

西藏米拉山不同海拔高山草地土壤有机碳分布特征

马和平*, 吴亚轩, 司孟鑫, 王彪, 陈利

(西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏林芝 860000)

摘要: [目的] 探究西藏高山草地土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量随海拔的变化特征, 为系统认识该区域土壤碳循环规律提供参考。[方法] 以西藏米拉山东坡海拔 4 409~5 108 m 范围内的高山草地为研究对象, 采用随机设定样点的方法采集不同深度土壤样品, 研究 SOC 沿海拔的变化及其影响因素。[结果] 1) 随着海拔的升高, 高山草地土壤 pH 值由 4.63 升高至 6.35, 而容重逐渐减小, 随着土层深度的增加, 土壤 pH 值和容重均升高。2) SOC、土壤有机氮(soil organic nitrogen, SON)及二者组分含量均与海拔、土层深度呈负相关。3) 海拔变化引起的 SOC、SON 及二者组分含量的变化是影响米拉山高山草地 SOC 稳定性的重要因素。[结论] 海拔变化引起米拉山水热因子、土壤理化性质和植被组成等因子变化, 导致植被对有机碳的输入和输出方式不同, 植被生产力通过改变凋落物的归还量进而影响 SOC 的输入量。

关键词: 土壤有机碳; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮; 高山草地; 米拉山

中图分类号: S718.5; S714.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0511-07

Distribution characteristics of soil organic carbon in alpine grassland at different elevations in Mila Mountain, Xizang

MA Heping*, WU Yaxuan, SI Mengxin, WANG Biao, CHEN Li

(Institute of Xizang Plateau Ecology, Xizang Agricultural & Animal Husbandry University, Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Xizang, Key Laboratory of Forest Ecology in Xizang Plateau, Ministry of Education, Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Xizang, Linzhi 860000, China)

Abstract: [Objective] To explore the characteristics of change in soil organic carbon (SOC) content along an elevation gradient in the alpine grassland of Xizang, the scientific question to be answered is "What are the distribution characteristics of SOC at different elevations in a mountain ecosystem?" The results are of great significance for predicting the impact of global climate change on the alpine grassland ecosystem in permafrost region and for providing a reference for the systematic understanding of soil carbon and nitrogen cycling in this region. [Methods] The changes in SOC, soil organic nitrogen (SON), soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN), particulate organic carbon (POC) and readily oxidizable organic carbon (ROC) contents, as well as their components along the elevation gradient and influencing factors, were studied by randomly setting samples at different depths in the alpine grassland on the eastern slope of Mila Mountain in Xizang, located at 4 409 - 5 108 m above sea level. Soil samples were collected by digging soil profiles. Soil sample pits of 120 cm deep were dug in each sample plot, and 100 cm³ ring knives were used to separate bulk heavy soil and soil samples in layers of 0 - 20 cm, >20 - 60 cm, and >60 - 120 cm. A total of 54 bulk

收稿日期: 2024-01-23 录用日期: 2024-05-13

基金项目: 西藏自治区 2023 年科技计划项目(XZ202301ZY0041G); 西藏农牧学院农业资源与环境学科建设项目(2024); 西藏农牧学院林学博士点(一期)(533325001)

* 通信作者: 285477889@qq.com

引文格式: 马和平, 吴亚轩, 司孟鑫, 等. 西藏米拉山不同海拔高山草地土壤有机碳分布特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 511-517.

Citation: MA H P, WU Y X, SI M X, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon in alpine grassland at different elevations in Mila Mountain, Xizang[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 511-517. (in Chinese)



heavy soil and soil samples were collected. The plant roots and gravel were then removed, and the soil samples from the same pit were mixed the same layer. One sample was refrigerated in an incubator and the other was brought back to the lab for air drying to determine the SOC content. [Results] 1) With increasing elevation, soil pH of the alpine grassland gradually increased from 4.63 to 6.35, bulk density gradually decreased. With the increase of soil depth, soil pH and bulk density increased. 2) SOC, SON, SMBC, SMBN, POC and ROC contents were negatively correlated with elevation and soil depth. Their contents were highest in the 0–20 cm soil layer at 4 409 m: 54.13 g/kg, 1.27 g/kg, 186.23 mg/kg, 3.89 mg/kg, 43.15 g/kg and 17.82 g/kg, respectively. 3) The changes in SOC, SON, SMBC, SMBN, POC and ROC contents were caused by changes in elevation, such as variations in hydrothermal conditions, soil physicochemical properties, vegetation composition, and so on. The results indicated that the changes in SOC and its component contents caused by elevation changes were important factors affecting the stability of SOC in the alpine grassland of Mila Mountain. [Conclusion] Soil depth has a significant influence on the contents of SOC, SON, SMBC, SMBN, POC and ROC. The possible reason is that the increase in soil compactness and the decrease in soil porosity hinder the infiltration of water. In low elevation areas, higher plant species richness and biomass lead to greater accumulation of soil organic matter and more carbon into the soil, resulting in the highest SOC and its components contents. Overall, changes in elevation lead to changes in hydrothermal factors, soil physical and chemical properties, and vegetation composition in Mila Mountain, which in turn affect the input and output patterns of organic carbon by vegetation. Vegetation productivity influences SOC input by altering the amount of litter returned.

Keywords: soil organic carbon; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; alpine grassland; Mila Mountain

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是全球陆地生态系统最大的碳库, 贮量约为 1 500 Pg, 是大气碳库的 2 倍, 是陆地植被碳库的 2~4 倍^[1]. 草地生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分, 在全球碳循环中起着极为重要的作用^[2]. SOC 是草地碳循环及草地质量评价的核心指标^[3-4]. SOC 的含量和组分通常受到多种环境因子的影响, 如温度、水分、植被类型、生物活动等^[5-7]. 山地生态系统在较小的垂直梯度上展现出复杂的环境因子变化, 如海拔的改变会影响土壤理化性质、土壤中动植物和微生物等, 它通过对区域的温度和降水等的再分配, 直接或间接地影响土壤碳库的大小和组成, 从而使 SOC 含量及其组分差异发生相应的规律性应答. 研究表明, 海拔是影响山地 SOC 含量的主导因子, 但不同地区海拔对 SOC 的影响规律有所差异^[8-9]. “山地生态系统中不同海拔 SOC 具有怎样的分布特征”这一科学问题至今仍是未知之谜.

米拉山位于西藏自治区东南部、冈底斯山脉的东段, 为雅鲁藏布江的两大支流——尼洋河和拉萨河的分水岭. 米拉山的海拔为 3 100~5 300 m, 落差较大, 研究区植被、土壤类型及其物理性质呈垂直地带性分布^[10-12]. 近年来, 关于米拉山东坡植物区系、土壤团聚体及土壤水分的研究已有报道^[13-15], 但关于该区域 SOC 特性的相关研究较少. 基于此, 本研究选择在西藏米拉山东坡海拔 4 409~5 108 m 范围内的高山草地为研究对象, 探究山地生态系统中不同海拔 SOC 的分布特征, 以期预测全球气候变化对多年冻土区高山草地生态系统的影响提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于西藏米拉山东坡海拔 4 409~5 108 m, 地理坐标为 92°20′19.289 2″~92°22′44.208 2″ E, 29°49′45.859 9″~29°54′27.034 2″ N, 属高原温带季风气候区, 受印度洋暖湿气流影响, 区域干湿季节分明, 每年 6—9 月为雨季, 天气温暖、湿润、多雨; 10 月—次年 5 月为旱季, 天气干燥、晴朗, 昼夜温差大. 研究区多年平均气温 7.98 °C, 最低气温 -15.15 °C, 最高气温 29.07 °C, 年气温相差 44.22 °C, 年降水量约 550 mm^[16]. 样地状况如表 1 所示. 植被结构较为简单, 主要为草地及灌丛草地, 主要植物有垫状点地梅、高山嵩草、尼泊尔香青、毛毡草、斜茎黄芪等草本植物. 土壤类型多为高寒草甸土和寒漠土^[14].

1.2 土壤样品采集

本研究在米拉山东坡海拔 4 409~5 108 m 范围内, 于 2023 年 9 月选择能够代表各海拔带植被组成状况的区域设置 1 个 5 m×5 m 的样地, 共计 6 块样地(表 1). 采用随机设定样点的方法进行土壤样品采集, 每个样地设定 3 次重复. 土壤样品采用挖取土壤剖面的方法采集, 在每个样地内挖取 120 cm 深的土壤样坑, 将深度为 0~20 cm、>20~60 cm 和 >60~120 cm 的土层分别记为 I 层、II 层和 III 层, 分层采用 100 cm³ 环刀取土壤容重土和土壤样品, 共采集容重土和土壤样品各 54 份. 再去除植物根系、杂石等, 将同一样坑的土样进行同层混合, 其中一份采用保温箱冷藏保存, 另一份带

表1 样地立地状况和植被组成

Tab. 1 Site conditions and vegetation composition of the sample plots

样地编号	海拔/m	东经	北纬	坡向	坡度/(°)	主要物种
ME01	5 108	92°20'19.289 2"	29°49'45.859 9"	东	22	1,2,3,4,5,6,7,8
ME02	5 008	92°20'32.868 7"	29°49'43.353 7"	东	28	3,7,9,10,11,12
ME03	4 909	92°20'34.250 6"	29°49'31.591 4"	东	32	10,13,14,15,16,17,18
ME04	4 709	92°20'00.570 1"	29°51'07.924 1"	东	25	10,14,16,18,19,20,21
ME05	4 502	92°20'56.136 4"	29°54'22.280 3"	东	28	10,14,16,19,22,23,24
ME06	4 409	92°22'44.208 2"	29°54'27.034 2"	东	21	10,14,22,23,24,25,26

注:1. 播娘蒿 (*Descurainia sophia*); 2. 鸭趾草 (*Commelina communis*); 3. 垫状点地梅 (*Androsace tapete*); 4. 喉毛花 (*Comastoma pulmonarium*); 5. 鳞叶龙胆 (*Gentiana squarrosa*); 6. 草血竭 (*Bistorta paleacea*); 7. 中华草沙蚕 (*Tripogon chinensis*); 8. 独一味 (*Phlomis rotata*); 9. 花叶燕麦草 (*Arrhenatherum elatius*); 10. 高山嵩草 (*Carex parvula*); 11. 欧氏马先蒿 (*Pedicularis oederi*); 12. 大果琉璃草 (*Cynoglossum divaricatum*); 13. 山景龙胆 (*G. oreodoxa*); 14. 尼泊尔香青 (*Anaphalis nepalensis*); 15. 长毛风毛菊 (*Saussurea hieracioides*); 16. 牛毛毡 (*Eleocharis yokoscensis*); 17. 圆叶锦葵 (*Malva pusilla*); 18. 圆穗蓼 (*Bistorta macrophylla*); 19. 狮牙草状风毛菊 (*Saussurea leontodontoides*); 20. 华蒲公英 (*Taraxacum sinicum*); 21. 麦瓶草 (*Silene conoidea*); 22. 毛毡草 (*Blumea hieracii folia*); 23. 肺筋草 (*Aletris spicata*); 24. 野草莓 (*Fragaria vesca*); 25. 斜茎黄芪 (*Astragalus laxmannii*); 26. 长籽柳叶菜 (*Epilobium pyrricholophum*).

回室内风干进行 SOC 含量的测定。

1.3 室内分析指标及分析方法

土壤 pH 值采用酸度计法测定,土壤容重采用环刀法测定,SOC 含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法^[17]测定,土壤有机氮(soil organic nitrogen,SON)含量采用凯氏定氮法^[17]测定.土壤微生物量碳(soil microbial biomass carbon,SMBC)和土壤微生物量氮(soil microbial biomass nitrogen,SMBN)含量采用三氯甲烷熏蒸浸提法测定:将新鲜土壤样品置于提取瓶中,和三氯甲烷、氢氧化钠一起放入真空干燥器内培养 24 h,同时将未熏蒸处理的作为对照;随后用 0.5 mol/L K₂SO₄溶液分别对熏蒸完全和未经过熏蒸处理的样品进行浸提,过滤后将滤液置于 Multi N/C 3100 分析仪中进行测定^[18].土壤颗粒有机碳(particulate organic

carbon,POC)含量参考 Caron 等^[19]的方法测定,土壤易氧化有机碳(readily oxidizable organic carbon,ROC)含量采用徐明岗等^[20]的方法测定.

1.4 数据分析

应用 Excel 2010 进行数据录入,利用 SPSS 11.5 软件对 SOC、SON、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量特征数据进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 高山草地土壤 pH 和容重随海拔的变化

西藏米拉山东坡不同海拔高山草地土壤 pH 和容重的变化如图 1(a)和(b)所示.可以看出:随着海拔的升高,同一土层深度土壤的 pH 总体呈上升趋势, I

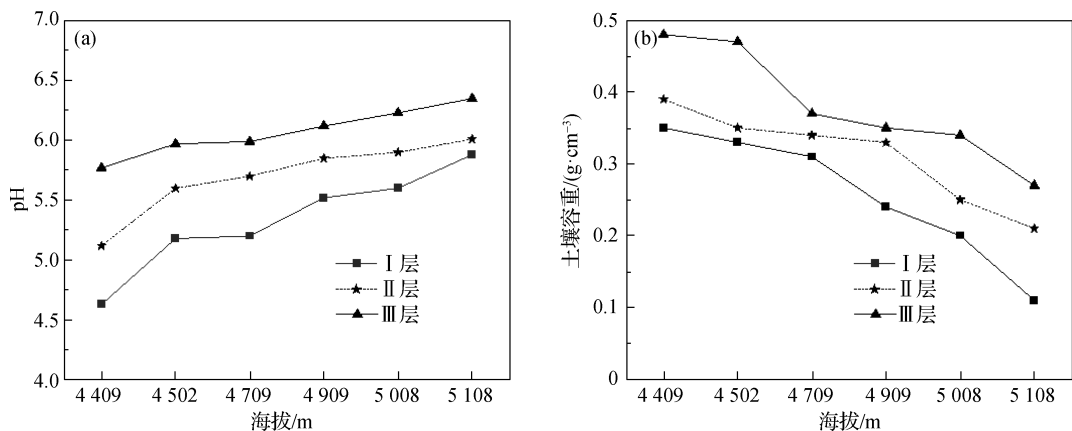


图1 垂直带土壤 pH(a)和容重(b)随海拔的变化

Fig. 1 Changes in pH (a) and bulk density (b) of vertical zone soil with elevation

层、II层和III层土壤的 pH 分别由 4.63, 5.12 和 5.77 升至 5.88, 6.01 和 6.35, 即由弱酸性过渡至中性. 在相同海拔, 随着土层深度的增加土壤 pH 升高, 土壤也由弱酸性过渡至中性. 随着海拔的升高, 同一土层深度的土壤容重逐渐减小, I 层、II 层和 III 层的容重分别由 0.35, 0.39 和 0.48 g/cm³ 减小至 0.11, 0.21 和 0.27 g/cm³. 在相同海拔处, 随着土层深度的增加, 土壤容重逐渐增加.

2.2 高山草地 SOC 和 SON 随海拔的变化特征

如表 2 所示, 在米拉山不同海拔的高山草地, 随着海拔的升高, SOC 和 SON 含量总体上均呈减小的趋势. 其中, I 层、II 层和 III 层的 SOC 含量范围分别为 25.12~54.13 g/kg, 20.73~45.14 g/kg 和 17.13~23.11 g/kg, SON 的含量范围分别为 0.32~1.27 g/kg, 0.27~1.13 g/kg 和 0.22~0.65 g/kg. 另外, 同一海

拔样地内 SOC 和 SON 含量总体上随着土层深度的增加而减小.

由表 2 还可以看出: 海拔 4 909, 4 502 和 4 409 m 处不同土层间的 SOC 含量均差异显著 ($P < 0.05$); 海拔 5 108 和 5 008 m 处 II 层和 III 层的 SOC 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 而二者与同一海拔 I 层的 SOC 含量差异显著 ($P < 0.05$); 在海拔 4 709 m 处, I 层和 II 层的 SOC 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 而二者与 III 层的 SOC 含量差异显著 ($P < 0.05$). 同时, 在海拔 4 409, 4 502 和 5 008 m 处, 不同土层间的 SON 含量均差异显著 ($P < 0.05$); 在海拔 4 709 m 处, I 层和 II 层的 SON 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 而二者与 III 层的 SON 含量差异显著 ($P < 0.05$). 由此可以看出, 土层深度对 SOC 和 SON 含量均有显著影响, 这与马和平等^[21]之前的研究结果一致. 对同一土层深度不同海拔而言, 海拔 4 409 m 处 I 层和 II 层 SON 含量与其他海拔相同土层 SON 含量差异显著 ($P < 0.05$), 海拔 4 502 和 4 709 m 处 I 层和 II 层 SON 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 海拔 4 909, 5 008 和 5 108 m 处 II 层 SON 含量差异不显著 ($P > 0.05$). III 层的 SON 含量在海拔 4 409 与 4 502 m 处的差异不显著 ($P > 0.05$), 但二者与其他海拔处的 SON 含量差异显著 ($P < 0.05$), 而在海拔 4 709, 4 909 和 5 008 m 处的 SON 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 海拔 5 108 m 处的 SON 含量与其他海拔间均差异显著 ($P < 0.05$).

2.3 高山草地 SMBC、SMBN、POC 和 ROC 随海拔的变化特征

西藏米拉山不同海拔高山草地 SMBC 和 SMBN 含量特征如表 3 所示. 可以看出: 随着海拔的升高, SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量均呈减小的趋势, 其 3 个土层的均值范围分别为 106.64~153.82 mg/kg, 1.58~3.20 mg/kg, 11.96~32.72 g/kg, 3.50~14.29 g/kg. 其中, SMBC 含量在 I 层、II 层和 III 层的变化范围分别为 125.37~186.23 mg/kg, 122.43~141.25 mg/kg 和 72.12~136.09 mg/kg, SMBN 含量在 I 层、II 层和 III 层的变化范围分别为 2.31~3.89 mg/kg, 1.72~3.70 mg/kg 和 0.71~2.02 mg/kg, POC 含量在 I 层、II 层和 III 层的变化范围分别为 16.35~43.15 g/kg, 13.52~34.28 g/kg 和 6.01~20.74 g/kg, ROC 含量在 I 层、II 层和 III 层的变化范围分别为 5.41~17.82 g/kg, 2.87~14.63 g/kg 和 2.23~10.41 g/kg. 另外, 研究区 SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量均随土层深度增加呈减小趋势, 这与前人的研究结果^[22-23]一致.

表 2 米拉山不同海拔高山草地 SOC 和 SON 的含量
Tab. 2 Contents of SOC and SON in alpine grassland at different elevations in Mila Mountain

样地编号	海拔/m	土层	SOC/(g · kg ⁻¹)	SON/(g · kg ⁻¹)
ME01	5 108	I	25.12 ± 8.32 ^{aC}	0.32 ± 0.31 ^{aC}
		II	20.73 ± 7.73 ^{bC}	0.27 ± 0.29 ^{bC}
		III	19.51 ± 7.34 ^{bB}	0.22 ± 0.27 ^{bC}
ME02	5 008	I	26.73 ± 8.95 ^{aC}	0.45 ± 0.32 ^{aC}
		II	20.74 ± 7.73 ^{bC}	0.47 ± 0.29 ^{bC}
		III	18.33 ± 6.92 ^{bC}	0.29 ± 0.19 ^{bB}
ME03	4 909	I	31.54 ± 9.58 ^{aC}	0.64 ± 0.33 ^{aB}
		II	24.26 ± 8.19 ^{bC}	0.56 ± 0.31 ^{bC}
		III	19.75 ± 7.36 ^{bB}	0.36 ± 0.28 ^{bB}
ME04	4 709	I	37.34 ± 9.93 ^{aB}	0.71 ± 0.34 ^{aB}
		II	38.41 ± 9.97 ^{aB}	0.89 ± 0.35 ^{aB}
		III	17.13 ± 7.22 ^{bC}	0.37 ± 0.02 ^{bB}
ME05	4 502	I	41.54 ± 10.12 ^{aB}	0.92 ± 0.40 ^{aB}
		II	34.21 ± 9.67 ^{bB}	0.83 ± 0.33 ^{bB}
		III	20.93 ± 7.75 ^{bB}	0.61 ± 0.28 ^{aA}
ME06	4 409	I	54.13 ± 11.19 ^{aA}	1.27 ± 0.41 ^{aA}
		II	45.14 ± 10.87 ^{bA}	1.13 ± 0.39 ^{bA}
		III	23.11 ± 7.81 ^{aA}	0.65 ± 0.30 ^{aA}

注: 不同小写字母表示同一海拔不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一土层不同海拔间差异显著 ($P < 0.05$), 下同.

表 3 米拉山不同海拔高山草地 SMBC、SMBN、POC 和 ROC 的含量

Tab. 3 Contents of SMBC, SMBN, POC and ROC of alpine grassland at different elevations in Mila Mountain

样地编号	海拔/m	土层	SMBC/(mg · kg ⁻¹)	SMBN/(mg · kg ⁻¹)	POC/(g · kg ⁻¹)	ROC/(g · kg ⁻¹)
ME01	5 108	I	125.37±32.21 ^{aC}	2.31±1.13 ^{aC}	16.35±8.28 ^{aC}	5.41±2.31 ^{aC}
		II	122.43±31.87 ^{aC}	1.72±1.03 ^{bC}	13.52±4.89 ^{bC}	2.87±1.32 ^{bC}
		III	72.12±20.37 ^{bC}	0.71±0.27 ^{cC}	6.01±2.11 ^{cC}	2.23±1.45 ^{bC}
ME02	5 008	I	135.41±34.95 ^{aC}	2.37±1.31 ^{aC}	19.83±9.34 ^{aC}	6.68±2.49 ^{aC}
		II	130.05±33.48 ^{bC}	2.13±1.25 ^{bB}	18.76±9.21 ^{aB}	3.96±1.87 ^{bC}
		III	87.13±22.38 ^{cC}	1.25±0.89 ^{cB}	12.22±4.67 ^{bB}	3.84±1.83 ^{bC}
ME03	4 909	I	159.47±38.27 ^{aB}	2.76±1.45 ^{aB}	26.76±10.53 ^{aB}	8.98±2.57 ^{aC}
		II	133.25±30.01 ^{bB}	2.16±1.05 ^{bB}	19.91±9.28 ^{bB}	5.03±2.25 ^{bB}
		III	104.36±28.38 ^{bB}	1.66±0.94 ^{cB}	17.36±8.51 ^{bA}	3.95±1.86 ^{cC}
ME04	4 709	I	160.22±38.27 ^{aB}	3.27±1.86 ^{aA}	31.54±12.97 ^{aB}	11.40±3.43 ^{aB}
		II	135.11±34.98 ^{bB}	2.19±0.94 ^{bB}	27.37±10.58 ^{aA}	8.53±2.36 ^{bB}
		III	116.25±29.93 ^{cB}	1.73±0.89 ^{cB}	17.62±8.47 ^{bA}	7.62±2.46 ^{bB}
ME05	4 502	I	169.01±38.94 ^{aB}	3.73±1.97 ^{aA}	34.37±13.51 ^{aB}	14.01±3.79 ^{aB}
		II	141.25±35.74 ^{bA}	2.23±1.01 ^{bB}	31.81±12.94 ^{aA}	12.51±3.65 ^{bA}
		III	135.34±34.95 ^{bA}	1.94±0.89 ^{cA}	18.55±9.14 ^{bA}	9.77±3.05 ^{cA}
ME06	4 409	I	186.23±41.34 ^{aA}	3.89±1.99 ^{aA}	43.15±15.59 ^{aA}	17.82±4.21 ^{aA}
		II	139.14±34.95 ^{bA}	3.70±1.88 ^{aA}	34.28±13.24 ^{bA}	14.63±3.89 ^{bA}
		III	136.09±34.99 ^{bA}	2.02±0.99 ^{bA}	20.74±9.98 ^{cA}	10.41±3.32 ^{cA}

由表 3 还可以看出:就不同海拔梯度同一土层而言,海拔 5 108 与 5 008 m 间 I 层的 SMBC 含量差异不显著($P>0.05$),4 909,4 709 和 4 502 m 间 I 层 SMBC 含量差异不显著($P>0.05$),而海拔 4 409 m 与其他海拔间的 I 层 SMBC 含量均差异显著($P<0.05$)。II 层和 III 层 SMBC 含量在海拔 4 409 与 4 502 m 间、4 709 和 4 909 m 间、5 008 和 5 108 m 间均差异不显著($P>0.05$),而这三者之间差异显著($P<0.05$)。I 层 SMBN 含量在海拔 4 409,4 502 和 4 709 m 间及 5 008 和 5 108 m 间差异不显著($P>0.05$),海拔 4 909 m 与其他海拔间的含量差异显著($P<0.05$)。II 层 SMBN 含量在海拔 4 409 m 与其他海拔间差异显著($P<0.05$),而在海拔 4 502,4 709,4 909 和 5 008 m 间差异不显著($P>0.05$)。海拔 5 108 m 处 III 层 SMBN 含量与其他海拔间差异显著($P<0.05$)。海拔 4 409 m 处 I 层、5 108 m 处 II 层和 III 层 POC 含量与其他海拔处同一土层的含量均差异显著($P<0.05$)。海拔 4 409 m 处 I 层 ROC 含量与其他海拔间差异显著($P<0.05$),海拔 4 409 和 4 502 m 间、4 709 和

4 909 m 间、5 008 和 5 108 m 间 III 层 ROC 含量均差异不显著($P>0.05$),而这三者之间则差异显著($P<0.05$)。

对于同一海拔不同土层,海拔 5 108 m 处不同土层间的 SMBN 和 POC 含量均差异显著($P<0.05$),III 层与 I 层、II 层间的 SMBC 含量差异显著($P<0.05$),而 I 层和 II 层间的 SMBC 含量差异不显著($P>0.05$),II 层和 III 层间的 ROC 含量差异不显著($P>0.05$)。海拔 5 008 m 处不同土层间的 SMBC 和 SMBN 含量均差异显著($P<0.05$),III 层与 I 层、II 层间的 POC 含量差异显著($P<0.05$),而 I 层和 II 层间的 POC 含量差异不显著($P>0.05$),II 层和 III 层间的 ROC 含量差异不显著($P>0.05$)。海拔 4 909 m 处不同土层间的 SMBC、SMBN 和 ROC 含量均差异显著($P<0.05$),I 层与 II 层、III 层间的 POC 含量也差异显著($P<0.05$)。海拔 4 709 m 处不同土层间的 SMBC 和 SMBN 含量均差异显著($P<0.05$)。海拔 4 502 m 处不同土层间的 SMBN 和 ROC 含量均差异显著($P<0.05$)。海拔 4 409 m 处不同土层间的 POC 和 ROC 含量均差异显著($P<0.05$)。

3 讨 论

在本研究中,随着海拔升高,高山草地土壤 pH 值逐渐升高,容重逐渐减小,SOC、SON、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量均呈减小趋势;随着土层深度增加,土壤 pH 值和容重均呈增加趋势,而 SOC、SON、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量均呈减小趋势,与刘放等^[24]的研究结果一致,表明弱酸性环境可能更有利于微生物的繁殖.这是因为在 pH 值较低的土壤中,微生物以真菌为主,其他种类微生物的作用受到限制,抑制了微生物对有机质的分解,从而使得植物物质的分解减缓,SOC 含量增大.可见,土壤 pH 值显著影响高山草地 SOC 及其组分含量,这与周晨霓等^[25]的研究结果一致.

在本研究中,SOC、SON、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量在不同土层表现的总体趋势是:Ⅰ层>Ⅱ层>Ⅲ层.可见土层深度对 SOC、SON 及二者组分含量有显著影响.这是因为深层土壤紧实度的增加和土壤孔隙的减少阻碍了水分的渗入,使得表层土壤的含水量一般较深层土壤的含水量大,而充足的土壤含水量,一方面有利于地上植被和根系生物量的增加,另一方面有利于提高凋落物和根系的分解速率^[26].由于地上凋落物和草本植物根系是浅层 SOC 主要输入来源,土壤表层的凋落物、密集分布的根系以及根系分泌物在分解过程中向浅表层土壤输送有机质,这些有机质最终被微生物分解形成有机碳被土壤固定.随着土层深度的增加,进入土壤的有机质逐渐减少,从而表现出 SOC 及其组分含量随着土层深度的增加呈减小的趋势,这与吴小刚等^[27]的研究结果一致.另外,表层土壤中好氧菌较多,活动较强,随着土层深度的增加,微生物的生境条件变差,深层土壤中生长代谢活动不强的厌氧菌占主导地位,微生物量的分布发生变化,因而 SMBC 和 SMBN 的含量明显低于上层.

植被是 SOC 的重要来源.植被类型不同,SOC 输入和输出方式不同,其 SOC 含量也相应不同^[28].植被生产力通过改变凋落物和根系及分泌物的归还量来影响 SOC 输入^[29].本研究结果表明,在低海拔区域,如海拔 4 409 m 样地植被种类多、体型大,如斜茎黄芩,较高的植物物种丰富度和生物量使得土壤有机质积累较多,输入土壤的碳增加,导致 SOC、SON、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量最高.与此同时,植被类型的不同导致凋落物特性的差异,在一定程度上会改变土壤微生物群落特征,其微生物量和土壤碳利

用效率均与植被类型密切相关.这也印证了植被类型的差异与有机碳含量之间的复杂关系,说明植物残体和生物归还量等的差异会进一步改变 SOC 的空间分布和积累状态.随着海拔的升高,植被出现退化,尤其在高海拔(5 108 m)区域,高寒、风大,常年处于低温条件,一年中大多数时间土壤都被积雪覆盖且长期处于冻土状态,这种环境不利于植物生长,植被种类稀少且比较矮小,如匍匐生长的独一味、垫状点地梅和鳞叶龙胆等.这些矮小植物的凋落物较少,导致输入土壤的碳源较少,因此该样地的 SOC、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量最低,这与张法伟等^[30]的研究结果一致.

本研究结果表明,SOC、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量与海拔呈显著负相关,与李洋等^[31]的研究结果一致.这是因为高海拔低温条件会抑制土壤微生物的新陈代谢活动,导致土壤微生物量减少,进一步印证了不同海拔条件下土壤微生物的新陈代谢过程及其数量都与 SOC 含量的动态变化特征息息相关.本研究中,随着海拔的升高,SOC 及其组分含量均呈减小的趋势,与向成华等^[32]的研究结果中随着海拔的升高 SOC 表现为双峰或单峰的特征不一致.这可能是因为本研究区海拔为 4 409 ~5 108 m,整个范围属于高寒区域,随着海拔的升高水热梯度及其植被组成变化较快,影响了该区域植物的生长及其凋落物厚度,从而影响了土壤碳的输入.

4 结 论

1) 米拉山高山草地土壤 pH 值与海拔、土层深度呈正相关,容重与海拔呈负相关,而与土层深度呈正相关.SOC、SON、SMBC、SMBN、POC 和 ROC 含量与海拔、土层深度呈负相关.

2) 海拔变化引起米拉山水热因子、土壤理化性质和植被组成等因子变化,导致 SOC、SON 及二者组分含量发生变化,表明海拔变化所引起的 SOC、SON 及二者组分含量的变化是影响米拉山高山草地 SOC 稳定性的重要因素.

参考文献:

- [1] TERRER C, PHILLIPS R P, HUNGATE B A, et al. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂ [J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 599-603.
- [2] 刘伟,程积民,高阳,等.黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.

- [3] ANGST G, MUELLER K E, NIEROP K G J, et al. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108189.
- [4] ZHANG X Y, JIA J, CHEN L T, et al. Aridity and NPP constrain contribution of microbial necromass to soil organic carbon in the Qinghai-Tibet alpine grasslands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108213.
- [5] 王深华, 江军, 刘丰彩, 等. 中国成熟天然林土壤有机碳垂直分异特征 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2371-2377.
- [6] KUČERIK J, TOKARSKI D, DEMYAN M S, et al. Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen [J]. *Geoderma*, 2018, 316: 38-46.
- [7] JIA Y F, KUZYAKOV Y, WANG G A, et al. Temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter fractions increases with their turnover time [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(5): 632-645.
- [8] 黄斌, 王泉泉, 李定强, 等. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征 [J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 374-383.
- [9] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述 [J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(3): 142-150.
- [10] 拉多, 张燕杰, 庞有智, 等. 米拉山植物群落数量及海拔梯度与物种丰富度变化格局分析 [J]. *西藏大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(1): 12-20.
- [11] 钟国辉, 钟政昌, 田发益, 等. 西藏米拉山区土壤主要养分元素垂直分布特征 [J]. *山地学报*, 2007, 25(1): 108-113.
- [12] 余波, 尹惠妍, 王冰, 等. 米拉山高寒草甸阴阳坡土壤物理性质垂直地带性 [J]. *高原农业*, 2023, 7(4): 418-428, 452.
- [13] 罗建, 边巴多吉, 郑维列. 西藏米拉山区种子植物区系研究 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(6): 18-22.
- [14] 喻武, 任德智, 杨文姬, 等. 西藏米拉山土壤团聚体垂直地带性特征 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(7): 59-69.
- [15] 张志伟, 尹惠妍, 李羊旦, 等. 西藏米拉山高寒草甸土壤水分的空间异质性 [J]. *高原农业*, 2021, 5(5): 452-459.
- [16] 王建群, 陈红红, 洛珠尼玛. 藏东南尼洋河流域降水径流量平衡问题 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 283-287.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54.
- [19] CARON J, ESPINDOLA C R, ANGERS D A. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 901-908.
- [20] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723-729.
- [21] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究 [J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 3122-3128.
- [22] 陈懂懂, 霍莉莉, 赵亮, 等. 青海高寒草地水热因子对土壤微生物生物量碳、氮空间变异的贡献: 基于增强回归树模型 [J]. *生态环境学报*, 2023, 32(7): 1207-1217.
- [23] 尹亚丽, 王玉琴, 鲍根生, 等. 退化高寒草甸土壤微生物及酶活性特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3881-3890.
- [24] 刘放, 吴明辉, 魏培洁, 等. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征 [J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6416-6426.
- [25] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1246-1251.
- [26] 程积民, 万惠娥, 胡相明, 等. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解 [J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1207-1212.
- [27] 吴小刚, 王文平, 李斌, 等. 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化 [J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1539-1547.
- [28] 季波, 何建龙, 吴旭东, 等. 宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征 [J]. *草业学报*, 2021, 30(1): 24-35.
- [29] WANG G X, WANG Y B, QIAN J, et al. Land cover change and its impacts on soil C and N in two watersheds in the center of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Mountain Research and Development*, 2006, 26(2): 153-162.
- [30] 张法伟, 李红琴, 仪律北, 等. 草地退化对三江源国家公园高寒草甸表层土壤有机碳、全氮、全磷的空间驱动 [J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5586-5592.
- [31] 李洋, 王毅, 韩国栋, 等. 青藏高原高寒草地土壤微生物量碳氮含量特征及其控制要素 [J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 50-60.
- [32] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布 [J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1025-1034.

(责任编辑:曾礼娜)