

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0165

SUN Fenghao, ZHANG Zhichun, JIANG Ping'an, et al. Organic carbon and its oxidation stability characteristics of shallow soil in frozen soil area of Three River Source Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1935–1943. [孙丰豪, 张志春, 蒋平安, 等. 三江源冻土区浅层土壤有机碳及其氧化稳定性特征[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1935–1943.]

# 三江源冻土区浅层土壤有机碳及其氧化稳定性特征

孙丰豪<sup>1</sup>, 张志春<sup>2</sup>, 蒋平安<sup>1</sup>, 杨 凯<sup>3</sup>, 周少龙<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 青海省气象灾害防御技术中心, 青海 西宁 810001; 3. 青海大学, 青海 西宁 810016)

**摘 要:** 土壤碳库作为全球碳循环中最为重要的组成部分, 是陆地生态系统中最大的碳库。冻土区土壤碳库是对气候变化反应最为敏感的碳库, 气候的微弱变化都会对其浅层土壤有机碳产生巨大的影响, 进而影响着区域景观和生态。氧化稳定性作为反映土壤有机碳抗氧化能力的指标, 影响着土壤有机碳的数量与质量, 受制于气候因素影响, 其变异在高寒冻土区具有一定的规律性。为探究冻土的土壤有机碳及其氧化稳定性分布特征, 基于实验数据与2011—2019年的气候资料, 采用随机森林模型对土壤有机碳含量、不同氧化难易程度土壤有机碳组分和土壤有机碳氧化稳定性系数, 以及环境变量(年均降水量、年均日照时数、年平均气温、海拔)进行多要素数字化制图并分析其控制性因素。结果表明: 模型对三江源冻土区浅层土壤有机碳的解释度在54%以上, 数字化制图能较好地反映土壤有机碳的分布情况; 土壤有机碳主要受降水和日照时数的影响, 温度次之; 不同氧化难易程度组分空间分布各异, 但氧化稳定性具有北高南低的分布特征; 冷、干利于冻土区浅层土壤有机碳氧化稳定性的提升。

**关键词:** 土壤有机碳; 氧化稳定性; 随机森林模型; 浅层土壤; 三江源

**中图分类号:** P642.14; S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1935-09

## 0 引言

冻土是温度低于0℃并出现冻结现象的土壤(或地表疏松层)。活动层则是随季节转换而发生周期性冻融的冻土类型, 其年平均气温高于0℃, 受土壤性质影响较大<sup>[1-2]</sup>。三江源气候属青藏高原气候系统, 年平均气温低, 无明显四季之分, 浅层土壤(0~40 cm)是随冷暖季节转换而发生冻融的活动层。冻土区浅层土壤有机碳的数量与质量关系到季节转换时土壤与大气之间的热量交换, 影响着冻土的发育、保护和退化。土壤有机碳氧化稳定性能够反映成土条件及过程<sup>[3]</sup>, 是衡量土壤有机碳抗氧化能力的重要指标。氧化稳定性系数( $K_{os}$ )是土壤有机碳氧化稳定性的量化指标, 其数值越大土壤有机碳就越稳定。土壤有机碳氧化稳定性的变化主

要发生在易氧化分解的部分, 不同氧化程度有机碳的占比能直观地反映出土壤有机碳分解的难易程度<sup>[4]</sup>。根据土壤有机碳氧化的难易程度可划分为四个不同组分(Fraction 1~4): 高氧化活性有机碳(F1)、中氧化活性有机碳(F2)、低氧化活性有机碳(F3)和难氧化活性有机碳(F4)<sup>[5]</sup>。各组分的多寡共同决定着土壤有机碳氧化稳定性的大小。

三江源平均海拔在4 000 m以上, 冻土分布广泛, 自西向东土壤类型逐渐由草甸土转变为草原土, 土壤有机碳含量较高<sup>[6]</sup>, 特殊的地理位置及气候条件使得冻土区浅层土壤有机碳对环境变化极为敏感<sup>[7-9]</sup>。复杂的大尺度区域研究, 样点稀疏且高寒地区恶劣的自然环境又加大了工作难度, 使得土壤样品采集困难且容易出现误差, 传统土壤制图难以对有机碳特征做出精准反映<sup>[10]</sup>。数字土壤制图基于环境协变量来定量

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071149); 青海省应用基础研究计划项目(2019-ZJ-7015)资助

作者简介: 孙丰豪, 博士研究生, 主要从事冻土有机碳研究. E-mail: 2993234276@qq.com

通信作者: 张志春, 教授级高级工程师, 主要从事碳循环与全球变化研究. E-mail: zczhang2006@126.com; 蒋平安, 教授, 主要从事农业资源与环境研究. E-mail: jiang863863@sina.com

土壤景观模型和栅格数据,能克服传统土壤调查制图仅利用斑块的局限性,多种因素综合考虑,在一定程度上可弱化外界条件影响并减少误差,较准确反映出土壤性质的变化,已在青藏高原农耕区广泛应用于碳、氮分布等研究<sup>[11-16]</sup>。本文采用随机森林模型对三江源冻土区浅层土壤有机碳氧化稳定性分布特征进行解析,探索其分布规律和对环境的响应。

## 1 研究区概况

三江源(31°39'~36°16' N, 89°24'~102°23' E)总面积为36.37×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,季节冻土和多年冻土镶嵌分布<sup>[7]</sup>。全区以山地地貌为主,最低海拔3 335 m,最高海拔6 564 m,平均海拔4 400 m左右,相对高差

3 229 m<sup>[17]</sup>。全区平均植被覆盖度为48.73%,自东南至西北递减,草甸、高山亚高山草甸、平原草原、高山亚高山草原和荒漠草原的平均植被覆盖度分别为59.86%、57.39%、39.50%、33.70%和14.13%<sup>[18]</sup>。

2011—2019年间全区年均气温为0.9℃,年均降水量475.50 mm,年均日照时数为2 622.62 h,气温低、降水少但日照充足。年均气温、年均降水量呈自东南向西北逐渐降低的特征,年均日照时数呈自东南向西北逐渐升高的特征(图1)。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测定

采样点布设以中国1:1 000万冻土区划及类型

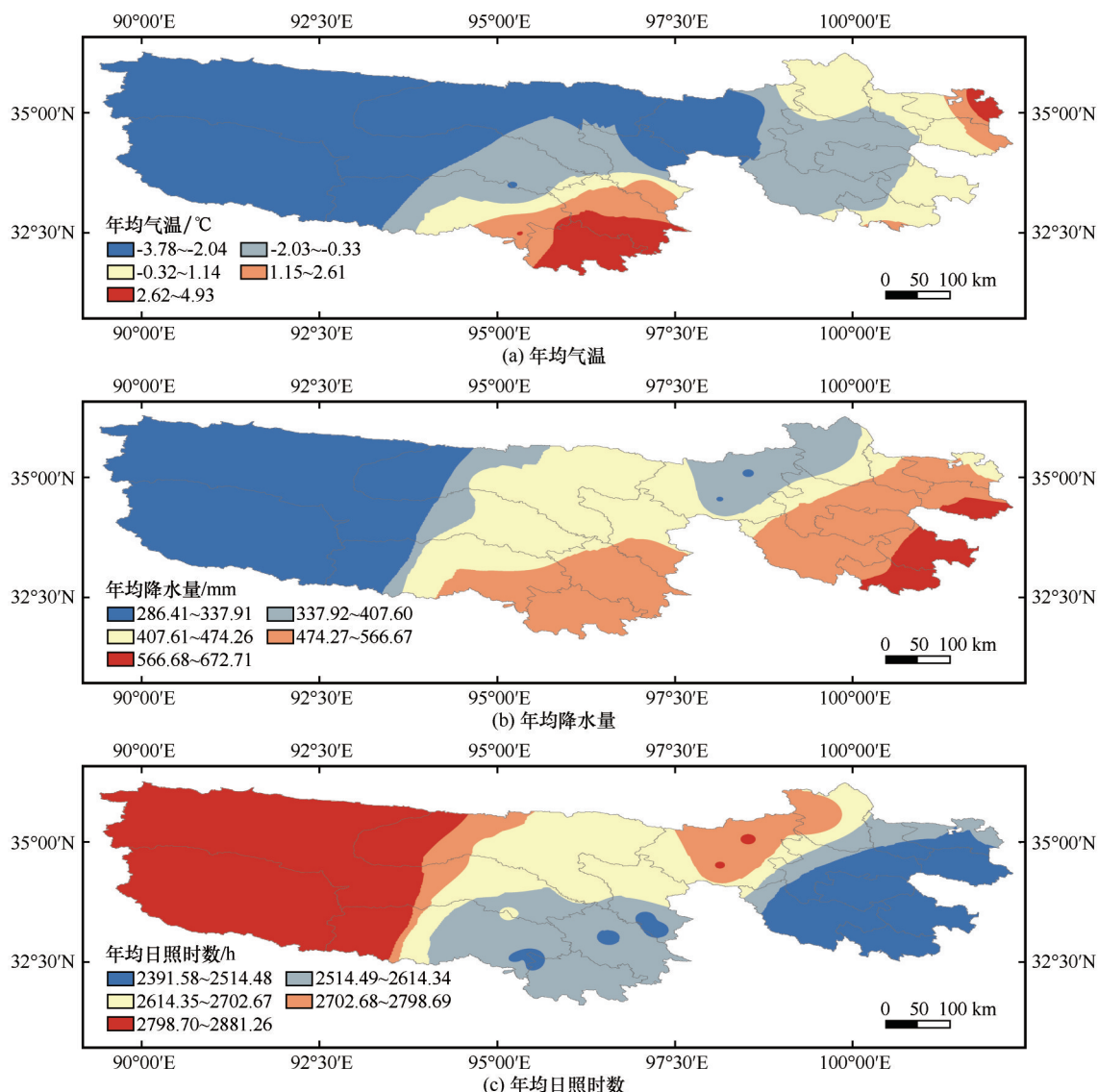


图1 2011—2019年三江源地区水热、日照条件

Fig. 1 Water, heat and sunshine conditions in Three River Source Region from 2011 to 2019: average annual air temperature (a), precipitation (b) and sunshine hours (c)

图、1:100 万土壤图、青海省土壤普查资料、青海省行政区划图和青海省交通图为依据,在能代表当地

及植被类型的平坦地区布设采样点采样,样点共 86 个,间距在 30~100 km 之间(图 2)。

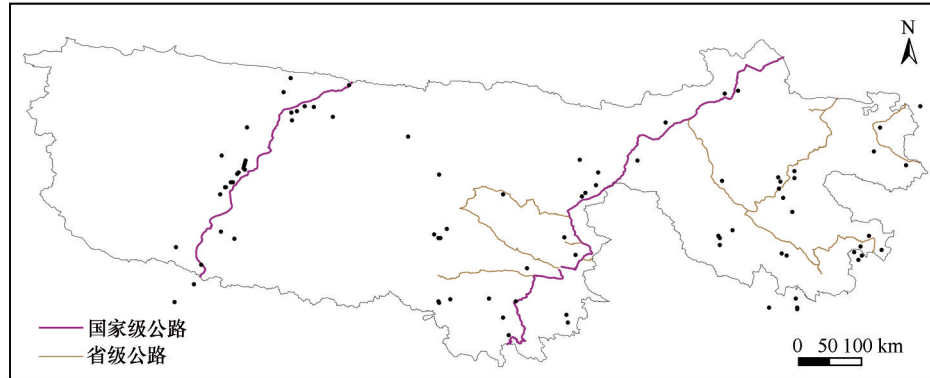


图 2 三江源地区土壤采样点空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil sampling points in Three River Source Region

确定采样点后,在能够代表本地植被特征且相对平坦区域按 100 m×100 m 的样方布置样点,按“X”形 5 点采样,采集 0~40 cm 或至冰碛物的土壤。样品捡去石块等杂物后,用四分法保留 1 kg 布袋封装带回实验室阴凉处自然风干。将风干土再次混匀,以四分法分出 150~200 g,仔细拣出枯枝落叶、砾石、植物根系等杂物后,研磨过 0.25 mm 筛待测。

对于土壤有机碳氧化稳定性的测定,普遍采用强酸加不同浓度氧化剂分别在一定温度下氧化土壤,由此来获得有机碳不同的氧化量,常用的氧化剂有  $K_2Cr_2O_7$  和  $KMnO_4$ 。本文采用不同浓度梯度的硫酸-重铬酸钾溶液在不同温度下氧化土壤(对同一样品分别称取 5 份相同的量)获取相应条件下土壤有机碳的氧化量,确定各级氧化活性组别的绝对量,据此计算各组别的相对含量和氧化稳定性系数。用 I、II、III、IV、V 表示不同的氧化强度,序号越高氧化能力越弱<sup>[19]</sup>。不同的氧化强度条件如下:

I 0.40 mol 1/6  $K_2Cr_2O_7$  同 1:1  $H_2SO_4$ , 170~180 °C 条件下于油浴煮沸 5 min;

II 0.27 mol 1/6  $K_2Cr_2O_7$  同 1:2  $H_2SO_4$ , 140~150 °C 条件下于油浴煮沸 5 min;

III 0.20 mol 1/6  $K_2Cr_2O_7$  同 1:3  $H_2SO_4$ , 130~140 °C 条件下于油浴煮沸 5 min;

IV 0.13 mol 1/6  $K_2Cr_2O_7$  同 1:5  $H_2SO_4$ , 120~130 °C 条件下于油浴煮沸 5 min;

V 0.073 mol 1/6  $K_2Cr_2O_7$  同 1:10  $H_2SO_4$ , 110~120 °C 条件下于油浴煮沸 5 min。

定义高氧化活性有机碳  $F1=V$ , 中氧化活性有机碳  $F2=IV-V$ , 低氧化活性有机碳  $F3=III-IV$ , 难氧化活性有机碳  $F4=I-III$ <sup>[20-21]</sup>; 土壤有机碳含量  $TOC=I$ ; 氧化稳定性系数  $Kos=(F3+F4)/(F1+F2)$ 。

## 2.2 制图参数

随机森林是多个决策树集成的机器学习算法,各决策树之间没有关联,模型的最终输出由每一棵决策树共同决定<sup>[22-23]</sup>。模型采用 ruby 中的 Random Forest 实现,ntree(决策树数量)为 500,随机抽样选取 70% 为训练集,余下为测试集,预测结果采用自然裂隙法分阶,利用 ArcGIS 制图<sup>[21]</sup>。本模型中 2011—2019 年的年均降水量、日照时数、年均温和采样点海拔等环境变量数据来源于中国气象局国家气象信息中心,DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)。

## 2.3 结果评估

用 goof 函数进行交叉验证验证得出决定系数( $R^2$ )、一致性系数(CC)、平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)作为模型预测结果评估指标,公式<sup>[24]</sup>为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [p(x_i) - \bar{p}]^2}{\sum_{i=1}^N [v(x_i) - \bar{p}]^2} \quad (1)$$

$$CC = \frac{2R\sigma_p\sigma_v}{\sigma_p^2 + \sigma_v^2 + (\bar{v} - \bar{p})^2} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p(x_i) - v(x_i)] \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p(x_i) - v(x_i)]^2} \quad (4)$$

式中: $N$ 为建模样点的个数; $p(x_i)$ 为建模样点的观测值; $v(x_i)$ 为建模样点的模拟值; $\bar{p}$ 为样点观测值的均值; $\bar{v}$ 为模拟值的均值; $\sigma_p^2$ 为建模样点观测值的

方差; $\sigma_v^2$ 为建模样点模拟值的方差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 样品数据统计

采样结果表明,三江源冻土区 TOC 在 5.27~157.35 g·kg<sup>-1</sup>之间,均值为(33.00±17.51) g·kg<sup>-1</sup>。不同氧化程度有机碳含量差异显著( $P<0.05$ ),均值 F4 最高,F3 均值最低,分别为 18.15 g·kg<sup>-1</sup>、3.88 g·kg<sup>-1</sup>,氧化稳定性系数( $Kos$ )在 0.44~2.92 之间,均值为 1.41(表 1)。

表 1 采样点土壤有机碳(TOC、F1~F4、 $Kos$ ) Table 1 Soil organic carbon (TOC, F1~F4, $Kos$ ) at sampling points						
土壤有 机碳	均值	最小值	最大值	方差	偏度	峰度
TOC	33.00	5.27	157.35	337.38	-0.64	0.13
F1	5.12	0.31	18.77	8.92	-0.36	0.36
F2	6.35	0.70	21.36	15.11	-1.12	0.17
F3	3.88	0.15	13.68	4.48	-0.51	0.55
F4	18.15	1.25	105.31	102.94	-0.51	0.23
$Kos$	1.41	0.44	2.92	0.14	1.38	1.25

注:表中 TOC、F1、F2、F3、F4 的均值、最小值和最大值的单位为 g·kg<sup>-1</sup>,其余各项无量纲。

#### 3.2 环境变量相关性分析

除海拔与  $Kos$  间不相关外,环境各变量与土壤有机碳总量、不同氧化难易程度组分以及  $Kos$  间均具有相关性,据此在随机森林建模时对  $Kos$  的预测剔除海拔变量,其余均作为协同变量对土壤有机碳进行预测<sup>[25]</sup>(表 2)。

#### 3.3 制图结果评估

预测结果中决定系数( $R^2$ )均在 0.54 以上,模型

表 2 采样点土壤有机碳(TOC、F1~F4、 $Kos$ )与 环境变量的相关系数 Table 2 Correlation coefficient between soil organic carbon (TOC, F1~F4, $Kos$ ) and environmental variables at sampling points							
环境变量	土壤有机碳						$Kos$
	TOC	F1	F2	F3	F4		
年均降水量	0.51**	0.44**	0.46**	0.35**	0.47**	-0.15*	
年均日照时数	-0.50**	-0.43**	-0.48**	-0.35**	-0.45**	0.15*	
年均气温	0.36**	0.29**	0.43**	0.17*	0.33**	-0.16*	
海拔	-0.31**	-0.22**	-0.31**	-0.21**	-0.29**	0.08	

注:\*\*表示在 0.01 水平显著相关,\*表示在 0.05 水平显著相关。

对上述六种有机碳属性有 54% 的解释度。一致性系数(CC)均大于 0.58,预测值与实际值一致性较高。除 TOC 预测结果均方根误差(RMSE)为 14.02、F4 预测结果均方根误差(RMSE)为 9.18 之外,其余预测结果均方根误差皆小于 2.90。随机森林模型能较好地对土壤有机碳进行预测,并对其变异性有较为精准的反映(表 3)。

表 3 土壤有机碳(TOC、F1~F4、 $Kos$ )预测值交叉验证结果  
Table 3 Cross-validation results of soil organic carbon  
(TOC, F1~F4,  $Kos$ ) prediction values

土壤有机碳	一致性系数 (CC)	平均误差 (ME)	均方根误差 (RMSE)	决定系数 ( $R^2$ )
TOC	0.79	-0.26	14.02	0.69
F1	0.78	-0.05	2.43	0.67
F2	0.81	0.01	2.90	0.73
F3	0.78	-0.07	1.84	0.72
F4	0.76	-0.18	9.18	0.66
$Kos$	0.58	-0.01	0.57	0.54

#### 3.4 土壤有机碳制图结果

TOC 经度地带性特征明显,高值区分布在三江源东部(100°00′~102°23′ E)和中部(96°30′~97°30′ E),西部(90°00′~95°00′ E)低值区分布广泛。

F1 相对含量(F1/TOC,下同)在 9.75%~24.03% 之间,高值区分布在东北一隅(34°50′~36°10′ N, 100°00′~101°27′ E)并向西递减至低值区(32°30′~33°25′ N, 98°20′~101°27′ E),中部(95°00′~97°30′ E)F1 占比适中,在 12.93%~19.27% 之间,西部(90°00′~95°00′ E)多为低值区分布。

F2 相对含量在 5.34%~30.62% 之间,同 F1 相近,高值区分布在东北一隅,但向西 F2 占比降幅度小于 F1,中部(95°00′~97°30′ E)F2 占比适中,西部偏低,自东向西逐渐递减。

F3 相对含量在 4.15%~30.21% 之间,与 F1、F2 不同,西部(90°0′~94°40′ E)F3 高值区广泛分布,中部(94°40′~98°30′ E)低值区广泛分布,中值区在东部(98°30′~101°27′ E)广泛分布且东北一隅(34°50′~36°10′ N, 100°00′~101°27′ E)F1、F2 的高值区反而是 F3 的中值区。

F4 相对含量在 34.71%~65.19% 之间,同 F1、F2 相近,仅在东北一隅存在小范围高值区,依次向西递减,低值区分布广泛。

$Kos$  在 0.77~2.60 之间,东北一隅(32°30′~





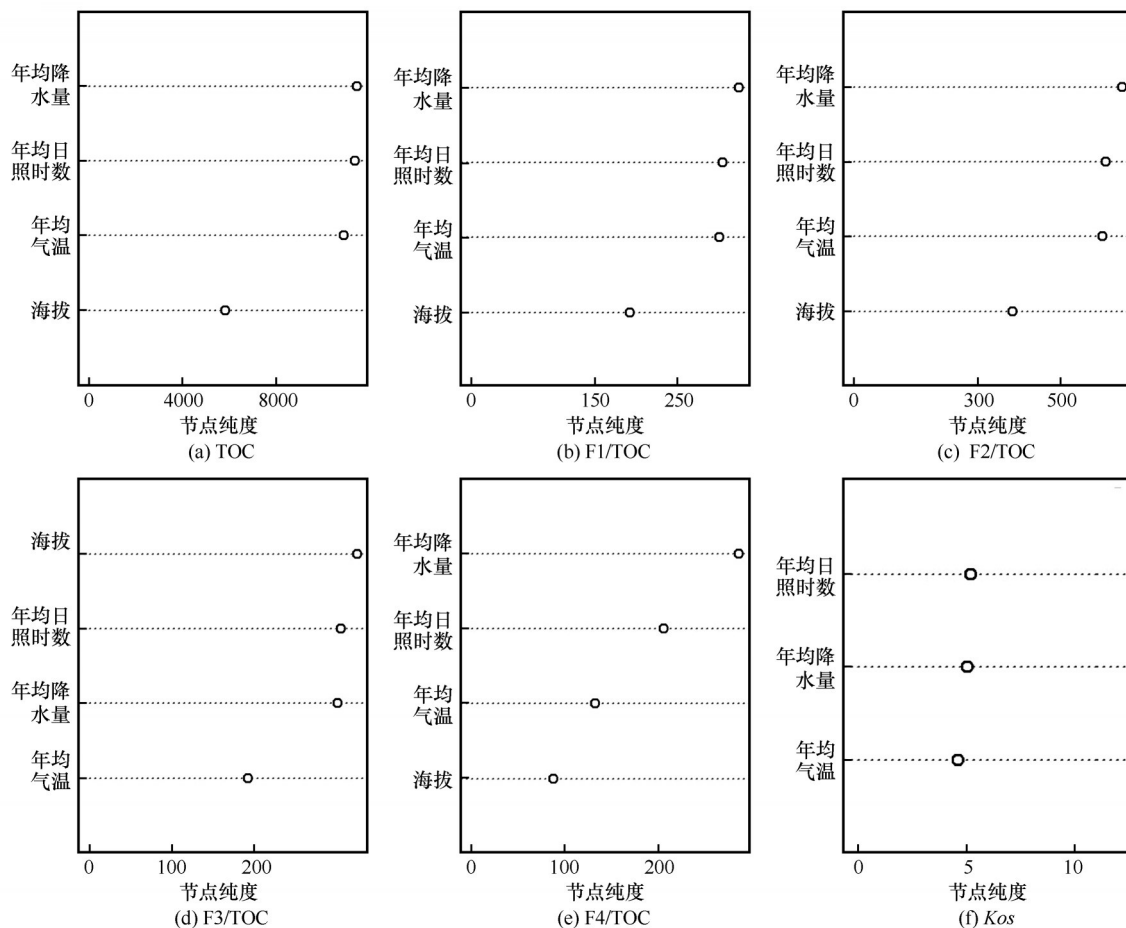


图4 土壤有机碳(TOC、F1~F4、Kos)预测结果的节点纯度

Fig. 4 Nodal purity of soil organic carbon (TOC, F1~F4, Kos) prediction results

海拔对模型中 *Kos* 的预测结果贡献有限。

温度和降水是影响土壤有机碳变异的主要因素<sup>[31-34]</sup>。预测结果显示,降水、日照时数对冻土区浅层土壤有机碳的贡献更大,温度却略显次要。其原因可能是研究区海拔较高、气温常年偏低、年际变化小,虽然内部不同自然地带间虽然温度存在一定差异,但由于整体气温偏低,使得温度不再是自然地带性差异最显著的气候因子,而降水量和日照时数则通过影响植物的分布和生长而对土壤有机碳含量和氧化稳定性产生间接影响<sup>[6]</sup>。

不同氧化难易程度组分影响着土壤有机碳的理化性质,其与土壤有机碳含量的占比反映了土壤有机碳的组成和状态<sup>[33-35]</sup>。与高寒地区低温少雨特性有关,三江源冻土区浅层土壤难氧化活性有机碳组分占比(F4/TOC)最高,而低氧化活性有机碳组分占比(F3/TOC)最低,前者对土壤有机碳的氧化稳定性的影响最大,后者最小。全区自东南向西北随着海拔升高、气候的变化,土壤类型逐渐由草甸土向草原土过渡,植被覆盖度也随之降低,同时海拔等

因素也对局部小气候造成不可忽视的影响。在种种因素共同作用下,不同氧化难易程组分有着不同的分布特征。F1/TOC、F2/TOC、F4/TOC 自东向西递减地带性特征明显,TOC 阶梯性递减,中部地区偶有升高;水热光照条件良好且草甸土广泛分布的东北一隅不仅是 TOC 的高值区,也是 F1/TOC、F2/TOC 和 F4/TOC 较高的区域。气候寒冷干燥、植被覆盖度低且以草原土为主导的西部地区 TOC、F1/TOC、F2/TOC 和 F4/TOC 都较低, F3/TOC 却较高。中部 TOC 高值区有机碳组分分布表现出了较大差异(F3 相对含量更低),其原因可能是中部高寒草甸、草原镶嵌分布,植被种类相对丰富,加快了低氧化活性有机碳的转化,也正是这种各组分间的分布差异导致了 *Kos* 和 TOC 在大尺度范围内变异性的产生。

作为具有较为综合性质的土壤有机碳氧化稳定性系数(*Kos*),数字制图结果显示全区 *Kos* 处于较高水平。三江源低温少雨的气候特征导致土壤有机碳活性较低、分解较慢,同时也意味着冷、干的环

境有利于冻土区浅层土壤有机碳的长期赋存。

与中国以水热为主要成土条件的地带性土壤有机碳氧化稳定性由南到北升高的情形类似<sup>[36-37]</sup>,三江源冻土区浅层土壤有机碳氧化稳定性基本呈现北高南低的分布特征。随着年均降水和气温自东南向西北的逐渐降低和日照时数的逐渐增加, $K_{os}$ 的经向地带性特征不及不同氧化难易程度组分(F1、F2、F3和F4)的分异明显,这应当是三江源冻土区浅层土壤有机碳氧化稳定性对环境的客观响应,也是土壤有机碳受不同氧化稳定性组分协同影响的具体体现。

## 5 结论

基于实验数据与2011—2019年气候资料,采用随机森林模型对三江源冻土区浅层土壤有机碳氧化稳定性进行了多要素数字化制图,得出以下结论:

(1)三江源冻土区浅层土壤有机碳受降水和日照时数影响较大,温度对其作用有限。

(2)三江源冻土区浅层土壤有机碳不同氧化难易程度组分分布各异,除低氧化活性有机碳组分(F3)外,其余组分随水热条件的地带性变化而变化。

(3)三江源冻土区浅层土壤有机碳氧化稳定性系数总体呈北高南低的特征,其地带性特征表征力度不及各不同氧化难易程度组分。

## 参考文献(References):

- [1] Duan Lijun, Shen Hongyan, Yu Di, et al. Study on water vapor conditions of precipitation on the Tibetan Plateau during rainy season [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 939-947. [段丽君, 申红艳, 余迪, 等. 青藏高原雨季降水的水汽条件研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 939-947.]
- [2] Yang Yufeng, Jiang Hao, Niu Fujun, et al. The space-time variation analyses of air temperature over the Qinghai-Xizang Plateau in warm and cold seasons [J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(3): 496-502. [杨瑜峰, 江灏, 牛富俊, 等. 青藏高原暖季与冷季气温的时空演变分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(3): 496-502.]
- [3] 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]. *Pergamon*, 1994, 26(12): 1647-1656.
- [4] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use [J]. *Ganoderma*, 2004, 128(1/2): 63-79.
- [5] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxidic Paleustalf under different pasture leys [J]. *Soil Science*, 2001, 166(1): 61-67.
- [6] Liu Zhengjia, Shao Quanqin. Vegetation coverage change and its response to climate change in Three-River Headwaters Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 334-339. [刘正佳, 邵全琴. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 334-339.]
- [7] Tian Yuqiang, Ouyang Hua, Song Minghua, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in alpine ecosystems on Tibetan Plateau transect [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2007, 33(4): 443-449. [田玉强, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, 33(4): 443-449.]
- [8] Zou Mijun, Shao Changkun, Yang Kun. Changes in climate, glaciers and permafrost during 1979—2018 in Tibetan Autonomous Region and their potential impacts on renewable energy [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 980-991. [邹必君, 邵长坤, 阳坤. 1979—2018年西藏自治区气候与冰川冻土变化及其对可再生能源的潜在影响[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 980-991.]
- [9] Xi Xiaohuan, Yang Zhongfang, Liao Qilin, et al. Soil organic carbon storage in typical regions of China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 573-583. [奚小环, 杨忠芳, 廖启林, 等. 中国典型地区土壤碳储量研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 573-583.]
- [10] Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, Gao Peng, et al. Soil information system of China (SISChina) and its application [J]. *Soils*, 2007, 39(3): 329-333. [史学正, 于东升, 高鹏, 等. 中国土壤信息系统(SISChina)及其应用基础研究[J]. *土壤*, 2007, 39(3): 329-333.]
- [11] Li Yingying, Zhao Zhengyong, Yang Qi. Review of digital soil mapping in soil nutrients [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(7): 61-67. [李莹莹, 赵正勇, 杨旗. 数字土壤制图在土壤养分方面的研究综述[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(7): 61-67.]
- [12] Bennett J McL, Robertson S D, Ghahramani A, et al. Operationalizing soil security by making soil data useful: digital soil mapping, assessment and return-on-investment [J]. *Soil Security*, 2021, 4: 100010.
- [13] Lagacherie P, McBratney A B. Chapter 1 spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping [J]. *Developments in Soil Science*, 2006, 31: 3-22.
- [14] Dai Zijun, Zhao Xia, Li Decheng, et al. Spatio-temporal variation of soil total nitrogen in Huangshui River basin and its affecting factors in the past 30 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 338-350. [代子俊, 赵霞, 李德成, 等. 近30年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 338-350.]
- [15] Yi Xiangsheng, Li Guosheng, Yin Yanyu, et al. Comparison on soil depth prediction among different spatial interpolation methods: a case study in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1793-1805. [易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 土壤厚度的空间插值方法比较: 以青海三江源地区为例[J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1793-1805.]
- [16] Yang Jianping, Ding Yongjian, Fang Yiping, et al. Research frame of vulnerability and adaptation for the cryosphere and its changes [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(5): 517-529. [杨建平, 丁永建, 方一平, 等. 冰冻圈及其变化的脆弱性与适应研究体系[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(5): 517-529.]
- [17] Lei Lin. Research on the establishment of national "northwest Sichuan national ecological protection and ecological economic



- development comprehensive pilot area”: based on the establishment of “Qinghai Sanjiangyuan national ecological protection comprehensive pilot area” and the investigation and analysis of desertification control in northwest Sichuan[J]. Decision Making Consultancy, 2016, 31(1): 24-30. [雷林. 创建国家级“四川西北国家生态保护与生态经济发展综合实验区”的研究: 基于“青海三江源国家生态保护综合实验区”的建立及四川西北地区沙化治理的调研分析[J]. 决策咨询, 2016, 31(1): 24-30. ]
- [18] Dang Xiaopeng. Biodiversity decreasing of Three-River Source Area and countermeasures for control[J]. Forest Inventory and Planning, 2007, 32(6): 18-21. [党晓鹏. 三江源生物多样性减少及防治对策[J]. 林业调查规划, 2007, 32(6): 18-21. ]
- [19] 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.
- [20] Yuan Zhe, Luo Chengde, Li Xianwei, et al. Soil readily oxidizable carbon and carbon pool management index in spruce plantation (*Picea asperata*) with different thinning intensity in western Sichuan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 127-131. [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. ]
- [21] 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.
- [22] Wu Lizhi, Chen Zhennan, Zhang Peng. Research on urban fire risk evaluation based on the random forest algorithm[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 54-60. [吴立志, 陈振南, 张鹏. 基于随机森林算法的城市火灾风险评估研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 54-60. ]
- [23] Lindner C, Bromiley P A, Ionita M C, et al. Robust and accurate shape model matching using random forest regression-voting[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1862-1874.
- [24] Wong Tzu Tsung. Performance evaluation of classification algorithms by *k*-fold and leave-one-out cross validation[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(9): 2839-2846.
- [25] Pang Longhui, Liu Feng, Zhao Xia, et al. Digital mapping of topsoil attributes in Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 505-513. [庞龙辉, 刘峰, 赵霞, 等. 青海省表层土壤属性数字制图[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 505-513. ]
- [26] Sheina S, Shevtsova E, Sukhinin A, et al. The method of selecting an integrated development territory for the high-rise unique constructions[J]. E3S Web of Conferences, 2018, 33: 02064.
- [27] Behrens T, Schmidt K, Ramirez-Lopez L, et al. Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis[J]. Geoderma, 2014, 213: 578-588.
- [28] Zhu Axing, Yang Lin, Fan Naiqing, et al. The review and outlook of digital soil mapping[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 66-78. [朱阿兴, 杨琳, 樊乃卿, 等. 数字土壤制图研究综述与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 66-78. ]
- [29] Guo Pengtao, Li Maofen, Luo Wei, et al. Prediction of soil total nitrogen for rubber plantation at regional scale based on environmental variables and random forest approach[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 194-202. [郭澎涛, 李茂芬, 罗微, 等. 基于多源环境变量和随机森林的橡胶园土壤全氮含量预测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 194-202. ]
- [30] Zhu Axing, Yang Lin, Li Baolin, et al. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic[J]. Geoderma, 2009, 155(3): 164-174.
- [31] Yuan Keneng, Zhang Youjin. Study on the oxidative stability of soil humus[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1964, 5(7): 345-349. [袁可能, 张友金. 土壤腐殖质氧化稳定性的研究[J]. 浙江农业科学, 1964, 5(7): 345-349. ]
- [32] Cao Zhiyuan, Yi Caixia, Wang Yong. Soil organic carbon characteristics of different alpine grasslands in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(3/4): 14-17. [曹志远, 易彩霞, 王永. 青藏高原不同类型草地土壤有机碳特征研究[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(3/4): 14-17. ]
- [33] Su Yongzhong, Zhao Halin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 220-228. [苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228. ]
- [34] Liu Zhenggang, Pei Boyang, Wang Xianshuai. Characteristics of SOC and ROC under different land use types at arid valley in the upper reaches of Minjiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 24-27. [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. ]
- [35] 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.
- [36] Xu Huajun. Comparative analysis of the soil organic carbon oxidation stability in Altai Mountain, Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 27-29. [徐华君. 阿尔泰山区土壤有机碳氧化稳定性的初步比较分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 27-29. ]
- [37] Xu Jianmin, Yuan Kneng. Study on oxidation stability of organic matter in zonal soils in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(1): 1-3. [徐建民, 袁可能. 我国地带性土壤有机质氧化稳定性的研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(1): 1-3. ]



## Organic carbon and its oxidation stability characteristics of shallow soil in frozen soil area of Three River Source Region

SUN Fenghao<sup>1</sup>, ZHANG Zhichun<sup>2</sup>, JIANG Ping'an<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>3</sup>, ZHOU Shaolong<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Qinghai Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Xining 810001, China; 3. Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** As the most important part of the global carbon cycle, soil carbon pool is the largest carbon pool in terrestrial ecosystems. Soil carbon pool in permafrost regions is the most sensitive carbon pool to climate change. Weak climate change will have a huge impact on the organic carbon production in the shallow soil, and then affect the regional landscape and ecology. As an indicator reflecting the antioxidant capacity of soil organic carbon, oxidation stability affects the quantity and quality of soil organic carbon, and its variation has a certain regularity in the alpine permafrost region under the influence of climatic factors. In order to explore the distribution characteristics of soil organic carbon and its oxidation stability in frozen soil, based on the experimental data and the climatic data from 2011 to 2019, the random forest model was used to conduct multi-factor digital mapping on soil organic carbon content, soil organic carbon components with different oxidation difficulty degrees, and soil organic carbon oxidation stability coefficient and environmental variables (average annual precipitation, average annual sunshine hours, average annual air temperature, and altitude) and analyze the controlling factors. The results showed that the model had an interpretation degree of more than 54% for the shallow soil organic carbon in frozen soil area of Three River Source Region, and the digital mapping could reflect the distribution of soil organic carbon well. Soil organic carbon was mainly affected by precipitation and sunshine duration, and temperature took second place. The spatial distribution of components with different oxidation difficulty is different, but the oxidation stability has the distribution characteristics of high in the north and low in the south. Cold and dry are conducive to improving the oxidation stability of organic carbon in shallow soil of frozen soil area.

**Key words:** soil organic carbon; oxidation stability; random forest model; shallow soil; Three River Source Region

(责任编辑：罗栋梁)