

三峡库区消落带土壤有机碳氧化稳定性特征

贾国梅^{1,2}, 何立¹, 刘潇³, 但飞君¹, 陈芳清^{1,2}

(1. 三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. Department of Chemistry, Stony Brook University, New York 11794, United States)

摘要:土壤有机碳氧化的难易对土壤质量和碳沉降具有显著的影响。选取三峡库区消落带的 3 个海拔梯度的土壤, 以从未淹没的样地作为对照, 研究消落带湿地不同海拔梯度土壤有机碳氧化难易各组分(F_1 : 高氧化活性有机碳组分; F_2 : 中氧化活性有机碳组分; F_3 : 低氧化活性有机碳组分; F_4 : 难氧化有机碳组分)的特征。结果表明: 土壤 F_1 组分含量和其所占有机碳的比例在所有样地的各组分中最高。土壤易氧化有机碳总量及其 F_2 , F_3 和 F_4 组分都是消落带区域小于从未淹没的对照样地, 但是高氧化有机碳组分 F_1 在海拔 155~165 m 的消落带区域与从未淹没的对照样地之间并无显著的差异。在消落带区域, 155~165 m 区域土壤易氧化有机碳及其 F_1 组分显著大于 144~155 m 及其 165~175 m 区域的, 而 F_2 , F_3 和 F_4 组分之间都无显著性差异。相关性分析表明, 土壤易氧化有机碳及其氧化有机碳组分与土壤总有机碳之间都具有显著的正相关性, 而氧化有机碳 F_3 和 F_4 组分只与土壤全氮之间具有显著的正相关性。消落带土壤易氧化有机碳活性系数的大小顺序为 155~165 m > 145~165 m > 165~175 m, 这意味着消落带土壤有机碳不稳定性高低的顺序为 155~165 m > 145~165 m > 165~175 m。

关键词:三峡库区消落带; 土壤有机碳; 氧化难易组分; 活性系数

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)05-0014-06

Characteristics of Soil Oxidizable Stable Organic Carbon in Riparian of Three Gorges Reservoir Area

JIA Guomei^{1,2}, HE Li¹, LIU Xiao³, DAN Feijun¹, CHEN Fangqing^{1,2}

(1. College of Biological and Pharmaceutical Sciences, Three Gorges University,

Yichang, Hubei 443002, China; 2. Hubei International Scientific and Technological Cooperation

Center of Ecological Conservation and Management in Three Gorges Area, Three Gorges University,

Yichang, Hubei 443002, China; 3. Department of Chemistry, Stony Brook University, New York 11794, USA)

Abstract: The different oxidizability of soil organic carbon influences soil quality and carbon. The objective of this study was to determine the change in soil oxidizable organic carbon fractions (F_1 , F_2 , F_3 , F_4) at different elevation gradients in riparian wetland of Three Gorges Reservoir Area. The results showed that oxidizable organic carbon fraction F_1 and F_1 /TOC (total organic carbon) were the highest among the sample sites. Although readily oxidizable carbon and F_2 , F_3 , and F_4 in riparian zone were lower than those in the control upland, F_1 had no significant difference between the sites of 155~165 m and the control upland. In riparian zone, readily oxidizable carbon and F_1 were higher in the sites of 155~165 m than those in the other sites, whereas there was no significant difference for F_2 , F_3 , and F_4 among sites. Soil readily oxidizable carbon and oxidizable organic carbon fractions showed the significantly positive relationship with soil total organic carbon, whereas F_3 and F_4 showed the significant positive relationship with total nitrogen. Liability index followed the order: 155~165 m > 145~165 m > 165~175 m, indicating that the liability of carbon followed the same order in riparian zone of Three Gorges Reservoir Area.

Keywords: riparian of Three Gorges Reservoir Area; organic carbon; oxidizable fractions; liability index

湿地土壤或沉积物是陆地生态系统的重要碳库，约占全球陆地生态系统碳库的 10%。因而，湿地土壤有机碳的稳定性与全球碳循环的关系非常密切^[1]。氧化稳定性是土壤有机质的一个重要性质，与有机质抵抗氧化的能力有关。Biederbeck 等^[2]通过动力学研究指出，土壤有机质的短暂波动主要发生在易氧化分解部分，因而，土壤有机碳氧化稳定性关系到有机碳分解的难易、在土壤中存留时间长短和养分的释放等诸多方面^[3]。土壤易氧化有机碳(readily oxidizable carbon, ROC)具有移动快、不稳定、易氧化、分解与矿化等显著特征，直接参与土壤生物化学转化过程的活性组分以及微生物活动能源和土壤养分的驱动力，对土壤碳及质量变化具有更高的灵敏性^[4]。Chan 等^[5]根据土壤有机碳氧化的难易程度，把有机碳可划分为 4 个组分，即 F₁ 组分：高氧化活性有机碳；F₂ 组分：中氧化活性有机碳；F₃ 组分：低氧化活性有机碳；F₄ 组分：难氧化有机碳，即稳定有机碳。Barreto 等^[6]进一步认为 F₁ 和 F₂ 之和为更容易氧化的碳，即活性有机碳，而 F₃ 和 F₄ 之和为更难氧化的碳，即惰性有机碳。吴家梅等^[7]研究报道，高氧化活性有机碳 F₁ 组分是甲烷排放的主要底物，这进一步说明土壤有机碳氧化程度的难易在全球碳平衡中起着非常重要作用。

三峡大坝的拦蓄和泄洪形成的消落带湿地由于其水位不断的消涨而成为流域景观内生物地球化学过程最为活跃的区域，是全球碳循环研究的热点^[8]。贾国梅等^[9]研究报道三峡库区消落带土壤有机碳和易氧化有机碳之间具有显著的正相关性，这说明易氧化有机碳能够敏感指示土壤有机碳的变化，然而很少有研究报道消落带土壤有机碳氧化稳定性的特征。

表 1 不同海拔梯度样地特征

海拔梯度	LI	MI	SI	NI
年淹没时间/d	225	165	60	0
年干燥时间/d	140	200	305	365
植物物种	空心莲子草 [<i>Alternanthera philoxe-roides</i> (Mart.) Girseb.]、狗牙根 [<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.]等			
	狗尾草 [<i>Setaria viridis</i> (L.) Scop.]、狗牙根 [<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.]、双穗雀稗 [<i>Paspalum distichum</i> L.)]等			
	玉米等 柑橘等			

1.3 土样分析

土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定。土壤总有机碳(TOC)和土壤易氧化碳(ROC)采用重铬酸钾氧化—稀释热法，总有机碳消煮的温度是 170~180℃，而易氧化碳的消煮温度为 130~140℃。易氧化有机碳(ROC)组分测定采用改进的 Walkley-Black 方法^[10]，加入 10 ml 0.167 mol/L 的重铬酸钾后，分别加入 5, 10, 20 ml 浓硫酸，酸度分别为 6, 9, 12 mol/L，然后用

因而，本研究以三峡库区消落带土壤为研究对象，研究不同海拔梯度土壤有机碳氧化稳定性的特征，同时探明人为调控的消落带湿地土壤中哪些有机碳组分氧化潜力最强，对土壤质量或者温室气体排放影响更大，以期为人 为调控的消落带湿地生态系统土壤碳循环的进一步研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域选择紧邻三峡大坝的秭归县的童庄河消落带(110°43′38″E, 30°56′51″N)和香溪河消落带(110°45′10″E, 31°01′31″N)。该地区气候属亚热带大陆性季风气候，气候温暖湿润，四季分明，雨热同季，热量充沛。年平均气温为 17.9℃，年平均降水量为 1 006.8 mm，年日照时间 1 631.5 h，无霜期年平均为 260 d 左右。土壤类型为紫色土。

1.2 土样采集

首先调查童庄河和香溪河两个消落带土壤质地情况，选择两个消落带质地都为紫色土的区域作为样地。然后在每个消落带划分不同高程段：从未淹没区(NI)(175~185 m)、淹没持续时间较短区(SI)(165~175 m)、年淹没和排干持续时间近似相等区(MI)(155~165 m)和淹没持续较长区(LI)(145~155 m) 4 个区域，以从未淹没区域作为对照(表 1)。在 2012 年 7 月(库区水位是 145 m 左右)取样，在每个消落带的每个海拔梯度选择 2 个 10 m×10 m 的样方按照蛇形法在 0—20 cm 各采取 5 个点的土壤，然后每个消落带每个海拔梯度的每个样方的 5 个样点的土壤分别混合为 1 个土样。土样室内自然风干，用于土壤有机碳、全氮和易氧化碳及其组分的分析。

1 mol/L 硫酸亚铁标定，所测得的有机碳分别记为 6, 9, 12 mol/L 的有机碳^[5]。12 mol/L 的有机碳就是易氧化碳含量。其组分如下：F₁ 组分为 6 mol/L 的有机碳，高氧化活性有机碳组分；F₂ 组分为 9 mol/L 的有机碳减去 6 mol/L 有机碳，中氧化活性有机碳组分；F₃ 组分为 12 mol/L 的有机碳减去 9 mol/L 有机碳，低氧化活性有机碳组分；F₄ 组分为 TOC 减去 12 mol/L 的有机碳，稳定有机碳组分。土壤易氧化有机

碳活性指数分别按照下式^[11-12]计算：
活性系数= $F_1/ROC\times3+F_2/ROC\times2+F_3/ROC\times1$
(1)

稳定系数= $(F_3+F_4)/(F_1+F_2)$
(2)

1.4 数据处理

每个指标的平均数为两个消落带的两个样方内土壤室内再进行 3 次重复的平均值。试验数据的处理比较用 Turkey's-b 单因素方差分析,相关性分析用 Pearson's test 分析,在 SPSS 11.5 软件上分析。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度土壤含水量、有机碳和全氮的特征

土壤含水量的变化范围为 14.90%~16.54%。MI 区域最大,NI 区域最小,但是方差分析的结果表明,4 个样地的含水量之间并无显著的变化。土壤总有机碳(TOC)的变化范围在 3.76~8.04 g/kg,土壤全氮(TN)的变化范围为 0.60~1.13 g/kg(表 2)。土壤总有机碳和全氮含量是从未淹没的对照样地显著大于消落带区域的样地。在消落带区域,总有机碳

的变化趋势为 MI>SI>LI,而全氮含量却在 3 个样地之间无显著性的差异,这说明三峡库区水位消涨,确实降低了土壤总有机碳和全氮的含量,但是淹没持续时间长短对总有机碳的影响显著,而对全氮的影响并不显著。

2.2 不同海拔梯度土壤氧化有机碳及其组分的特征

土壤易氧化有机碳(ROC)总量的变化范围为 2.51~5.79 g/kg(表 2),也是从未淹没的对照样地显著大于消落带区域的样地。在消落带区域,MI 样地的易氧化有机碳显著大于 SI 和 LI,而 SI 和 LI 之间却无显著性的差异,这说明总有机碳大的对照样地,其易氧化有机碳总量也大,而在消落带区域,淹没时间较长或者较短的区域其易氧化有机碳含量的降低比年淹没和排干持续时间近似相等的区域的更显著。土壤易氧化有机碳占总有机碳的比例的变化范围为 67.63%~81.03%,MI 区域最大,LI 区域最小,但是方差分析的结果表明 4 个样地之间并无显著的差异。这说明虽然水位消涨影响了土壤易氧化有机碳含量,但是 ROC/TOC 的比例在 4 个样地之间并没有发生显著的变化。

表 2 消落带不同海拔梯度土壤总有机碳、全氮和易氧化碳总量

样地	含水量/%	TOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	ROC/(g·kg ⁻¹)	ROC/TOC/%
LI	16.51(0.74)a	3.76(0.20)c	0.60(0.08)b	2.51(0.19)c	67.63(4.60)a
MI	16.54(0.62)a	5.01(0.39)b	0.73(0.08)b	3.95(0.27)b	81.03(4.63)a
SI	15.00(0.73)a	4.06(0.17)bc	0.71(0.10)b	3.06(0.09)c	76.94(4.29)a
NI	14.90(0.95)a	8.04(0.44)a	1.13(0.11)a	5.79(0.32)a	71.89(2.73)a

注:平均数(标准误)后的小写字母相同说明处理间无显著性的差异,字母发生变化,说明处理间具有显著差异。

在所研究的样地中,土壤有机碳氧化稳定性组分的大小顺序都为 F₁>F₄>F₃>F₂(表 3)。在土壤有机碳氧化稳定性组分中,F₁ 组分的变化范围为 1.32~2.69 g/kg,大小顺序为 NI>MI>LI>SI,但是单因素方差分析的结果表明,F₁ 在 NI 与 MI 之间,LI 和 SI 之间都分别无显著差异。F₂,F₃ 和 F₄ 组分是消落带区域的小于对照样地。在消落带区域,随着淹没持续时间长短 F₂,F₃ 和 F₄ 组分并无显著的变化,这说明淹没持续时间长短仅仅对高氧化有机碳产生了影响,且 MI 区域维持了高氧化活性的有机碳含量,只有 LI 和

SI 区域的高氧化活性有机碳的含量显著降低。

LI 样地中,F₁ 和 F₄ 组分显著的大于 F₂ 和 F₃ 组分(表 3),而 F₁ 和 F₄ 之间、F₂ 和 F₃ 之间分别无显著性的差异;在 MI 样地中,F₁ 显著大于其他组分,而其他组分间也无显著性的差异;SI 样地中,F₁,F₃ 和 F₄ 之间无显著差异,F₂ 和 F₃ 之间无显著差异,只有 F₁ 显著大于 F₂;NI 样地中,F₁,F₃ 和 F₄ 之间无显著差异,F₂ 和 F₃ 之间也无显著性的差异。这说明 NI,SI 和 LI 既能提高最易氧化有机碳含量,又能保持稳定性有机碳含量,只有 MI 仅仅提高了 F₁ 组分的含量。

表 3 消落带不同海拔梯度土壤有机碳氧化稳定性组分 g/kg

样地	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
LI	1.34(0.13)bA	0.53(0.10)bB	0.63(0.10)bB	1.27(0.22)bA
MI	2.49(0.22)aA	0.63(0.06)bB	0.83(0.10)bB	1.06(0.28)bB
SI	1.32(0.16)bA	0.67(0.12)bB	1.06(0.15)bAB	1.01(0.20)bAB
NI	2.69(0.26)aA	1.17(0.14)aB	1.89(0.15)aAB	2.29(0.30)aA

注:平均数(标准误)后的小写字母相同说明处理间无显著性的差异,字母发生变化,说明处理间具有显著差异。同一行的大写字母相同说明 4 个组分间无显著性差异,大写字母不同说明 4 个组分间差异显著。

2.3 土壤易氧化有机碳各组分占有有机碳总量的百分数

在 4 个有机碳氧化稳定性组分中,组分 F_1 /TOC 的比例在每个样地中都最高(图 1),且随不同海拔梯度具有显著的差异,MI 样地的 F_1 /TOC 显著大于其他样地,而其他样地之间无显著性的差异; F_2 /TOC, F_3 /TOC 和 F_4 /TOC 在不同样地之间都无显著性的差异,这说明消落带水位的消涨只是对单位有机碳的高氧化活性的有机碳百分数具有显著的影响。高氧化有机碳的组分 F_1 比易氧化有机碳总量更能敏感指示土壤有机碳的微小的变化。Barreto 等^[6]认为惰性有机碳($F_3 + F_4$)具有较高的化学稳定性,它的周转周期高于易氧化有机碳,在土壤中存留时间较长,较为稳定^[13-16]。活性有机碳($F_1 + F_2$)占总有机碳的比例随着海拔的升高其大小顺序为 $MI > SI > LI > NI$ (图 1),MI 的活性有机碳($F_1 + F_2$)占总有机碳的比例高达 64.46%,显著高于其他样地。惰性有机碳占总有机碳的百分数的大小顺序是 $NI > LI > SI > MI$ (图 1),但是单因素方差分析的结果表明,MI 区域显著低于其他样地,而其他样地之间并无显著性的差异。这说明了消落带 MI 区域活性有机碳的比例提高,而惰性有机碳的比例降低。

2.4 有机碳的活性系数和稳定系数的特征

有机碳的活性系数的变化范围为 2.09~2.42 (图 1),其大小顺序为 $MI > LI > NI > SI$,但是单因素方差分析的结果表明,LI 和 MI 之间、LI,SI 和 NI 之间分别都无显著性的差异,只有 MI 显著的高于 SI 和 NI。这说明消落带区域年淹没和排干持续时间近似相等的区域显著地提高了有机碳的活性,加速有机碳氧化,有提高碳矿化风险的潜力,其次是淹没持续时间较长的区域,淹没持续时间较短的区域易氧化碳活性最低。有机碳的稳定系数的变化范围为 0.64~1.25,LI 最大,MI 最小(图 1),但是方差分析的结果表明,4 个样地之间并无显著性的差异,这说明易氧化有机碳的活性系数比有机碳稳定系数更适合评价三峡库区消落带土壤质量状况。

2.5 土壤有机碳氧化稳定性各组分与土壤特性间的相关性

相关性分析的结果表明, F_1 与 F_2 ($p < 0.05$)、 F_4 ($p < 0.01$)、总有机碳 ($p < 0.01$) 和总易氧化有机碳 ($p < 0.01$) 之间都具有显著的正相关性; F_2 与 F_3 ($p < 0.05$)、总有机碳 ($p < 0.01$)、总易氧化有机碳 ($p < 0.01$) 之间具有显著的正相关性 ($p < 0.01$) (表 4); F_3 与总有机碳、全氮和总易氧化有机碳之间都具有显著的正相关性 ($p < 0.01$); F_4 组分与总有机碳 ($p < 0.01$)、全氮 ($p < 0.01$) 和总易氧化碳 ($p < 0.05$)

之间具有显著的正相关性;总有机碳和总易氧化有机碳之间也具有显著的正相关性 ($p < 0.01$),而全氮与 F_1 、 F_2 和总易氧化有机碳之间并无显著的相关性。土壤含水量与易氧化有机碳及其组分之间都无显著的相关性。

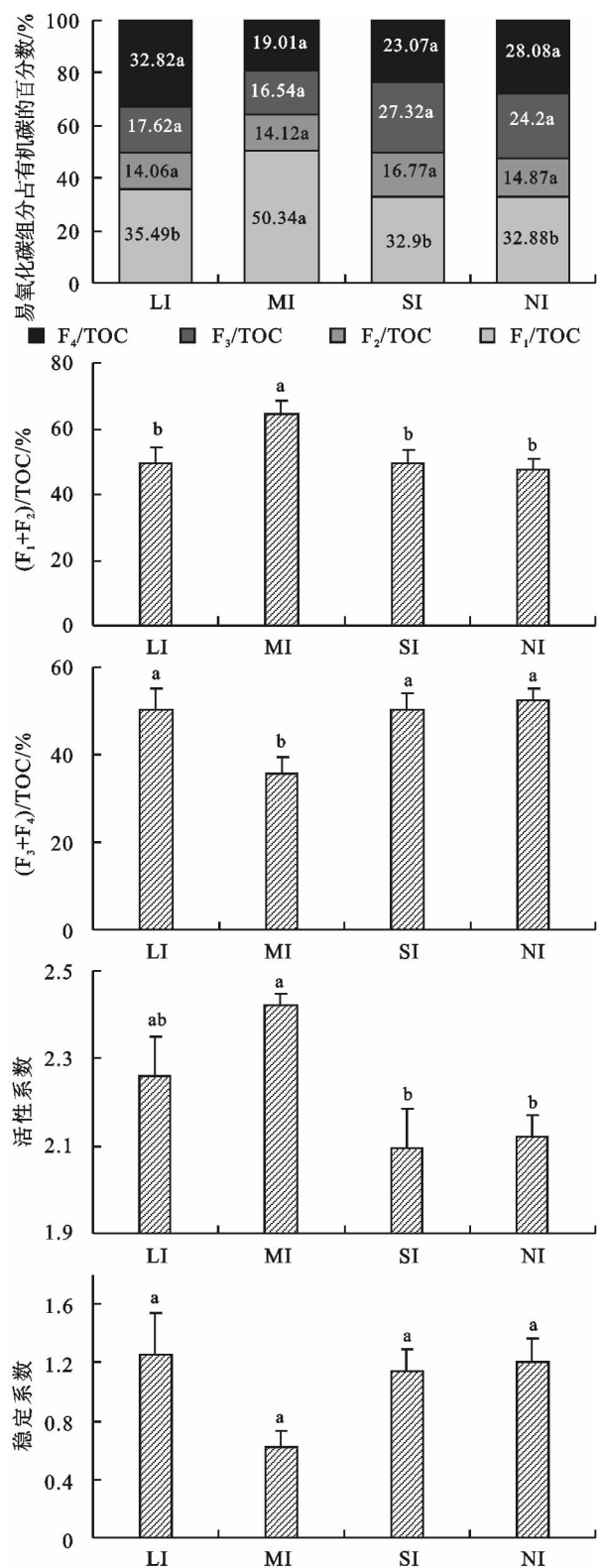


图 1 消落带不同海拔梯度土壤有机碳的活性系数、有机碳氧化难易各组分占总有机碳的百分数

表 4 土壤有机碳氧化稳定性组分和土壤总有机碳、全氮间的相关性

项目	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	TOC	TN	ROC
F ₂	0.31 [*]						
F ₃	0.27	0.35 [*]					
F ₄	0.34 ^{**}	−0.01	0.23				
TOC	0.77 ^{**}	0.47 ^{**}	0.63 ^{**}	0.72 ^{**}			
TN	−0.15	0.11	0.58 ^{**}	0.38 ^{**}	0.32 [*]		
ROC	0.83 ^{**}	0.64 ^{**}	0.70 ^{**}	0.30 [*]	0.88 ^{**}	0.18	
含水量	−0.24	−0.13	−0.12	−0.20	−0.28	0.05	−0.24

注：*表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾)，*表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤有机碳氧化难易的 4 个组分反映了土壤有机碳的组成和状态,对于土壤有机碳的储存和变化具有重要的意义^[17]。易氧化有机碳与总有机碳的比值越大说明总有机碳活性越强,总有机碳被分解矿化的潜力越大^[18]。F₁ 组分和 F₂ 组分与土壤有效营养紧密相关,活性较高;而 F₃ 组分和 F₄ 组分主要起源于腐殖化的有机质,是由一些分子量较大,化学稳定性较高的化合物构成^[5]。本研究中,F₁ 在 4 个组分中占有有机碳总量的百分数最高,F₂ 组分占的比例最低。这说明 F₁ 组分对土壤有机碳矿化的贡献最大,F₂ 组分的贡献最小。随着海拔的升高,有机碳氧化难易的各组分的变化趋势并不一致。消落带 MI 区域的 F₁ 含量显著大于其他消落带区域,且与对照样地无显著性差异,而且 MI 区域的 F₁/TOC、(F₁+F₂)/TOC 百分比显著大于其他样地,(F₃+F₄)/TOC 显著小于其他样地,这说明 MI 区域由于年淹没和排干持续时间近似相等提高了单位土壤有机碳的容易氧化的部分,降低了单位土壤有机碳的惰性部分,提高了微生物所需要的有效养分,也有可能加大碳通过氧化而损失的风险性。这可能与其地上植物多样性较高^[19]提供更多活性有机残体^[5,20]和年干湿交替时间近似相等改善了土壤结构有关^[21]。F₂、F₃ 和 F₄ 组分消落带区域显著小于对照样地,但是在消落带区域 3 个组分在 3 个样地之间分别都无显著性的差异,这进一步说明虽然有机碳氧化难易的 4 个组分能够指示湿地和旱地的差异,但只有 F₁ 组分能够更加敏感指示消落带土壤质量受淹没持续时间长短的影响。Chan^[5]和 Barreto^[6]等也表明不同的牧草地或者不同的农林系统土壤有机碳氧化稳定性的差异主要发生在 F₁ 组分上。因而,高氧化有机碳组分 F₁ 可以作为消落带土壤质量变化的敏感指标。

相关性分析的结果表明,易氧化有机碳及其氧化有机碳各组分与总有机碳之间具有显著的正相关性,这说明易氧化有机碳总量及其氧化有机碳各组分的变化很大程度上依赖于总有机碳的变化^[22]。这与易氧化有机碳的主导影响因素是土壤全碳的结论是一致的^[23-24]。土壤全氮和 F₃ 及其 F₄ 与之间具有显著的正相关性,但是与 F₁ 和 F₂ 之间都无显著的相关性,这说明土壤惰性碳的变化与土壤全氮之间具有紧密的联系,而土壤碳的活性部分与土壤全氮之间并无紧密联系。涂利华等^[25]报道土壤活性有机碳与土壤中氮素含量关系密切,氮素的增加可能通过减少土壤有机质的数量而影响活性有机碳的含量,也可能通过改变土壤有机质的稳定性和质量,从而改变土壤活性有机碳与非活性有机碳之间的转变。

3.2 结论

消落带区域土壤有机碳主要以高氧化有机碳组分 F₁ 为主,F₁ 在 4 个组分中占有有机碳总量的百分数最高,这说明 F₁ 组分对土壤有机碳矿化的贡献最大,在消落带营养循环中起重要作用。消落带区域,F₁ 组分随着海拔梯度发生相应变化,而 F₂、F₃ 和 F₄ 并无显著性的变化,这意味着高氧化有机碳组分 F₁ 能敏感指示消落带淹没持续时间长短对土壤质量的影响,而 F₂、F₃ 和 F₄ 组分并不能成为指示消落带淹没持续时间长短对土壤质量影响的敏感指标。消落带土壤易氧化有机碳的活性指数意味着 155~165 m 区域土壤质量最好,但是同时碳被氧化分解的风险也最大,其次是 145~155 m,土壤质量最低的是 165~175 m。所以在三峡库区消落带植被恢复优先要考虑 165~175 m 的区域,加大植被恢复力度,改善土壤质量。

参考文献:

[1] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands;a critical review[J]. Wetlands, 2010,30(1):111-124.

[2] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile

- soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12):1647-1656.
- [3] 张春霞,郝明德,魏孝荣,等.黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究[J].*土壤肥料*,2004(3):10-12.
- [4] 袁可能,陈通权.土壤有机矿质复合体研究:I.土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J].*土壤学报*,1963,11(3):286-292.
- [5] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys[J]. *Soil Science*, 2001,166(1):61-67.
- [6] Barreto P A B, Gama-Rodrigues E F, Gama-Rodrigues A C, et al. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil[J]. *Agroforestry Systems*, 2011,81(3):213-220.
- [7] 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等.稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性[J].*生态学报*,2013,33(15):4599-4607.
- [8] 袁兴中,刘红,王建修,等.三峡水库消落带湿地碳排放生态调控的科学思考[J].*重庆师范大学学报:自然科学版*,2010,27(2):23-25.
- [9] 贾国梅,牛俊涛,席颖.三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征[J].*土壤*,2015,47(5):926-931.
- [10] Walkley A. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils-effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents[J]. *Soil Science*, 1947,63(4):251-264.
- [11] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K, et al. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice-wheat-jute agroecosystem under different fertilizer treatments [J]. *Plant and Soil*, 2007,297(1/2):53-67.
- [12] 袁喆,罗承德,李贤伟,等.间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响[J].*水土保持学报*,2010,24(6):127-131.
- [13] Sherrod L A, Peterson G A, Westfall D G, et al. Soil organic carbon pools after 12 years in no-till dryland agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005,69(5):1600-1608.
- [14] 孙彩丽,刘国彬,马海龙,等.不同沙生植被土壤易氧化有机碳组分及其含量的差异[J].*草地学报*,2012,20(5):863-869.
- [15] Guareschi R F, Pereira M G, Perin A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems[J]. *Revista Ciência Agronômica*, 2013, 44(2):242-250.
- [16] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter;a key but poorly understood component of terrestrial C cycle [J]. *Plant and Soil*, 2011,338(1/2):143-158.
- [17] Sun C, Xue S, Chai Z, et al. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016,8(2):221-231.
- [18] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2006,12(4):459-465.
- [19] 王建超,朱波,汪涛.三峡库区典型消落带淹水后草本植被的自然恢复特征[J].*长江流域资源与环境*,2011,20(5):603-610.
- [20] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Crop and Pasture Science*, 1995,46(7):1459-1466.
- [21] 杜高赞,高美荣.三峡库区典型消落带土壤粒径分布及分形特征[J].*南京林业大学学报:自然科学版*,2011,35(1):47-50.
- [22] 刘正刚,裴柏洋,王宪帅.岷江上游干旱河谷不同土地利用类型的土壤有机碳和易氧化态碳特征[J].*水土保持研究*,2011,18(3):24-27.
- [23] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3):969-978.
- [24] 张俊华,丁维新,孟磊.海南热带橡胶园土壤易氧化有机碳空间变异特征研究[J].*生态环境学报*,2010,19(11):2563-2567.
- [25] 涂利华,胡庭兴,张健,等.模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影响[J].*生态学报*,2010,30(9):2286-2294.