地土壤阳离子交换量(CEC)(cmol/kg)

Tab. 11 Cation Exchange Capacity (CEC) of Typical Stands Soil in Three Gorges Reservoir Area

	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农地(对照)
A	10.10	12.47	6.53	17.14	11.94
AB	8.90	7.38	4.77	23.75	9.17
B	14.52	8.07	4.46	7.53	10.24
C	4.34	6.27	5.93	—	7.49
平均值	9.47	8.55	5.42	16.14	9.71
CV	0.44	0.32	0.18	0.51	0.19

性关系: $C = -0.02D + 1.6$ ($R^2 = 0.83, n = 19, p < 0.01$)。SOC 含量对土壤毛管孔隙度, 即团聚体内部孔隙作用最为明显, $P_c = 0.64C + 31.8$ ($R^2 = 0.83, n = 19, p < 0.01$)。藏北退化草原虽然与三峡库区的气候、环境和土壤及植被类型完全不一样, 但是同样得出 SOC 含量与土壤物理质基本一致的关系^[12]。土壤有机碳的损失必然造成土壤容重增加、土壤毛管孔隙度和持水性能降低, 从而导致土壤结构遭到破坏, 土地生产潜力遭到破坏。

SOC 是形成团聚体的重要胶结剂, 可以有效地把土壤缠结在一起, 有利于土壤良好结构的形成。SOC 含量与土壤团聚度 (A) 和土壤团聚状况 (S) 均有较好的相关关系: $A = 0.99C + 13.4$ ($R^2 = 0.62, n = 19, p < 0.01$), $S = 0.41C + 5.3$ ($R^2 = 0.76, n = 19, p < 0.01$), 表明土壤有机碳直接参与了土壤团聚体的形成。已有报道系统总结了土壤有机碳库与土壤结构稳定性的关系, 定量描述土壤有机碳库和土壤稳定性关系将是今后研究的方向^[8]。土壤侵蚀通过使土壤团聚体破坏、径流携带走有机碳等途径影响土壤有机碳动态过程, 土壤侵蚀是导致陆地碳库衰减的主要动力之一^[14], 良好的土壤结构起到很好的土壤抗侵蚀作用, 从而也起到保护土壤碳库的作用。

SOC 与土壤主要营养元素 (N, P, K) 关系中, 对 N 元素作用最明显, 特别是速效氮, 对磷的矿化起主要作用, 与钾元素关系不明显。三峡库区各土地利用土壤中氮元素含量最高, 速效氮含量约为速效磷的 6 倍, 为速效钾的 2.5 倍。速效氮约占全氮含量的 5% 左右, 速效磷约为全磷含量的 1% 左右, 而速效钾只占全钾含量的 0.4%。

从表层到底层各营养元素基本都呈下降趋势。SOC 含量 (C) 与速效氮 (N_e) 之间存在比较明显的线性关系: $N_e = 2.48C + 36.1$ ($R^2 = 0.66, n = 19, p < 0.01$)。土壤有机碳是决定 N 矿化的主导因子, 从土壤表层到底层 C/N 比值呈下降趋势, N 矿化速度越到底层分解越快。SOC 含量 (C) 与 C/N 比值 (V) 之间存在明显的线性关系, $V = 0.41C + 2.27$ ($R^2 = 0.71, n = 19, p < 0.01$)。微生物对磷的转化速度远低于氮, C/P 值约为 C/N 值的 6 倍左右, 对 P 矿化速度慢, 而且主要由 SOC 含量来决定, 土壤 C/P 比值 (V_p) 与 SOC 含量 (C) 有明显的相关关系: $V_p = 0.24C$ ($R^2 = 0.88, n = 19$)。有研究表明, 有机碳和氮含量的下降是随着沙漠化的发展而发展的^[14], 土壤中氮元素是最主要的营养元素, 而有机碳与氮的关系最为密切, 土壤有机碳含量的下降将直接导致

氮元素含量下降, 会造成土地肥力的退化, 土地贫瘠化出现。

阳离子交换量 (CEC) (E) 与土壤团聚度 (A) 之间有明显的相关关系: $E = 2.44A - 0.56$ ($R^2 = 0.49, n = 19, p < 0.01$)。SOC 对 CEC 的作用主要通过改变土壤结构而实现。CEC 常与稳定的团聚体结构联系在一起^[6], 土壤良好的结构将有利于土壤有效养分的吸收与利用。

参考文献:

- [1] KIRSCHBAUM M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 21~51.
- [2] LAL R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *For Eco Manage*, 2005, 220: 242~258.
- [3] VALETINI R, MATTENUCCI G, DOLMAN A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forestes [J]. *Nature*, 2000, 404: 862~864.
- [4] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317~327.
- [5] ALLMARAS R R, SCHOMBERG H H, DOUGLAS C L, et al. Soil organic carbon sequestration potential of adopting conservation tillage in US croplands [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55: 365~367.
- [6] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review [J]. *Geoderma*, 2005, 124: 3~22.
- [7] SIX J, ELLIOU E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 1 042~1 049.
- [8] 彭新华, 张 斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618~623.
- [9] 陈亮中, 谢宝元, 肖文发, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤有机碳贮量研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 640~643.
- [10] 徐秋芳, 姜培坤, 沈 泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 18~22.
- [11] HOUGHTON R A, HOBBIE J E, MELILLO J M, et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soil between 1860~1980: A net release of CO_2 to the atmosphere [J]. *Ecol Monog*, 1983, 53: 235~262.
- [12] LUGO A E, SANCHEZ A J, BROWN S. Land use and organic carbon content of some subtropical soils [J]. *Plant Soil*, 1986, 96: 185~196.
- [13] 蔡晓布, 周 进. 退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2 639~2 645.
- [14] LAL R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2003, 29: 437~450.
- [15] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化 [J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 976~982.

CONTENT OF SOIL ORGANIC CARBON IN FOREST SOIL AND ITS EFFECTS IN THE THREE GORGES RESERVOIR AREA

WANG Yun-qi, WANG Yü-jie

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education,
College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the Three Gorges Reservoir areas, the typical forest types were selected to study the soil organic carbon (SOC) and its effects on soil physical properties, soil structure, and soil nutrients, which will benefit the eco-environment protection. The forest soil samples were collected according to soil genetic horizons. The content of SOC in A horizon (12.06~45.18 g/kg) was obviously larger than that in the lower horizons, over one quantitative grade. The content of SOC from top soil layer to bottom layer descended quickly. The arable land was reconstructed from shrub forest. Though the arable land has the same site with shrub forest, the content of SOC was less than that in shrub forest land after eight years cropping management. The content of SOC in A horizon in arable land decreased 10% compared to shrub forest soil, and the average content of SOC only accounted for 66% of shrub forest soil. The content of SOC had the direct effects on soil physical properties. There were obvious positive linear correlation between content of SOC and soil density and soil capillary porosity ($R^2 = 0.83, 0.83, n = 19, p < 0.01$). SOC also promote the soil aggregation. The content of SOC positively related to soil aggregation degree and aggregation ($R^2 = 0.62, 0.76, n = 19, p < 0.01$). The content of N element was the highest in forest soil in the study area. The content of effective N was six times as large as content of effective P, and 2.5 times of effective K. In soil nutrient elements of N, P, K, the content of SOC had significant relationship with content of N, especially with effective N ($R^2 = 0.66, n = 19, p < 0.01$), but not obvious with contents of P and K. The SOC played the dominant role in the N and P mineralization. From top layer to bottom layer, the C/N also descended. The C/P was about six times as great as C/N. Cation exchange capacity (CEC) was closely related to soil aggregation degree ($R^2 = 0.49, n = 19, p < 0.01$), which means the effect of SOC on CED was practiced by improving soil structure.

Key words: the Three Gorges Reservoir areas; soil organic carbon (SOC); physical properties; soil nutrient elements