

宁夏天然草地土壤有机碳分布格局及驱动因素

李旭梅¹, 杨钧¹, 李小伟^{1,2*}, 周亮¹, 黄文广², 杨君珑¹

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草原工作站, 宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】草地作为重要的土壤碳库, 探究其有机碳的分布格局及影响因素对缓解温室效应、草地生态系统评价以及退化草地生态恢复具有重要意义。【方法】以宁夏3种类型天然草地(草甸草原、典型草原、荒漠草原)为研究对象, 在195个样地测定0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)含量, 利用分段结构方程模型(Segmented structural equation model)揭示土壤SOC含量与地理、气候、植被、和土壤因子的关系。【结果】在水平方向上0~20 cm和20~40 cm土层SOC平均含量分别为9.46和8.25 g/kg, 草甸草原>典型草原>荒漠草原; 在垂直剖面上SOC平均含量随土层深度增加而减少; 由南到北呈递减的变化趋势。分段结构方程表明: 在0~20和20~40 cm土层中SOC含量与TN、TP和丰富度指数呈极显著正相关($P<0.01$), 与pH值和年均温(MAT)呈极显著负相关($P<0.01$), 与年降水量(MAP)没有显著关系。0~20 cm土层中, 总效应由大到小依次为: 气候因子(0.38)>土壤因子(0.21)>丰富度指数(0.12)。20~40 cm土层中, 总效应由大到小依次为土壤因子(0.39)>气候因子(0.23)>丰富度指数(0.13)。【结论】分段结构方程结果显示雨热条件是影响表层土壤SOC含量的主要因子, TN和TP是影响深层土壤SOC含量的主要因子。

关键词: 宁夏天然草地; 有机碳; 环境因子; 结构方程模型

中图分类号: S812.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)04-0001-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.04.001



陆地生态系统碳库约为大气碳库的2倍, 地上生物量的3倍^[1], 在全球碳循环中起着重要作用, 其轻微的波动就会对全球碳平衡和气候产生重大影响^[2]。草地是陆地生态系统的重要组成部分, 在全球碳循环、气候调节、草地畜牧业发展和生物多样性保护等方面发挥重要作用^[3-4]。土壤有机碳含量和动态平衡能够影响土壤肥力和草地生产力, 是草地健康和土壤质量的重要指示指标^[5]。因此探究草地土壤有机碳格局和影响因素是解锁碳循环的关键环节, 并对区域草地生

态系统碳汇管理和草地生态恢复具有积极意义。

基于全球、区域尺度的研究表明: 草地有机碳含量主要受有机质输入、分解和迁移的影响^[6-9]。方精云^[10]对中国草地生态系统碳库及变化的研究表明, 气候因子和植被条件是影响有机碳的主要因素。气候因子对土壤有机碳的影响是个漫长的过程, 且不同的气候因子对有机碳的作用具有差异性。赵世伟等^[11]研究发现, 植被恢复过程中土壤有机碳含量增加。不同草原类型和土壤深度, 土壤有机碳的水平 and 垂直分布的差异显著。季波^[12]对宁夏回族自治区不同草原类型的有机碳含量进行对比得到草甸草原>典型草原>荒漠草原。随着土壤深度的增加, 土壤有机碳的含量逐渐减少^[13-14]。

宁夏回族自治区深居我国西北内陆、黄河中上游地区, 是典型的农牧交错区。天然草地是宁夏生态功能的主体^[15-16]。宁夏作为我国西北重要的生态屏障, 随着2002年“封山禁牧”、“退耕还林还草”政策的实

收稿日期: 2023-05-05; **修回日期:** 2023-05-19

基金资助: 国家自然科学基金项目(31560154); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03085); 宁夏高等学院一流学科建设(草业科学)项目(NXY-XK2017A01)

作者简介: 李旭梅(1995-), 女, 宁夏银川人, 硕士, 研究方向为草地生态、资源与环境。

E-mail: lxm1163702022@163.com

*通信作者。E-mail: lixiaowei@nxu.edu.cn

施,宁夏草原生态质量逐渐改善。而宁夏地处荒漠与草原地交错带,生态类型单一且脆弱致使土壤呈高度空间异质性分布,20年的植被恢复政策导致土壤碳空间分布发生变化^[17]。当前宁夏地区对于有机碳的研究多集中于有机碳含量及组分^[18-20],而对于宁夏不同草原类型的天然草地有机碳分布格局及影响因素的研究较少。鉴于此,本研究通过对宁夏天然草地土壤有机碳和环境因子关系的分析,以期回答以下问题:(1)宁夏天然草地不同土层中SOC(Soil Organic Carbon, SOC)的分布特征和格局;(2)探究影响不同土层SOC含量的驱动因子。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

宁夏位于我国西北黄河中上游地区,区域轮廓狭长,呈十字形,南北长约456 km,东西长约250 km,属于典型的大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季炎热,昼夜温差大,年平均气温在5~9℃,呈北高南低分布。降雨少且分布不均,雨季主要集中在7—9月,年降水量为183.4~677.0 mm,呈由南向北递减的规律,主要的草原类型有温性草甸草原、典型草原和荒漠草原。土壤类型由南到北主要有黑垆土,灰钙土和山地灰褐土。

1.2 样地设置

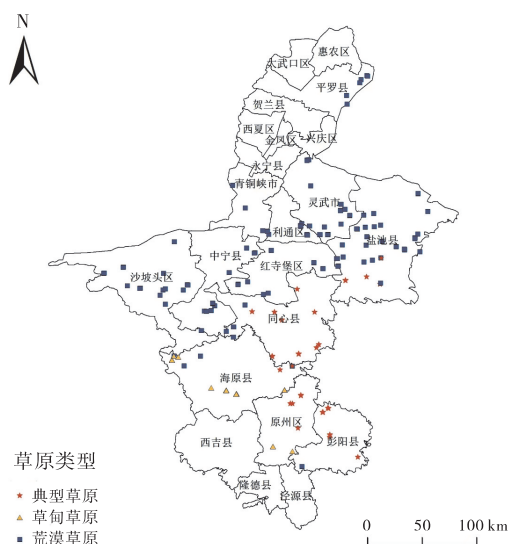
在2018年7—9月,根据宁夏天然草原分布情况,在盐池、中宁、同心、海原、彭阳、西吉、平罗、红寺堡区、青铜峡、中卫、固原、灵武市设置了195个典型样地,其中草甸草原16个、典型草原42个、荒漠草原137个(图1)。

1.3 植物群落调查

在选定的样地内设置一个10 m×10 m样方,记录样地海拔、经度和纬度等坐标信息。在10 m×10 m样方内沿对角线设置3个1 m×1 m的草本样方。调查物种数、物种高度、盖度、频度等;其中高度采用实测法,盖度采用针刺法,频度采用样圆法^[19]。

1.4 土壤取样和测定

1.4.1 土壤样品采集与处理 土壤样地与植被调查样地相对应,在每个1 m×1 m样方内通过五点法利用直径5 cm的土钻按照0~20 cm和20~40 cm土层对



审图号: GS(2019)1822号

图1 宁夏天然草原分布和采样点设置

Fig. 1 Distribution of natural grasslands in Ningxia and setting of sampling points

土壤进行取样,将5钻同层土壤进行混合,重复三次;将采集的土壤样品带回实验室风干(风干时将土块压碎,去除土壤内的残根)、过筛(2 mm)后将剩下的样品充分混匀,从过筛后的土壤样品中取50 g左右进行进一步研磨,装密封袋备用。

1.4.2 土壤理化性质的测定 本研究采用全自动凯氏定氮仪(K-360, BUCHI Labortechnik AG, Switzerland)测定土壤全氮(Total nitrogen, TN);采用HClO₄-H₂SO₄消煮,流速分析仪(Skalar Analytical B. V., Netherlands)测定土壤全磷(Total phosphorus, TP);采用雷磁pH计(pHS-3G, China)测定pH值(电位测定法,水土比5:1);采用重铬酸钾外加热法测量土壤有机碳含量^[21]。

1.5 数据分析

1.5.1 植物物种丰富度指数的计算公式如下 Margalef物种丰富度指数: $Ma = (S - 1) / \ln N$

式中: S为物种总数; N为物种总个体数^[22]

1.5.2 气候数据获取 气候数据来自世界气候网站(<http://worldclim.org>)^[23]。该数据集提供了全球1 km×1 km分辨率近50年的月平均气象数据。根据月均数据来计算年均降水量(Mean annual precipitation, MAP)和年均温(Mean annual temperature, MAT)。

1.5.3 数据分析 采用Microsoft Excel 2010对试验

数据进行整理,采用 SPSS 26.0 软件,对 SOC 含量与植物群落多样性、气候因子和土壤理化性质之间的关系单因素方差分析以及描述性统计。利用 ArcGIS10.0 对 SOC 含量进行空间插值法分析。分段结构方程分析地理因子、气候因子、植物和土壤因子对 SOC 的直接和间接影响,用 R 软件中的‘piecewiseSEM’^[24]、‘nlme’^[25]和‘lme4’^[26]包进行分析,使用 Fisher’C($P<0.05$)来确定建模结果优度,对模型进行修正。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量垂直和空间分布格局

宁夏天然草地 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中 SOC 的含量均为草甸草原(24.88 g/kg, 20.75 g/kg)>典型草原(11.00, 9.57 g/kg)>荒漠草原(7.16, 6.42 g/kg)。0~20 cm 土层草甸草原、典型草原、荒漠草原的变异系数分别为 66.90%、55.36%、65.23%, 20~40 cm 土层草甸草原、典型草原、荒漠草原的变异系数分别为 69.16%、52.46%、58.41%(表 1)。

表 1 不同草原类型不同土层有机碳含量

Table 1 SOC content of different soil layers in different grassland types

土层/cm	草原类型	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	变异范围	变异系数/%	样本数
0~20	荒漠草原	7.16±4.79 ^a	1.07~37.02	66.90	137
	典型草原	11.00±6.09 ^b	1.88~27.38	55.36	42
	草甸草原	24.88±16.23 ^c	10.99~58.78	65.23	16
20~40	荒漠草原	6.42±4.44 ^a	0.80~23.23	69.16	137
	典型草原	9.57±5.02 ^b	1.88~17.36	52.46	42
	草甸草原	20.75±12.12 ^c	6.37~56.04	58.41	16

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

宁夏天然草地不同土层中 SOC 含量从南到北呈逐渐减少的趋势。0~20 cm 土层,固原市及中卫市南部地区有机碳含量最高,含量在 34.4~58.78 g/kg,石嘴山市、银川市以及吴忠市含量最少,仅有 1.07~

6.81 g/kg(图 2-A)。20~40 cm 土层分布格局与 0~20 cm 土层类似,含量最高的地区是中卫市南部和固原市,最低是石嘴山市和银川市(图 2-B)。

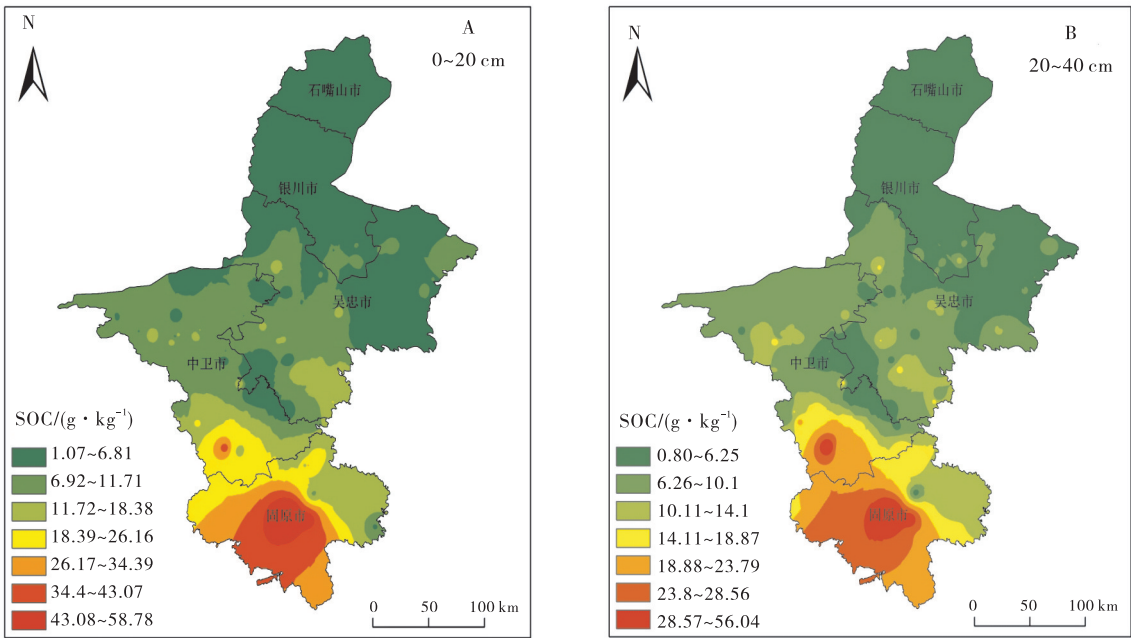


图 2 土层中土壤有机碳含量分布
Fig. 2 Distribution of SOC in soil layers

2.2 环境因子基本特征

对研究区各环境因子进行描述性统计分析,结果表明:0~20 cm 和 20~40 cm 土层均表现为pH的平均值最大,土壤TP的平均值最小(见表2)。

表2 研究区环境因子统计特征

Table 2 Statistical characteristics of environmental factors in the study area			
土层/cm	环境因子	平均值±标准差	样本量
0~20	丰富度指数	3.87±3.65	195
	pH值	8.70±1.15	195
	TN/(g·kg ⁻¹)	1.35±2.61	195
	TP/(g·kg ⁻¹)	0.44±0.55	195
20~40	pH值	8.72±1.10	195
	TN/(g·kg ⁻¹)	1.25±2.15	195
	TP/(g·kg ⁻¹)	0.43±0.56	195

2.3 不同土层中有机碳的直接和间接驱动因素

利用分段结构方程对地理因子、气候因子、植物和土壤因子与有机碳含量的关系进一步量化。在0~20 cm 和 20~40 cm 土层中SOC含量与TN、TP和丰富度指数呈极显著正相关($P<0.05$),与pH值和MAT呈极显著负相关($P<0.05$),与MAP没有显著的关系(图3)。

在0~20 cm 土层中气候、植物和土壤解释了有机碳空间变异的71.0%($R^2=0.71$);20~40 cm 土层解释了有机碳空间变异的75.0%($R^2=0.75$)。0~20 cm 土层中,总效应由大到小依次为:气候因子(0.38)>土壤因子(0.21)>丰富度指数(0.12)(图3-A)。20~40 cm 土层中,总效应由大到小依次为土壤因子(0.39)>气候因子(0.23)>丰富度指数(0.13)(图3-B)。pH对0~20 cm 土层中有机碳影响较大;MAT和TN对20~40 cm 土层中的有机碳影响更大。

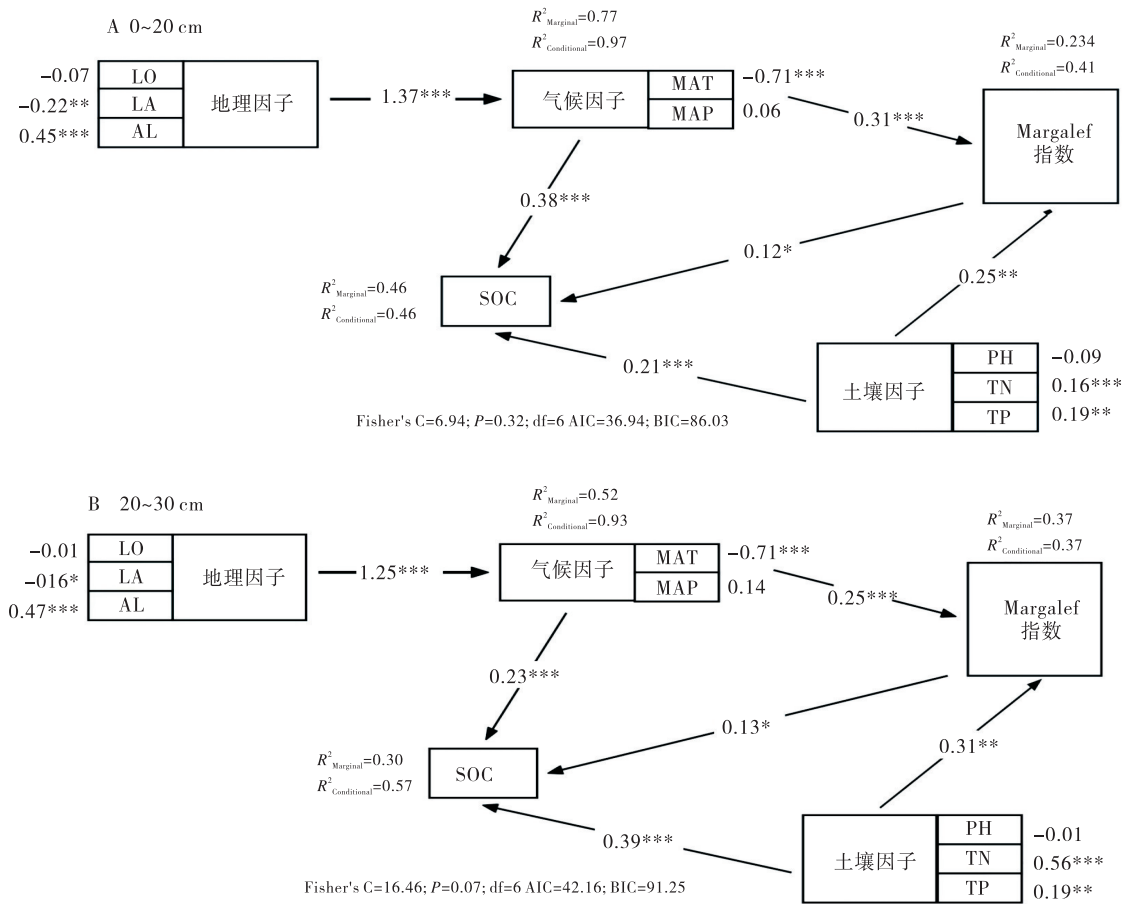


图3 不同土层草地土壤有机碳含量影响因素

Fig. 3 Influencing factors of soil organic carbon content in different soil layers of grassland

注:df自由度;AIC赤池信息准则;BIC贝叶斯信息准则

3 讨论

3.1 土壤有机碳含量特征及分布格局

本研究中不同土层有机碳含量与 2009 年刘伟等^[27]报道的黄土高原草地有机碳含量相比,高于其典型草原和荒漠草原,低于其草甸草原(表 4),原因是宁

夏天然草地退化严重,自 2003 年起正式实施退耕还林还草工程,经过近 10 年的全区禁牧,面积较大的典型草原和荒漠草原植被得到了显著恢复^[22],从而增加了有机碳的输入量。而草甸草原由于禁牧封山等原因,使得植被长时间未被利用,草原退化,分解速率减缓,有机碳含量降低。

表 4 本研究有机碳含量与其他研究结果比较

Table 4 Comparison of organic carbon content in this study with other studies

0~20 cm SOC/(g·kg ⁻¹)			20~40 cm SOC/(g·kg ⁻¹)			数据来源
草甸草原	典型草原	荒漠草原	草甸草原	典型草原	荒漠草原	
24.88±16.23	11.00±6.09	7.16±4.79	20.75±12.12	9.57±5.02	6.42±4.44	本研究
6.55±0.59	7.55±0.75	1.79±0.27	4.17±0.48	4.24±0.48	1.62±0.31	刘伟 ^[27]

土壤垂直方向随着土壤深度的增加有机碳减少,有明显的表层聚集性,表层土壤含有较多的植物残体及腐殖质,使有机碳的积累、分解和向下运输受到了阻碍。因此,表层土壤的有机碳含量高于底层。本研究显示有机碳含量草甸草原>典型草原>荒漠草原,常帅^[28]对内蒙古锡林郭勒地区有机碳研究结果是草甸草原>典型草原>荒漠草原。季波^[12]对宁夏典型天然草地有机碳的研究也得出同样的结果,这与本研究相一致,植被类型与植被覆盖度都会对土壤有机碳的输入和输出产生重大影响^[29-30]。植被覆盖度越高,枯落物越多,归还到土壤的有机质就越多,并且草甸草原和典型草原相对于荒漠草原的水热条件更好,可以促进土壤微生物活性和植被的新陈代谢,使得地表枯落物分解加快,根系分泌物增多,有机碳含量也增多^[31]。

3.2 环境因子对不同土层土壤有机碳含量的影响

气候、植被、土壤理化性质是影响天然草地有机碳含量的主要因素^[9-10]。有研究指出进入土壤的植物残体由植被类型决定,而植被类型受气候条件(年均温和降水量)等因素的制约,同时水热条件、土壤特性很大程度上决定着微生物的生物量及其活动,从而影响有机质在土壤中的分解速率^[32]。傅华^[33]对阿拉善天然草地有机碳研究显示不同土层土壤有机碳含量与年降水量、植被盖度、草地生产力、土壤含水量和呈极显著正相关,与年均温、土壤 pH 值呈极显著负相关。戴万宏研究表明中国土壤有机质含量随 pH 值升高而降低的趋势,两者之间呈极显著负相关^[34]。张超

飞^[31]对长江源区布曲流域土壤有机碳研究显示土壤有机碳含量与 pH 值呈现极显著的负相关,与碳氮比呈现极显著的正相关。丁金梅^[35]对宁夏天然草地有机碳研究表明地上生物量对土壤有机碳的影响最大,降水量对土壤有机碳影响包括直接和间接影响,间接影响通过生物量及土壤含水量表现,温度通过影响生物量从而对土壤有机碳产生效应。本研究结果与上述研究结果一致,得出有机碳与 TN、TP、以及丰富度指数呈显著正相关,与年均温(MAT)和 pH 呈显著负相关,且 0~20 cm 土层中,气候因子对有机碳含量的影响最大,20~40 cm 土层中,TN 和 TP 对有机碳的影响最大。

温度是影响植物生长的重要因素,也会直接影响土壤的发育,高温会使土壤湿度和空气湿度降低,不利于植物的生长,使植被地上生物量减少,从而导致向地下输送的有机质也减少^[36]。此外,温度也会影响有机质的分解与形成。宁夏地区地貌狭长,呈现南高北低的特点,南北方向水热状况变化显著。年均温随纬度升高而升高,而温度越高微生物的活性越高,使有机碳的分解越快^[37],从而导致有机碳的含量降低。降水是植物生长的必要因素,降雨量越高,越有利于植被的生长,而植被越茂盛,累积到土壤中的有机碳就越多。另一方面,随着降水量的增加,土壤含水量也相应增加,好氧型微生物活性降低,从而导致对有机碳的分解作用减小^[38],有利于有机碳的存储,但在本试验中,年降水量(MAP)和有机碳没有显著的关系,可能与研究区域处于干旱和半干旱区,需要进一

步进行验证。

pH值是衡量土壤酸碱性的重要指标,土壤酸碱性的会影响土壤有机碳的矿化速率^[39]。通常认为无论是强酸还是强碱都不适合土壤微生物的活动,当pH值过低时,土壤微生物活性受到限制,有机碳分解速率降低,有利于土壤碳的累积;当土壤pH值过高时,土壤微生物活性增强,有机碳分解速率随之加快^[40]。研究区土壤pH值在8.80~8.85之间,土壤偏碱性,使土壤微生物活性受到抑制甚至失活,土壤有机碳的分解受阻。还可能是碱性土壤有利于土壤中硝化细菌的硝化作用,进而有利于植物对土壤中氮素的利用,促进植物生长^[41]。

有机碳含量与TN、TP呈极显著正相关。氮元素是陆地生态系统肥力的限制性元素,土壤碳的固定受到生态系统中氮可利用性限制,而土壤中的N元素主要来自于动植物和微生物残体^[41],它能促进植物的生长和微生物的繁殖^[42]。研究表明生物量对宁夏草地土壤有机碳的直接效应最大,即生物量的增加有利于有机碳的积累^[35],因此氮元素越多,植被生长越茂盛,即植物地上生物量就越多,土壤中的有机质积累增多^[43]。此外,过量的氮会改变微生物特征,从而抑制有机碳的矿化。P元素多数来自于矿物质的风化,它的输入不仅有利于植物根系生长^[34],还有利于高含水量有机碳的矿化以及可溶性碳淋失^[44],Miyata^[45]的研究结果表明P元素增多可显著提高有机碳的含量,与本研究结果一致。而刘德燕^[44]的研究与本研究结果相反,需进一步的考虑碳磷耦合等的试验去分析。

物种多样性可以反映群落组成特征。物种丰富度与植物多样性密切相关,物种丰富度越高,则物种多样性越高,地表植被覆盖率也会越高,SOC相应增多^[45];另一方面地表植被覆盖率增加能够缓解水分蒸发速度,从而有利于SOC的积累^[43]。

4 结论

(1) 0~20 cm和20~40 cm土层的有机碳分别为9.46和8.25 g/kg,变化范围分别为0.87~58.78和0.40~56.04 g/kg,有机碳含量在水平梯度的分布规律为草甸草原>典型草原>荒漠草原;在垂直剖面上,有机碳含量随着土层深度的增加而减少。

(2) 生态因子对有机碳含量产生影响。在0~20

和20~40 cm土层中气候因子、丰富度和土壤因子和土壤有机碳含量间的显著关系一致。在0~20 cm土层中气候因子中的年均温是土壤有机碳含量变化的主要驱动因子;在20~40 cm土层中土壤因子中的全氮和全磷含量是土壤有机碳含量变化的主要驱动因子。

参考文献:

- [1] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks [J]. *Nature*, 2008, 451(7176):289—92.
- [2] 周晓宇,张称意,郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1867—1874.
- [3] Diffenbaugh N S, Noah, Field C B, *et al.* Changes in Ecologically Critical Terrestrial Climate Conditions [J]. *Science*, 341(6145):486—492.
- [4] 吴旭东. 沙漠化对草地植物群落演替及土壤有机碳稳定性的影响[D]. 银川:宁夏大学,2016.
- [5] 张瑶瑶. 甘南州草地土壤有机碳,全氮空间分布特征及影响因素分析[D]. 兰州:兰州大学,2019.
- [6] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 2—3.
- [7] Awiti AO, Walsh, *et al.* Dynamics of topsoil carbon and nitrogen along a tropical forest—cropland chronosequence: Evidence from stable isotope analysis and spectroscopy [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2008, 127(3/4):265—272.
- [8] Lal R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security [J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623—1627.
- [9] Piao S L, Ito A, Li S G, *et al.* The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades [J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(9):4025—4066.
- [10] 方精云,杨元合,马文红,等. 中国草地生态系统碳库及其变化 [J]. *中国科学:生命科学*, 2010, 40(7): 566—576.
- [11] 赵世伟,苏静,吴金水,等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3):114—117.
- [12] 季波,李娜,马璠,等. 宁南典型退耕模式对土壤有机碳固存的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(3):6.
- [13] 刘景双,杨继松,于君宝,等. 三江平原沼泽湿地土壤有

- 机碳的垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003(3): 5—8.
- [14] 马辉英, 李昕竹, 马鑫钰, 等. 新疆天山北麓中段不同植被类型下土壤有机碳组分特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 8.
- [15] 任继周, 梁天刚, 林慧龙, 等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 1—22.
- [16] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001(1): 47—53.
- [17] 金山. 宁夏贺兰山国家级自然保护区植物多样性及其保护研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [18] 展秀丽, 许艺馨, 王红, 等. 宁夏东部风沙区固定沙丘土壤性质小尺度空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3195—3203.
- [19] 杨君珑, 李小伟. 宁夏不同草地类型土壤有机碳组分特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 55—61.
- [20] 许冬梅, 许新忠, 王国会, 等. 宁夏荒漠草原自然恢复演替过程中土壤有机碳及其分布的变化[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 35—42.
- [21] 张嘉玉, 李小伟, 刘万弟, 等. 宁夏沙芦草群落分类及群落特征与环境关系的研究[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 498—509.
- [22] 夏露, 张苏人, 刘培培, 等. 增温和增/减水及氮沉降对中国草地植物多样性影响的研究进展[J]. 草原与草坪, 2022, 42(4): 158—165.
- [23] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 25(15): 1965—1978.
- [24] Lefcheck J S. piecewise SEM: Piecewise structural equation modeling in R for ecology, evolution, and systematics [J]. *Methods in Ecology & Evolution*, 2016, 7: 573—579.
- [25] Pinheiro J C, Bates D M, Debroy S, *et al.* Linear and Nonlinear Mixed Effects Models [J]. *R Package Version*, 2015, 3: 1—83.
- [26] Bates D, Mchler M, Bolker B M, *et al.* Fitting Linear Mixed—Effects Models Using lme4 [J]. *Foundation for Open Access Statistics*, 2015(1).
- [27] 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.
- [28] 常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355—1366.
- [29] Fu Xiadi, Shao Mingan, Wei Xiaorong, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31—35.
- [30] Novara A, Gristina L, BodiMB, *et al.* The impact of fire on redistribution of soil organic matter on a mediterranean hillslope under maquia vegetation type [J]. *Land Degradation & Development*, 2011, 22(6): 530—536.
- [31] YongQ L, XueY Z, REN YC, *et al.* Artificial root exudates and soil organic carbon mineralization in a degraded sandy grassland in northern China [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(4): 423—431.
- [32] 张红. 不同植被覆盖土壤中植物残体腐解过程的质能状态研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [33] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469—476.
- [34] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851—860.
- [35] 丁金梅, 王维珍, 米文宝, 等. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素分析[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1913—1922.
- [36] 王莲阁. 温度变化对土壤有机碳矿化及其动力学特征的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [37] 吴静, 陈书涛, 胡正华, 等. 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 10.
- [38] Stirling G R, Lodge G M. A survey of Australian temperate pastures in summer and winter rainfall zones: soil nematodes, chemical, and biochemical properties [J]. *Soil Research*, 2005, 43(8). DOI: 10.1071/SR05079.
- [39] Zhang J, Wu X, Shi Y, *et al.* A slight increase in soil pH benefits soil organic carbon and nitrogen storage in a semi—arid grassland [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130(1): 108037.
- [40] An S, Mentler A, Mayer H, *et al.* Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2010, 81(3): 226—233.
- [41] 刘慧霞, 孙宗玖, 石宇堃, 等. 准噶尔盆地梭梭沙质荒漠

- 土壤有机碳分布特征的研究[J]. 中国农业科技导报, 2021(11):147—155.
- [42] 张超飞,马素萍,何晓波,等. 长江源多年冻土区土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2022, 41(9):1665—1673.
- [43] Bai Y, Zhou Y, He H. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China [J]. *Geoderma*, 2020, 376(1):376—388.
- [44] 刘德燕,宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 8(9): 769—774.
- [45] Shimizu M, Marutani S, Desyatkin A R, et al. The effect of manure application on carbon dynamics and budgets in a managed grassland of Southern Hokkaido, Japan [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 130 (1/2):31—40.

Distribution pattern and driving factors of soil organic carbon of natural grassland in Ningxia

LI Xu-mei¹, YANG Jun¹, LI Xiao-wei^{1,2*}, ZHOU Liang¹, HUANG Wen-guang²,
YANG Jun-long¹

(1. *Agricultural school of Ningxia university, Yinchuan 750021, China*; 2. *Ningxia Grassland Workstation, Yinchuan 750021, China*)

Abstract: 【Objective】 Grassland is an important soil carbon pool. It is important to investigate the distribution pattern and influencing factors of organic carbon in grasslands in order to mitigate the greenhouse effect. The investigation is also of great significance in grassland ecosystem evaluation and ecological restoration of degraded grasslands. 【Method】 In this paper, three natural grassland types (meadow steppe, typical steppe and desert steppe) in Ningxia were taken as the research object. Soil organic carbon (SOC) in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers was measured in 195 sample plots. The Composite structural equation model was used to reveal the relationship between soil organic carbon content and geography, climate, vegetation and soil factors. 【Result】 The results showed that in the horizontal direction, the average SOC content of natural grassland in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers was 9.46 g/kg and 8.25 g/kg, respectively, with the order of meadow grassland > typical grassland > desert grassland. In the vertical section, SOC decreased with the increased of soil depth. There was a decreased trend from south to north. The segmental structural equation showed that in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers, SOC content was positively correlated with TN, TP, and Margalef richness indices ($P<0.01$), and negatively correlated with pH and MAT ($P<0.01$), but had no significant relationship with MAP. In 0~20 cm soil layer, the total effect was in the order of climate factor (0.38)>soil factor (0.21)>Margale index (0.12). In the 20~40 cm soil layer, the total effect was in the order of soil factor (0.39)>climate factor (0.23)>Margale index (0.13). 【Conclusion】 The results of the fractional structural equation showed that rain and heat conditions were the main factors affecting the SOC content of the surface soil. TN and TP were the main factors affecting the SOC content of the deep soil.

Key words: Ningxia natural grassland; soil organic carbon; environmental factors; structural equation model

(责任编辑 刘建荣)