

土地利用与反季节水位波动影响下土壤活性有机碳的组分特征

李文娟^{1,2}, 朱 凯¹, 冉义国^{1,2}, 冉娇娇^{1,2}, 黄 平¹

(1.中国科学院水库水环境重点实验室,中国科学院重庆绿色智能技术研究院,
重庆 400714;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 为了研究消落带不同土地利用类型和水淹强度下土壤活性有机碳组分特征及其主要的影响因子,选取不同海拔高程(水淹强度)与不同土地利用类型的消落带土壤为研究对象,定量解析土地利用方式与水淹强度对三峡水库消落带土壤活性有机碳组分的影响,并分析土壤活性有机碳与土壤理化性质之间的关系。结果表明,消落带土壤活性有机碳含量总体上随着水淹强度的增强而减小。土地利用、水淹强度及其交互作用对土壤活性有机碳影响的解释度分别为 22.1%,13.7%,9.3%;土壤微生物生物量碳主要受土地利用、土地利用与淹水强度交互作用的影响,对土壤微生物生物量碳影响对应的解释度分别为 3.9%,0.6%;土壤可溶性有机碳与土壤颗粒有机碳主要受淹水强度的影响,其方差解释度分别为 65.1%,5.5%。多元因子分析(MFA)结果表明,土壤活性有机碳组分 MBC 含量主要与 EC 具有显著的负相关关系,而不同水淹强度可能影响土壤理化性质中 TN 和 C : N,进而影响土壤活性有机碳组分 DOC 分布。土壤 POC 含量与 SOC 含量呈显著正相关,POC 可被用来衡量消落带不同水淹强度下有机碳库变化的敏感性指标。

关键词: 消落带;淹水强度;土地利用;土壤活性有机碳组分

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0178-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.024

Effects of Land-use Types and Off-season Water-level Fluctuation on Component Characteristics of Soil Active Organic Carbon

LI Wenjuan^{1,2}, ZHU Kai¹, RAN Yiguo^{1,2}, RAN Jiaojiao^{1,2}, HUANG Ping¹

(1.Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to determine the effects of land-use types and dam-triggered flooding intensity on soil active organic carbon fractions and identify the main influencing factor in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, soils from different flood intensities and land-use types were collected as study objects and were used to quantitatively analyze soil active organic carbon fractions, while the relationships between soil active organic carbon fractions and soil physical and chemical properties were analyzed. The results showed that the content of soil active organic carbon decreased with the increase of flooding intensity. The land-use types, flooding intensity, and their interaction explained by 22.1%, 13.7%, and 9.3% respectively, on soil organic carbon variation. Soil microbial biomass carbon was mainly affected by land-use types and the interaction between land-use types and flooding intensity, and their variation partitioning for the effects on soil microbial biomass carbon were 3.9% and 0.6%, respectively. Soil dissolved organic carbon and soil particulate organic carbon were mainly affected by the dam-triggered flooding intensity, and the explanations for their variation partitioning were 65.1% and 5.5%, respectively. Multiple factor analysis showed that significant correlations between the MBC content of soil active organic carbon and soil electrical. However, Water flooding intensity might affect TN and C : N in soil properties, and further affect the distribution of DOC. Soil POC content was significantly positively correlated with SOC content, and POC can be used as an indicator to measure the flooding intensity changes of organic carbon pool in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir.

收稿日期: 2020-10-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771266,41401243);土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y812000005);中国科学院青年创新促进会项目(2017391)

第一作者: 李文娟(1996—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤结构与物质循环研究。E-mail:liwenjuan@cigit.ac.cn

通信作者: 黄平(1984—),男,博士,研究员,主要从事土壤结构演变与界面物质循环研究。E-mail:huangping@cigit.ac.cn

Keywords: fluctuating zone; flooding intensity; land-use types; soil active organic carbon components

土壤有机碳库(soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统的重要组成部分^[1],其碳储量约为大气碳库的 2 倍^[2]。湿地是地球上碳储量最丰富、碳密度最高的生态系统,其土壤碳占陆地土壤碳库的 20%~25%^[3]。在全球变化背景下,湿地土壤有机碳的微小变化将改变大气 CO₂ 浓度的平衡^[4];另一方面,由于全球气候变化,不同微生物作用下的土壤有机碳组分的相对分布变化可能会影响湿地土壤中碳的固存^[5]。土壤活性有机碳虽然仅占土壤总有机碳含量的很小一部分,但是对人类活动的响应却十分敏感,可直接或间接参与养分循环和物质转化过程,能够在土壤碳库中快速反应碳的各组分改变和转移^[6]。微生物量碳(MBC)、溶解性有机碳(DOC)和颗粒性有机碳(POC)是土壤活性碳库 3 个重要组分^[7]。因此,研究湿地土壤活性有机碳组分有助于揭示土壤碳库动态变化机制及气候变化对湿地生态系统的影响评价。

土地利用类型是影响土壤活性有机碳组分的关键因素之一。不同的土地利用类型由于植被覆盖、种植方式、人为干扰等差异,导致土壤的理化性质发生变化,进而影响土壤活性有机碳含量。土地利用是导致土壤活性有机碳演变的关键驱动因素。有研究^[8]表明,人为扰动可增加土壤有机碳的活性,沿海滩涂种植水稻减少土壤盐分,增加土壤活性有机碳含量;但也有研究^[9]表明,一般未被干扰的自然用地的活性有机碳含量大于农用地,其含量分布为草地>林地>设施菜地>农田;而在干旱区的湿地也证实这一结论,自然状态下的湿地土壤活性有机碳也显著大于农田^[10]。同时,湿地水文条件的变化也影响土壤有机碳和活性有机碳的积累与分解。土壤活性有机碳含量在常年水淹区、季节性水淹区和较少水淹区的湿地含量分布不同,较少水淹区的湿地具有较高的土壤活性有机碳含量和分配比例^[11]。柴雪思等^[12]研究表明,中短期水淹提高土壤活性有机碳中 MBC 含量,而在水陆交错的湖滨带湿地土壤活性有机碳量则表现为近水区>中水区>远水区^[13]。综上所述,土地利用类型和水淹状态是影响土壤活性有机碳的关键因子,然而对于两者交互作用影响土壤活性有机碳组分特征鲜有报道,还需进一步研究。因而,本文以三峡水库消落带为研究对象,三峡水库自 2010 年正式蓄水至 175 m 以来,在其周围形成了与天然河流季节涨落规律截然相反、垂直高差达 30 m、面积约为 349 km² 的消落带新生湿地^[14]。三峡水库独特的反季节水位波动使消落带土壤遭受周期性的裸露和浸泡,导致土壤结构演变、

冲刷侵蚀和淤积沉淀等颗粒再分布过程,直接和间接影响土壤有机碳的含量和分布^[15]。消落带出露后种植水稻、玉米、花生等作物形成消落带不同土地利用类型。本文探究三峡库区不同土地利用类型与不同海拔高程(水淹强度)下土壤活性有机碳含量和分布特征,并定量解析水淹强度与不同土地利用方式对消落带土壤活性有机碳的影响,为进一步了解消落带新生湿地土壤碳循环提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌杨湾消落带位于澎溪河上游,是三峡库区典型的支流库湾消落带,其地理坐标为 108°27′37.6″—108°28′0.04″E,31°11′15.23″—31°11′28.91″N^[16](图 1)。地处亚热带湿润季风气候区,温和湿润。年平均气温 18.6℃,年平均降水量 1 100~1 500 mm,年平均径流量 35.8 亿 m³,土壤类型主要为紫色土。消落带内植物以草本植物为主,主要包括狗牙根(*Cynodon dactylon*)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)等^[17],研究区主要土地利用类型为玉米地、水田、花生、撂荒草地(自然演替状态)等^[18]。

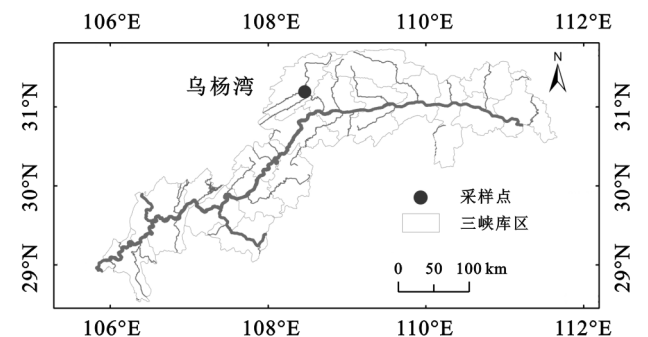


图 1 研究区示意

1.2 样地设置与采样

2018 年 9 月,沿着研究区消落带 160~175 m 海拔高程,选取 173 m 高程的玉米地(173C)与水田(173P)、168 m 高程的玉米地(168C)、水田(168P)与草地(168G)以及 163 m 玉米地(163C)与草地(163G),并选取永不淹水区的 177 m 高程旱地(蔬菜与玉米地)(UL)为对照(表 1)。在每个样地按照“S”形随机采集 6 份 0—20 cm 土层土壤样品,研究不同淹水强度与不同土地利用方式下的土壤活性有机碳含量和分布特征。

1.3 样品处理与分析

土壤基本理化性质采用常规的分析方法进行测定^[17]。土壤 SOC 含量采用总有机碳分析仪进行测定(Multi N/C 3100, Analytikjena, Germany);土壤 pH

按照土水质量比为 1 : 2.5 的比例浸提,电位法测定 (FE20, Mettler Toledo, USA);土壤含水率与电导率采用 WET 三参数仪测定 (Saardi, UK);容重采用环刀法测定;土壤质地采用马尔文粒径分析仪 (Mastersizer 3000, Malvern Panalytical Brands, UK)测定。

表 1 样地基本类型与主要特征

简称	高程/m	作物类型	淹水时间/d
UL 型	177	永不淹水区旱地	0
173C	173	玉米地	88
173P	173	水田	88
168G	168	草地	143
168C	168	玉米地	143
168P	168	水田	143
163G	163	草地	175
163C	163	玉米	175

土壤微生物生物量碳 (MBC) 与可溶性有机碳 (DOC) 根据已有研究^[17]的方法测定,并做了一些改进。具体为:称取 25 g 新鲜土样置于干燥器中,并放

入无乙醇氯仿,随后用真空泵抽气至氯仿沸腾并保持最少 2 min,关闭干燥器阀门,在 25 ℃ 黑暗环境中熏蒸 24 h,然后将熏蒸处理过的土壤样品和未进行熏蒸处理的对照样品转移到 100 mL 塑料瓶中,加入 50 mL 0.5 mol/L K₂SO₄,以 25 ℃ 振荡 30 min 后过滤提取浸提液 5.0 mL,采用总有机碳分析仪 (TOCVCPH, Shimadzu, Japan) 对提取液进行碳分析,从熏蒸样品中得到的有机碳量与未熏蒸样品中得到的有机碳量之差与 0.38 (氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳被浸提出来的比例) 的比值,从而测得微生物量碳 (MBC);称取 20 g 湿土样品,按土水比为 1 : 5 在土壤样品中添加蒸馏水,并置于振荡机中以 25 ℃ 振荡 30 min,随后放入离心机中以 9 000 r/min 离心 10 min,最后用 0.45 μm 滤膜过滤,滤液用总有机碳测量分析仪 (TOCVCPH, Shimadzu, Japan) 测得土壤可溶性有机碳 (DOC)。颗粒有机碳 (POC) 含量测定方法见文献^[17]。土壤基本理化性质见表 2。

表 2 研究样地的土壤理化性质

土壤理化性质	UL	173C	173P	168C	168P	168G	163G	163C
SBD/(g·cm ⁻¹)	1.49(0.05)a	1.16(0.03)c	1.104(0.03)c	1.25(0.024)b	1.13(0.02)c	1.07(0.07)c	1.10(0.09)c	1.28(0.02)b
C : N	10.66(0.24)bc	11.20(0.16)bc	10.02(0.30)c	11.17(0.24)bc	11.86(0.15)b	11.78(0.08)b	18.18(1.17)b	23.23(0.84)a
TC/(g·kg ⁻¹)	1.00(0.09)d	1.69(0.11)bc	1.79(0.02)b	1.42(0.05)c	1.36(0.02)c	1.71(0.07)bc	2.15(0.24)a	1.80(0.10)b
TN/(g·kg ⁻¹)	0.09(0.01)d	0.15(0.01)b	0.18(0.01)a	0.13(0)c	0.12(0)cd	0.15(0.01)bc	0.12(0.01)c	0.08(0.01)d
TP/(g·kg ⁻¹)	0.45(0.02)c	0.56(0.01)ab	0.59(0.01)a	0.53(0.01)b	0.57(0)ab	0.59(0.02)a	0.57(0.03)ab	0.51(0.01)b
TK/(g·kg ⁻¹)	56.26(3.69)b	51.57(5.27)b	53.64(5.83)b	58.88(2.62)ab	69.72(0.56)ab	72.46(3.17)a	68.45(2.37)ab	73.21(1.56)a
EC/(μS·cm ⁻¹)	164.89(6.64)a	135.78(5.19)b	122.67(7.70)bc	100.76(3.64)c	126.62(3.31)bc	124.78(5.40)bc	103.69(3.10)c	132.89(3.38)b
Clay/%	5.95(0.34)b	5.17(0.40)bc	2.62(0.37)f	7.00(0.38)a	3.72(0.17)de	3.20(0.21)ef	4.30(0.28)cd	2.27(0.48)f
Silt/%	37.79(1.78)ab	43.26(2.47)a	27.74(3.29)c	34.13(4.77)b	26.56(0.44)cd	24.34(1.53)cd	27.25(1.06)cd	25.54(0.99)cd
Sand/%	56.26(2.01)b	51.57(2.03)c	69.54(2.03)a	58.88(1.45)b	69.72(0.44)a	72.43(1.74)a	68.45(1.32)a	71.60(0.99)a
pH	7.30(0.31)a	7.22(0.36)a	7.11(0.21)a	7.40(0.27)a	7.18(0.28)a	6.92(0.17)a	7.35(0.35)a	7.23(0.12)a
SOC/(g·kg ⁻¹)	9.01(0.80)e	16.64(0.91)a	16.42(0.36)ab	15.00(1.04)ab	12.61(1.36)cd	16.89(0.72)a	13.74(0.95)bc	9.95(1.80)de

注:SBD 为土壤容重;C : N 为碳氮比;TC 为总碳;TN 为总氮;TP 为总磷;TK 为总钾;EC 为土壤电导率;Clay 为土壤黏粒含量;Silt 为土壤粉粒含量;Sand 为土壤砂粒含量;SOC 为土壤有机碳;不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$),括号内数据表示误差值。下同。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2019 (Microsoft Software Inc., Washington, USA) 对数据进行录入与整理,用 SPSS 20.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 软件进行双因素方差分析 (ANOVA),用 Canoco 5 对双因素方差分析的结果进行方差分解,最后通过 R.version.4.0.3 多元因子分析 (MFA) 和 Pearson 分析其土壤基本理化性质与土壤活性有机碳组分相关性,以探究影响消落带土壤活性有机碳组分的主要因素。在进行 ANOVA 之前,对所有变量进行正态性、方差齐性与多重共线性检验,对不符合正态分布、方差齐性的数据进行对数转换,并剔除具有多重共线性的变量。

2 结果与分析

2.1 消落带土壤有机碳与活性有机碳组分

从图 2a 可以看出,消落带 SOC 含量随海拔高度降低(水淹强度增强)而减小。消落带中水淹时间较短的 173 m 高程样地与所有高程自然演替草地的 SOC 含量较高。方差分析表明,消落带中 173 m 高程的玉米地(16.63±0.91 g/kg)与 168 m 高程的草地 SOC 含量(16.88±0.71 g/kg)显著高于其他样地,永不淹水区的旱地 SOC 含量最低(9.00±0.80 g/kg)。

由图 2b 可知,在相同高程条件下,水田的土壤微生物生物量碳 (MBC) 高于玉米地和草地,其中 173 m 高程的水田 MBC 最高(66.49±3.15 mg/kg),显著高

于其他样地的 MBC($P<0.05$)。在草地和玉米地,随着海拔高度的降低(水淹强度增加),各样地 MBC 呈增加趋势。与其他受不同水淹强度干扰的高程相比较,未受水淹胁迫高程的旱地 MBC 含量较低($20.02\pm 4.48\text{ mg/kg}$)。三峡水库消落带不同土地利用类型和海拔高度(水淹强度)对土壤可溶性有机碳(DOC)含量研究结果(图 2c)表明,未受水淹胁迫的旱地 DOC 含量($16.02\pm 1.40\text{ mg/kg}$)较低,而受水淹胁迫影响不同高程土壤 DOC 含量随海拔高程的降低(水淹强度增加)而减小,173 m 海拔高程草地土壤 DOC 含量(27.63 ± 1.83

mg/kg)最高,而 163 m 草地含量($9.20\pm 0.36\text{ mg/kg}$)最低。由图 2d 可知,消落带研究区各样地中的土壤颗粒有机碳(POC)含量差异不明显,但总体而言,随水淹强度的增加,POC 含量呈现轻微减少趋势。

在 173C 样地土壤 MBC 含量最低,而土壤 DOC 和 POC 含量则最高;163C 样地土壤 DOC 含量最低,其 MBC 和 POC 含量较高;168P 样地 POC 含量最高,而 MBC 含量较高。土壤 DOC 和 POC 含量与 SOC 含量变化趋势大致一样,随着海拔高度的降低(水淹强度的增加)而降低。

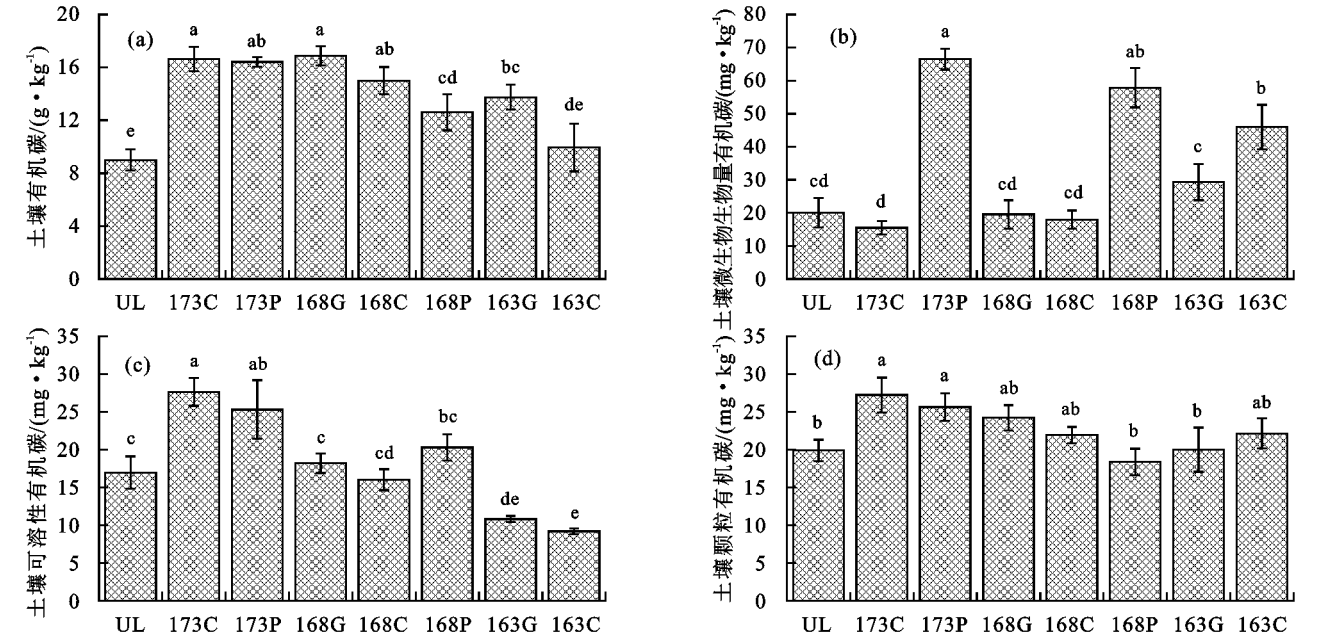


图 2 不同土地利用与海拔高程土壤颗粒有机碳含量

2.2 土地利用类型和水淹强度对土壤有机碳与活性有机碳组分的影响

双因素方差分析表明,土地利用类型与水淹强度以及二者之间交互作用都影响消落带土壤的 SOC、MBC、DOC、POC 的含量(表 3、图 3)。方差分析表明,土地利用主要对 SOC 和 MBC 的影响极显著,对土壤中 SOC、MBC、POC 解释度分别为 22.1%,3.9%和 5.5%,对 DOC 解释度为 0(表 3、图 3)。而水淹强度对 DOC 具有极显著相关性,解释度为 65.1%,水淹强度对 SOC、POC 均有显著性影响,其解释度分别为 13.7%,5.5%(表 3、图 3)。在土地利用和水淹强度交互作用的条件下,SOC 和 MBC 受其显著影响,方差解释度分别为 9.3%和 0.6%;而对 DOC 和 POC 影响较小,方差解释度为 0 和 0.6%(表 3、图 3)。

2.3 消落带土壤活性有机碳组分的主要影响因素

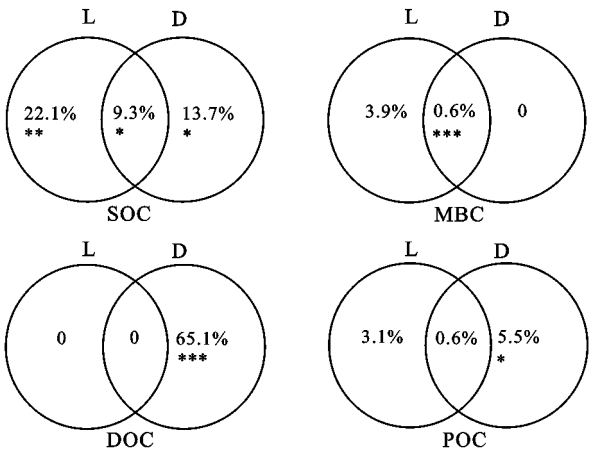
将土地利用类型和水文条件、土壤理化性质和土壤活性有机碳库进行多元因子分子(multiple factorial analysis, MFA)。多元因子分析是主成分分析(PCA)的扩展,可描述多组变量集的相互关系。其中偏轴图和单个因子图与结果 2.2 相同,则单独列出土

地利用类型和海拔高度(水淹强度)、土壤理化性质和土壤活性碳每组中的变量最显著相关性的排序图(图 4),实心虚线箭头表示土地利用类型(LU)和海拔高度(ALT)(水淹强度);实心实线箭头表示显著相关性的土壤理化性质 C : N、TC、TN、SOC、EC;空心实线箭头表示活性有机碳组分 MBC、DOC、POC;两者夹角表示相关性,锐角正相关,钝角负相关,夹角越小,相关性越大。圆圈的半径(等于 1)代表标准化偏轴最大的长度,该 2 轴解释度分别为 31.59%,15.55%。其中土地利用类型显著影响土壤 MBC,土壤活性有机碳 MBC 与 C : N、TC 呈正相关,与 EC 呈显著负相关。海拔高度与 TN、SOC、DOC、POC 呈正相关,而与 C : N 呈负相关性。根据 Pearson 相关性分析(表 4),MBC 与 EC、DOC 与 TN 和 C : N、POC 与 SOM 和 TN 均具有显著相关性($P<0.05$)。

表 3 土壤有机碳与活性有机碳组分的双因素方差分析

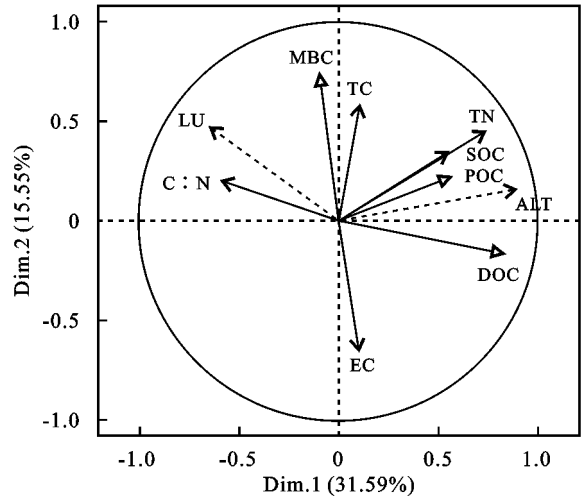
处理	SOC	MBC	DOC	POC
L	<0.01	<0.01	0.782	0.250
D	<0.05	0.055	<0.0001	<0.05
L×D	<0.05	<0.0001	0.278	0.426

注:L 为土地利用类型;D 为淹水强度。



注:L为土地利用类型;D为淹水强度;*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$ 。

图 3 土地利用与淹水强度对土壤有机碳及活性有机碳组分影响的方差分解



注:环境因子包括有机质 SOC、电导率 EC、总碳 TC、总氮 TN 和碳氮比 C : N。

图 4 土壤活性有机碳组分与环境因子的 MFA 分析

表 4 土壤活性有机碳与理化性质的 Pearson 相关分析

土壤理化性质	MBC	DOC	POC
EC	0.0164	0.1824	0.6120
TN	0.1364	<0.001	0.0231
TC	0.1882	0.7546	0.8401
C : N	0.6191	<0.001	0.2784
SOC	0.9704	0.0794	0.0088

注: $P<0.05$ 表示具有显著相关性。

3 讨论

在三峡水库消落带中,土地利用类型对土壤微生物生物量碳有显著的影响,MBC 含量与 TC 和 C : N 呈正相关,与 EC 呈显著负相关。水田 MBC 含量最高,水田的土壤由于长期处于淹渍状态,微生物分解慢;表层土壤又施入有机肥和秸秆,增加地表凋落物,为微生物提供充足的碳源,因而 MBC 含量高于草地和玉米地^[19]。这与早期的研究^[20]结果相似,水田相

对于旱地和草地,土壤 SOC 和 MBC 含量最高。草地具有稳定的凋落物、根系及其分泌物等有机物质输入^[21],草地的土壤的 C : N 和 TC 含量较高,因而草地土壤 MBC 含量相对旱地高。这与 MBC 在草地含量高于耕地研究^[22]一致;而玉米地人为干扰较多,周期性的翻耕、除草,影响微生物长期稳定的生长^[19]。消落带 173C 的 MBC 含量最低,其 EC(135.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$)最高。土壤 MBC 含量与 EC 呈显著负相关性,说明土壤电导率越高,土壤盐分含量越多,进而抑制微生物活性,导致 MBC 含量少^[23]。而本文研究与贾国梅等^[24]研究的三峡消落带土壤 MBC 含量主要受海拔高度影响结论不一致。该研究^[24]认为,消落带中 MBC 随海拔高度的降低而减少,其主要原因是由于低海拔区域,水淹强度增大,土壤被冲刷,抗侵蚀能力降低;其次雨水的浸泡冲刷和养分的淋溶造成微生物生境的变劣,使微生物生物量碳降低。

水淹强度对土壤 DOC 和 POC 含量影响显著,土壤 DOC 和 POC 含量随着水淹强度的增强呈现降低趋势。干湿交替强度显著影响土壤 DOC 含量,总体来看,干湿交替频率越高,土壤 DOC 含量越低^[25]。而低海拔高强度的水淹样地 163C,干湿交替频率较高,土壤 DOC 含量最低。淋溶是土壤 DOC 含量损失的重要原因^[26],影响不同水淹强度下 DOC 含量的分布。前人^[24]对三峡水库消落带 DOC 含量研究表明,低海拔水淹持续时间长,水位波动使土壤 DOC 含量比例最高,本研究与此一致。三峡水库消落带土壤长期受干湿交替的影响,在长时间水淹强度影响下,土壤侵蚀结构破坏,更多的土壤 DOC 暴露和释放,可能随水流而流失。土壤 POC 主要由沙粒(直径 53~200 μm)结合的植物残体分解产物组成,可以作为有机碳短期变动的敏感性指标^[27]。三峡水库消落带 POC 含量总体随水淹强度增加而下降,可能由于 POC 在高强度水淹、波浪和重力等侵蚀下,随着水分流失^[28-29],从而导致水淹强度大且频繁的低海拔区域 POC 含量相对较低。同时土壤 MBC 含量较高,POC 还容易被微生物矿化利用,则在 168 m 高 MBC 含量的水稻中土壤 POC 含量最低,在 173 m 低 MBC 含量的草地中 POC 含量最高。此外,连续耕种使土壤表层环境经常处于人为活动干扰之中,加速植物残体的分解速率^[30],因此永不淹水区旱地土壤颗粒有机碳含量较低。水淹强度与土壤 DOC 和 TN 呈显著负相关性,与 C : N 呈显著正相关,说明水淹强度可能是驱动 TN 和 C : N 间接驱动土壤活性有机碳中 DOC 含量分布。POC 含量和 SOC 与 TN 呈显著正相关,因此,对于三峡水库消落带土壤

活性碳组分 POC 对 SOC 变化响应较为敏感。与从永不淹水的对照相比,中短期水淹强度有利于消落带 SOC 的积累,同时土壤活性有机碳 DOC 和 POC 含量也较其他水淹强度高。

该研究将消落带水淹强度和土地利用类型相互结合分析对土壤活性有机碳的影响,证实了部分前人研究的结果,但是只分析不同的土地利用类型及其土壤理化性质直接和间接对活性有机碳的影响,并未结合植被本身(如玉米、水稻、草本的生物量以及根系等)进行分析;只选择土壤活性碳的 3 个组分(MBC、DOC、POC),其他组分(易氧化有机碳、轻质有机碳)条件均未涉及。为此,在今后研究中,应该结合植被影响因子更加系统全面地进行深入研究。

4 结 论

(1)三峡水库消落带土地利用类型可能主要通过影响 EC 来影响土壤活性有机碳 MBC 的分布,表现为水田>草地>旱地;土壤 MBC 还受消落带土地利用和水淹强度相互交互作用影响,而消落带土地利用类型对 DOC 和 POC 活性有机碳组分的影响并未达到显著水平。

(2)三峡水库消落带水淹强度与 SOC、TC 呈显著负相关,而与 C : N 呈显著正相关。这些土壤理化性质因子可能显著影响 DOC 与 POC 在不同水淹强度的分布。

(3)与永不淹水的旱地相比,水淹频率较低的样地 DOC、POC 和 SOC 含量最高,其变化趋势呈现出随水淹强度的增加而降低,POC 与 SOC 呈显著正相关,POC 可被用来衡量消落带水淹强度有机碳库变化的敏感性指标。

参考文献:

[1] Oliveira D M d S, Paustian K, Cotrufo M F, et al. Assessing labile organic carbon in soils undergoing land use change in brazil: A comparison of approaches[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 411-419.

[2] 王岩松,李梦迪,朱连奇.土壤有机碳库及其影响因素的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(32): 123-131.

[3] 简兴,翟晓钰,王喻,等.土地利用方式改变对湿地土壤总有机碳与可溶性有机碳的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(3): 475-482.

[4] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review [J]. *Wetlands*, 2009, 30(1): 111-124.

[5] Craft C. Biogeochemistry of wetlands: Science and applications[J/OL]. *Soil Science Society of America Jour-*

https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104522.

[15] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 3-5.

[16] Cheng H, Chen C D, Wu S J, et al. Emergy evaluation of cropping, poultry rearing, and fish raising systems in the drawdown zone of three gorges reservoir of china [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 559-571.

[17] 叶飞.三峡库区消落带土壤氮循环关键过程微生物群落特征研究[D].重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2018.

[18] 程辉.不同土地利用方式对三峡库区消落带库湾生态系统的影响研究[D].重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2017.

[19] 张仕吉,项文化,孙伟军,等.湘中丘陵区不同土地利用方式对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 222-227.

[20] 杨秀才,王小利,王雪雯,等.贵州典型岩溶区土地利用对土壤有机碳及微生物量碳的影响[J]. *贵州农业科学*, 2020, 48(4): 48-53.

- genes in communities of nitrogen fixers in soil[J]. Research in Microbiology, 2001, 152: 95-103.
- [13] Ragot S, Kertesz M, Bünnemann E. *phoD* alkaline phosphatase gene diversity in soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, 81(20): 7281-7289.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] Roberto G R, Victoria O, Hinojosa M B, et al. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2137-2145.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 304-312.
- [18] 郁洁, 蒋益, 徐春森, 等. 不同有机物及其堆肥与化肥配施对小麦生长及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1293-1302.
- [19] 袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 27-35.
- [20] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期施肥下甘薯产量稳定性及品质特性研究[J]. 西北农业学报, 2017, 26(4): 588-595.
- [21] 张秀芝, 高洪军, 彭畅, 等. 长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1473-1481.
- [22] 赵帅翔, 张卫峰, 姜远茂, 等. 黄土高原苹果过量施氮因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 484-491.
- [23] Wang Q F, Jiang X, Guan D W, et al. Long-term fertilization changes bacterial diversity and bacterial communities in the maize rhizosphere of Chinese Mollisols[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 125: 88-96.
- [24] Hu X J, Liu J J, Wei D, et al. Soil Bacterial communities under different long-term fertilization regimes in three locations across the black soil region of northeast China[J]. Pedosphere, 2018, 28(5): 751-763.
- [25] Ye G, Lin Y, Liu D, et al. Long-term application of manure over plant residues mitigates acidification, builds soil organic carbon and shifts prokaryotic diversity in acidic ultisols[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 133: 24-33.
- [26] Sun R, Zhang X X, Guo X, et al. Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 9-18.
- [27] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 303-313.
- [28] 沈冰涛, 张孝倩, 陈红, 等. 有机肥替代化肥对小麦产量及土壤养分和酶活性的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(5): 46-52.
- [29] 柯蓓. 有机肥替代部分化肥对甘薯产量及土壤养分含量的影响[J]. 福建农业科技, 2019(9): 67-70.
- [30] 赵鹏, 陈阜, 李莉. 秸秆还田对冬小麦农田土壤无机氮和土壤脲酶的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 165-169.
- (上接第 183 页)
- [21] 严登华, 王刚, 金鑫, 等. 滦河流域不同土地利用类型土壤微生物量 C、TN、TP 垂直分异规律及其影响因子研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1844-1849.
- [22] Woloszczyk P, Fiencke C, Elsner D C, et al. Spatial and temporal patterns in soil organic carbon, microbial biomass and activity under different land-use types in a long-term soil-monitoring network[J/OL]. Pedobiologia, 2020, 80: 150642. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150642>.
- [23] 元炳成. 紫花苜蓿改良盐渍土对土壤微生物活性和养分含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 415-419.
- [24] 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.
- [25] 乐艺, 张晓雅, 高俊琴, 等. 模拟干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及可溶性碳氮稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 81-87.
- [26] Qualls R G. Comparison of the behavior of soluble organic and inorganic nutrients in forest soils[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 138(1/3): 29-50.
- [27] 杨合龙, 孙宗玖, 范燕敏, 等. 短期放牧对昭苏草甸草原土壤活性有机碳组分的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(12): 1926-1932.
- [28] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [29] 贺秀斌, 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 160-168.
- [30] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218-226.