

# 植被混凝土边坡修复基质易氧化有机碳组分季节动态

瞿红云<sup>1</sup>, 贾国梅<sup>1,2</sup>, 向瀚宇<sup>1</sup>, 岳云飞<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**易氧化有机碳组分能够敏感指示土壤质量的变化。为探讨植被混凝土边坡修复基质易氧化有机碳组分季节变化特征及其驱动因子,以2个修复年限的植被混凝土边坡修复基质为研究对象,测定4个季节的易氧化有机碳组分( $F_1$ :高氧化活性有机碳; $F_2$ :中氧化活性有机碳; $F_3$ :低氧化活性有机碳; $F_4$ :难氧化有机碳),揭示易氧化有机碳组分变化的驱动因子。结果表明:易氧化有机碳组分及其占总有机碳的百分比具有明显季节动态。 $F_1$ 表现为夏季最低冬季最高; $F_2$ 最高值出现在夏季而最低值出现在冬季; $F_3$ 表现为春、秋、冬显著性高于夏季, $F_4$ 表现为春、夏季显著低于秋、冬季。但是夏季的 $(F_1+F_2)/\text{TOC}$ 最高,且春季高于秋、冬季, $(F_3+F_4)/\text{TOC}$ 变化规律则相反。这说明有机碳在春、夏季活性高,秋、冬季稳定性强。对于4个易氧化有机碳组分,土壤有机碳春、秋、冬季主要以 $F_1$ 为主,而 $F_2$ 在夏季含量最高,因此, $F_1$ 可作为衡量基质质量状况的良好指标。冗余分析发现:气候因子是驱动易氧化有机碳及其组分变化的主要因素,同时边坡坡度以及基质的理化性质也是重要影响因素,这些因素主要驱动 $F_1$ 和 $F_2$ 组分的季节动态。

**关键词:**土壤; 易氧化有机碳组分; 季节变化; 驱动因素; 植被混凝土边坡修复

中图分类号:S153.6<sup>+</sup>21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0028-06

## Seasonal Dynamics of Soil Oxidizable Organic Carbon Fractions in Substrate of Eco-Restoration of Vegetation Concrete

QU Hongyun<sup>1</sup>, JIA Guomei<sup>1,2</sup>, XIANG Hanyu<sup>1</sup>, YUE Yunfei<sup>1</sup>

(1.College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2.Hubei International Center for Ecological Protection and Management in the Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** Soil oxidizable organic carbon fractions can sensitively respond to variations in soil quality. In order to investigate the seasonal dynamics of soil oxidizable organic carbon fractions and their driving factors in substrate of eco-restoration of vegetation concrete, the concentration of oxidizable organic carbon fractions ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  and  $F_4$ ) of eco-restoration of vegetation concrete were determined. The results showed that  $F_1$  was the lowest in the summer and highest in the winter, respectively,  $F_2$  was highest in the summer and lowest in the winter, respectively.  $F_3$  was lowest in the summer,  $F_4$  was significantly lower both in the spring and summer than those both in the autumn and winter;  $(F_1+F_2)/\text{TOC}$  was higher in the spring and the summer than that in the autumn and winter, and  $(F_3+F_4)/\text{TOC}$  was reversed, indicating that organic carbon was labile in spring and summer, respectively, and was stable in autumn and winter, respectively;  $F_1$  was the highest in spring, autumn and winter, respectively, and  $F_2$  was the highest in summer among four fractions, indicating that  $F_1$  can be used as a sensitive indicator for the changes in soil quality. Redundancy analysis showed that changes in climatic, physicochemical properties of substrate and slope gradient were the main factors that governed the seasonal dynamics of soil oxidizable organic carbon fractions, especially  $F_1$  and  $F_2$  fractions.

**Keywords:** soil; oxidizable organic carbon fraction; seasonal dynamics; driving factor; eco-restoration of vegetation concrete

收稿日期:2019-02-24

修回日期:2019-03-21

资助项目:国家自然科学基金应急管理项目“消落带土壤甲烷氧化菌群落的生态位分异特征及其对水位消涨的响应机理”(51541903)

第一作者:瞿红云(1992—),女(土家族),湖北利川人,硕士研究生,主要从事环境生态学研究。E-mail:2450009405@qq.com

通信作者:贾国梅(1965—),女,甘肃永登人,博士,教授,主要从事土壤生态学研究。E-mail:jjjgm@126.com

土壤易氧化有机碳组分反映有机碳的组成、状态和变化,显著影响土壤养分循环和土壤质量<sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳按照有机碳的氧化活性划分为4个组分:高氧化活性有机碳( $F_1$ )、中氧化活性有机碳( $F_2$ )、低氧化活性有机碳( $F_3$ )和难氧化有机碳( $F_4$ )<sup>[3]</sup>。 $F_1$ 和 $F_2$ 主要来自凋落物、根际生物量和根系分泌物,具有高的氧化活性,为有机碳活性组分<sup>[2,4-5]</sup>,容易被土壤微生物氧化和分解,为生态系统营养循环提供能量和物质以维持土壤质量稳定<sup>[1,6]</sup>。而 $F_3$ 和 $F_4$ 与有机物分解和腐殖化后的分子量和化学稳定性高的化合物相关,其通过微生物缓慢改变,周转期较长,对土壤中有机碳的封存有重要作用,为有机碳惰性部分<sup>[3-4,6-7]</sup>。易氧化有机碳各组分对土壤有机碳贡献不一,但普遍认为 $F_1$ 组分是土壤中最敏感部分,在养分循环过程中起着重要作用,能够作为衡量土壤质量状况的良好指标<sup>[8-10]</sup>。但是,以前的研究主要集中在农林生态系统并发现土壤易氧化有机碳组分受植被类型、土壤理化性质、气候、土地利用方式以及人为干扰等多种因素影响<sup>[8,11-13]</sup>。

植被混凝土生态护坡技术通过构筑生境基材为植被提供生长条件,对基础工程建设后形成的裸露边坡进行生态修复<sup>[14]</sup>,取得了良好社会效益和生态效益<sup>[15-16]</sup>。基材营养状况是保证坡面植物生长、演替,确保边坡生态恢复效果的关键<sup>[17]</sup>。研究表明在2~12 a修复过程中虽然基材肥力呈先增加然后趋于稳定的变化趋势<sup>[17-19]</sup>或者土壤肥力因子呈现增强的趋势<sup>[18]</sup>,但是在部分边坡出现植被退化的现象<sup>[20]</sup>。这可能说明基质储存的营养物质无法被植物吸收利用,活性有机质组分较少,为此本文选取宜昌市修复时间分别为10 a和12 a的两个样地、不同季节的植被混凝土边坡修复基材为研究对象,从易氧化有机碳组分角度分析边坡修复一定年限后基材有机碳组成和状态,探讨土壤易氧化有机碳各组分的变化规律及其驱动因素,旨在揭示边坡修复植被退化的原因提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宜昌市内(东经110°15′—112°04′,北纬29°56′—31°34′),属于亚热带季风性湿润气候,该地区四季分明,季节平均气温(MMT)和季节平均降雨量(MMP)均表现为夏季高冬季低。选取的生态修复年限分别为10 a和12 a的两个植被混凝土生态防护技术修复边坡样地植被混凝土修复基材的配方和制作方法相同,根据规范处理后,客土的性质基本一致。基材厚度为10 cm,原始pH为8.40,有机质为26.57 g/kg。本文所选样地植被具备常见边坡较

为典型的演替过程(裸地→草地→草、灌),边坡修复后人为干扰较少。修复年限为12 a和10 a的样地植被主要分别是低矮落叶灌木群落和低矮落叶灌木—草本群落,坡度(Slope)分别大致为64°和80°。

### 1.2 样品采集

选取宜昌市生态修复年限分别为10 a和12 a的两个植被混凝土生态防护技术修复边坡样地基材作为研究样地,其质地相同(黄棕壤)和基材配制相同。取样时间为2014年3月、7月、10月以及次年1月,每个样地选取6个1 m×1 m样方,按照五点取样法分布,样方之间间隔1~2 m。每个样方按照按S型随机取表层的土样各5个,取样时,用直径4 cm的地质钻垂直坡面取表层0—8 cm土壤的样品混合为1个样。混合样去除枯枝落叶和石砾,置室内通风阴凉处自然风干,过0.25 mm筛,用于总有机碳及其氧化有机碳组分的测定。所有指标测定均在7 d内完成。

### 1.3 样品分析

含水量(SWC)采用烘干法;全氮(TN)用凯氏定氮法测定;总有机碳(TOC)和易氧化有机碳(ROC)采用重铬酸钾氧化——稀释热法,易氧化有机碳(ROC)组分测定采用改进的Walkley-Black方法<sup>[3]</sup>,加入10 ml浓度为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,然后用标定好的1 mol/L硫酸亚铁滴定,所测得的有机碳分别记为6,9,12 mol/L时的有机碳。12 mol/L时测得的有机碳就是易氧化有机碳(ROC)含量。其组分如下: $F_1$ 是高氧化活性有机碳组分,为6 mol/L时测得的有机碳含量; $F_2$ 是中氧化活性有机碳组分,为9 mol/L时测得的有机碳含量减去6 mol/L时测得有机碳含量; $F_3$ 是低氧化活性有机碳组分,为12 mol/L时测得的有机碳含量减去9 mol/L时测得的有机碳含量; $F_4$ 是难氧化有机碳组分为TOC减去12 mol/L时测得的有机碳含量。土壤有机碳稳定性指数按照下式计算:

$$\text{稳定系数} = (F_3 + F_4) / (F_1 + F_2)$$

### 1.4 数据处理

每个指标的平均数为两个样地的6个样方内土壤,在室内再进行3次重复的平均值。组间分析采用Duncan单因素方差分析,试验数据在SPSS 18.0软件上处理分析;用Origin 8.0和Canoco 5.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 边坡修复基质理化性质季节动态

从表1可知,两个修复年限土壤含水量和pH在夏季最低,含水量在秋、冬季最高而pH在春季最高。TN含量在0.09~0.10 g/kg之间变化,春季显著性

低于秋、冬季。两个修复年限土壤中 TOC 含量变化范围为 9.70~11.17 g/kg, 低于原始基质含量, 表现为秋>冬>夏>春, 且 4 个季节之间没有显著性差

异。基质 C/N 含量变化范围为 97.63~106.73, 修复 10 a 样地 C/N 含量无季节差异, 修复 12 a 样地 C/N 含量冬季高于秋季而低于春、夏季。

表 1 基质理化性质和气候因子

样地	季节	SWC/%	pH	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	C/N	MMT/℃	MMP/mm
12 a	春	16.95(0.44)c	8.14(0.03)a	0.09(0.00)b	9.44(0.05)a	105.02(1.34)a	16.53	91.53
	夏	13(0.06)d	7.87(0.01)c	0.09(0.00)b	9.6(0.08)a	106.73(0.92)a	26.77	179.37
	秋	21.91(0.24)a	8.20(0.02)a	0.10(0.00)a	9.7(0.14)a	97.63(0.81)c	17.83	84.93
	冬	18.32(0.54)b	8.05(0.02)b	0.10(0.00)a	9.73(0.05)a	101.19(0.87)b	6.95	23.57
10 a	春	17.05(0.17)b	8.33(0.04)a	0.09(0.00)b	10.05(0.06)a	114.64(1.04)a	16.53	91.53
	夏	13.85(0.4)c	7.97(0.03)c	0.10(0.00)a	10.65(0.25)a	110.54(2.08)a	26.77	179.37
	秋	17.68(0.38)ab	8.16(0.03)b	0.10(0.00)a	11.17(0.08)a	114.07(0.67)a	17.83	84.93
	冬	18.82(0.66)a	8.17(0.02)b	0.10(0.00)a	10.91(0.03)a	112.02(1.95)a	6.95	23.57

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。

2.2 边坡修复基质易氧化有机碳组分以及占有有机碳百分数季节动态

从表 2 可以看出,ROC 含量变化范围为 6.72~8.11 g/kg, 春、秋、冬 3 个季节之间虽然无显著性差异但是却显著性低于夏季。基质易氧化有机碳占总

有机碳的比例的变化范围为 57.92%~76.29%, 修复 12 a 的春、夏季之间没有显著性差异,但却显著高于秋季而低于冬季;修复 10 a 的春、夏季显著高于秋、冬季。这说明季节变化可以影响易氧化有机碳含量。

表 2 不同季节基质易氧化有机碳及其组分含量变化

样地	季节	F <sub>1</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )	F <sub>2</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )	F <sub>3</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )	F <sub>4</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )	ROC/(g·kg <sup>-1</sup> )	ROC/TOC/%
12 a	春	2.71(0.11)bA	2.15(0.10)bB	1.93(0.03)aC	2.66(0.02)bA	6.78(0.05)b	71.84(0.25)a
	夏	2.24(0.13)cC	3.3(0.12)aA	1.44(0.06)bD	2.63(0.02)bB	6.98(0.06)a	72.67(0.12)a
	秋	2.67(0.06)bB	2.04(0.04)bC	2.03(0.03)aC	2.97(0.08)aA	6.73(0.08)b	69.43(0.53)b
	冬	3.05(0.05)aA	1.68(0.02)cC	1.98(0.01)aB	3.01(0)aA	6.72(0.05)b	57.92(0.39)c
10 a	春	3.67(0.03)bA	2.12(0.04)bC	1.75(0.05)aD	2.51(0.05)bB	7.54(0.11)b	75.01(0.61)a
	夏	2.88(0.13)cB	3.93(0.09)aA	1.3(0.11)bC	2.54(0.21)bB	8.11(0.04)a	76.29(1.29)a
	秋	3.67(0.03)bA	2.22(0.11)bC	1.92(0.04)aD	3.35(0.03)aB	7.82(0.09)b	69.97(0.37)b
	冬	4.33(0.07)aA	1.53(0.04)cD	1.89(0.05)aC	3.16(0.03)aB	7.75(0.06)b	70.99(0.33)b

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。

易氧化有机碳组分呈现季节变化规律且两个样地变化规律相同。F<sub>1</sub> 的变化范围分别为 2.24~4.33 g/kg, 夏季最低而冬季最高;F<sub>2</sub> 的变化范围为 1.53~3.93 g/kg, 夏季最高而冬季最低;F<sub>3</sub> 的变化范围为 1.30~2.03 g/kg, 其含量夏季最低, 其余季节之间无显著性差异;F<sub>4</sub> 的变化范围为 2.51~3.35 g/kg, 秋、冬季显著性高于春、夏季(表 2)。(F<sub>1</sub>+F<sub>2</sub>)/TOC 变化范围为 48.66%~63.9%, 春季显著性低于夏季, 但高于秋、冬季;而(F<sub>3</sub>+F<sub>4</sub>)/TOC 变化范围为 36.1%~51.48%, 春季显著性高于夏季, 但低于秋、冬季。易氧化有机碳组分占有有机碳总量的百分比的季节变化规律与相应组分的季节变化规律基本一致(图 1)。

不同季节的易氧化有机碳组分间差异显著。春季和冬季的易氧化有机碳组分变化规律为 F<sub>1</sub>>F<sub>4</sub>>F<sub>2</sub>>F<sub>3</sub>, F<sub>1</sub>>F<sub>4</sub>>F<sub>3</sub>>F<sub>2</sub>;夏季的 F<sub>2</sub> 最大而 F<sub>3</sub> 最小;秋季的 F<sub>3</sub> 最小, 修复 12 a 的 F<sub>4</sub> 最大而 10 a

的 F<sub>1</sub> 最大(表 2)。不同季节的易氧化有机碳组分占有有机碳总量的百分比的组分间变化规律与相应组分的组分间变化规律基本一致。这说明不同季节的易氧化有机碳组分间存在差异(图 1)。

2.3 边坡修复基质有机碳稳定系数季节动态

土壤有机碳的氧化稳定系数是用来衡量氧化稳定性的指标<sup>[12]</sup>。基质有机碳的稳定系数变化范围为 0.65~0.98, 秋、冬季高, 夏季低(图 2)。这说明春夏季节基质有机碳活性高, 有机碳氧化快, 碳矿化风险的潜力大, 而秋冬季节土壤有机碳稳定性强, 有机碳不易被分解。

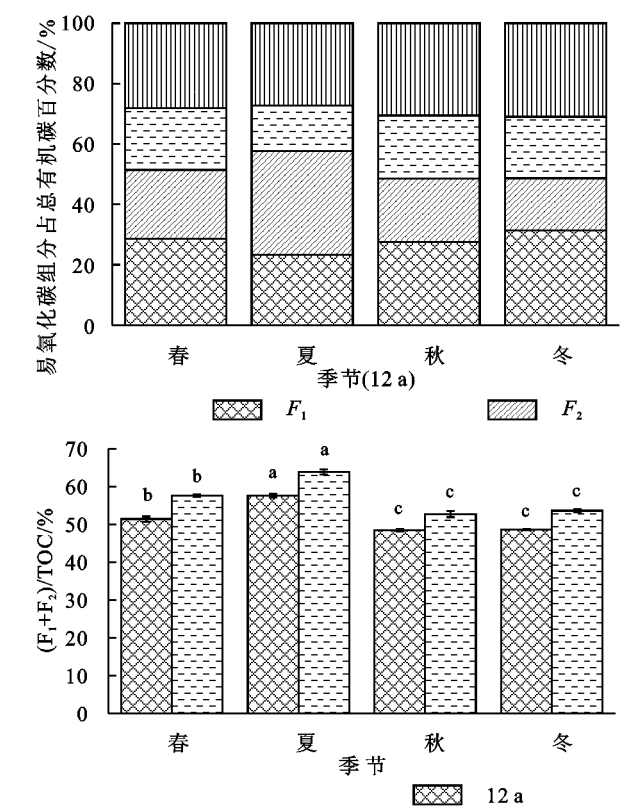
2.4 基质易氧化有机碳组分与环境因子的冗余分析

本研究中, 冗余分析发现所选环境因子对易氧化有机碳及其组分解释超过 82%, 其中 MMT 和 MMP 共解释了 57.0%, 其次是边坡斜率(18.7%)和有机碳(10.7%)(图 3), 说明气候是影响易氧化有机碳及其组分的主要因子。从图中可以看出, F<sub>1</sub> 与 pH, SWC, TOC



和C/N呈正相关,而与MMT,MMP和Slope呈极显著负相关; $F_2$ 与SWC和pH呈负相关,与MMT和

MMP呈极显著正相关; $F_3$ 与 $F_4$ 与SWC和Slope呈正相关,与MMT和MMP呈负相关。



注:平均数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性的差异。大写字母相同说明4个组间无显著性差异,大写字母不同说明4个组间差异显著。

图1 不同季节基质易氧化有机碳组分占总有机碳百分数的季节变化

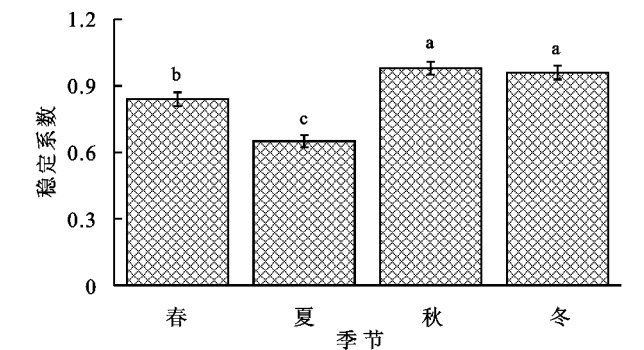


图2 基质有机碳稳定系数的季节变化

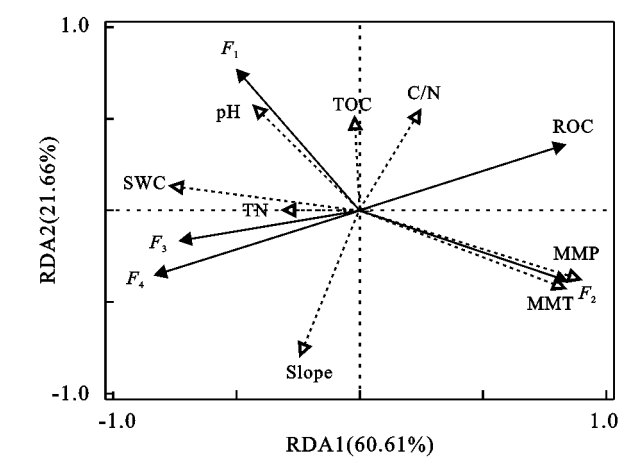
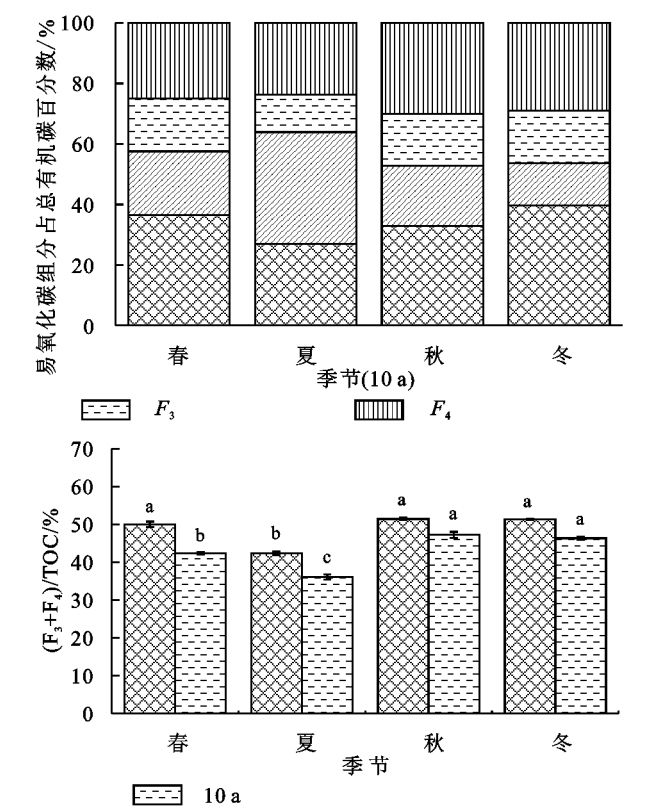


图3 基质易氧化有机碳组分与土壤环境因子间的冗余分析



### 3 讨论

**3.1 边坡修复基质易氧化有机碳组分季节动态**

本研究中,易氧化有机碳组分含量及其占总有机碳百分数的变化规律基本一致。春、夏季的 $(F_1 + F_2)/TOC$ 高于秋、冬季,这表明基质有机碳在春、夏季,特别是夏季,容易被氧化,从而影响养分循环以改善基质质量<sup>[1,21]</sup>,这主要归因于气温和降雨通过影响植被和微生物活性对基质有机碳季节动态产生影响<sup>[22-23]</sup>。随着春、夏季气温以及降雨回升,植被以及微生物生命活动旺盛,养分需求高,对基质中营养物质转化以及吸收加快,导致不稳定的有机碳含量增加<sup>[24]</sup>。本研究中, $F_1$ 组分夏低冬高。 $F_1$ 组分是一种快速反应的不稳定有机物质,为土壤微生物提供能量和营养,并释放部分营养物质,用于植物短期更新<sup>[12]</sup>。春、夏季, $F_1$ 组分被快速氧化分解<sup>[6]</sup>以及雨水淋失<sup>[25]</sup>等原因导致含量降低。秋、冬季微生物活性减弱但仍维持一定活性<sup>[24]</sup>, $F_1$ 组分消耗减少且部分 $F_2$ 组分能被氧化成 $F_1$ 组分,因此, $F_1$ 组分含量升高。 $F_2$ 组分从春季到夏季含量升高,可能是因为研究区春、夏季微生物活性高,将部分惰性有机碳氧化,以及基质根际生物量和根系分泌

物增加<sup>[26]</sup>。 $F_2$ 组分含量秋冬季降低,这说明夏季贮存的 $F_2$ 组分在秋冬季被氧化损失又因气候原因未得到及时补充。因此,本研究中虽然基质中 $F_1$ 组分夏低冬高,但由于 $F_2$ 组分含量的变化,有机碳活性部分仍然为夏季高。秋、冬季的 $(F_3 + F_4)/\text{TOC}$ 高于春、夏季,与有机碳稳定系数变化规律相符。其中 $F_3$ 组分含量在夏季最低, $F_4$ 组分含量秋、冬季高于春、夏季。这可能是由于少量惰性有机碳在春夏季被氧化分解。秋冬季植物、微生物代谢减弱,以及大量凋落物输入到基质中<sup>[24,27]</sup>,基质中腐殖质增加,使有机质氧化稳定性升高<sup>[3]</sup>。因此,植被混凝土边坡修复基质中春、夏季有机碳的氧化活性高而不稳定,秋、冬季惰性有机碳含量高而利于碳储存,而且易氧化有机碳组分内部存在一定的转化关系<sup>[3,8]</sup>。

不同季节的易氧化有机碳组分间存在差异。本研究中,春、秋、冬季总体上是 $F_1$ 最大而 $F_4$ 次之;夏季为 $F_2$ 最高;除冬季 $F_2$ 最低外,其余三季的 $F_3$ 最小。这说明 $F_1$ 和 $F_4$ 组分分别对边坡修复基质有机碳矿化和稳定的贡献较大, $F_3$ 组分的贡献较小。虽然 $F_1$ 含量最高,但仅占 $\text{TOC}$ 的26.98%~39.98%,尤其是夏季,这低于可可农林生态系统的含量(50%)而比贫瘠沙地土壤的含量高(<10%)<sup>[8,11]</sup>,说明边坡植被能够利用的高氧化活性有机碳含量低。Chan等<sup>[3]</sup>和Ding等<sup>[13]</sup>通过研究不同草地类型和长期施肥的黄土高原土壤得出 $(F_3 + F_4)/\text{TOC}$ 分别为35%和28%,但贫瘠的沙地土壤 $(F_3 + F_4)/\text{TOC}$ 高于84%<sup>[8]</sup>。而本研究得出 $F_3$ 和 $F_4$ 占 $\text{TOC}$ 的36.1%~51.48%,说明边坡修复基质有机碳稳定性相对较高。这些结果也从有机碳稳定系数得到证实,有机碳稳定系数在0.65~0.98之间变化高于可可农林生态系统的(0.3~0.5),且本研究中基质碳氮比也较高,表明边坡修复基质有机质具有较稳定的优势<sup>[11]</sup>。Chan等<sup>[3]</sup>研究表明不稳定的组分含量较高主要归因于残留物的投入和细根的程度,稳定有机碳的增加可能受益于覆盖物的维持以及水分含量变化较小<sup>[6]</sup>。因此,边坡修复基质有机质的高稳定性低活性特征可能是边坡修复植被退化的原因。

### 3.2 边坡修复基质易氧化有机碳组分季节动态驱动因素

基质易氧化有机碳组分含量的变化是一个复杂过程,受气候、理化性质以及人为干扰等多种因素干扰。本研究中冗余分析发现,对易氧化有机碳及其组分影响最大的是气候因子(降雨量和气温),易氧化有机碳组分呈现季节变化规律并且 $F_1$ 、 $F_3$ 和 $F_4$ 组分与降雨量和气温呈反比, $F_2$ 组分随降雨量和气温增

加而增加。这是由于有机碳含量季节动态与气候变化密切相关,且气候因子主要通过影响生物生命活动而影响基质有机碳<sup>[27-30]</sup>。边坡坡度是影响易氧化有机碳及其组分的又一环境因子,因为坡度大,生物残留物、养分等易损失基质<sup>[22]</sup>导致基质中养分含量下降,尤其是极易氧化的 $F_1$ 组分<sup>[9,31]</sup>,这也是12 a样地有机碳含量低于10 a样地的重要原因。同时,易氧化有机碳组分也受基质理化性质影响<sup>[1,8-10,12]</sup>。森林基质自然含水率的变化显著影响森林SOC含量和基质ROC的转化和积累<sup>[24]</sup>。本研究区比其他森林含水量低<sup>[24,27,32]</sup>。因此,含水量也是易氧化有机碳组分内部转化的因素之一,基质含水量越高 $F_2$ 组分越低,其余组分含量越高。研究表明土壤酸碱度影响土壤有机质周转<sup>[33]</sup>,本研究也证明pH与 $F_1$ 和 $F_3$ 呈显著正相关关系,与 $F_2$ 呈显著负相关关系,但是与孙彩丽等<sup>[8]</sup>研究结果不一致,这可能由于本研究样地基质碱性低于沙地土壤。黄土高原的沙地土壤中易氧化有机碳组分与 $\text{TOC}$ 、 $\text{TN}$ 均呈正相关<sup>[8]</sup>,而长期施肥的土壤 $\text{TN}$ 仅与 $F_1$ 和 $F_2$ 组分呈正相关<sup>[13]</sup>。但本研究中, $\text{TOC}$ 、 $\text{TN}$ 与 $F_1$ 和 $F_4$ 组分呈正相关,基质 $\text{C/N}$ 与 $F_1$ 呈正相关但与 $F_3$ 组分呈负相关,与前人研究不一致,这可能与基质肥力以及气候的差异有关。另外,环境因子与 $F_1$ 和 $F_2$ 组分相关性高于 $F_3$ 和 $F_4$ 组分,这说明环境因子主要驱动有机碳活性部分的动态变化,主要是因为有机碳活性部分易矿化、周转快<sup>[3]</sup>。

## 4 结论

(1) 基质易氧化有机碳组分及其占有有机碳的比例呈现季节变化规律, $(F_1 + F_2)/\text{TOC}$ 、 $(F_3 + F_4)/\text{TOC}$ 和有机碳稳定系数的变化规律表明有机碳氧化稳定性秋、冬高,夏季最低。这意味着夏季基质碳被氧化分解的风险也最大,春季次之。

(2) 基质有机碳春秋冬季主要以高氧化活性有机碳组分 $F_1$ 为主,而 $F_2$ 组分在夏季含量最高,这说明 $F_1$ 组分对基质有机碳矿化的贡献最大,在营养循环中起重要作用,可作为衡量基质质量状况的良好指标,而 $F_4$ 组分对边坡修复基质有机碳稳定的贡献较大。

(3) 气候是基质易氧化有机碳组分季节变化的主要驱动因素,其次是边坡坡度和基质理化性质,另外这些环境因子主要驱动 $F_1$ 和 $F_2$ 组分的季节动态。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Janzen H H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1987, 67(4):845-856.
- [3] 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.
- [4] Pereira F B, Santos R C, Lombardi K C, et al. Soil oxidizable organic carbon fractions under organic management with industrial residue of roasted mate tea [J]. *Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment*, 2014:295-299.
- [5] Maia S M F, Xavier F A S, Oliveira T S, et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil [J]. *Agroforestry Systems*, 2007, 71(2):127-138.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 贾国梅, 何立, 刘潇, 等. 三峡库区消落带土壤有机碳氧化稳定性特征 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5):14-19.
- [10] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K. Soil organic carbon pools and productivity in relation to nutrient management in a 20-year-old rice-berseem agroecosystem [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(3):451-461.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Ding S, Xue S, Liu G. Effects of long-term fertilization on oxidizable organic carbon fractions on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(4):579-590.
- [14] 许文年. 植被混凝土生态防护技术理论与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [15] 周明涛, 刘高鹏, 许文年. 溪洛渡水电站高陡岩石边坡生态护坡试验研究 [J]. *中国水土保持*, 2007(3):20-21.
- [16] 吴彬, 刘刚, 肖海, 等. 雅砻江官地水电站生态护坡工程初期土壤肥力状况 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2):172-176.
- [17] 丁瑜, 胡文静, 夏振尧, 等. 生态护坡生境基材土壤肥力动态变化研究 [J]. *水生态学杂志*, 2017, 38(2):31-37.
- [18] 许阳, 陈芳清, 金章利, 等. 水电站植被混凝土边坡生态防护工程基材土壤肥力隔年变化分析 [J]. *水利水电技术*, 2012, 43(11):47-50.
- [19] 牛海波, 许文年, 夏振尧, 等. 植被混凝土肥力水平变化研究 [J]. *中国水土保持*, 2010(2):36-39.
- [20] 马志林, 周心澄, 王治国. 我国边坡生态防护技术及其可持续性对策 [J]. *福建林业科技*, 2008, 35(2):184-187.
- [21] Mosquera O, Buurman P, Ramirez B L, et al. Carbon replacement and stability changes in short-term silvo-pastoral experiments in Colombian Amazonia [J]. *Geoderma*, 2012, 170:56-63.
- [22] 周嘉聪, 刘小飞, 纪宇骥, 等. 减少降雨对杉木幼林土壤有机质组分及稳定性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7):2203-2210.
- [23] 刘爽, 王传宽. 5 种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局 [J]. *生态学报*, 2010, 30(12):3135-3143.
- [24] 辜翔, 张仕吉, 项文化, 等. 中亚热带 4 种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(10):1064-1076.
- [25] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(2):603-612.
- [26] 范志平, 琼王, 李法云. 辽东山地不同森林类型土壤有机碳季节动态及其驱动因子 [J]. *生态学报*, 2018, 37(11):3220-3230.
- [27] 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周转期 [J]. *生态学报*, 2015, 35(14):4668-4677.
- [28] 范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态 [J]. *生态学报*, 2015, 35(14):4668-4677.
- [29] Cleveland C C, Wieder W R, Reed S C, et al. Experimental drought in a tropical rain forest increases soil carbon dioxide losses to the atmosphere [J]. *Ecology*, 2010, 91(8):2313-2323.
- [30] 娄雪冬, 翟生强, 康冰, 等. 若尔盖泥炭地溶解有机碳季节变化特征及其影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(2):157-163.
- [31] 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.
- [32] 朱小叶, 王娜, 方晰, 等. 中亚热带不同退化林地土壤有机碳矿化的季节动态 [J]. *生态学报*, 2019, 39(1):1-14.
- [33] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系 [J]. *土壤学报*, 2009, 46(5):851-860.