

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.020

引用格式:刘振梅,曹生奎,侯瑶芳,等.青海湖流域草地土壤碳氮含量及密度空间分布特征研究[J].草地学报,2026,34(1):203-216

LIU Zhen-mei, CAO Sheng-kui, HOU Yao-fang, et al. Study on Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen Content as well as Their Density in Grasslands of the Qinghai Lake Basin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):203-216

青海湖流域草地土壤碳氮含量及密度空间分布特征研究

刘振梅^{1,2}, 曹生奎^{1,2,3*}, 侯瑶芳^{1,2}, 雷义珍^{1,2}, 王江^{1,2}, 裴若颖^{1,2}, 丁辰深^{1,2}

(1. 青海师范大学地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008; 2. 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海省人民政府—北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘要:本研究在青海湖流域选取163个样地489个样方,采用野外采样与实验分析、数理统计及空间分析等方法研究了该流域草地土壤全碳(Total carbon, TC)、有机碳(Soil organic carbon, SOC)和全氮(Total nitrogen, TN)含量及其密度[全碳密度(Total carbon density, TCD)、有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCD)和全氮密度(Total nitrogen density, TND)]在不同草地类型中的差异、空间分布特征及其主要影响因素。结果显示:该流域草地0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm土层土壤TC平均含量分别为5.60%, 4.72%和4.30%; SOC平均含量分别为4.40%, 3.70%和3.34%; TN平均含量分别为0.46%, 0.37%和0.30%。对应土层TCD平均值分别为5.75 kg·m⁻², 6.07 kg·m⁻²和6.01 kg·m⁻², SOCD平均值分别为4.53 kg·m⁻², 4.75 kg·m⁻², 4.67 kg·m⁻², TND平均值分别为0.46 kg·m⁻², 0.46 kg·m⁻²和0.42 kg·m⁻²。土壤碳氮含量在高寒草甸中最高,在高寒荒漠中最低。土壤TC, SOC和TN含量及其密度在流域西北部、青海湖北岸、布哈河和沙柳河河源地区较低,在各河流中游地区较高。0~30 cm土壤有机碳和全氮累积含量及密度主要受多年平均降水量、植被覆盖度和生态系统总初级生产力的共同影响。

关键词:土壤碳氮含量;土壤碳氮密度;空间分布;青海湖流域

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0203-14

Study on Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen Content as well as Their Density in Grasslands of the Qinghai Lake Basin

LIU Zhen-mei^{1,2}, CAO Sheng-kui^{1,2,3*}, HOU Yao-fang^{1,2}, LEI Yi-zhen^{1,2},
WANG Jiang^{1,2}, PEI Ruo-ying^{1,2}, DING Chen-shen^{1,2}

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China)

Abstract: In this study, there were 163 selected sampling sites with a total of 489 sampling plots in the grassland of Qinghai Lake Basin. And the spatial distribution characteristics of soil total carbon (TC), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) content and density (TCD, SOCD and TND) in different grassland types were studied by means of field sampling and experimental analysis, mathematical statistics and spatial analysis methods. Results showed that the soil average TC content in the 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm

收稿日期:2025-01-24;修回日期:2025-04-01

基金项目:青海省自然科学基金项目(2023-ZJ-924M)资助

作者简介:刘振梅(1998-),女,汉族,青海湟源人,硕士研究生,主要从事自然地理学方面研究,E-mail:1615526646@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: caoshengkui@163.com

layers were 5.60%, 4.72% and 4.30%, respectively. Corresponding SOC content averaged 4.40%, 3.70%, and 3.34%; TN content were 0.46%, 0.37%, and 0.30%. The average values of TCD in the corresponding soil layers were $5.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $6.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $6.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The average values of SOCD were $4.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $4.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $4.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The average values of TND were $0.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $0.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. Alpine meadow soils exhibited the highest carbon and nitrogen contents, whereas alpine desert soils showed the lowest. Spatially, the content and density of soil TC, SOC and TN were lower in the northwestern of the basin, on the northern shore of Qinghai Lake, in the headwaters of Buha river and Shaliu river, and higher in the middle reaches of all rivers. Soil cumulative SOC and TN contents and densities in the 0–30 cm depths were collectively influenced by annual mean precipitation, vegetation coverage, and ecosystem gross primary productivity.

Key words: Soil carbon and nitrogen content; Soil carbon and nitrogen density; Spatial distribution; Qinghai Lake Basin

土壤是地球表层系统各圈层间进行物质循环和能量交换的纽带,在维持生物多样性、保障生态系统稳定性及调节气候等众多方面发挥着重要作用^[1–3]。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,土壤碳库分解释放的 CO_2 约占陆地生态系统与大气交换的 CO_2 总量的 $2/3$ ^[4],会对生态系统稳定性产生重要的影响^[5]。土壤氮是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^[3,6]。已有研究表明,土壤碳氮含量及密度在不同生态系统类型和区域间存在显著差异^[7–13],主要受气候、地形、植被覆盖及土壤质地等多种因素综合影响^[8–18]。因此,阐明土壤碳氮含量及密度的空间变异格局,对评估生态系统土壤碳氮储量和固碳潜力,实现“碳达峰”和“碳中和”目标具有重要的理论和现实意义。

青藏高原被称为“地球第三极”,其独特的气候、地形和生态环境使其在全球碳氮循环中占据重要地位^[19]。青藏高原土壤碳氮空间分布受多种自然和人为因素的驱动^[20–26],包括气候、地形、土壤质地、植被覆盖类型以及土地利用方式等^[20–26],其土壤碳氮分布呈现出明显的空间异质性^[19–27]。位于青藏高原东北部的青海湖流域,生态系统敏感脆弱,其土壤碳氮含量及其密度的空间分布特征对深入认识流域生态功能、评估流域碳汇潜力和生态环境保护具有重要意义。已有研究主要集中在青海湖流域不同剖面尺度、高寒草地、典型湿地和退耕还林草地土壤有机碳和碳氮含量特征^[20,28–31],多侧重于单一生态系统或小尺度区域内,针对流域尺度内主要草地类型土壤碳氮含量及密度的异同性及其空间分布特征的研究仍较为不足。基于此,本文以青海湖流域为研究对象,基于野外采样和室内实验分析,采用数理统计和空间分析方法研究青海湖流域草地土壤全碳、有机碳和全氮含量及密度的空间分

布特征,探究其主要影响因素,研究结果可为深入理解青海湖流域土壤碳氮空间格局,评估流域生态系统碳氮储量和生态系统碳汇潜力提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青藏高原东北部($36^{\circ}15' \sim 38^{\circ}20' \text{ N}$, $97^{\circ}50' \sim 101^{\circ}20' \text{ E}$,海拔 3169~5268 m)(图 1),面积约 2.96 万 km^2 。流域气候属高原大陆性气候,多年平均气温为 1.6°C ,多年平均年降水量为 354.5 mm,多年平均蒸发量约为 449 mm^[32]。主要河流有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、泉吉河、甘子河、黑马河、倒淌河等(图 1)。流域内主要植被类型以草地为主,包括温性草原、高寒草原、高寒草甸和高寒荒漠;主要土壤类型有高山草甸土、草原土和风沙土等^[33–34]。

1.2 数据来源

1.2.1 样品采集 2023年7月至8月在青海湖流域按照不同海拔梯度和均匀分布原则共选择 163 个样地。其中,温性草原 24 个,高寒草原 16 个,高寒草甸 120 个,高寒荒漠 2 个,退耕地 1 个。在所选样地内搭建 5 m×5 m 样方,用五点法选择 3 个 1 m×1 m 小样方,共计 489 个小样方,分别采集 0~30 cm 土壤样品,采样间距为 10 cm。所采土壤样品全部装入自封式塑料袋中,自然风干后,保存待测;土壤容重采用烘干法进行测定。共采集土壤样品 1467 个。

1.2.2 遥感数据来源 气温和降水量数据来自国家青藏高原科学数据中心(www.tpdc.ac.cn/)的中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集(1901—2023)

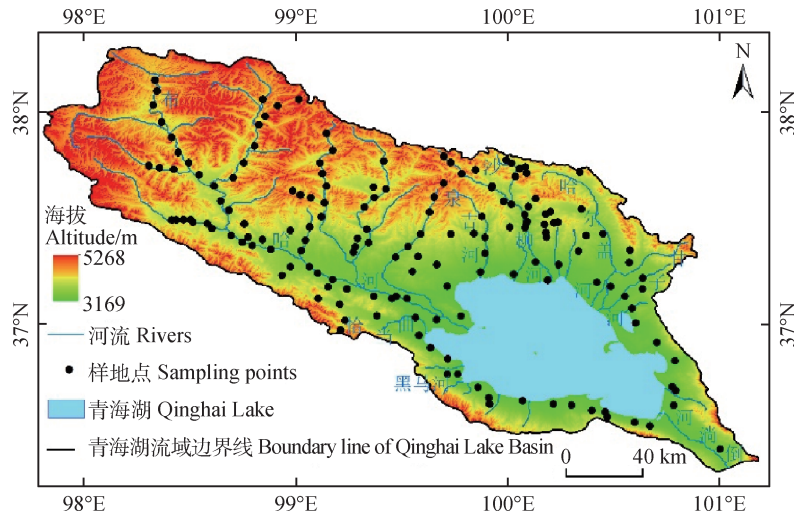


图1 青海湖流域位置及样地分布

Fig. 1 Location of the Qinghai Lake Basin and distribution of sampling plots

和中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2023)。2000—2023 年逐年植被覆盖度(Fractional vegetation cover, FVC)数据来源于国家青藏高原科学数据中心(www.tpdc.ac.cn/)的中国区域 250 m 植被覆盖度数据集(2000—2023)。2000—2023 年逐年净初级生产力(Net primary productivity, NPP)和总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)数据来自美国国家航空航天局数据中心(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提供的 MOD17A3HGF 和 MOD17A2H 数据产品,空间分辨率为 500 m。数字高程模型(Digital elevation model, DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 90 m。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤碳氮指标测定 土壤样品全碳(Total carbon, TC)和全氮(Total nitrogen, TN)含量数据使用碳氮元素分析仪(CN 802, 意大利)进行测定。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)测定:使用电子天平称取 0.5 g 左右的土样(重量记为 M_1),缓慢滴加 HCl,直至气泡完全消失,确保无机碳去除。用真空式水泵和 0.7 μm 玻璃纤维滤纸(Wathmn)进行抽滤,后置于 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥至恒重(记为 M_2)。土壤有机碳含量(SOC)计算公式如下^[35-36]:

$$\text{SOC} = \text{TC} \times \frac{M_2}{M_1} \quad (1)$$

1.3.2 土壤碳氮密度计算 0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 不同深度土壤全碳密度(Total carbon density, TCD)、有机碳密度(Soil organic carbon

density, SOCD)和全氮密度(Total nitrogen density, TND)计算公式如下^[10]:

$$\text{SD}_i = \sum_{i=1}^n S_i \times \text{BD}_i \times H_i \times 0.1 \quad (2)$$

式(2)中, SD_i 为第 i 层土壤全碳、有机碳和全氮密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), S_i 为第 i 层土壤全碳、有机碳和全氮含量(%), BD_i 为第 i 层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H_i 为第 i 层土壤厚度(cm), n 为土壤层次数, 0.1 为单位转化系数。

1.3.3 遥感数据处理 利用 ArcGIS 软件对气温和降水量数据进行格式转换、投影转换、时间序列合成和裁剪,获取 2000—2023 年青海湖流域多年平均 1 km 分辨率的气温和降水量数据。对植被覆盖度数据进行格式转换、投影转换、时间序列合成、裁剪和重采样,生成 2000—2023 年青海湖流域多年平均 1 km 分辨率的植被覆盖度数据。对 1 年分辨率的 NPP 和 8 天分辨率的 GPP 数据进行镶嵌拼接、投影转换、异常值剔除、时间序列合成、裁剪及重采样处理,生成 2000—2023 年青海湖流域多年平均 1 km 分辨率的 NPP 和 GPP 数据。

1.3.4 数理统计与空间分析 (1) 0~30 cm 土壤剖面全碳、有机碳和全氮累积含量及其密度分别由 0~10, 10~20 和 20~30 cm 不同土层土壤全碳、有机碳和全氮含量及其密度累加获得。(2) 基于 163 个样地数据,用 Origin 2024 对 0~30 cm 不同深度土壤全碳、有机碳和全氮含量及其密度等数据进行描述性统计;并使用 SPSS 19.0 软件对剔除一个退耕地样地后其余不同草地类型的土壤全碳、有机碳和全氮含量及其密度进行均值比较分析。(3) 为揭

示青海湖流域草地不同土层土壤全碳、有机碳和全氮含量及其密度的空间格局,首先基于489个样方数据,将每个样地3个样方土壤碳氮含量及密度数据进行平均值计算,获得每个样地土壤全碳、有机碳和全氮平均含量及其平均密度;其次,利用ArcGIS 10.2软件,生成青海湖流域不同样地不同土层土壤全碳、有机碳和全氮含量及其密度的空间分布图。(4)为探究青海湖流域草地土壤全碳、有机碳和全氮含量及其密度的空间分布影响因素,首先利用ArcGIS 10.2软件中的“多值提取至点”工具,提取163个样地2000—2023年间多年平均气温、降水量、植被覆盖度、净初级生产力(NPP)和总初级生产力(GPP)等数据。随后,结合各样地的经纬度与海拔信息,以及上述提取的环境因子数据,使用Origin 2024软件的相关性分析工具,采用Pearson相关系数法分析0~30 cm土层中土壤全碳、有机碳和全氮的累积含量及其累积密度与各影响因子之间的相关关系。用Origin 2024和ArcGIS 10.2软件进行全文图件制作。

2 结果与分析

2.1 青海湖流域草地土壤碳氮含量及其密度统计特征

青海湖流域草地土壤全碳(TC)和有机碳(SOC)含量描述性统计结果显示(表1),0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm的TC含量分别在1.47%~21.20%,1.60%~14.60%和1.41%~15.67%间变化,对应平均值分别为5.60%,4.72%和4.30%。各土层SOC含量平均值依次为4.40%,3.70%和3.34%。0~30 cm的TC和SOC累积含量在4.75%~50.39%和3.99%~38.79%间变化,其累积含量平均值分别为14.62%和11.45%(表1)。0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm的TN含量分别在0.10%~1.88%,0.08%~1.24%,0.07%~1.19%间变化,其各土层TN含量平均值分别为0.46%,0.37%和0.30%。0~30 cm的TN累积含量在0.26%~3.88%间变化,其累积含量平均值为1.13%(表1)。

表1 土壤全碳、有机碳及全氮含量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil total carbon, organic carbon and total nitrogen content

	土层 Depths/cm	最小值 Minimum/%	最大值 Maximum/%	平均值 Mean/%	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
全碳含量 Total carbon content	0~10	1.47	21.20	5.60	3.08	54.97
	10~20	1.60	14.60	4.72	2.14	45.38
	20~30	1.41	15.67	4.30	1.93	44.88
	0~30(累积 Accumulate)	4.75	50.39	14.62	6.80	46.54
有机碳含量 Soil organic carbon content	0~10	1.38	16.10	4.40	2.38	53.94
	10~20	1.31	11.43	3.70	1.68	45.25
	20~30	1.20	12.70	3.34	1.52	45.60
	0~30(累积 Accumulate)	3.99	38.79	11.45	5.31	46.34
全氮含量 Total nitrogen content	0~10	0.10	1.88	0.46	0.28	60.84
	10~20	0.08	1.24	0.37	0.20	54.45
	20~30	0.07	1.19	0.30	0.17	56.08
	0~30(累积 Accumulate)	0.26	3.88	1.13	0.62	54.88

青海湖流域草地土壤全碳密度(TCD)和有机碳密度(SOCD)描述性统计结果显示(表2),0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm的TCD分别在2.12~12.27 kg·m⁻²,2.83~14.11 kg·m⁻²和2.44~14.26 kg·m⁻²间变化,平均值依次为5.75 kg·m⁻²,6.07 kg·m⁻²和6.01 kg·m⁻²。0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm的SOCD变化范围分别为1.88~9.66 kg·m⁻²,2.30~11.28 kg·m⁻²和2.08~11.49 kg·m⁻²,平均值依次为4.53 kg·m⁻²,4.75 kg·m⁻²和4.67 kg·m⁻²。0~30 cm土壤全碳和有机碳累积密度在

8.41~40.13 kg·m⁻²和7.05~31.80 kg·m⁻²间变化,其累积密度平均值分别为17.84 kg·m⁻²和13.95 kg·m⁻²。0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm土壤全氮密度(TND)变化范围分别为0.18~1.07 kg·m⁻²,0.14~1.32 kg·m⁻²和0.13~1.26 kg·m⁻²,平均值依次为0.46 kg·m⁻²,0.46 kg·m⁻²和0.42 kg·m⁻²(表2),表明土壤TND随土层深度呈现先增加后减小的趋势。0~30 cm土壤全氮累积密度在0.46~3.37 kg·m⁻²间变化,其累积密度平均值为1.34 kg·m⁻²。

表 2 土壤全碳、有机碳及全氮密度描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil total carbon, organic carbon and total nitrogen density

	土层 Depths/cm	最小值 Minimum/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	最大值 Maximum/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	平均值 Mean/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
全碳密度	0~10	2.12	12.27	5.75	1.43	24.77
Total carbon	10~20	2.83	14.11	6.07	1.52	25.01
density	20~30	2.44	14.26	6.01	1.75	29.12
	0~30(累积 Accumulate)	8.41	40.13	17.84	4.20	23.55
有机碳密度	0~10	1.88	9.66	4.53	1.06	23.48
Soil organic	10~20	2.30	11.28	4.75	1.12	23.50
carbon density	20~30	2.08	11.49	4.67	1.36	29.20
	0~30(累积 Accumulate)	7.05	31.88	13.95	3.10	22.25
全氮密度	0~10	0.18	1.07	0.46	0.14	30.92
Total nitrogen	10~20	0.14	1.32	0.46	0.15	33.06
density	20~30	0.13	1.26	0.42	0.17	40.41
	0~30(累积 Accumulate)	0.46	3.37	1.34	0.42	31.19

2.2 青海湖流域不同草地类型土壤碳氮含量及其密度特征

青海湖流域不同草地类型 TC 含量、SOC 含量及其密度变化结果显示, 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 不同草地类型土壤 TC 和 SOC 含量均表现出高寒草甸最高, 高寒草原次之, 高寒荒漠最低(图 2a, 图 3a)。高寒草甸、高寒草原、温性草原和高寒荒漠 0~30 cm 的 TC 累积平均含量分别为 15.66%, 12.62%, 11.34% 和 8.65%(图 2a); 对应的 SOC 累积平均含量分别为 12.39%, 9.31%, 8.71% 和 6.66%(图 3a)。0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 的 TCD 在不同草地类型间表现出高寒草原最高, 高寒草甸次之, 高寒荒漠最低(图 2b), SOCD 则在高寒草甸最高, 高寒草原次之, 高寒荒漠最低(图 3b)。此外, 高寒草原、高寒草甸、温性草原和高寒荒漠 0~30 cm 土壤全碳累积平均密度分别为 $18.53 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $17.85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $17.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $13.93 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 2b), 对应的有机碳累积平均密度分别为 $13.65 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $14.13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $13.45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $10.80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 3b)。同一草地类型不同土层 TC 和 SOC 含量均表现出随土壤深度加深而减小的特点(图 2c, 图 3c), 但 TCD 和 SOCD 随土壤深度变化幅度较小(图 2d, 图 3d)。

青海湖流域不同草地类型土壤全氮含量及其密度变化结果显示(图 4), 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 的不同草地类型 TN 含量在高寒草甸中最高, 温性草原次之, 高寒荒漠最低(图 4a)。高寒草甸、温性草原、高寒草原和高寒荒漠 0~30 cm 土壤全氮累积平均含量分别为 1.26%, 0.82%, 0.76% 和 0.44%(图 4a)。0~10 cm, 10~20 cm,

20~30 cm 的不同草地类型 TND 在高寒草甸中最高, 温性草原次之, 高寒荒漠最低; 高寒草甸、温性草原、高寒草原和高寒荒漠 0~30 cm 土壤全氮累积平均密度分别为 $1.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $1.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $1.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.71 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 4b)。同一草地类型土壤全氮含量随土壤深度增加而减小的幅度高于土壤全氮密度(图 4c-d)。

2.3 青海湖流域草地土壤碳氮含量空间分布特征

青海湖流域草地不同土层深度土壤全碳(TC)和有机碳(SOC)含量空间分布结果显示(图 5, 图 6), 0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 三个深度 TC 和 SOC 含量在流域西北部地区、青海湖环湖北岸、布哈河和沙柳河河源地区较低, 在各河流中游地区较高, 其最高含量出现在沙柳河中上游地区。此外, 三个深度 TC 和 SOC 含量在青海湖环湖南岸地区高于北岸地区(图 5a-c, 图 6a-c)。0~30 cm 土壤全碳和有机碳累积含量分别在 4.75%~50.39% 和 3.99%~38.79% 间变化, 其空间分布与各土层土壤全碳含量基本一致。同样地, 其最高累积含量在沙柳河中上游地区表现尤为突出, 环湖南岸地区明显高于北岸(图 5d, 图 6d)。

青海湖流域草地不同土层深度土壤全氮(TN)含量空间分布结果显示(图 7), 0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 的 TN 含量高值区主要分布在布哈河中游山地地区, 沙柳河、哈尔盖河和甘子河中上游地区及环青海湖南岸地区, 低值区主要分布在流域西北部、环青海湖北岸、各河流河源及下游地区(图 7a-c)。0~30 cm 土壤全氮累积含量为 0.26%~3.88%(图 7d), 与各土层土壤全氮含量空间分布特征基本一致。

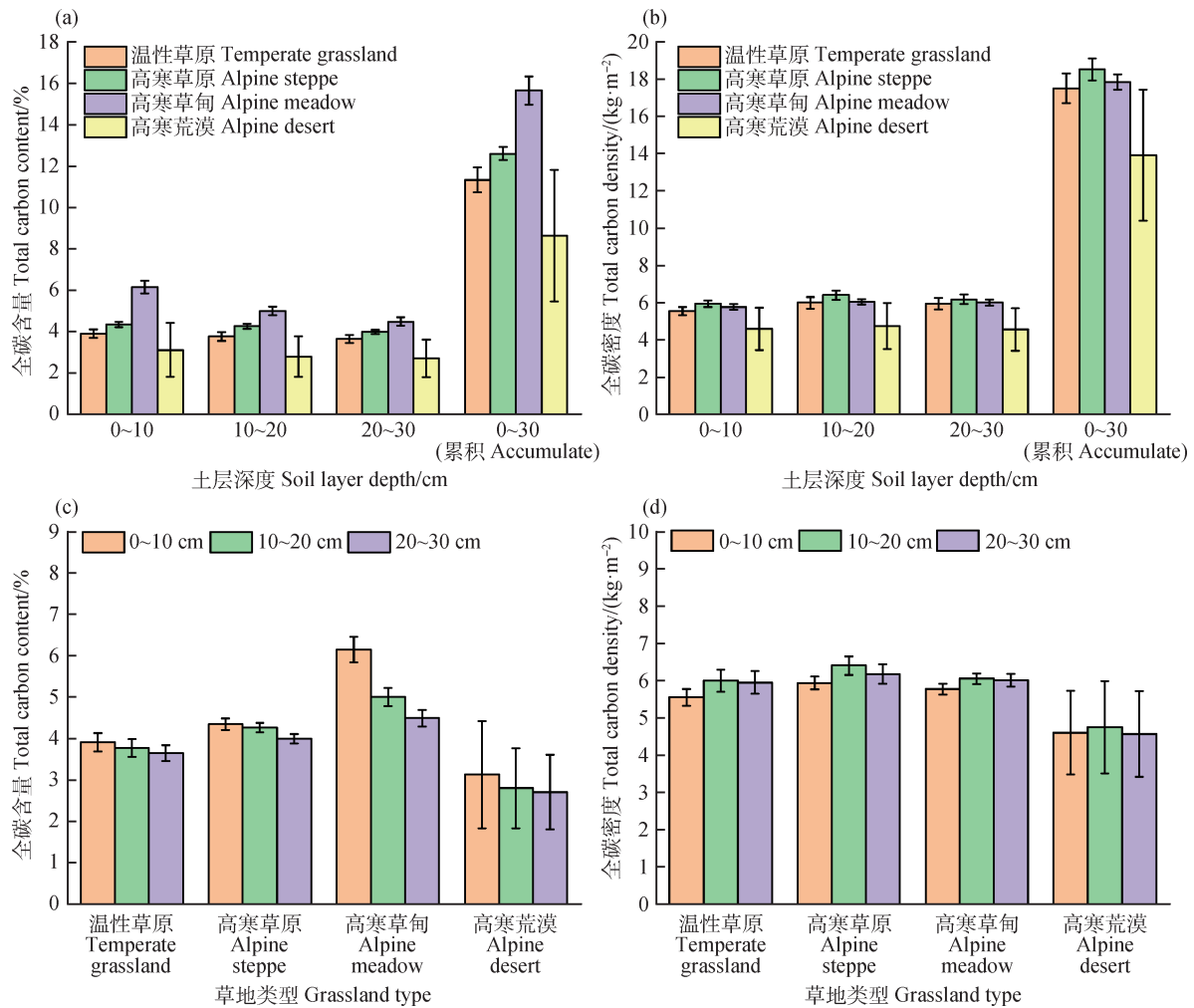


图 2 青海湖流域不同草地类型土壤全碳含量与密度变化特征

Fig. 2 Characteristics of soil total carbon content and density among grassland types in the Qinghai Lake Basin

2.4 青海湖流域草地土壤碳氮密度空间分布特征

青海湖流域草地不同土层深度土壤全碳密度(TCD)和有机碳密度(SOCD)平均值的空间分布结果显示(图 8, 图 9),在布哈河中游山地地区,沙柳河、哈尔盖河和甘子河的中上游地区,以及环青海湖南岸地区,0~10 cm,10~20 cm 和 20~30 cm 深度的土壤 TCD 和 SOCD 普遍较高,尤其在沙柳河中上游地区表现最为明显。相比之下,在布哈河和沙柳河的高海拔源头区域、泉吉河周边地区以及青海湖东岸,其 TCD 和 SOCD 值相对较低。环湖南岸各土层 TCD 和 SOCD 高于环湖北岸(图 8a-c,图 9a-c)。0~30 cm 土壤全碳累积密度和有机碳累积密度分别在 $8.41 \sim 40.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $7.05 \sim 31.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 间变化。其空间分布与各土层 TCD 和 SOCD 空间分布特征基本一致(图 8d,图 9d)。

青海湖流域草地不同深度土壤全氮密度(TND)平均值空间分布结果显示(图 10),各土层

TND 在青海湖流域西北部地区和青海湖东岸较低,高值区主要分布在青海湖流域的东北部,包括沙柳河、哈尔盖河和泉吉河流域,以及布哈河中游地区和青海湖南岸周边区域(图 10a-c)。0~30 cm 土壤全氮累积密度在 $0.46 \sim 3.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 间变化,其空间分布与各土层 TND 空间分布特征一致(图 10d)。

3 讨论

3.1 青海湖流域土壤碳氮含量及其密度的合理性探讨

与青藏高原其他地区的研究结果比较显示,青海湖流域草地 TC 和 TN 平均含量与祁连山青海片区 0~40 cm 草甸化草原和高寒草甸较为接近,TC 和 TN 的含量分别为 $64.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $40.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [37];但 SOC 平均含量高于阿里荒漠区 0~20 cm 的 SOC 平均含量($5.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)[38]和三江源国家公园原生

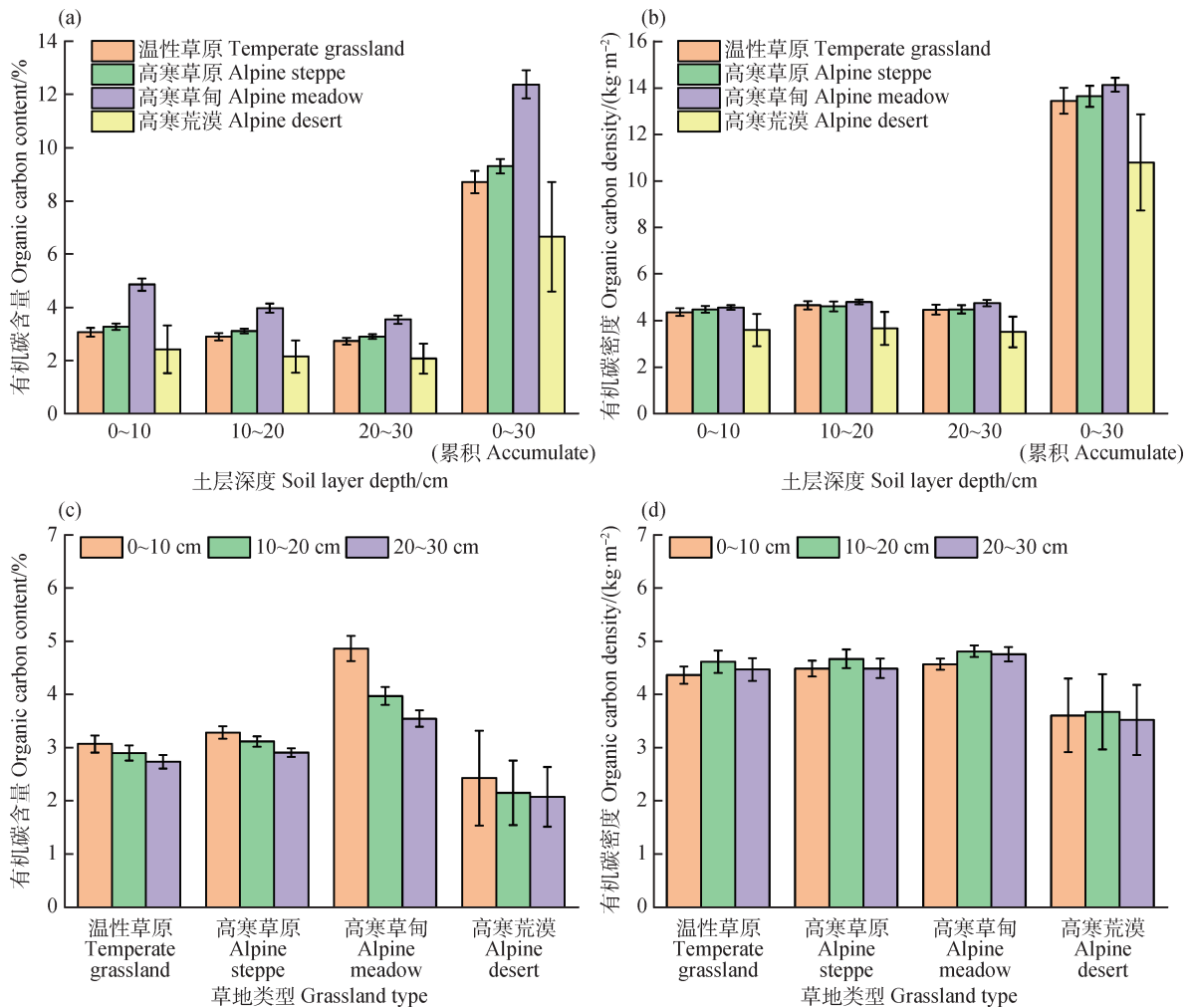


图 3 青海湖流域不同草地类型土壤有机碳含量与密度变化特征

Fig. 3 Characteristics of soil organic carbon content and density among grassland types in the Qinghai Lake Basin

高寒草甸 0~30 cm 的 SOC 平均含量 (2.45%)^[39]。已有研究显示,青藏高原高寒草甸 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 的 SOC 平均含量分别为 $63.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $40.19 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $35.77 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 高寒草原 SOC 含量在各层平均值分别为 $12.94 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $11.79 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $8.67 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[21], 表明除高寒草甸表层土壤外,青海湖流域草地 0~30 cm 的 SOC 含量总体高于青藏高原高寒草甸和高寒草原。同样地,青藏高原高寒草甸 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 的 TN 含量各层平均值分别为 $4.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $3.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $2.51 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 高寒草原土壤各层 TN 含量平均值为 $1.28 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $1.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $0.94 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[21], 表明青海湖流域草地 TN 含量与青藏高原高寒草甸较为接近,但高于高寒草原。此外,青海湖流域草地 SOCD 高于青藏高原草地 1 m 深度以上平均 SOCD ($3.79 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[40],与青藏高原高寒草甸 ($5.58 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 和高寒草地 ($4.29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 0~20 cm 土壤平均 SOCD

较为接近;TND 也与高寒草甸 ($0.44 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 和高寒草地 ($0.36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 接近^[21],均在中国陆地生态系统氮密度范围内 ($0.15\sim0.69 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[41]。上述结果显示青海湖流域土壤全碳、有机碳和全氮含量及密度均处在青藏高原已有相关研究的范围之内,说明本研究结果科学合理。

3.2 青海湖流域草地土壤碳氮含量及密度影响因素分析

青海湖流域 0~30 cm 土壤全碳 (TC)、全氮 (TN) 和有机碳 (SOC) 累积平均含量与各因子的相关性分析结果显示 (图 11), 0~30 cm 土壤全碳累积平均含量与多年平均降水量 (MAP) ($P<0.01$)、植被覆盖度 (FVC) ($P<0.001$)、净初级生产力 (NPP) ($P<0.05$)、总初级生产力 (GPP) ($P<0.01$)、经度 (Lon) ($P<0.01$) 呈显著正相关关系,其相关系数分别为 0.23, 0.31, 0.17, 0.22 和 0.22 (图 11)。说明

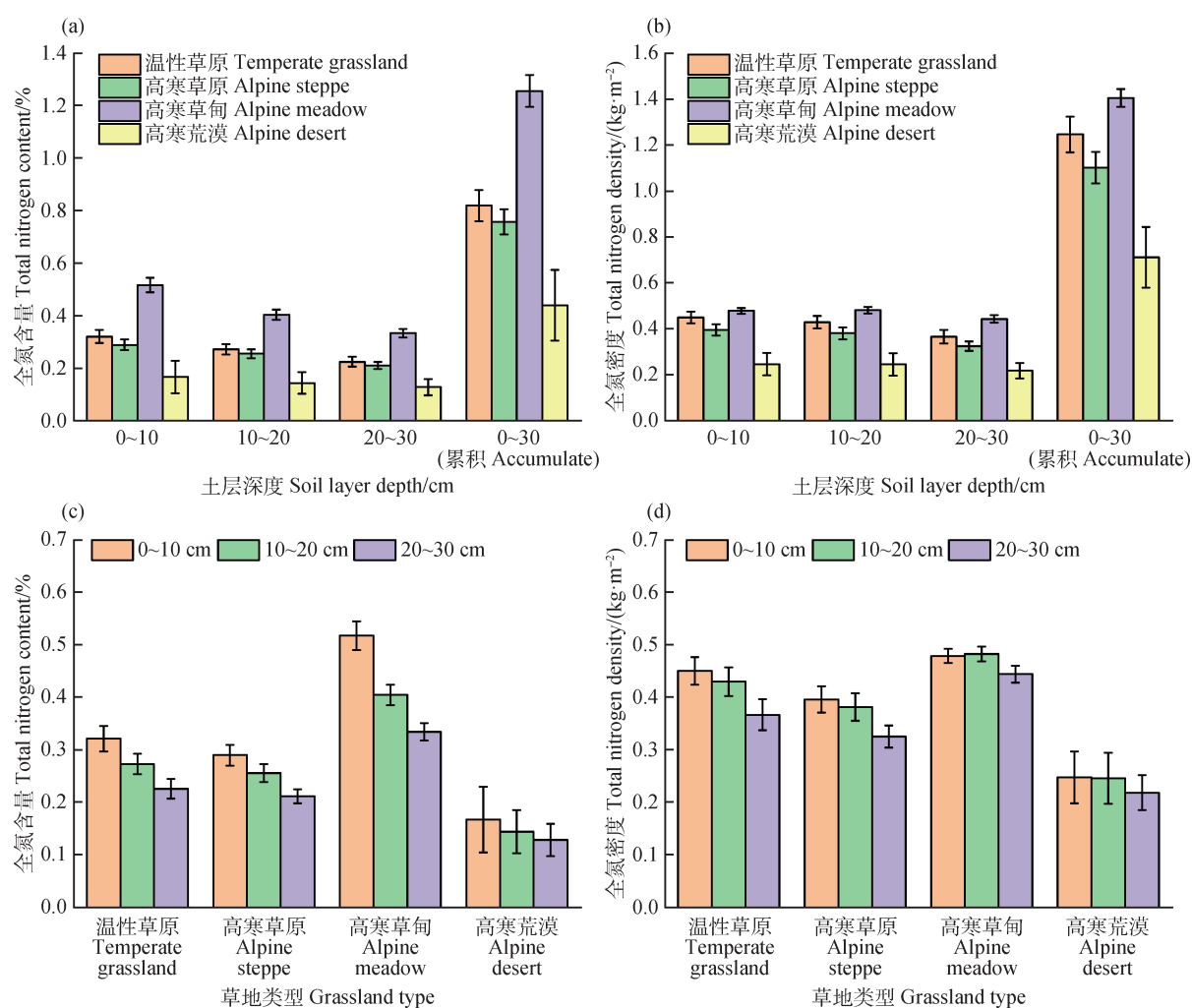


图 4 青海湖流域不同草地类型土壤全氮含量与密度变化特征

Fig. 4 Characteristics of soil total nitrogen content and density among grassland types in the Qinghai Lake Basin

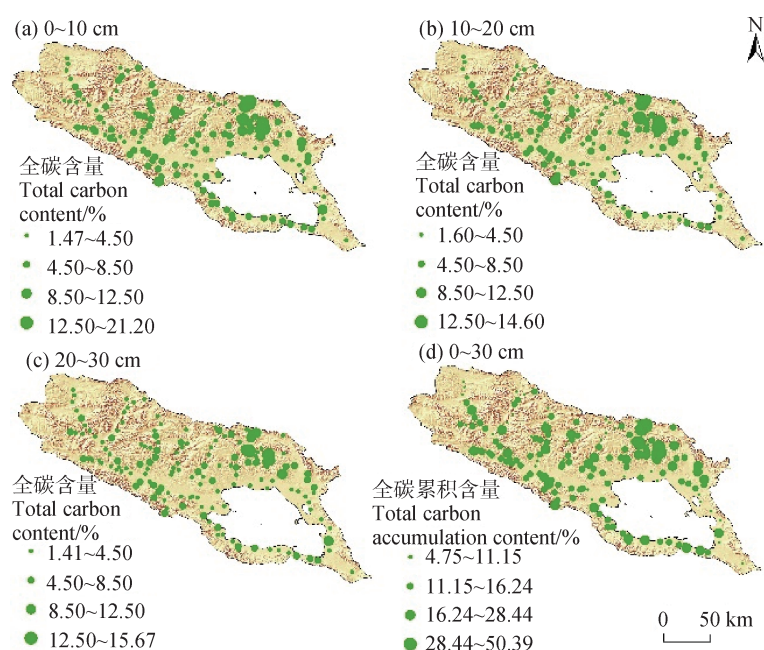


图 5 青海湖流域草地不同土层深度土壤全碳含量空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of soil total carbon content in different depths in grasslands of the Qinghai Lake Basin

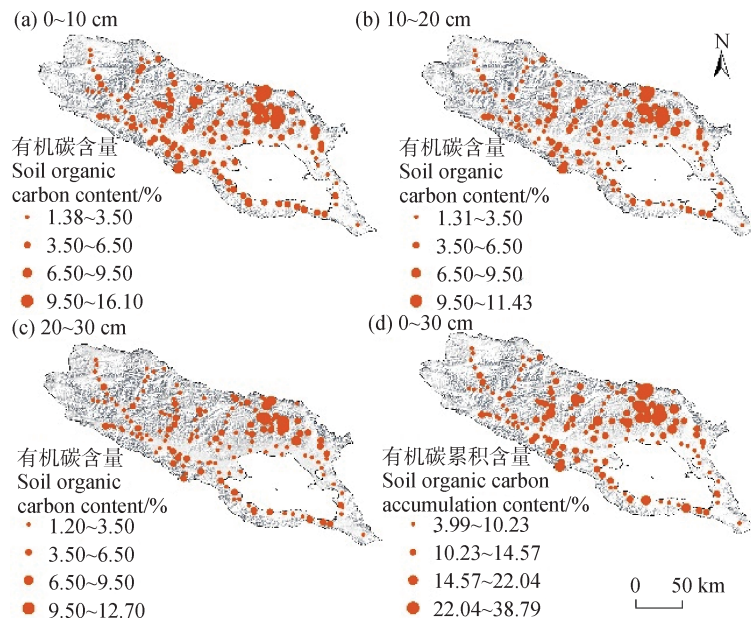


图 6 青海湖流域草地不同土层深度土壤有机碳含量空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of soil organic carbon content in different depths in grasslands of the Qinghai Lake Basin

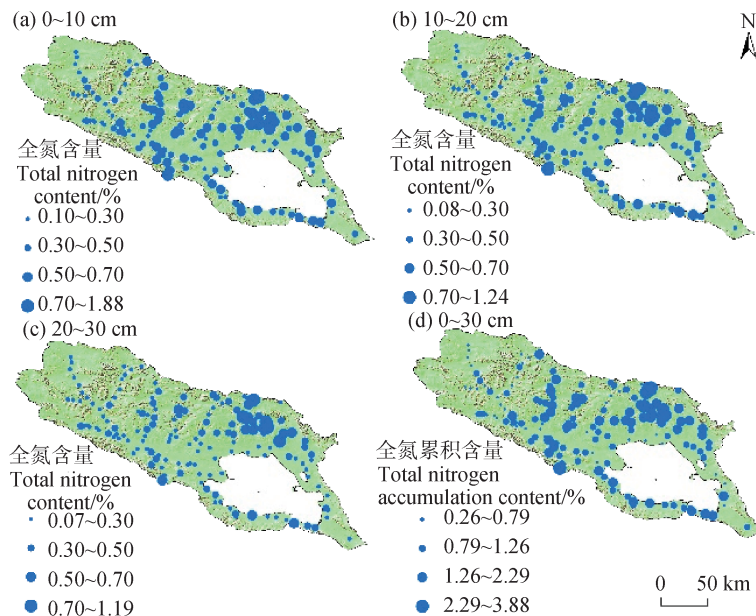


图 7 青海湖流域草地不同土层深度土壤全氮含量空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of soil total nitrogen content in different depths in grasslands of the Qinghai Lake Basin

FVC是影响青海湖流域TC含量空间分布的最主要因素,其次为MAP和GPP。SOC含量与MAP($P<0.001$),FVC($P<0.001$),NPP($P<0.05$),GPP($P<0.01$)和Lon($P<0.01$)呈显著正相关关系,相关系数分别为0.28,0.36,0.19,0.23和0.24(图11);TN含量与MAP,FVC,NPP,GPP,Lon均呈显著正相关($P<0.001$),其相关系数分别为0.36,0.44,0.26,0.30和0.32(图11)。说明青海湖流域土壤全氮和有机碳含量空间分布的影响因素与全碳含量

相似,但土壤全氮含量受这些因素的影响比全碳和有机碳更明显。以往研究显示,西北干旱区土壤碳氮含量均与降水量呈显著正相关^[42],长江和黄河源区SOC和TN与植被覆盖度显著正相关^[17],这可能是因为降水量增加有利于植物生长,增加植被覆盖度和生产力及有机物归还量,提高了土壤碳氮含量^[43]。

青海湖流域草地0~30 cm土壤全碳(TCD)、全氮(TND)和有机碳(SOCD)平均累积密度与各因

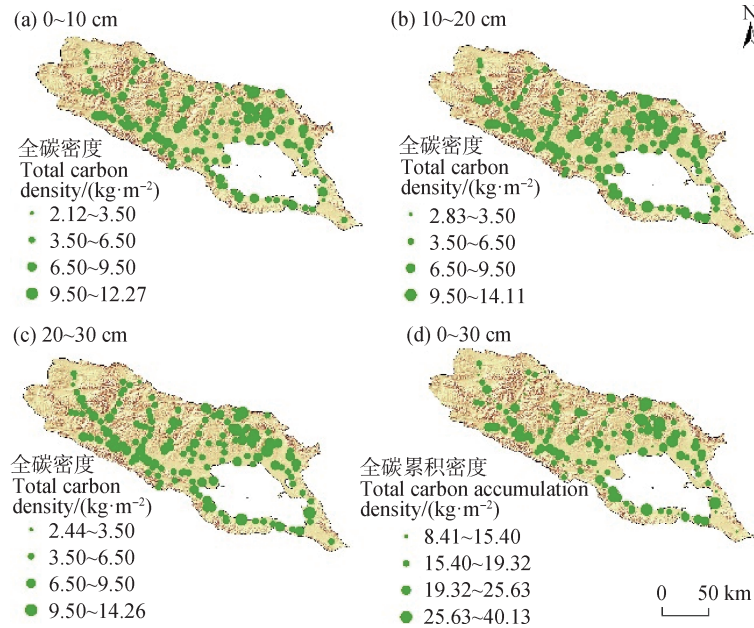


图 8 青海湖流域草地不同土层深度土壤全碳密度空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of soil total carbon density in different depths in grasslands of the Qinghai Lake Basin

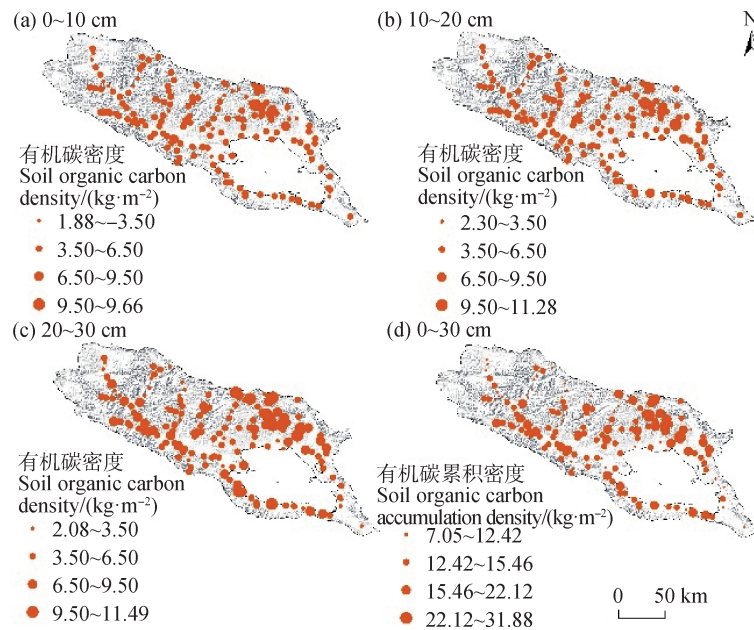


图 9 青海湖流域草地不同土层深度土壤有机碳密度空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of soil organic carbon density in different depths in grasslands of the Qinghai Lake Basin

子的相关性结果显示(表 3), TCD 平均累积密度与 MAT($P<0.01$), GPP($P<0.05$)和 Lon($P<0.05$)呈显著正相关关系, 其相关系数分别为 0.23, 0.16 和 0.16, 与 Lat($P<0.05$)和 EL($P<0.001$)呈显著负相关关系, 其相关系数分别为 -0.20 和 -0.26 (表 3)。说明青海湖流域草地 0~30 cm 土壤全碳累积平均密度主要受多年平均气温、生态系统总初级生产力和经度的积极影响, 受纬度和海拔的消极影响。这可能是由于流域多年平均气温升高时, 有利

于植被生长, 增加植被覆盖度和生态系统生产力(图 11), 增加有机质输入, 从而提高土壤全碳密度; 同时, 温度升高可能加速有机质的分解, 但青海湖流域属于高寒地区, 这种分解速率的增加可能不足以抵消有机质输入的增加, 导致全碳密度的增加。青海湖流域地势自东南向西北递增, 随着海拔升高, 经度减小、纬度增加, 气温降低, 不利于植被生长, 降低植被覆盖度和生态系统生产力(图 11), 减少有机质输入, 导致土壤全碳密度减小。

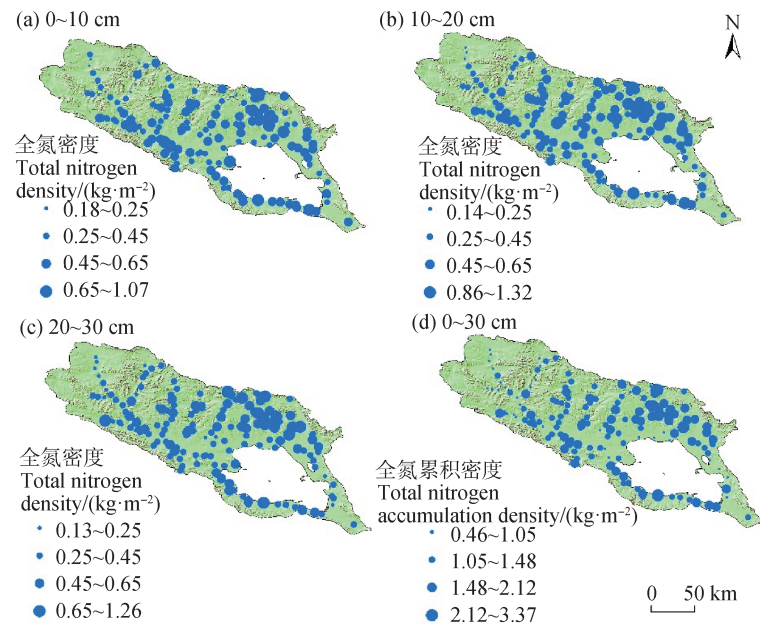


图 10 青海湖流域草地不同土层深度土壤全氮密度空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of soil total nitrogen density in different depths in grasslands of the Qinghai Lake Basin

青海湖流域草地 0~30 cm 土壤有机碳平均累积密度与 MAP ($P<0.05$)、FVC ($P<0.05$)、NPP ($P<0.05$)、GPP ($P<0.05$) 和 Lon ($P<0.01$) 呈显著正相关,其相关系数分别为 0.17, 0.19, 0.19, 0.20 和 0.24,与 EL ($P<0.05$) 呈显著负相关关系,其相关系数为 -0.17 (表 3)。说明该流域草地多年平均生态系统总初级生产力、经度和海拔对 0~30 cm 土壤有机碳平均累积密度的影响与土壤全碳平均累积密度影响一致。此外,不同之处在于多年平均降水量对土壤有机碳平均累积密度有积极影响,降水量的增加有利于植被覆盖度和生态系统生产力的增加 (图 11),增加了土壤有机质输入,提高了土壤有机碳密度。

青海湖流域草地 0~30 cm 土壤全氮平均累积密度与 MAP ($P<0.001$)、FVC ($P<0.001$)、NPP ($P<0.001$)、GPP ($P<0.001$)、Lon ($P<0.001$) 呈显著正相关关系,其相关系数分别为 0.36, 0.42, 0.34, 0.35 和 0.40,与 Lat ($P<0.05$) 呈显著负相关关系,其相关系数为 -0.17 (表 3)。说明多年平均降水量、植被覆盖度、生态系统生产力 (NPP 和 GPP) 和经度对土壤全氮平均累积密度的影响与土壤有机碳平均累积密度影响一致。此外,不同之处在于纬度对土壤全氮平均累积密度的消极影响较为显著,海拔的消极影响则不明显,可能是因为随着纬度增加,青海湖流域气温整体降低,直接影响了植被生产力 (图 11),导致土壤氮源输入减少,全氮密度减小。

表 3 青海湖流域草地 0~30 cm 土壤全碳、有机碳和全氮累积平均密度与各因子的相关关系

Table 3 Correlations between cumulative average density of soil total carbon, organic carbon and total nitrogen in 0-30 cm depths and environmental variables in grasslands of the Qinghai Lake Basin

	MAT	MAP	FVC	NPP	GPP	Lon	Lat	EL
TCD	0.23**	0.04	0.07	0.15	0.16*	0.16*	-0.20^*	-0.26^{***}
SOCD	0.13	0.17*	0.19*	0.19*	0.20*	0.24**	-0.11	-0.17^*
TND	0.08	0.36***	0.42***	0.34***	0.35***	0.40***	-0.17^*	-0.14

注: TCD 表示土壤全碳密度; SOCD 表示土壤有机碳密度; TND 表示土壤全氮密度; MAT 表示多年平均气温; MAP 表示多年平均降水量; FVC 表示多年平均植被覆盖度; GPP 表示多年平均总初级生产力; NPP 表示多年平均净初级生产力; Lon 表示经度; Lat 表示纬度; EL 表示海拔。***表示在 0.001 水平上极显著; **表示在 0.01 水平上极显著; *表示在 0.05 水平上显著

Note: TCD is soil total carbon density, SOCD is soil organic carbon density, TND is soil total nitrogen density, MAT is multi-year average temperature, MAP is multi-year average precipitation, FVC is multi-year average fractional vegetation cover, GPP is multi-year average gross primary productivity, NPP is multi-year average net primary productivity, Lon is longitude, Lat is latitude, EL is elevation. *** indicates that it is extremely significant at the 0.001 level; ** is extremely significant at the 0.01 level; * is significant at the 0.05 level

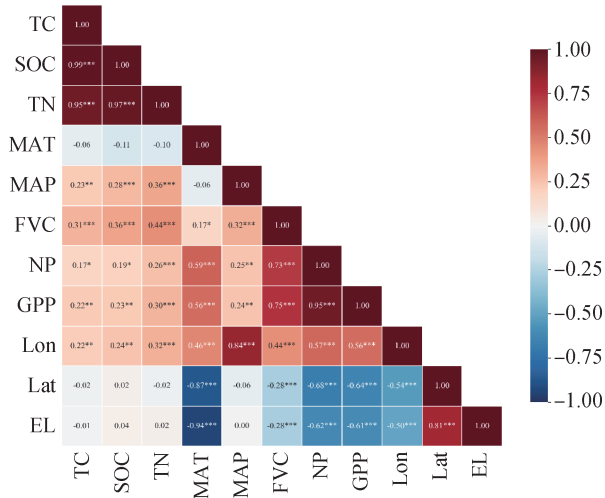


图11 青海湖流域草地0~30 cm土壤全碳、有机碳和全氮累积平均含量与各因子的相关关系

Fig. 11 Correlations between cumulative average content of soil total carbon, organic carbon and total nitrogen in 0-30 cm depths and environmental variables in grasslands of the

Qinghai Lake Basin

注:TC表示土壤全碳;SOC表示土壤有机碳;TN表示土壤全氮;MAT表示多年平均气温;MAP表示多年平均降水量;FVC表示多年平均植被覆盖度;GPP表示多年平均总初级生产力;NPP表示多年平均净初级生产力;Lon表示经度;Lat表示纬度;EL表示海拔。***表示在0.001水平上极显著;**表示在0.01水平上极显著;*表示在0.05水平上显著

Note:TC is total soil carbon, SOC is soil organic carbon, TN is total soil nitrogen, MAT is multi-year average temperature, MAP is multi-year average precipitation, FVC is multi-year average fractional vegetation cover, GPP is multi-year average gross primary productivity, NPP is multi-year average net primary productivity, Lon is longitude, Lat is latitude, EL is elevation. *** indicates that it is extremely significant at the 0.001 level; ** is extremely significant at the 0.01 level; * is significant at the 0.05 level

4 结论

(1)青海湖流域草地0~30 cm范围内土壤碳氮含量及其密度均随土层加深呈下降趋势。其中高寒草甸土壤TC,SOC,TN,TND,SOCD较高,高寒草原土壤SOCD较高,高寒荒漠碳氮含量及其密度均较低,显示出不同草地类型下土壤碳氮水平的显著差异。

(2)青海湖流域土壤碳氮含量及密度在流域西北部、湖滨北岸及高海拔源区相对较低,而在以沙柳河中上游为代表的流域中部地区显著较高,整体呈现出显著的空间异质性。

(3)青海湖流域土壤碳氮含量主要受植被覆盖度和降水量的积极影响,而土壤碳氮密度受多年平

均气温、生态系统生产力、降水量、经度的积极影响及纬度、海拔的消极影响。

参考文献

- [1] 冯晓娟,戴国华,刘婷,等. 从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径[J]. 中国科学:地球科学,2024,54(11):3421-3432
- [2] 蔡祖聪. 土壤在植物多样性形成中的作用及其研究意义[J]. 土壤学报,2022,59(1):1-9
- [3] 吕卫东,董全民,孙彩彩,等. 牦牛和藏羊暖季放牧对青藏高原高寒草地不同组分碳、氮的影响[J]. 草地学报,2025,33(1):125-135
- [4] VAN GROENIGEN K J, QI X, OSENBERG C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage[J]. Science (New York, N. Y.), 2014,344(6183):508-509
- [5] 王棣,耿增超,余雕,等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J]. 生态学报,2015,35(16):5421-5429
- [6] 邹丽娜,周志宇,颜淑云,等. 玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应[J]. 中国草地学报,2009,31(6):80-87
- [7] 王燕,张全智,王传宽,等. 恢复方式对东北东部森林土壤碳氮磷计量特征的影响[J]. 植物生态学报,2024,48(7):943-954
- [8] 钟建军,李林,魏识广,等. 漓江流域喀斯特森林土壤碳氮磷储量分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2023,37(6):180-186,193

- Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 180-186, 193
- [9] 熊小玲, 任寅榜, 吕茂奎, 等. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 83-88
- XIONG X L, REN Y B, LV M K, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen storage in typical forest soils at different altitudes in Wuyishan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 83-88
- [10] 张君钰, 吴普侠, 卜元坤, 等. 油松飞播林土壤有机碳密度的影响因素[J]. 生态学报, 2024, 43(3): 895-903
- ZHANG J Y, WU P X, BU Y K, et al. Influencing factors of soil organic carbon density in *Pinus tabulaeformis* aerial seeding forest[J]. Journal of Ecology, 2024, 43(3): 895-903
- [11] 周磊, 孙宗玖, 聂婷婷, 等. 凋落物添加对蒿类荒漠草地土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 462-469
- ZHOU L, SUN Z J, NIE T T, et al. Effects of litter additions on soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric characteristics in sagebrush desert grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 462-469
- [12] 王磊, 高阳, 沈振. 气候变化背景下农田土壤碳储量评估方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 1-11
- WANG L, GAO Y, SHEN Z. Research progress on assessment methods of farmland soil carbon storage under the background of climate change[J]. Acta Agricultural Engineering Science, 2024, 40(16): 1-11
- [13] PEI H, MIAO Y, LIANG A N, et al. Improving cropland soil water management to promote soil organic carbon increase through organic material returning in cold black soil areas[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 382: 109470
- [14] 刘潘伟, 高鹏, 刘晓华, 等. 大岗山流域土壤碳氮要素空间分布特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 73-79
- LIU P W, GAO P, LIU X H, et al. Spatial distribution and influential factors of soil carbon and nitrogen in Dagangshan Watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(2): 73-79
- [15] 张恒宇, 孙树臣, 吴元芝, 等. 黄土高原不同植被密度条件下土壤水、碳、氮分布特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 875-884
- ZHANG H Y, SUN S C, WU Y Z, et al. Distribution characteristics of soil water, carbon and nitrogen under different vegetation densities in Loess Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(5): 875-884
- [16] 廖洪凯, 龙健, 李娟, 等. 西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征[J]. 土壤, 2012, 44(3): 421-428
- LIAO H K, LONG J, LI J, et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different vegetation types in micro-habitats of karst dry-hot valley region of south western China[J]. Soils, 2012, 44(3): 421-428
- [17] 李世珍, 袁自强, 林琳, 等. 江河源冻土区土壤碳氮空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5246-5258
- LI S Z, YUAN Z Q, LIN L, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil carbon and nitrogen in frozen soil area of river source[J]. Ecology, 2024, 44(12): 5246-5258
- [18] 童根平, 杨漫婷, 杜芳芳, 等. 清凉峰有机碳、全氮质量分数和碳、氮质量分数比空间变异及其影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(11): 132-144
- TONG G P, YANG M T, DU F F, et al. Spatial variability of organic carbon, total nitrogen mass fraction, and carbon to nitrogen mass ratio and their influencing factors in Qingliangfeng[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(11): 132-144
- [19] 杨红, 高文于, 吕庆鑫, 等. 青藏高原不同生境沙棘叶片及土壤碳、氮、磷的生态化学计量特征[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(8): 110-119
- YANG H, GAO W Y, LYU Q X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in *Hippophae rhamnoides* leaves and soil across different habitats on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(8): 110-119
- [20] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 自然生长和人为影响下土壤碳氮含量差异及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 163-172, 187
- YUAN J, CAO G C, E C Y, et al. Differences in soil carbon and nitrogen content and influencing factors under natural growth and human influence[J]. Study on soil and water conservation, 2023, 30(3): 163-172, 187
- [21] 罗帅伟. 青藏高原高寒草地土壤碳-氮-磷空间分布格局研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022: 1-11
- LUO S W. Study on the spatial distribution pattern of soil carbon-nitrogen-phosphorus in alpine grassland of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022: 1-11
- [22] CHEN H, JU P J, ZHU Q, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 701-716
- [23] YANG T W, SUN J J, LI Y F, et al. Impact of climate-induced water-table drawdown on carbon and nitrogen sequestration in a *Kobresia*-dominated peatland on the central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6: 188
- [24] KOU D, YANG G B, LI F, et al. Progressive nitrogen limitation across the Tibetan alpine permafrost region[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3331
- [25] 徐仁飞, 王璐, 邓磊, 等. 高寒沙区不同恢复年限青杨人工林土壤碳氮水变化特征[J]. 应用生态学报, 2024, 35(10): 2657-2666
- XU R F, WANG L, DENG L, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, and water of *Populus cathayana* plantation along different vegetation restoration years in alpine sandy region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(10): 2657-2666
- [26] 马骏杰, 陈银萍, 牟晓明, 等. 植物多样性对青藏高原东北部高寒草甸土壤有机碳的影响[J]. 高原气象, 2025, 44(1): 56-66

- MA J J, CHEN Y P, MOU X M, et al. Effects of plant diversity on soil organic carbon in alpine meadow in northeastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(1): 56-66
- [27] 贾映兰, 吴明辉, 魏培洁, 等. 疏勒河源冻土区高寒草甸土壤碳氮含量特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 219-228
- JIA Y L, WU M H, WEI P J, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen contents in permafrost region of the Shule River Headwaters [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 219-228
- [28] 潘蕊蕊, 李小雁, 胡广荣, 等. 青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6374-6384
- PAN R R, LI X Y, HU G R, et al. Characteristics of soil organic carbon distribution and its controlling factors on hill-slope in seasonal frozen area of Qinghai Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6374-6384
- [29] 苏洪烨, 张中华, 余延娣, 等. 不同管理措施对青海湖流域高寒草地土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(05): 1071-1075
- SU H Y, ZHANG Z H, SHE Y D, et al. Effects of different management measures on soil nutrients of alpine grassland in Qinghai Lake Basin [J]. Grassland Journal, 2022, 30(5): 1071-1075
- [30] 陈懂懂, 李奇, 邹小艳, 等. 青海湖农场退耕还林草后的土壤碳氮变化[J]. 草地学报, 2014, 22(3): 469-474
- CHEN D D, LI Q, ZOU X Y, et al. How did soil organic carbon and total nitrogen change after "grain for green" in the Qinghai-lake farm [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(3): 469-474
- [31] 刘英, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖2种高寒湿地土壤碳氮化学计量特征研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(11): 2630-2637
- LIU Y, CAO S K, CAO G C, et al. Comparative study on soil carbon and nitrogen stoichiometry in two alpine wetlands of Qinghai Lake [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(11): 2630-2637
- [32] 游浩妍, 骆成凤, 刘正军, 等. 基于MODIS植被指数估算青海湖流域植被覆盖度研究[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 55-60, 66
- YOU H Y, LUO C F, LIU Z J, et al. Estimation vegetation coverage based on vegetation index of MODIS data in Qinghai Lake watershed [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(5): 55-60, 66
- [33] 高黎明, 张乐乐. 青海湖流域植被覆盖度时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1318-1329
- GAO L M, ZHANG L L. Spatiotemporal dynamics of the vegetation coverage in Qinghai Lake basin [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(9): 1318-1329
- [34] 康利刚, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖流域地表温度时空变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1084-1097
- KANG L G, CAO S K, CAO G C, et al. Spatiotemporal variation of land surface temperature in Qinghai Lake Basin [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1084-1097
- [35] 闵秀云, 武君, 高春亮, 等. 基于元素分析仪测定土壤有机碳的不同前处理方法对比研究[J]. 盐湖研究, 2020, 28(4): 64-70
- MIN X Y, WU J, GAO C L, et al. The comparative study on different pretreatment methods of soil organic carbon determined by elemental analyzer [J]. Journal of Salt Lake Research, 2020, 28(4): 64-70
- [36] 史运坤. 门源盆地黄土记录的古环境演化[D]. 西宁: 青海师范大学, 2021: 34-35
- SHI Y K. Paleoenvironmental evolution recorded by loess in Menyuan basin [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021: 34-35
- [37] 白丽丽, 王文颖, 德却拉姆, 等. 祁连山典型植被土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征的垂直变化[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 444-455
- BAI L L, WANG W Y, DE Q L Met al. Vertical variation of soil carbon, nitrogen, phosphorus content and ecological stoichiometric characteristics of typical vegetation in Qilian Mountains [J]. Research on arid area, 2024, 41(3): 444-455
- [38] 史尧方, 薛娴, 尤全刚, 等. 阿里荒漠区土壤有机碳分布特征及其与土壤物理性质的关系[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 284-294
- SHI Y F, XUE X, YOU Q G, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon in Ali desert area and its relationship with soil physical properties [J]. Desert of China, 2023, 43(3): 284-294
- [39] 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
- ZHANG F W, LI H Q, YI L, et al. Spatial response of topsoil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus content of alpine meadows to grassland degradation in the Sanjiangyuan National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5586-5592
- [40] HUANG X T, LIU X, LIAO L Q, et al. Grazing decreases carbon storage in the Qinghai-Tibet Plateau grasslands [J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6: 198
- [41] XU L, HE N P, YU G R. Nitrogen storage in China's terrestrial ecosystems [J]. Science of The Total Environment, 2020, 709: 136201
- [42] 赵玮, 王新兴, 杨昊天, 等. 土壤碳氮特征沿干旱梯度时空格局及对气候变化的响应——基于中国生态系统研究网络(CERN)长期定位监测数据[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3582-3591
- ZHAO W, WANG X X, YANG H T, et al. Spatio-temporal patterns of soil carbon and nitrogen characteristics along aridity gradients and their responses to climate change: based on long-term field observation data of Chinese Ecosystem Research Network [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3582-3591
- [43] 张俊华, 朱连奇, 李国栋等. 中国南北过渡带土壤碳氮空间特征及暖温带与亚热带界限[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2269-2282
- ZHANG J H, ZHU L Q, LI G D, et al. Spatial patterns of SOC/TN content and their significance for identifying the boundary between warm temperate and subtropical zones in China's north-south transitional zone [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2269-2282