

DOI: 10.20103/j.stxb.202306051186

李世珍, 袁自强, 林琳, 陈方方, 王金牛, 高怡婷, 雷汶杰, 刘佳, 彭贻菲, 沈琦, 金会军, 罗栋梁. 江河源冻土区土壤碳氮空间分布特征及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(12): 5246-5258.

Li S Z, Yuan Z Q, Lin L, Chen F F, Wang J N, Gao Y T, Lei W J, Liu J, Peng Y F, Shen Q, Jin H J, Luo D L. Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen contents in association with permafrost variability in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5246-5258.

江河源冻土区土壤碳氮空间分布特征及其影响因素

李世珍^{1,2}, 袁自强³, 林琳⁴, 陈方方^{1,2}, 王金牛⁵, 高怡婷^{1,2}, 雷汶杰^{1,2}, 刘佳^{1,2}, 彭贻菲⁶, 沈琦⁷, 金会军^{1,8}, 罗栋梁^{1,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 兰州大学生态学院, 兰州 730000

4 清华大学地球系统科学系, 北京 100084

5 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

6 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000

7 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070

8 东北林业大学土木工程学院, 哈尔滨 150040

摘要: 江河源区是我国高寒生态安全屏障的重要区域, 冻土的长期存在使其形成低温冻结环境, 弱化了土壤微生物活性, 抑制了土壤有机质的矿化过程, 因而其近地表浅层土壤碳氮含量高。然而, 土壤碳氮含量对不同冻土分区和环境因素响应的空间分异规律尚不清楚。为此, 针对江河源 4 个不同冻土区(季节冻土区、岛状多年冻土区、不连续多年冻土区、片状连续多年冻土区)共 11 个样点进行植被样方调查、土壤分层采样。在分析碳氮含量的基础上, 探讨了年均地温(MAGT)、活动层厚度(ALT)、海拔(ASL)、土壤深度(SD)、植被特征及土壤 pH 对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、碳氮比(C/N)的影响。结果表明: (1) SOC、TN、C/N 在片状连续多年冻土区最高, 在季节冻土区最低, 且与年均地温负相关, 和海拔正相关; (2) 江河源区 SOC、TN、C/N 随土壤深度的增加而降低, 自表层至 40cm 深度整体下降幅度分别为 58.45%、36.96%、17.01%; (3) SOC、TN、C/N 与植被覆盖度(FVC)显著正相关($P \leq 0.05$), 与土壤 pH 值显著负相关($P \leq 0.01$); (4) 冗余分析表明, 土壤 pH、MAGT、ALT、SD、FVC 是影响江河源区 SOC、TN、C/N 空间分布的关键因素。研究结果可为厘清气候变暖条件下江河源区土壤碳氮空间分异规律及多年冻土热稳定性对土壤碳氮排放的影响提供科学基础, 同时也有助于预测多年冻土区土壤碳氮空间变化。

关键词: 江河源区; 冻土区; 土壤有机碳; 全氮; 碳氮比; 活动层

Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen contents in association with permafrost variability in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

LI Shizhen^{1,2}, YUAN Ziqiang³, LIN Lin⁴, CHEN Fangfang^{1,2}, WANG Jinniu⁵, GAO Yiting^{1,2}, LEI Wenjie^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, PENG Yifei⁶, SHEN Qi⁷, JIN Huijun^{1,8}, LUO Dongliang^{1,*}

1 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Faculty of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

4 Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

基金项目: 甘肃省科技重大专项(23ZDFA017); 中国科学院西部之光青年学者项目(E2290601)

收稿日期: 2023-06-05; **网络出版日期:** 2024-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luodongliang@lzb.ac.cn

5 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

6 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

7 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

8 School of Civil Engineering and Permafrost Institute, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers (SAYYR), which is located in the transitional zone from predominantly continuous permafrost to seasonally frozen ground, is one of the most important cold regional ecological barriers in China. The negative temperature and frozen environment facilitate the long-term existence of frozen ground, accordingly inhibiting soil microbial activities and the mineralization process of soil organic matter, resulting in high carbon and nitrogen contents in the near-surface shallow soils. However, it is still unclear how the soil carbon and nitrogen content respond to the spatial distribution pattern of the variability in the thermal state of permafrost and environmental factors. In this study, eleven plots were investigated at four different typical kinds of frozen ground (seasonally frozen ground, island permafrost, discontinuous permafrost, and predominantly continuous permafrost) in the SAYYR. We conducted plant quadrat survey and soil sampling from different depths. After analyzing the soil carbon and nitrogen content, we explore the distribution of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), C/N, and key factors that influence the distribution of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and C/N. The environmental factors include mean annual ground temperature (MAGT), active layer thickness (ALT), altitude (ASL), soil depth (SD), vegetation characteristics, and soil pH. The results show that: (1) the contents of SOC, TN, and C/N were positively correlated with altitude but negatively correlated with MAGT, being characteristics of an obviously vertical pattern, with the highest values coming from the predominantly continuous permafrost region, and the lowest values coming from the seasonally frozen ground region; (2) With the increase of soil depth, the overall decreasing rates of SOC, TN, and C/N were 58.45%, 36.96%, and 17.01%, respectively; (3) The SOC and TN contents were positively correlated with fractional vegetation (FVC) ($P \leq 0.05$), but significantly negatively correlated with soil pH ($P \leq 0.01$); and; (4) The redundant analysis showed that soil pH, MAGT, ALT, SD, and FVC in permafrost were the dominant environmental factors for the spatial distribution and depth patterns of SOC, TN, and C/N. Our study provides data support for clarifying the spatial distribution characteristics between SOC, TN, and C/N, and the determinations of the thermal stability of permafrost on soil carbon and nitrogen emission under climate warming in the SAYYR in the future. Thus, our study will also shed light on the prediction of soil carbon and nitrogen change in permafrost region, which is one of the biggest carbon pools of great uncertainty.

Key Words: the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers; varied thermal state of permafrost; soil organic carbon; total nitrogen; carbon-nitrogen ratio; active layer

土壤是地球表层与其他圈层进行物质和能量循环的纽带,在维持陆地生态系统平衡方面起着非常重要的作用^[1-2]。碳氮是土壤的重要组成部分。全球土壤碳库约 $2.2 \times 10^3 - 3 \times 10^3 \text{Pg}$,是陆地生态系统浅表层最大的有机碳库^[3-4]。土壤中氮素(TN)作为衡量土壤肥力的重要指标,不仅为植物生长提供营养元素,也影响其理化性质^[5]。土壤碳氮含量的微弱变化即可对全球碳氮储量变化及碳氮循环产生较大影响^[6]。

目前国内外学者针对不同生态系统的土壤有机碳(SOC)、TN 贮存及其分布特征开展了较多研究。综合已有研究发现,SOC、TN 含量空间分布变化实际上受多种因素综合影响,如气候、海拔、水文、植被类型、地形地貌、土壤养分、土壤质地等,因而其分布与驱动因素具有高度的区域差异性^[7-8]。Chen 等^[9]分析了中亚干旱地区土壤碳氮含量变化及其驱动因子,发现碳氮含量的分布规律具有较高相似性,其变化主要受土壤水分和年平均气温影响。王长庭等^[10]对三江源区主要草地类型土壤碳氮含量变化特征及其影响因素的分析表明,土壤碳氮含量受海拔影响,且高寒草甸明显高于高寒草原,与土壤 pH 呈负相关,与植被盖度呈正相关。王彦龙等^[11]在黄河源区研究发现,以藏嵩草为优势种的沼泽化草甸土壤碳氮含量较高,且受土壤 pH 值影响

显著。分布于高纬度和高海拔山区的冻土,是除积雪外分布最广的冰冻圈要素,与其他土壤相比,其浅表层冷生土壤水热条件常因冻融交替而变化,进一步改变土壤理化性质和微生物群落,碳氮含量、迁移和转化也因之受到影响,继而影响高寒植物生长、水源涵养功能、碳氮循环等^[12-13]。因而冷生土壤是深入分析高寒地区各生态要素相互作用的关键环节。尽管土壤碳氮的空间分布特征及其影响因素已取得较多研究进展,但多年冻土区作为陆地生态系统最大的土壤有机碳库^[14],有其特殊性,其 SOC、TN 含量及空间分布特征还受冻土类型、冻融循环、水热交换过程等诸多因素影响,相应研究仍有待加强。

青藏高原是全球海拔最高、中低纬度多年冻土最主要的分布区^[15-16],长期负温条件造成其特殊的气候和生物地理环境,微生物活性弱,土壤有机质分解缓慢^[17]。广泛分布的多年冻土及其冻融过程水热变化是青藏高原土壤碳氮大量积累的控制因素之一^[18]。近年来,对青藏高原高海拔多年冻土 SOC、TN 分布及其响应特征的研究日渐增多。Liu 等^[19]对青藏高原多年冻土区 SOC、TN 空间分布规律进行了探讨,不仅证实了高寒沼泽草甸与高寒草甸碳氮含量随土壤深度增加而减小这一普遍性规律,还发现土壤水分是控制冻土区土壤 SOC、TN 含量的最主要因素。Hu 等^[20]对三江源多年冻土区活动层土壤碳氮含量的分析发现,随着活动层土壤深度增加,SOC、TN、C/N 下降,且三者均与土壤 pH 呈负相关。Wu 等^[21]研究了青藏高原西部高海拔多年冻土区土壤碳氮储量的环境控制因子,发现土壤质地、土壤水分和植被类型是控制其碳氮含量的主要因素,活动层厚度对其影响却很小。上述研究均揭示了多年冻土区 SOC、TN 含量随环境条件变化而表现出明显的动态变化规律。

江河源区既是重要的多年冻土分布区,也是生态水文敏感区^[22]。在复杂的冻土空间分布和水热条件影响下,各类高寒生态环境要素强烈耦合,土壤碳氮含量空间分布呈现错综复杂的局面,然而不同冻土类型对 SOC、TN、C/N 变化的影响仍不清晰。为此,本研究分别选取了季节冻土区(鄂陵湖北岸、野牛沟、星星海、清水河)、岛状多年冻土区(麻多乡)、不连续多年冻土区(扎陵湖南岸、查龙穷、曲麻河)和片状连续多年冻土区(巴山口、巴山口南、查拉坪)的 11 个场地,揭示不同冻土类型下 SOC、TN 含量和 C/N 分布特征及其影响因素,以期全面掌握高海拔多年冻土区 SOC、TN 含量和 C/N 变化规律,为气候暖湿化驱动下多年冻土区碳氮循环机理的响应研究提供科学依据。

1 研究区概况

江河源区地处青藏高原东北部和青海省腹地(图 1),其中长江源区面积 15.76 万 km²,黄河源区面积 12.36 万 km²,地理坐标 89°45′—102°23′E、31°39′—36°12′N,海拔均在 3300m 以上^[25]。地势总体西北高、东南低,地貌分异显著,海拔梯度明显^[26]。源区包括高寒草原、高寒草甸、高寒沼泽湿地等三大类型生态系统,局部河谷地带分布灌丛,山体分布垫状、稀疏植被^[27],区内的鄂陵湖和扎陵湖为青藏高原两个最大的淡水湖泊^[28]。土壤厚度薄,呈明显的垂直地带性,主要有高山草甸土、山地草甸土、高山草原土等^[29]。据江河源区 11 个国家气象站的气温和降水观测数据显示^[30],1960—2019 年源区年均气温、年最高及最低温均呈升高趋势,东部增温幅度大于西部,年降水量总体以 7.6mm/(10a) 增加,2010—2019 年源区年平均降水量高达 610mm^[31],年蒸发量达 1000mm 以上,年蒸发量远大于年降水量^[32]。在诸多因子复合作用下,源区从西向东,随着海拔降低,冻土类型由多年冻土过渡到季节冻土^[33],多年冻土分布连续性降低,热稳定性减弱。

2 材料和方法

2.1 样品采集

于 2011 年 7—9 月植被生长盛期开展江河源不同冻土分区的样方调查。每个冻土区选取 1—4 个场地,共 11 个场地,分别为:季节冻土区(鄂陵湖北岸、野牛沟、清水河、星星海)、岛状多年冻土区(麻多乡)、不连续多年冻土区(扎陵湖南岸、查龙穷、曲麻河)、片状连续多年冻土区(巴山口、巴山口南、查拉坪),共采集 30 个

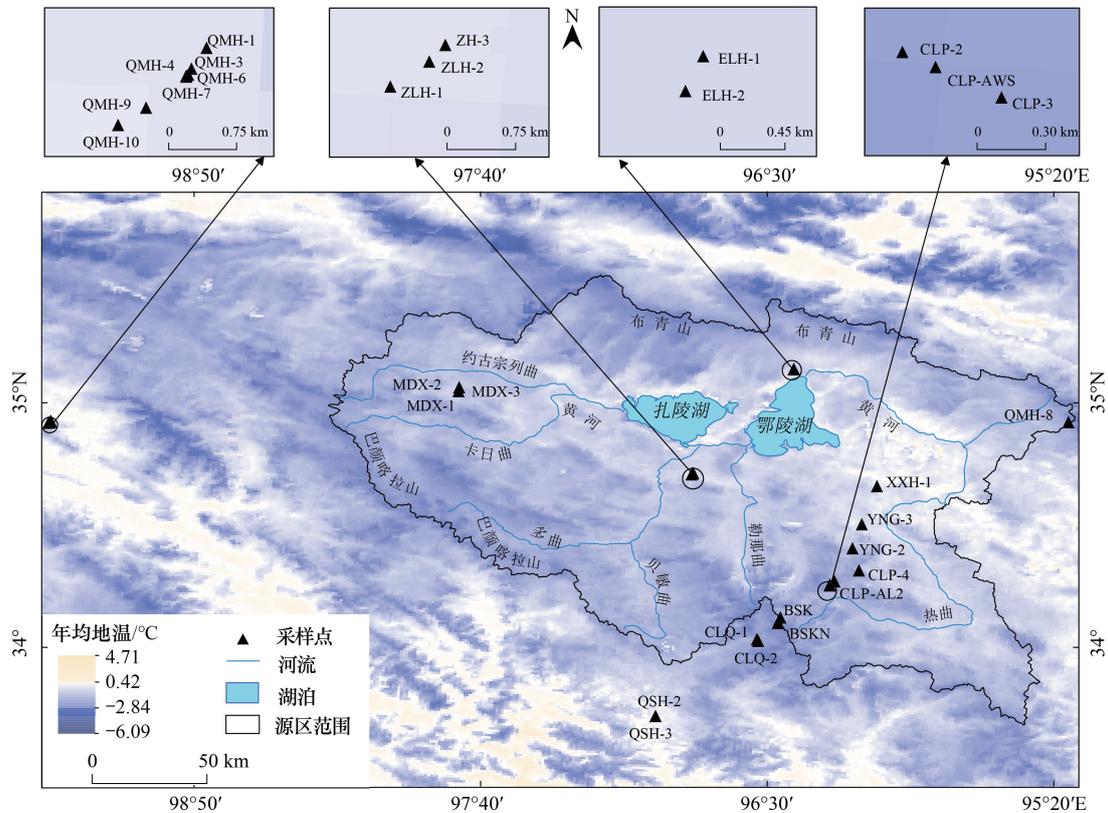


图1 研究区多年冻土热状态分布及采样点示意图(年均地温数据来源于国家青藏高原科学数据中心^[23-24])

Fig.1 Thermal state of permafrost and sampling points in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers (The dataset is provided by National Cryosphere Desert Data Center.)

ELH: 鄂陵湖北岸; QSH: 清水河; YNG: 野牛沟; XXH: 星海海; MDX: 麻多乡; ZLH: 扎陵湖南岸; QMH: 曲麻河; CLQ: 查龙穷; CLP: 查拉坪; BSK: 巴山口; BSKN: 巴山口南

样点(表1)。在每个样点周围选取1个 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 代表样方进行植被调查,用目测法观测植被的覆盖度并测量其高度;接着在一级样方基础上,随机选取1个 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ 二级样方,采用刈割法获得地上生物量并装入信封;利用土钻法在每个样方分4层(0—10cm、10—20cm、20—30cm、30—40cm)取样,每层重复取样3次,取出的土壤样品用自封袋装好并做好标记,待测各指标含量。

2.2 样品处理及测定

将植物样品带回实验室利用烘箱设定 80°C 烘干至恒重,用电子天平称重(精确到 0.01g)并记录。土壤样品带回实验室风干后送至甘肃省农业科学院农业测试中心测定SOC和TN。其中,土壤有机碳含量采用重铬酸钾硫酸氧化—外加加热法测定^[35],土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定^[36-37],土壤pH值用pHS—25型酸度计采用电极法测定。

2.3 数据处理与分析

利用Microsoft Excel 2016(Microsoft Inc., USA)整理数据并预处理,使用IBM SPSS Statistics 22(IBM, USA)进行方差分析,采用OriginPro 2023b(OriginLab, USA)量化各环境因子对SOC、TN和C/N的影响,最后运用Canoco 5.0(Microcomputer Power, USA)对所有环境因子组成的数据矩阵进行冗余分析(Redundancy analysis)。进行冗余分析时,先对源区各环境因子特征值进行标准化和中心化,然后通过蒙特卡罗排列检验(Monte Carlo permutation test)评估每个环境因子对SOC、TN和C/N的贡献是否显著。

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of soil sample points

场地名称 Site	采样点 Sample no.	海拔 Elevation/m	经度 Longitude(°)	纬度 Latitude(°)	植被类型 Vegetation type	优势种 Dominant species	植被盖度 Vegetation cover/%	植被高度 Vegetation height/cm	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	土壤 pH 值 Soil pH	冻土类型 Type of frozen ground
鄂陵湖北岸	ELH-1	4360	97.7082	35.1101	高寒草原	小嵩草	49.00	3.17	19.91	8.47	季节冻土区
Northern bank of the Ngoring Lake	ELH-2	4356	97.7071	35.1079	高寒草原	金露梅	53.33	2.39	31.68	8.59	
野牛沟	YNG-2	4402	97.9396	34.4024	草原化草甸	毛穗披碱草	50.33	4.18	27.06	8.36	
Yenugou	YNG-3	4430	97.9746	34.4962	沼泽草甸	藏嵩草	90.00	1.72	57.00	8.19	
清水河	QSH-2	4398	97.1653	33.7401	沼泽草甸	藏嵩草	57.85	4.77	76.30	6.99	
Qingshuihe	QSH-3	4401	97.1653	33.7398	沼泽草甸	藏嵩草	50.00	2.80	11.80	7.70	
星星海 Xingxinghai	XXH-1	4230	98.0346	34.6474	沼泽草甸	藏嵩草、高山嵩草	68.00	10.83	46.93	8.40	
麻多乡	MDX-1	4416	96.3921	35.0226	沼泽草甸	藏嵩草	82.00	10.67	93.05	8.18	岛状多年冻土区
Maduo Town	MDX-2	4424	96.3944	35.0378	草原化草甸	小嵩草	44.67	13.67	53.18	8.17	
	MDX-3	4431	96.4128	35.0657	草原化草甸	小嵩草	60.17	8.00	17.48	8.29	
扎陵湖南岸	ZLH-1	4413	97.3069	34.6944	草原化草甸	小嵩草	57.33	17.33	66.67	7.87	不连续多年冻土区
Southern bank of the Gyaring Lake	ZLH-2	4346	97.3124	34.6986	黑土滩	-	16.83	5.00	13.83	7.95	
	ZLH-3	4350	97.3108	34.6969	沼泽草甸	藏嵩草	92.25	18.00	75.47	7.59	
查龙穷	CLQ-1	4641	97.5638	34.0426	沼泽草甸	绿绒蒿、凤毛菊	36.00	14.16	93.10	7.61	
Chalongqiong	CLQ-2	4615	97.5656	34.0359	沼泽草甸	藏嵩草、苔草	63.50	9.56	72.00	7.95	
	QMH-1	4486	94.7909	34.9042	半稀疏草甸	西藏微孔草	67.67	3.69	28.93	7.89	
	QMH-3	4452	94.7894	34.9021	高寒草甸	藏嵩草、黑穗苔草	92.25	7.17	54.10	7.57	
曲麻河	QMH-4	4467	94.7891	34.9015	高寒草甸	藏嵩草、高山嵩草	90.00	6.20	52.10	7.79	
Quma'he	QMH-6	4461	94.7889	34.9014	高寒草甸	藏嵩草、高山嵩草	93.50	7.44	37.60	7.33	
	QMH-7	4467	94.7889	34.9013	高寒草甸	藏嵩草、高山嵩草	91.00	12.50	66.90	7.40	
	QMH-8	4477	98.7871	34.8998	高寒草甸	藏嵩草、矮嵩草	86.00	7.77	34.70	7.83	
	QMH-9	4479	94.7849	34.8982	高寒草甸	藏嵩草、苔草	90.00	7.00	65.10	7.84	
	QMH-10	4511	94.7821	34.8965	高寒草甸	藏嵩草、矮嵩草	39.00	1.47	69.60	8.32	
巴山口	BSK	4835	97.6551	34.1288	高寒沼泽草甸	藏嵩草、矮嵩草	60.00	5.02	29.30	6.71	片状连续多年冻土区
Bayan Har Mountain Pass (BHM)	BSKN	4757	97.6452	34.1065	高寒沼泽草甸	藏嵩草	90.00	5.84	44.70	6.45	
巴山口南	CLP-2	4559	97.8496	34.2563	高寒沼泽草甸	藏嵩草、矮嵩草	64.50	13.00	78.60	6.30	
South of the BHM	CLP-3	4667	97.8674	34.2712	高寒沼泽草甸	藏嵩草	75.50	14.20	61.24	6.90	
查拉坪	CLP-4	4560	97.9637	34.3148	高寒沼泽草甸	藏嵩草	92.83	12.67	58.63	7.12	
Chalaping	CLP-AL2	4724	97.8483	34.2569	高寒沼泽草甸	藏嵩草、苔草	84.00	22.00	49.43	6.66	
	CLP-AWS	4721	97.8522	34.2551	高寒沼泽草甸	藏嵩草、矮嵩草	61.50	11.33	72.52	6.42	

部分样点的海拔、经纬度、植被类型、优势种、冻土类型等数据引自林琳等^[34]；ELH：鄂陵湖北岸 Northern bank of the Ngoring Lake；YNG：野牛沟 Yenugou；QSH：清水河 Qingshuihe；XXH：星星海 Xingxinghai；MDX：麻多乡 Maduo Town；ZLH：扎陵湖南岸 Southern bank of the Gyaring Lake；CLQ：查龙穷 Chalongqiong；QMH：曲麻河 Quma'he；BSK：巴山口 Bayan Har Mountain Pass (BHM)；BSKN：巴山口南 South of the BHM；CLP：查拉坪 Chalaping

3 结果与分析

3.1 不同冻土类型下土壤 SOC、TN、C/N 特征

对江河源不同冻土区 SOC、TN、C/N 对比分析发现(图 2), SOC 含量在片状连续多年冻土区显著高于其他冻土区($P \leq 0.01$); 岛状多年冻土区的 TN 含量与季节冻土区、不连续多年冻土区差异不显著($P > 0.05$); 片状连续多年冻土区的 C/N 与其他 3 种冻土类型差异显著($P \leq 0.01$), 其余差异均不显著($P > 0.05$)。麻多乡(MDX)场地位于岛状多年冻土区, 其 SOC、TN、C/N 分别为: 46.00g/kg、3.05g/kg、13.57%, 不连续多年冻土区各场地 SOC、TN、C/N 变异较大, 变化范围分别在 53.28—94.40g/kg、4.09—6.55g/kg、9.57%—14.77%之间。SOC、TN、C/N 在季节冻土区的变异系数为 70%、51%、18%, 片状连续多年冻土区的则为 36%、51%、21%。

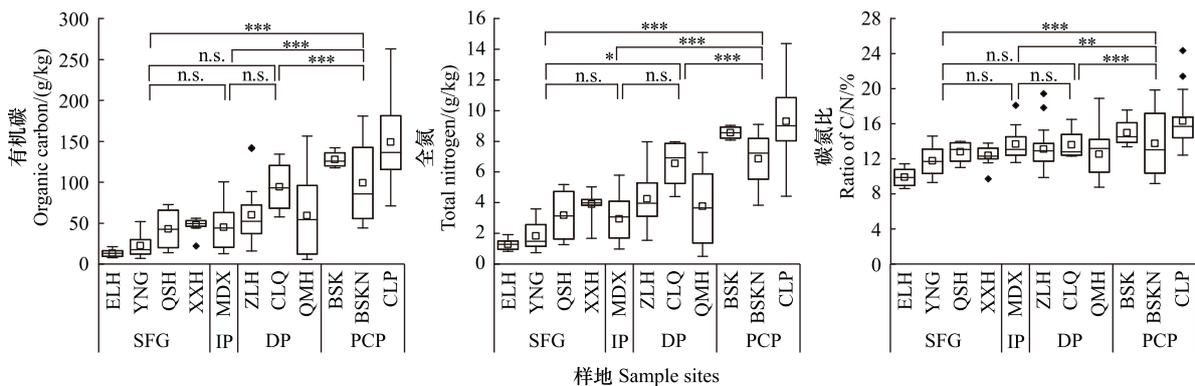


图 2 江河源区不同冻土类型下 SOC、TN、C/N 特征

Fig.2 Characteristics of SOC, TN, C/N at the four kinds of frozen ground in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

SFG: 季节冻土区; IP: 岛状多年冻土区; DP: 不连续多年冻土区; PCP: 片状连续多年冻土区

3.2 土壤 SOC、TN、C/N 与年均地温、活动层厚度的关系

年均地温是评价冻土热稳定型的重要阈值^[38], 本文收集了 11 个场地的年均地温^[39]。江河源季节冻土区年均地温最高(0.41℃), 片状连续多年冻土区年均地温最低(-1.37℃)(图 3)。随着从季节冻土区过渡到片状连续多年冻土区, 年均地温逐渐降低, 土壤 SOC、TN、C/N 逐渐增加; 年均地温与 SOC、TN 含量呈显著负相关($P \leq 0.01$), 相关系数 r 分别为 -0.75、-0.80, 与 C/N 呈显著负相关($P \leq 0.05$, $r = -0.48$)。

多年冻土活动层厚度是冻土区土壤质量的重要影响因子, 其变化不仅影响土壤结构, 还影响土壤的碳氮循环过程^[40]。通过活动层厚度变化与土壤 SOC、TN、C/N 间的相关分析可知, 除季节冻土区外, 其他冻土分区活动层厚度与土壤 SOC、TN 显著负相关($P \leq 0.05$), 相关系数 r 分别为 -0.47、-0.48, 与 C/N 相关性不显著($P > 0.05$, $r = -0.42$)(图 4)。

3.3 土壤 SOC、TN、C/N 与海拔、土壤深度的关系

江河源不同冻土区各场地土壤 SOC、TN、C/N 垂直分带明显(图 5)。SOC 含量与海拔显著正相关($P \leq 0.05$, $r = 0.51$); TN 与海拔显著正相关($P \leq 0.01$), 相关系数 r 为 0.59; C/N 与海拔相关性不显著($P > 0.05$)。区内海拔最高和最低样地分别为片状连续多年冻土区(4693m)和季节冻土区(4368m), 对应的 SOC、TN、C/N 最高和最低。海拔仅相差 51m 的不连续多年冻土区(4474m)和岛状多年冻土区(4423m), SOC、TN、C/N 分别相差 31.31%、28.71%、3.72%。

由图 6 可知, 源区土壤 SOC、TN、C/N 均随深度增加而下降, 这符合土壤碳氮空间分布的一般规律。其中, SOC 含量随冻土类型的下降率表现为岛状多年冻土区(79.04%) > 季节冻土区(68.07%) > 不连续多年冻土区(55.23%) > 片状连续多年冻土区(48.16%); TN 的下降率为岛状多年冻土区(72.44%) > 季节冻土区(55.56%) > 不连续多年冻土区(41.39%) > 片状连续多年冻土区(27.84%); 而 C/N 的下降率为片状连续多年

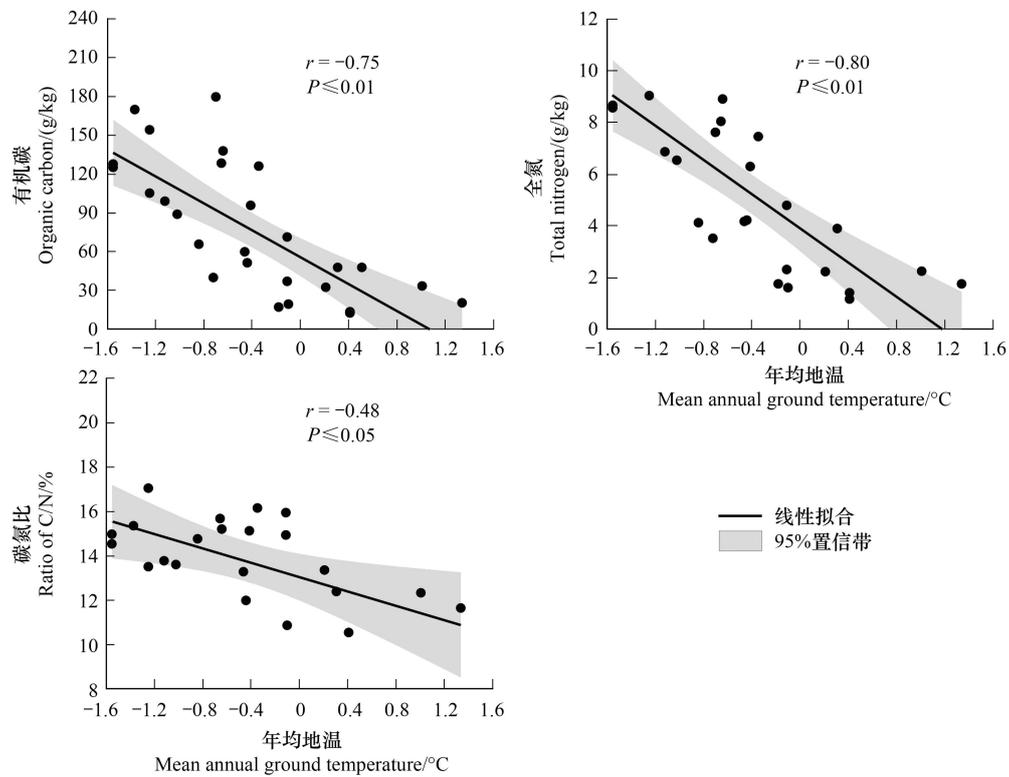


图3 江河源区 SOC、TN、C/N 与年均地温的关系

Fig.3 Relationship between SOC, TN, C/N and mean annual ground temperature in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

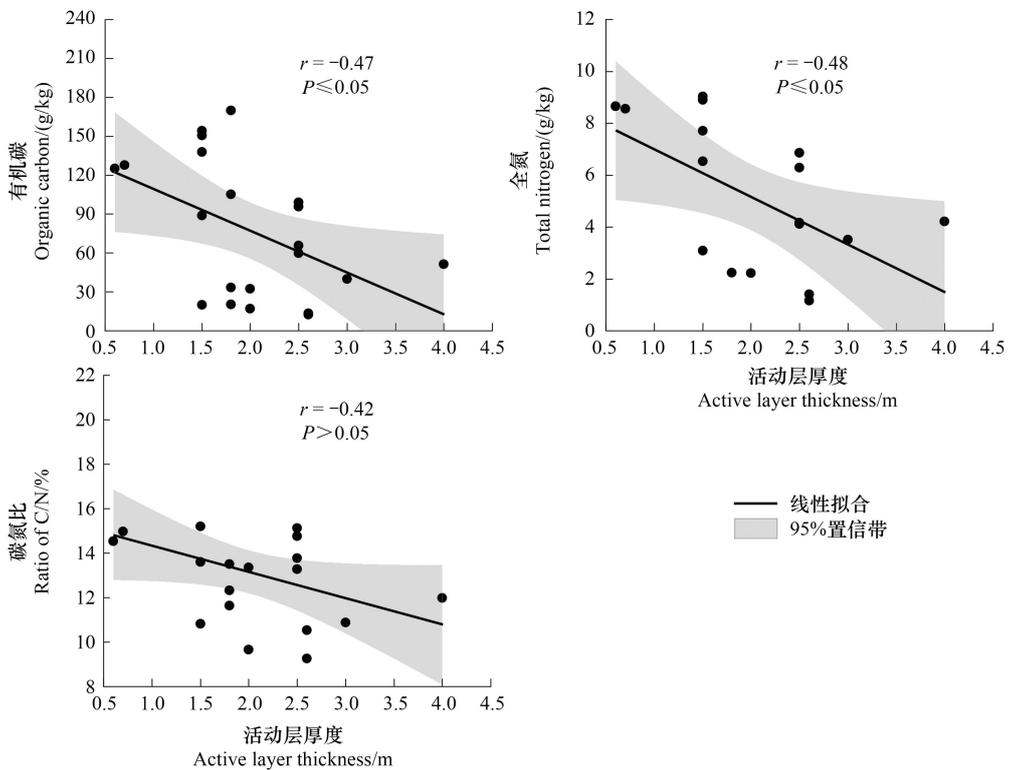


图4 江河源区 SOC、TN、C/N 与活动层厚度的关系

Fig.4 Relationship between SOC, TN, C/N and active layer thickness in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

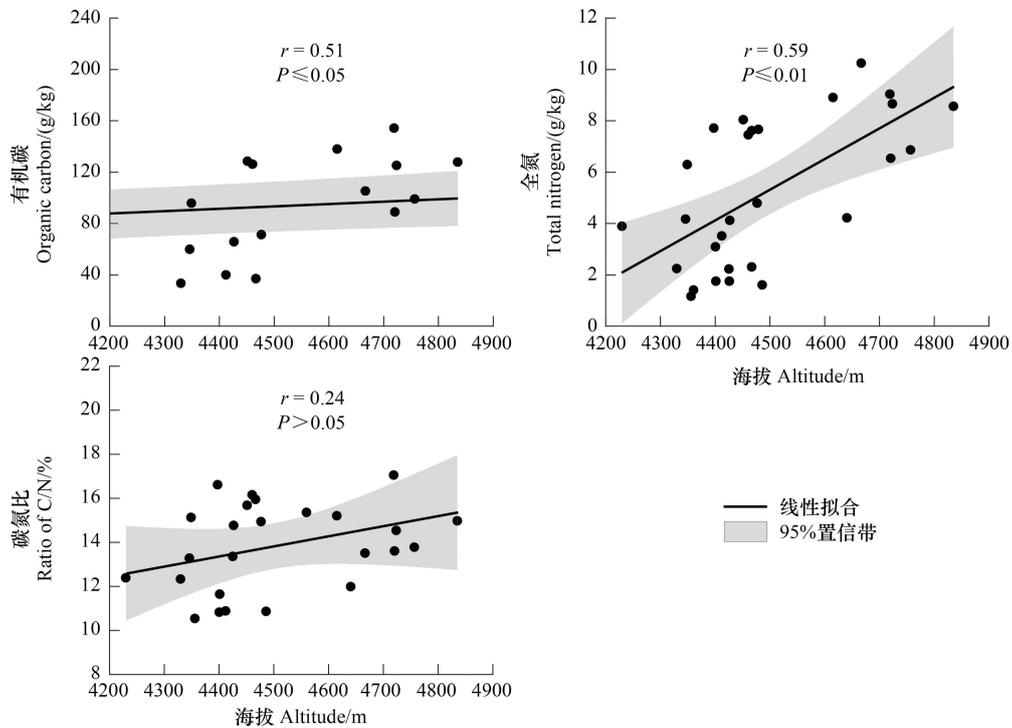


图 5 江河源区 SOC、TN、C/N 与海拔的关系

Fig.5 Relationship between SOC, TN, C/N and altitude in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

冻土区(21.72%)>不连续多年冻土区(17.49%)>岛状多年冻土区(15.84%)>季节冻土区(13.96%)。即在江河源区,随活动层土壤深度增加,岛状多年冻土区 SOC、TN 含量随深度变化下降最快,C/N 在片状连续多年冻土区下降最快(表 2)。

表 2 江河源区不同土壤深度下 SOC、TN、C/N 含量变化

Table 2 Changes of SOC, TN and C/N at different soil depths in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

冻土类型 Frozen ground type	土壤深度/cm Soil depth	土壤有机碳/(g/kg) Soil organic carbon	全氮/(g/kg) Total Nitrogen	碳氮比/% Ratio of C/N
季节冻土区 Seasonally frozen ground	0—10	57.81±88.01	3.69±3.68	12.82±3.77
	10—20	35.92±43.48	2.87±2.55	11.06±1.99
	20—30	21.64±16.24	1.88±1.17	10.83±2.17
岛状多年冻土区 Island permafrost	30—40	18.46±15.71	1.64±1.39	11.03±1.85
	0—10	79.85±54.78	4.97±2.86	14.77±3.14
	10—20	41.99±37.06	3.62±1.94	14.31±3.86
不连续多年冻土区 Discontinuous permafrost	20—30	22.61±10.25	1.78±0.55	12.22±2.60
	30—40	16.74±3.99	1.32±0.34	12.73±0.59
	0—10	108.95±104.01	6.04±3.61	15.49±6.67
片状连续多年冻土区 Predominantly continuous permafrost	10—20	77.37±56.52	5.21±3.18	13.39±3.36
	20—30	50.80±36.66	3.78±2.41	12.67±2.08
	30—40	48.76±39.49	3.54±2.41	12.78±2.91
	0—10	179.64±36.89	10.81±1.87	16.76±3.35
	10—20	133.89±37.40	9.10±2.15	14.70±2.01
	20—30	114.79±36.66	7.80±1.93	14.61±2.43
	30—40	93.13±35.27	9.58±10.62	13.12±3.80

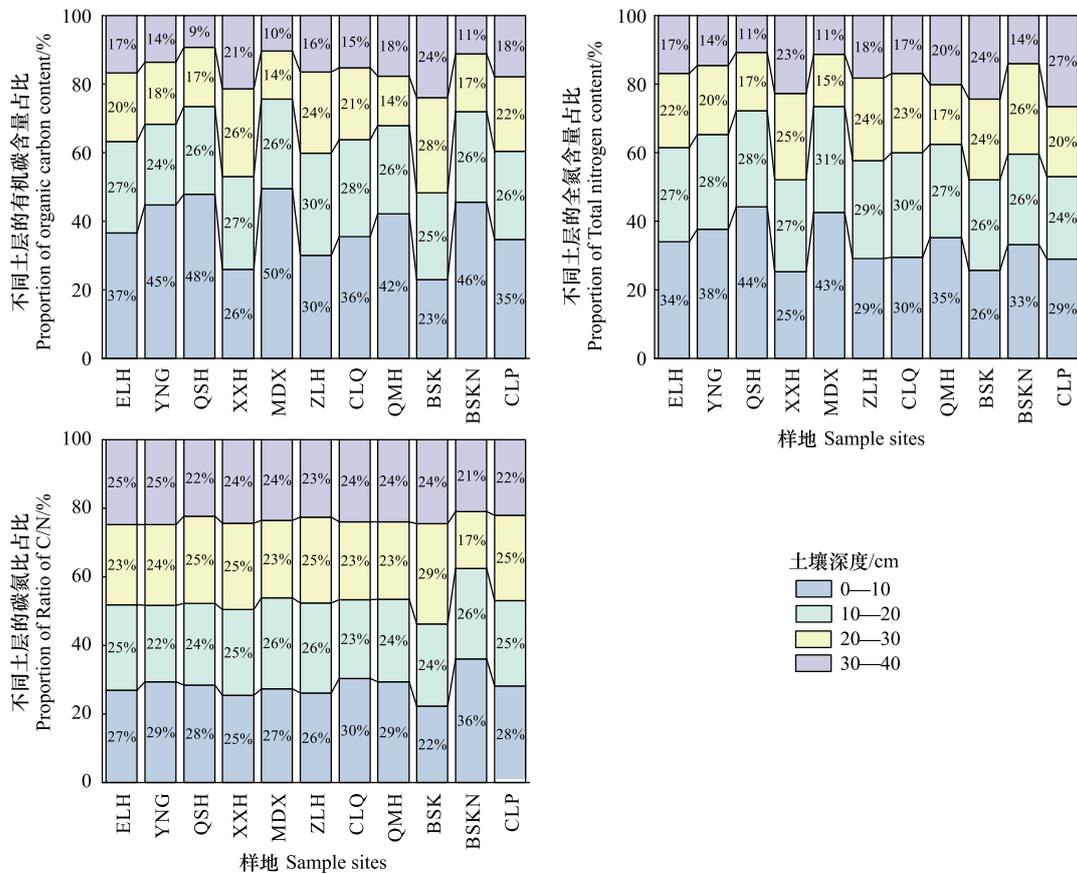


图6 江河源区 SOC、TN、C/N 与活动层土壤深度的关系

Fig.6 Relationships between SOC, TN, C/N and soil depths in the active layer in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

3.4 土壤 SOC、TN、C/N 与植被特征、土壤 pH 的变化关系

利用相关系数图表示土壤 SOC、TN、C/N 与植被特征和土壤 pH 之间的相关关系 (图 7), 发现 SOC 与 TN、C/N, TN 与 C/N 间均呈显著正相关 ($P \leq 0.01$), 相关系数 r 依次为 0.93、0.85、0.70。SOC 与 FVC (植被覆盖度) 呈显著正相关 ($P \leq 0.05, r = 0.31$), 与土壤 pH 值呈显著负相关 ($P \leq 0.01, r = -0.77$); TN 与 FVC、VH (植被高度) 分别表现出显著正相关 ($P \leq 0.05$), 相关系数 r 分别为 0.33、0.39, 与 pH 呈显著负相关 ($P \leq 0.01, r = -0.80$); 土壤 C/N 与 FVC、AGB (地上生物量) 呈显著正相关 ($P \leq 0.05$), 相关系数依次为 0.34、0.32, 与 pH 值呈显著负相关 ($P \leq 0.01, r = -0.59$)。

3.5 土壤 SOC、TN、C/N 与环境因子关系的冗余分析

冗余分析 (RDA) 表明, 环境因子对土壤指标的总解释率为 82.32%, 第一轴解释了 82.3% ($r = 0.87$), 第二轴解释了 0.02% ($r = 0.56$) (图 8)。FVC、AGB、VH、ASL (海拔) 与土壤特征指标 SOC、TN、C/N 正相关; 与 MAGT (年均地温)、ALT (活动层厚度)、SD (土壤深

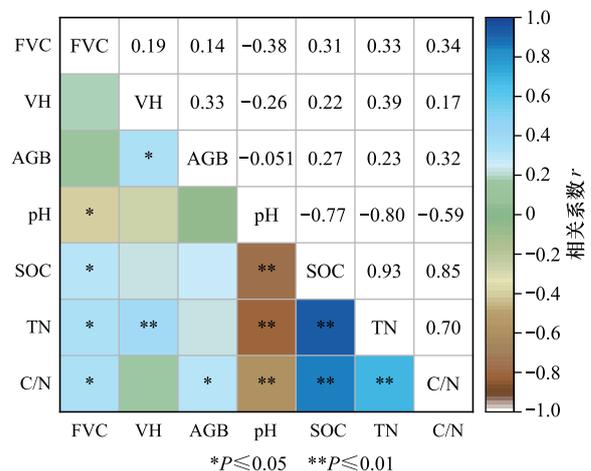


图7 江河源区土壤 SOC、TN、C/N 与植被特征及 pH 的关系

Fig.7 Relationship between SOC, TN, C/N and vegetation characteristics, pH in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

FVC: 植被覆盖度; VH: 植被高度; AGB: 地上生物量; pH: 土壤 pH; SOC: 土壤有机碳; TN: 土壤全氮; C/N: 碳氮比

度)、pH 负相关。为了进一步了解各环境因子对土壤指标的贡献是否显著,采用蒙特卡罗排列检验对环境因子进行排序检验,发现 pH、MAGT、ALT、SD、FVC 显著影响土壤 SOC、TN、C/N 变化($P \leq 0.05$) (表 3)。

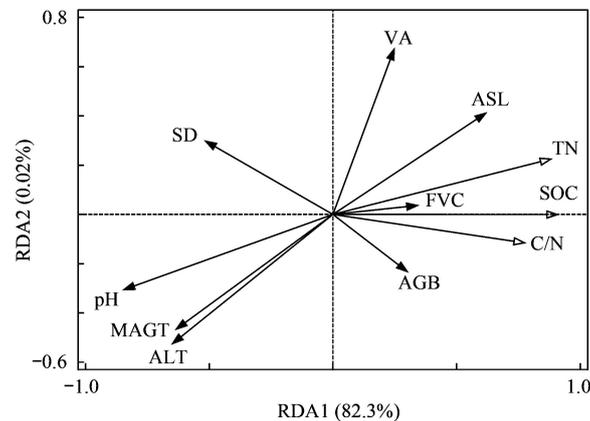


图 8 江河源区土壤 SOC、TN、C/N 与环境因子的冗余分析(RDA)图

Fig.8 Redundancy analysis of SOC, TN, C/N and environmental factors in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers

SD: 土壤深度; ALT: 活动层厚度; ASL: 海拔; MAGT: 年均地温

表 3 环境因子对土壤 SOC、TN、C/N 的贡献率、解释率和显著性检验

Table 3 Contribution, interpretation rate and significance test of the influence of environmental factors on SOC, TN, and C/N

土壤指标 Soil properties	环境因子 Environmental factors	解释率 Explains/%	贡献率 Contribution/%	F	P
有机碳、全氮、碳氮比 SOC、TN、C/N	SD	10.1	11.3	7.6	0.002 **
	ASL	7.6	8.8	5.3	0.044 *
	FVC	9.6	10.3	6.8	0.025 *
	VH	2.7	2.3	2.2	0.168
	AGB	4.8	5.4	4.1	0.064
	ALT	20.9	26.4	11.7	0.002 **
	MAGT	26.6	35.5	20.4	0.002 **

土壤 pH 对土壤碳氮含量贡献率高达 72.4% ($P=0.002$ **), 约束了其他因子的贡献率, 上表的排序结果未将 pH 考虑在内; * 表示在 0.05 水平下差异显著, ** 表示在 0.01 水平下差异显著; SD: 土壤深度 soil depth; ALT: 多年冻土活动层厚度 active layer thickness; ASL: 海拔高度 altitude; FVC: 植被覆盖度 fractional vegetation cover; VH: 植被高度 vegetation height; AGB: 地上生物量 above ground biomass; MAGT: 多年冻土年均地温 mean annual ground temperature

4 讨论

4.1 土壤 SOC、TN、C/N 与年均地温、活动层厚度的关系

冻土因弱透水性降低了地表水下渗率,使植物根系常处于饱水状态,微生物呼吸受到抑制,从而在活动层内集聚大量碳氮^[41-42],而冻土的透水性能与其热稳定状态密切相关。江河源冻土空间分布主要受海拔控制^[43],随着海拔自西北向东南逐渐降低,冻土类型由片状连续多年冻土过渡到季节冻土,热稳定性逐渐降低^[44]。不同冻土在一定程度上与生态系统的空间分异相对应^[45]。本文研究发现,源区 SOC、TN、C/N 表现为在片状连续多年冻土区最高,在季节冻土区最低;土壤 SOC、TN、C/N 与年均地温、活动层厚度呈负相关。冗余分析结果显示:年均地温与活动层厚度对 SOC、TN、C/N 变异的解释率分别为 26.6%、20.9%,表明冻土热稳定型也是导致土壤 SOC、TN、C/N 差异较大的主要原因之一。Wu 等^[46]分析了青藏高原南部多年冻土区碳氮储量空间分布特征,表明多年冻土区的碳氮含量远高于无冻土区。本研究进一步根据 4 个不同冻土分区进行植被调查和土壤分析,表明土壤碳氮含量随多年冻土热稳定性升高而增加,这是由于连续多年冻土区年均地

温更低,冻土存在减少了水分渗透,较长的负温冻结期抑制了微生物活动,减缓了有机质分解,导致土壤中固存了大量碳氮。

4.2 土壤 SOC、TN、C/N 与 pH、植被特征、土壤深度、海拔的关系

江河源区土壤 SOC、TN、C/N 与土壤 pH 呈显著负相关($P \leq 0.01$),由此可见不同土壤 pH 与土壤 SOC、TN、C/N 的空间分异密切相关。以巴山口、巴山口南和查拉坪为代表的片状连续多年冻土区土壤 pH 最小(6.70 ± 0.38),对应的 SOC、TN、C/N 最高($(130.36 \pm 47.91) \text{ g/kg}$, $(9.32 \pm 5.53) \text{ g/kg}$, $(14.80 \pm 3.18) \%$)。这是由于片状连续多年冻土区所处环境以高寒沼泽草甸为主,常处饱水状态,土壤呼吸减缓,碳氮储存较大;同时,大量的水分与土壤、植被中的酸性物质充分反应,使土壤中 H^+ 增多,pH 降低^[47]。而季节冻土区平均 pH 为 8.38,平均 SOC、TN、C/N 为 12.48 g/kg 、 1.25 g/kg 、 9.88% 。季节冻土区土壤呼吸条件适宜,有机质正常分解,且植被覆盖度低,地表水分蒸发量大,地下的可溶性盐依附毛管水迁移到地表,使土壤 pH 增加。

RDA 结果显示,土壤深度对土壤 SOC、TN、C/N 具有显著影响($P \leq 0.05$),第一轴解释了 10.1% 的变异。江河源不同冻土区 SOC、TN、C/N 自土壤表层至 40cm 深度,三者均呈下降趋势。这与牟翠翠等^[48]对祁连山黑河上游俄博岭多年冻土区不同海拔活动层内碳储量变化的研究和 Evgrafova 等^[49]对西伯利亚北部多年冻土区有机碳小尺度空间分布格局的研究结论相一致,即表层土壤植被根系丰富,根系分泌物多,利于碳氮元素的输入和积累^[50]。

随海拔升高,江河源区 SOC、TN、C/N 均呈增加趋势。这与龙训建等^[51]发现黄河源区跨热洼尔玛流域高寒草甸土壤碳氮含量与海拔呈负相关关系的结论相矛盾,这是因为跨热洼尔玛流域高寒草甸为气候相对暖和的季节冻土区,同时土壤受到侵蚀作用较强,植被退化现象严重,土壤碳氮运移分异,使高海拔地方流失,低海拔地方堆积。本研究中 RDA 结果显示,海拔对江河源区土壤 SOC、TN、C/N 解释率为 7.6% ($P > 0.05$),这是由于本文中场地海拔较高,寒冷气候和低温起主导作用,且各场地间海拔相差不大,导致不同海拔下 SOC、TN、C/N 差异不显著。

随着从季节冻土区过渡到片状连续多年冻土区,源区地上生物量、植被覆盖度和植被高度逐渐递增。研究结果显示,植被覆盖度对土壤 SOC、TN、C/N 的变异有显著影响($P \leq 0.05$),解释率为 9.6%,而地上生物量和植被高度的影响不显著($P > 0.05$),解释率仅为 4.8%、2.7%。这是由于 4 种冻土区间虽然植被类型有所不同,但优势种基本均以藏嵩草为主,且除季节冻土区外,其他冻土区地上生物量和高度变异较小,对土壤碳、氮含量影响不显著。

5 结论

江河源区高寒草地土壤 SOC、TN、C/N 受多年冻土热稳定影响明显,SOC、TN、C/N 表现为在片状连续多年冻土区最高,在季节冻土区最低;随年均地温和活动层厚度的增加,土壤 SOC、TN、C/N 呈现降低趋势;随海拔升高,SOC、TN、C/N 不同程度增加;不同深度土壤 SOC、TN、C/N 表现为表层大于深层,且随着深度的增加,岛状多年冻土区 SOC、TN 含量下降率最大,连续多年冻土区 C/N 下降率最大;土壤 pH、年均地温、活动层厚度是造成 SOC、TN、C/N 差异的关键因素。

参考文献(References):

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [2] 曾永年, 冯兆东, 曹广超, 薛亮. 黄河源区高寒草地土壤有机碳储量及分布特征. *地理学报*, 2004, 59(4): 497-504.
- [3] Waring B G, Sulman B N, Reed S, Smith A P, Averill C, Creamer C A, Cusack D F, Hall S J, Jastrow J D, Jilling A, Kemner K M, Kleber M, Liu X J A, Pett-Ridge J, Schulz M. From pools to flow: the PROMISE framework for new insights on soil carbon cycling in a changing world. *Global Change Biology*, 2020, 26(12): 6631-6643.
- [4] 余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展. *生态学报*, 2014, 34(17): 4829-4838.
- [5] 邹丽娜, 周志宇, 颜淑云, 秦彧. 玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应. *中国草地学报*, 2009, 31(6): 80-87.

- [6] Johnson D W, Todd D E Jr, Trettin C F, Sedinger J S. Soil carbon and nitrogen changes in forests of walker branch watershed, 1972 to 2004. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1639-1646.
- [7] Yuan Z Q, Jin H J, Wang Q F, Wu Q B, Li G Y, Jin X Y, Ma Q. Profile distributions of soil organic carbon fractions in a permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 31(4): 538-547.
- [8] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. *土壤*, 2000, 32(1): 11-17.
- [9] Chen Y S, Zhang S H, Wang Y D. Distribution characteristics and drivers of soil carbon and nitrogen in the drylands of central Asia. *Land*, 2022, 11(10): 1723.
- [10] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 王启兰, 丁路明, 施建军. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 441-449.
- [11] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 董全民, 吴海艳, 盛利, 杨时海, 李世雄. 黄河源区高寒草甸不同植被生物量及土壤养分状况研究. *草地学报*, 2011, 19(1): 1-6.
- [12] Bibi S, Wang L, Wang L, Li X P, Zhou J, Chen D L, Chen D L, Yao T, Yao T. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau; a review. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(S1): e1-e17.
- [13] Wang D, Zang S Y, Wang L Y, Ma D L, Li M. Effects of permafrost degradation on soil carbon and nitrogen cycling in permafrost wetlands. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 911314.
- [14] 牟翠翠, 张廷军. 青藏高原东北部多年冻土区土壤有机碳的分解潜力//中国大地测量和地球物理学学术大会. 2014.
- [15] Yang M X, Nelson F E, Shiklomanov N I, Guo D L, Wan G N. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau; a review of recent research. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(1/2): 31-44.
- [16] 程国栋, 赵林, 李韧, 吴晓东, 盛煜, 胡国杰, 邹德富, 金会军, 李新, 吴青柏. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [17] 孙岩, 王一博, 孙哲, 刘国华, 高泽永. 有机质对青藏高原多年冻土活动层土壤持水性能的影响. *中国沙漠*, 2017, 37(2): 288-295.
- [18] Baumann F, He J S, Schmidt K, Kühn P, Scholten T. Pedogenesis, permafrost, and soil moisture as controlling factors for soil nitrogen and carbon contents across the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2009, 15(12): 3001-3017.
- [19] Liu W J, Chen S Y, Zhao Q, Sun Z Z, Ren J W, Qin D H. Variation and control of soil organic carbon and other nutrients in permafrost regions on central Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11): 114013.
- [20] Hu G L, Fang H B, Liu G M, Zhao L, Wu T H, Li R, Wu X D. Soil carbon and nitrogen in the active layers of the permafrost regions in the Three Rivers' Headstream. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(12): 5113-5122.
- [21] Wu X D, Zhao L, Fang H B, Zhao Y G, Smoak J M, Pang Q Q, Ding Y J. Environmental controls on soil organic carbon and nitrogen stocks in the high-altitude arid western Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(1): 176-187.
- [22] Jin X Y, Jin H, Luo D, Sheng Y, Wu Q B, Wu J C, Wang W H, Huang S T, Li X Y, Liang S, Wang Q F, He R, Serban R, Ma Q, Gao S H, Li Y. Impacts of permafrost degradation on hydrology and vegetation in the source area of the Yellow River on northeastern Qinghai-Tibet Plateau, southwest China. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 845824.
- [23] 冉有华. 青藏高原多年冻土地温与热稳定型分布图. 国家青藏高原科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>), 2021. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.ncdc.NIEER.db2513.2022>.
- [24] 冉有华, 李新, 程国栋, 南卓铜, 车金星, 盛煜, 吴青柏, 金会军, 罗栋梁, 唐志光, 吴小波. 2005—2015 年青藏高原多年冻土稳定性制图. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(2): 183-200.
- [25] 冯永忠, 杨改河, 杨世琦, 王得祥. 黄河源区地域界定研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(1): 11-14.
- [26] 张森琦, 李永国, 尚小刚, 辛元红, 王占昌, 石维栋, 庄永成, 周金元. 黄河源区新构造运动对生态环境恶化的影响. *地质通报*, 2006, 25(S1): 213-220.
- [27] 杜际增, 王根绪, 杨燕, 张涛, 毛天旭. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因. *生态学报*, 2015, 35(18): 6173-6182.
- [28] 沈德福, 李世杰, 陈炜, 姜永见, 聂欣. 黄河源区鄂陵湖现代湖盆形态研究. *地理科学*, 2011, 31(10): 1261-1265.
- [29] 吴玉虎. 黄河源区天然草场的植被类型及其特点. *中国草地*, 2004, 26(2): 70-75.
- [30] Cao L J, Zhu Y N, Tang G L, Yuan F, Yan Z W. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(13): 4384-4392.
- [31] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 余迪, 白文蓉. 1960—2019 年黄河源区气候变化时空规律研究. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 293-302.
- [32] 蓝永超, 钟英君, 张耀南, 赵国辉, 畅俊杰, 许叶新, 马建华. 近 50 余年来黄河源区水循环要素的变化及其对气候变暖的响应. *中国水论坛*. 2008.
- [33] 罗栋梁, 金会军, 吕兰芝, 吴青柏. 黄河源区多年冻土活动层和季节冻土冻融过程时空特征. *科学通报*, 2014, 59(14): 1327-1336.

- [34] 林琳, 金会军, 罗栋梁, 吕兰芝, 何瑞霞. 黄河源区高寒植被主要特征初探. 冰川冻土, 2014, 36(1): 230-236.
- [35] 郭艳. 土壤有机质不同测定方法的对比. 农业与技术, 2019, 39(18): 25-26.
- [36] Michałowski T, Asuero A G, Wybraniec S. The titration in the Kjeldahl method of nitrogen determination: base or acid as titrant? Journal of Chemical Education, 2013, 90(2): 191-197.
- [37] Sáez-Plaza P, Navas M J, Wybraniec S, Michałowski T, Asuero A G. An overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. part II. sample preparation, working scale, instrumental finish, and quality control. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2013, 43(4): 224-272.
- [38] Qin Y H, Wu T H, Zhao L, Wu X D, Li R, Xie C W, Pang Q Q, Hu G J, Qiao Y P, Zhao G H, Liu G Y, Zhu X F, Hao J M. Numerical modeling of the active layer thickness and permafrost thermal state across Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(21): 11, 604-11, 620.
- [39] Luo D L, Jin H J, Wu Q B, Bense V F, He R X, Ma Q, Gao S H, Jin X Y, Lü L Z. Thermal regime of warm-dry permafrost in relation to ground surface temperature in the Source Areas of the Yangtze and Yellow Rivers on the Qinghai-Tibet Plateau, SW China. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1033-1045.
- [40] Rodionov A, Flessa H, Grabe M, Kazansky O A, Shibistova O, Guggenberger G. Organic carbon and total nitrogen variability in permafrost-affected soils in a forest tundra ecotone. European Journal of Soil Science, 2007, 58(6): 1260-1272.
- [41] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 吴晓东, 马露, 孙哲, 原黎明, 周华云, 刘世博. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1233-1246.
- [42] 王根绪, 沈永平, 程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析. 冰川冻土, 2000, 22(3): 200-205.
- [43] Luo D L, Jin H J, Jin X Y, He R X, Li X Y, Muskett R R, Marchenko S S, Romanovsky V E. Elevation-dependent thermal regime and dynamics of frozen ground in the Bayan Har Mountains, northeastern Qinghai-Tibet Plateau, southwest China. Permafrost and Periglacial Processes, 2018, 29(4): 257-270.
- [44] 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 何瑞霞, 常晓丽, 罗栋梁. 黄河源区冻土特征及退化趋势. 冰川冻土, 2010, 32(1): 10-17.
- [45] Iqbal M, Wen J, Wang S P, Tian H, Adnan M. Variations of precipitation characteristics during the period 1960-2014 in the Source Region of the Yellow River, China. Journal of Arid Land, 2018, 10(3): 388-401.
- [46] Wu X D, Zhao L, Hu G J, Liu G M, Li W P, Ding Y J. Permafrost and land cover as controlling factors for light fraction organic matter on the southern Qinghai-Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 1165-1174.
- [47] 凌大炯, 章家恩, 欧阳颖. 酸雨对土壤生态系统影响的研究进展. 土壤, 2017, 39(4): 514-521.
- [48] 牟翠翠, 张廷军, 曹斌, 万旭东, 彭小清, 程国栋. 祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究. 冰川冻土, 2013, 35(1): 1-9.
- [49] Evgrafova A, de la Haye T R, Haase I, Shibistova O, Guggenberger G, Tananaev N, Sauheitl L, Spielvogel S. Small-scale spatial patterns of soil organic carbon and nitrogen stocks in permafrost-affected soils of northern Siberia. Geoderma, 2018, 329: 91-107.
- [50] 岳广阳, 赵林, 王志伟, 邹德富, 张乐乐, 乔永平, 赵拥华, 牛丽. 多年冻土区高寒草甸根系分布与活动层温度变化特征的关系. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1381-1387.
- [51] 龙训建, 钱鞠, 张春敏, 王根绪, 李元寿. 高寒草甸区典型景观单元土壤养分空间变异性研究. 冰川冻土, 2008, 30(1): 139-146.