

DOI: 10.5846/stxb202201040022

丁金梅, 王维珍, 米文宝, 侯凯元, 张喜旺, 赵亚楠, 文琦. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(5): 1913-1922.

Ding J M, Wang W Z, Mi W B, Hou K Y, Zhang X W, Zhao Y N, Wen Q. Spatial characteristics of soil organic carbon in grassland of Ningxia and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1913-1922.

## 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素

丁金梅<sup>1,2</sup>, 王维珍<sup>3</sup>, 米文宝<sup>1,2,\*</sup>, 侯凯元<sup>2</sup>, 张喜旺<sup>4</sup>, 赵亚楠<sup>1</sup>, 文琦<sup>2</sup>

1 宁夏大学农学院, 银川 750021

2 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

3 宁夏彭阳县自然资源局, 彭阳 756500

4 宁夏同心县自然资源局, 同心 751300

**摘要:** 草地是重要的碳汇资源库, 在陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色。探明草地土壤有机碳的空间分布格局及其影响因素对于推动区域生态系统碳汇管理, 实现“双碳”目标和绿色高质量发展具有重要意义。以宁夏三种主要草地类型为研究对象, 基于野外样点调查, 采用结构方程模型, 分析了草地土壤有机碳的空间分布特征及其影响因素。结果表明: 不同类型草地土壤有机碳含量表现为草甸草原高于典型草原, 荒漠草原最低, 垂直剖面上均随土壤深度的增加而降低。草甸草原和荒漠草原有机碳空间变异自表层向下逐渐增大, 典型草原在 20—40 cm 土层变异系数达到最大。有机碳分布在区域上从南部六盘山山地向中部干旱风沙带逐渐降低。路径分析发现, 海拔高度、地上生物量、降水量、温度和土壤含水量可解释土壤有机碳空间变异的 91.4%。海拔高度对土壤有机碳总效应最大(作用系数为 0.78), 海拔高度引起的降水和温度等要素区域分异间接影响土壤有机碳含量; 地上生物量对土壤有机碳的直接正向效应最大(0.559); 降水量对土壤有机碳效应分为直接效应和作用于生物量及土壤含水量的间接影响; 温度表现为通过生物量对土壤有机碳间接产生负向效应(-0.259)。宁夏草地土壤有机碳的空间分布主要受降水量和与其密切相关的生物量的支配作用。近 20 年来降水量增多和草地人为干扰减少, 宁夏草地碳汇作用显著。

**关键词:** 土壤有机碳; 空间特征; 影响因素; 草地

## Spatial characteristics of soil organic carbon in grassland of Ningxia and its influencing factors

DING Jinmei<sup>1,2</sup>, WANG Weizhen<sup>3</sup>, MI Wenbao<sup>1,2,\*</sup>, HOU Kaiyuan<sup>2</sup>, ZHANG Xiwan<sup>4</sup>, ZHAO Yanan<sup>1</sup>, WEN Qi<sup>2</sup>

1 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Natural Resources Bureau of Pengyang County, Pengyang 756500, China

4 Natural Resources Bureau of Tongxin County, Tongxin 751300, China

**Abstract:** Grasslands are important contributors of carbon sequestration among terrestrial ecosystems, which play an important role in the global biogeochemical cycle and energy exchange. Based on field surveys in July—August 2021, soil samples of meadow steppe, typical steppe and desert steppe in Ningxia were collected. The organic carbon contents, bulk density, total nitrogen, and pH of these soil samples were measured. We also monitored factors affecting carbon distribution such as altitude, annual precipitation, annual mean temperature, aboveground biomass and soil water content. Results indicated that content of the soil organic carbon decreased along the vertical soil profile, the average organic carbon content

基金项目: 国家自然科学基金项目(42061037)

收稿日期: 2022-01-04; 网络出版日期: 2022-07-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: miwbao@nxu.edu.cn

followed the order of meadow steppe > typical steppe > desert steppe. The distribution of grassland soil organic carbon gradually decreased from the Liupan Mountains in the south to the dry sand belt in the middle along the altitude. Soil organic carbon was significantly positively correlated with aboveground biomass, annual precipitation, altitude and soil total nitrogen density, and significantly negatively correlated with annual mean temperature ( $P < 0.001$ ), positively correlated with soil water content, and negatively with soil bulk density ( $P < 0.01$ ), and no obvious correlation with soil pH. Amos structural equation model was applied to evaluate the combined effects of environmental factors on grassland soil organic carbon. The most important factors affecting organic carbon was altitude ( $r = 0.78$ ), which mainly caused regional differentiation of precipitation and temperature to affect soil organic carbon indirectly; followed by aboveground biomass ( $r = 0.559$ ); then annual precipitation (0.539), which not only directly but also indirectly affected the soil organic carbon by altering aboveground biomass and soil water content positively. Annual mean temperature indirectly affected organic carbon negatively by influencing aboveground biomass ( $r = -0.259$ ). The spatial distribution of grassland organic carbon in Ningxia was dominated by precipitation and aboveground biomass closely related to precipitation. In the past 20 years, with the increase of precipitation and the reduction of grassland anthropogenic disturbance, grassland ecosystem in Ningxia had a very significant carbon sink function.

**Key Words:** soil organic carbon; spatial characteristics; influencing factors; grassland

随着碳达峰和碳中和目标确立,陆地生态系统碳汇功能成为学术界与政府关注的焦点。土壤有机碳是陆地生物圈中最大的有机碳库,储量为大气碳库和陆地生物量碳库的 3 倍左右<sup>[1]</sup>,其波动会造成 CO<sub>2</sub> 浓度发生大幅变化,进而影响全球气候。草地约占全球陆地面积的 30%,在陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色<sup>[2-3]</sup>,储存了全球土壤有机碳 10%—30%,每年 0.5 Pg 的有机碳固存量约占世界土壤潜在碳固存量的四分之一<sup>[4]</sup>。草地有机碳动态变化对于大气 CO<sub>2</sub> 含量和区域碳循环有重要影响。剖析草地土壤有机碳影响因素是研究碳循环的关键环节,对于合理利用草地积极应对全球气候变化具有重要意义,同时为草地生态系统碳汇管理和草地生态修复提供理论依据。

草地土壤有机碳空间分布及其影响因素研究在全球、区域层面开展了大量工作<sup>[5-8]</sup>。土壤有机碳储量主要受制于有机质的输入与土壤有机质分解-迁移速率的动态变化。在区域尺度,降水、温度等气候因素和植被条件是被认为影响土壤有机碳累积的主要环境因子<sup>[9]</sup>。Yang 等<sup>[10]</sup>分析了青藏高原高寒草地,土壤有机碳密度随着年降水量和土壤黏粒含量的增加呈显著增加趋势,陈庆美等<sup>[11]</sup>和刘伟等<sup>[12]</sup>研究发现内蒙古草原和黄土高原草地土壤有机碳随着降水量增加而增加。温度对土壤有机碳影响具有明显区域差异,刘伟等<sup>[12]</sup>和常帅等<sup>[13]</sup>研究表明黄土高原和内蒙古温性草原土壤有机碳含量与温度呈负相关,而 Yang 等<sup>[10]</sup>在高寒草地中研究得出土壤有机碳密度随年均温的增加呈微弱上升趋势。此外,草地土壤有机碳密度还与植被盖度<sup>[14]</sup>、地上生物量<sup>[15-16]</sup>、土壤含水量<sup>[14,17]</sup>等显著正相关。在流域尺度,海拔和坡度等地形因子对土壤有机碳分异起支配作用<sup>[18-19]</sup>。可见,草地土壤有机碳受气候、植被、土壤等因素的共同作用,且控制性影响因素随着研究区域范围的不同具有明显的尺度效应。草地土壤有机碳主导因素及贡献分析,一直为碳循环研究的热点问题。综上,草地土壤有机碳影响因素研究已经取得丰硕成果,研究方法趋于多样化,学者们对于草地土壤有机碳研究达成了一定共识,但研究存在重因素判定轻机制分析,科学评价草地土壤有机碳空间分布及其影响因子作用机制,对于“双碳”目标达成具有重要作用。本文运用结构方程模型,尝试从总效应、直接效应和间接效应等方面定量分析环境因素对草地土壤有机碳的影响机理和作用路径,进而探讨各因素对草地土壤有机碳空间分异的作用机制。

宁夏草地作为中国西北草原的重要组成部分,是国家重要的生态安全屏障和畜牧业生产基地,草地类型多样,草地土壤有机碳的研究多集中在小流域尺度<sup>[20-21]</sup>,对区域尺度草地土壤有机碳空间分异及其影响因素研究尚显不足。本文基于大量的野外样点数据,揭示宁夏草地土壤有机碳空间分布格局,在 Pearson 相关分

析的基础上,用结构方程模型定量分析草地土壤有机碳分布的影响因素,探讨了草地土壤有机碳时空变化特征,为草地碳汇管理及生态系统服务功能优化提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

宁夏回族自治区位于我国西北内陆地区的东部,东经 104°17'—107°39'和北纬 35°14'—39°23'之间,为半湿润区、半干旱区向干旱区的过渡带和典型的农牧交错区。从南部山地、中部干旱风沙带到北部引黄灌区,地势呈阶梯式逐渐下降。自南向北,气候由半湿润向半干旱过渡,年均温从南部的 5℃ 逐渐上升到北部的 9℃,年均降水量从南至北由 650 mm 下降为 180 mm 左右。宁夏地处中温带半干旱的草原气候区,拥有较丰富的天然草地资源。草甸草原主要分布在南部六盘山、月亮山、南华山等山地,形成集中连片区;在固原南部、西吉南部及隆德部分黄土丘陵沟壑阴坡地段呈现镶嵌分布,发育山地灰褐土,主要植物有:凸脉苔草(*Carex lanceolata*)、紫苞凤毛菊(*Saussurea iodostegia*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。典型草原是中温带半干旱气候区的地带性草原类型,广泛分布于宁夏南部广大的黄土丘陵地区,黑垆土为地带性土壤,主要植物有:长芒草(*Stipa bungeana*)、早熟禾(*Poa annua*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、大针茅(*Stipa grandis*)等。荒漠草原属于典型草原向荒漠过渡的地带性草地类型,主要分布在宁夏中、北部干旱风沙带,广泛发育灰钙土,主要植物有:短花针茅(*Stipa breviflora*)、珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)等。

### 1.2 调查样地设置和样品测定

根据宁夏各类草地的面积和集中分布区域及海拔状况等,于 2021 年 7—8 月在宁夏草地相对均匀设置调查样点(图 1)。草甸草原样地选取六盘山叠叠沟、月亮山、南华山等样点(7 个样地,21 个样方)。典型草原在宁夏典型草原分布的各县均设置样地,包括固原市原州区云雾山、头营镇,彭阳县古城镇、王洼乡,隆德县山河乡、观堡乡,西吉县红耀乡、泾源县香水镇,同心县张家塬镇、海原县草洼乡等地(10 个样地,30 个样方)。荒漠草原样点设置主要包括:中卫市沙坡头区迎水桥镇、中宁县新堡乡、红寺堡鲁家瑶、同心县下马关镇、盐池花马池乡等地(7 个样地,21 个样方)。依据每个样点的情况,选择能够代表整个样点植被状况的区域设置调查样地(1—2 个)约 100 m×100 m,采用随机设定样方的方法,在调查样地内设置 3 个 1 m×1 m 的样方,采用全收获法将样方内所有植物齐地面剪下,称其鲜重,带回实验室先在 105℃ 杀青 30 分钟,然后在 65℃ 下烘 48 小时,称其干重,共采集植物样方 72 个。在每块样地沿对角线随机设置 3 个土样采集样方,去除地表枯落物,在每个样方的中心和四角用 7 cm 土钻分别采集 0—10、10—20、20—40、40—60、60—100 cm 土层土壤样品,将同样方的土样按层混合均匀分装于保鲜袋中,带回实验室自然风干,磨细过筛(孔径为 1 mm)以备室内理化性质的测定。总计采集土壤样本 360 份。土壤有机碳测定采用重铬酸钾-外加热法,全氮采用半微量凯氏法,pH 值采用 FE-28 酸度计测定。用 100 mL 的土壤环刀按照上面 5 个土层深度从上至下依次取样,每层取 3 个重复样品,在 105℃ 烘干至恒重,计算土壤容重和土壤含水量。3 种草地土壤理化性质如表 1 所示。

土壤有机碳密度(SOCD)计算:

$$SOCD = \sum_i^m SOC_i \times BD_i \times D_i$$

式中,SOCD 表示土壤有机碳密度(kg/m<sup>2</sup>),SOC<sub>i</sub> 表示第 i 层的土壤有机碳含量(g/kg),BD<sub>i</sub> 表示第 i 层的土层密度(g/cm<sup>3</sup>),D<sub>i</sub> 表示第 i 层的土层厚度(m),m 表示土层的数量。

### 1.3 数据处理

借助 Excel 对原始数据进行汇总整理,应用 SPSS 22.0 对数据进行统计分析,采用单因素方差分析中的最小显著性差异法(LSD)、图基检验法(Turkey)对不同草地类型土壤有机碳等因素之间的差异进行比较,不符合正态分布或未通过方差齐性检验的样本则采用非参数检验中的克鲁斯卡尔-沃里斯检验(Kruskal-Wallis)

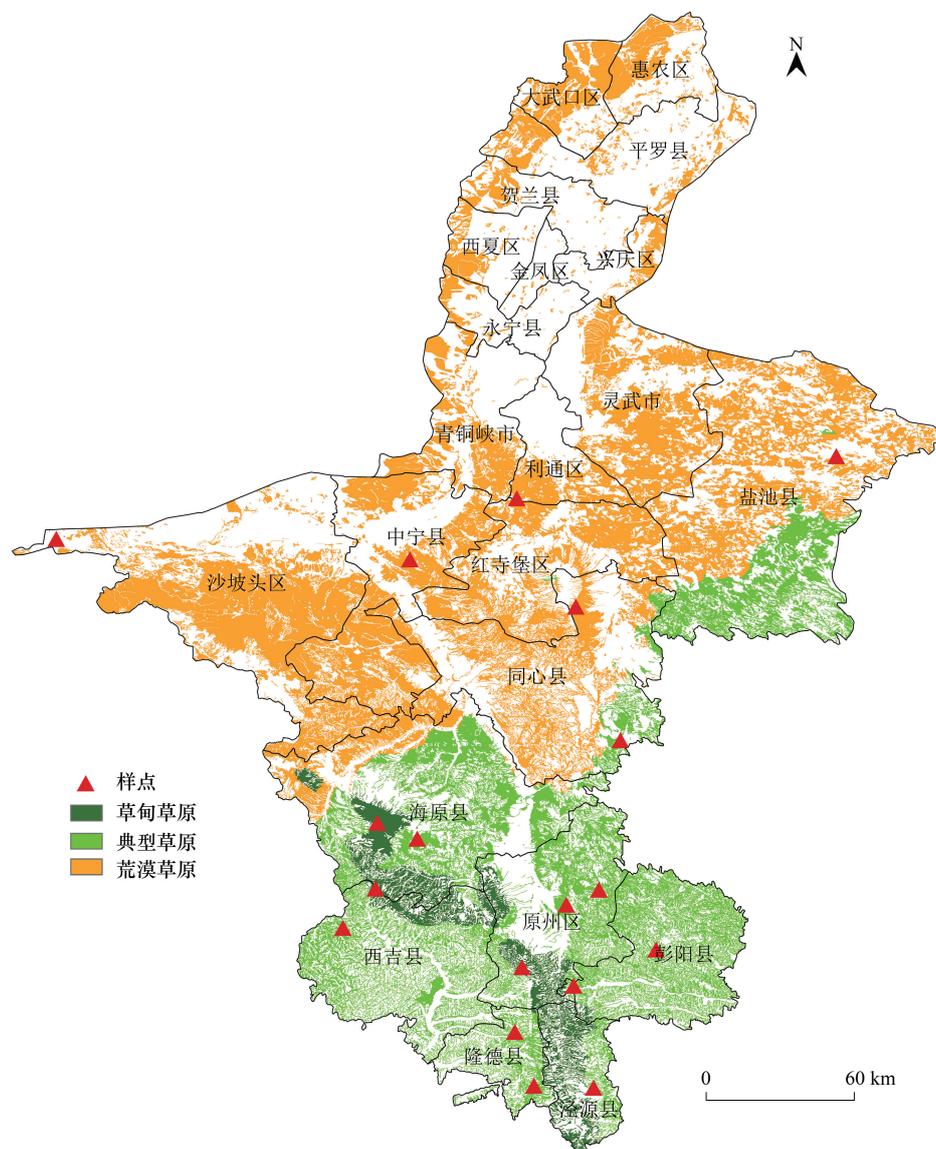


图1 调查样点设置分布图

Fig.1 Study area and sampling sites

(草甸草原各层土壤有机碳含量)。土壤有机碳和各个环境变量的关系采用 Pearson 相关性分析。土壤有机碳与海拔高度、年均降水量、年均温、地上生物量等影响因素之间的关系强弱和作用机理采用 Amos 22.0 进行路径分析。使用 Arcgis 10.2 和 Origin 8.0 软件制图,图中的误差棒代表标准误差(SE)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同草地类型的地上生物量和土壤基本理化特征

草甸草原植被地上生物量最大,为  $307.61 \text{ g/m}^2$ ,典型草原平均地上生物量为  $146.56 \text{ g/m}^2$ ,荒漠草原为  $88.16 \text{ g/m}^2$ 。荒漠草原土壤容重最大,典型草原居中,草甸草原容重最小,三者都在 0—10 cm、10—20 cm 土层差异性显著( $P < 0.05$ )。荒漠草原容重自表层向下先降低后增加,草甸草原和典型草原容重在剖面上随土层深度增大。草地容重最小值 0.66 出现在叠叠沟表层,最大值 1.54 出现在中宁荒漠草原 60—100 cm 土层。草甸草原平均土壤含水率最大,表层最大,剖面上随着深度增加先降低后有所增加,典型草原居中,荒漠草原最小,

典型草原和荒漠草原剖面含水量均随着深度增加而增大。草甸草原 pH 值最小,典型草原和荒漠草原均较大,三者 pH 值在剖面上随着土层加深而增大。草甸草原全氮密度在剖面上各层均大于典型草原,荒漠草原最小,三者 0—10 cm、10—20 cm 土层差异显著( $P < 0.05$ )。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic soil physiochemical feature

草地类型 Grassland type	土层 Soil layer/cm	容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	酸碱度 pH	含水率 Soil water content/%	SOC/ (g/kg)	有机碳含量 变异系数 CV of SOC	STND/ (kg/m <sup>2</sup> )	样本数/个 Samples
草甸草原 Meadow steppe	0—10	0.87±0.05c	7.98±0.06c	18.46±1.54a	42.22±1.83a	11%	0.35±0.02a	21
	10—20	0.97±0.03c	7.98±0.07b	15.14±0.95a	38.37±1.09a	8%	0.37±0.04a	21
	20—40	1.03±0.04b	8.06±0.09b	14.32±0.17a	31.64±2.37a	20%	0.58±0.03a	21
	40—60	1.04±0.01b	8.12±0.12a	16.76±0.94a	24.97±3.48a	37%	0.50±0.04a	21
	60—100	1.06±0.04b	8.22±0.11a	17.86±1.39a	16.25±2.38a	39%	0.60±0.13a	21
典型草原 Typical steppe	0—10	1.05±0.03b	8.19±0.03b	9.80±1.78a	15.99±0.74b	15%	0.16±0.01b	30
	10—20	1.08±0.03b	8.19±0.03a	10.59±1.59a	14.18±0.86b	19%	0.14±0.01b	30
	20—40	1.12±0.03a	8.27±0.02a	11.29±1.45a	11.55±0.91b	25%	0.24±0.02b	30
	40—60	1.16±0.03a	8.34±0.02a	11.75±1.58a	8.96±0.62b	22%	0.20±0.02b	30
	60—100	1.11±0.04b	8.39±0.02a	12.35±1.48a	6.65±0.44b	21%	0.33±0.03b	30
荒漠草原 Desert steppe	0—10	1.24±0.04a	8.32±0.03a	1.01±0.16b	6.87±0.63c	24%	0.08±0.01c	21
	10—20	1.29±0.03a	8.29±0.04a	1.90±0.34b	6.07±0.56c	24%	0.07±0.01c	21
	20—40	1.22±0.05a	8.26±0.07a	3.42±0.25b	5.67±0.57b	27%	0.13±0.02b	21
	40—60	1.23±0.04a	8.32±0.12a	4.67±0.39b	4.88±0.58b	31%	0.12±0.02b	21
	60—100	1.28±0.07a	8.36±0.12a	5.27±0.54b	4.59±0.66b	38%	0.18±0.03b	21

不同小写字母代表指标在同一层不同草地类型对比的差异显著( $P < 0.05$ ); STND: 土壤全氮密度 Soil total nitrogen density; SOC: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon

## 2.2 草地土壤有机碳含量的垂直分布和空间特征

草甸草原、典型草原、荒漠草原的土壤有机碳含量(SOC)均随深度增加而减小(图 2),表层有机碳含量高,呈现明显的表聚性,这与傅华等<sup>[14, 22—23]</sup>的研究结果一致。有机碳在不同草地土壤中积累的顺序依次是:草甸草原>典型草原>荒漠草原。三种草地有机碳含量在 0—10 cm、10—20 cm 土层差异显著,在 20—100 cm 土层,草甸草原与后两者差异显著( $P < 0.05$ )(表 1)。

草甸草原 SOC 最大值在叠叠沟顶部草甸 0—10 cm 层,为 52.32 g/kg,最小值在南华山剖面 60—100 cm,为 10.42 g/kg,最大值是最小值的 5.02 倍。从表层向下,平均 SOC 含量从 42.22 g/kg 降至 16.25 g/kg,空间变异系数由 11% 增大到 39%。典型草原平均 SOC 含量为(11.47±0.64) g/kg,剖面上从表层的 15.99 g/kg 降至 60—100 cm 土层的 6.65 g/kg,变动范围较草甸草原小。SOC 最大值在涇源香水镇 0—10 cm 土层(25.45 g/kg),最小值在该样方 60—100 cm 土层,仅为 2.35 g/kg,最大值是最小值的 8.55 倍,空间变异系数自表层向下先增大后降低。荒漠草原 SOC 平均含量为(5.62±0.55) g/kg。最大值在同心县下马关的 0—10 cm 土层(10.40 g/kg),最小值出现在中宁 60—100 cm 土层(2.10 g/kg),最大值是最小值的 4.95 倍,空间变异系数自土壤表层

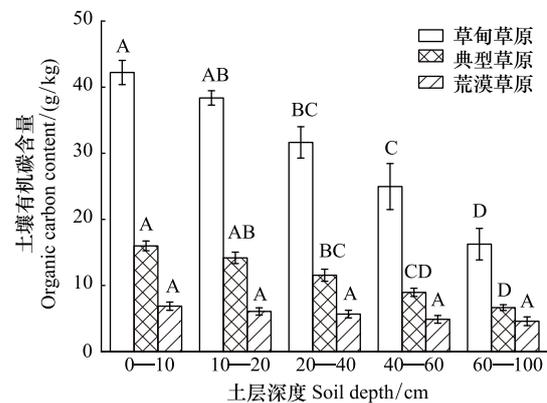


图 2 不同草地类型不同土层土壤有机碳含量的分布规律

Fig. 2 Variations of soil organic carbon content in different soil layers

不同大写字母表示同一草地类型不同土层之间显著差异( $P < 0.05$ )

向下逐渐增大,从 24%到 38%。

区域空间分布上,从研究区南部的六盘山、月亮山等山地经六盘山周边的泾源、隆德、彭阳古城等到中部干旱带的盐池、同心、沙坡头等地,随着降水量减少和温度升高,有机碳含量呈现减少的趋势,从侧面验证了关于温性草原土壤有机碳随着降水量的减少而减少以及随温度升高而降低的特征<sup>[11-13]</sup>。从南向北,随着气候变化,植被类型从草甸草原转变为典型草原、荒漠草原,植被生产力下降,导致土壤有机质的输入速率逐渐降低,形成宁夏草地土壤有机碳空间变化特征,表明土壤有机碳空间分布和气候、植被的地带性规律密切相关。

### 2.3 不同草地类型有机碳密度分布特征

0—100 cm 土层有机碳密度,草甸草原>典型草原>荒漠草原(图 3),草甸草原平均有机碳密度为 $(25.81 \pm 1.83)$  kg/m<sup>2</sup>,分别是温性草原和荒漠草原的 2.41 倍和 4.01 倍。草甸草原和后两者有机碳储量差异非常显著( $P < 0.001$ ),典型草原和荒漠草原有机碳密度差异显著( $P < 0.05$ )。三种草地类型 0—40 cm 土层有机碳储量占整个剖面的 53.51%, 54.08%, 46.66%,表层碳储量高;单位厚度的有机碳密度自表层向下均逐渐降低。空间上,草甸草原和荒漠草原有机碳密度从表层向下随着深度增加变异系数增大,而温性草原变异系数先逐渐增大后降低,20—40 cm 土层最大,分别和各草地类型土壤有机碳含量的空间变异特征一致。三种草地土壤有

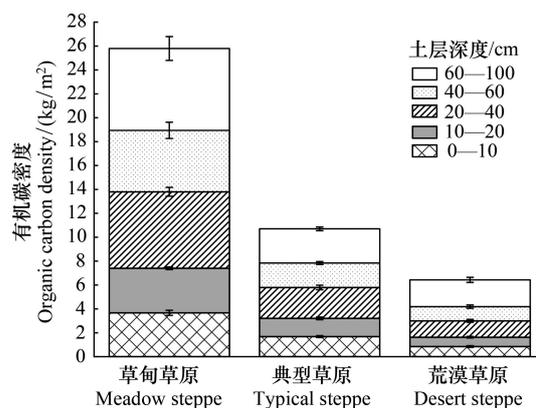


图 3 不同草地类型土壤有机碳密度

Fig. 3 Soil organic carbon densities of different grasslands

机碳密度(SOCD)在 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 土层差异显著,在 40—100 cm 土层,草甸草原有机碳密度和后两者差异显著( $P < 0.05$ )。空间分布上,海拔 2200 米以上的南华山、月亮山和叠叠沟等地有机碳密度最大,六盘山周边的泾源、隆德、彭阳古城次之,海原、西吉、原州区、同心居中,而位于中部干旱带的盐池、中宁、沙坡头、红寺堡等有机碳密度低,平均为 5 kg/m<sup>2</sup>左右。

### 2.4 有机碳密度空间分布差异的影响因素

草地土壤碳库的空间变异主要与气候、土壤质地等因素密切相关,除了自然因素,放牧和围封等人为因素也会导致草地土壤有机碳库的动态变化<sup>[9]</sup>。宁夏自 2000 年起先后实施退耕还林草和禁牧封育等生态保护政策,草地人为干扰减少,自然因素对草地土壤有机碳空间分异起主要作用。利用 SPSS 对所有变量进行柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫检验(K-S),运用 Pearson 分析土壤有机碳和海拔高度、年均温、年降水量、地上生物量、土壤含水量、全氮、pH 值、容重等因素的相关关系(图 4)。研究区 SOCD 与地上生物量、年降水量、海拔高度、全氮等极显著正相关( $P < 0.001$ ),与年均温极显著负相关( $P < 0.001$ ),和土壤含水量显著正相关( $P < 0.01$ ),与土壤容重显著负相关( $P < 0.01$ ),与土壤 pH 值没有明显相关关系。

为揭示不同因素对草地土壤有机碳的影响程度和作用路径,用结构方程模型进行模拟分析。在相关分析的各因子中,土壤有机碳密度和土壤容重显著负相关,但相关程度较低( $R^2 < 0.7$ ),故土壤容重不作为分析因子;土壤有机碳密度和全氮密度有显著正相关关系,碳-氮互相作用对于提高土壤碳氮储量发挥重要作用,碳氮含量共同受气候、植被等自然条件的制约,因此,不将氮作为分析因子。以海拔、年均温、年降水量、地上生物量和土壤含水量为自变量,SOCD 为因变量,通过 Amos 22.0 软件,采用最大似然法建模。通过模型输出的效应值(路径系数)来分析各变量之间的不同作用效果,效应可分解为直接效应、间接效应和总效应。

研究发现(图 5、表 2):海拔高度、年均温、年降水量、地上生物量和土壤含水量等因素对草地土壤有机碳密度空间分布的影响方式和影响程度不同,5 个因子共解释了有机碳空间变异的 91.4%( $R^2 = 0.914$ )。总效应的绝对值由大到小依次为:海拔高度(0.780)>地上生物量(0.559)>年降水量(0.539)>年均温(-0.253)>土壤含水量(0.007),海拔高度、地上生物量、年降水量和土壤含水量与草地土壤有机碳密度正相关,而年均温则和

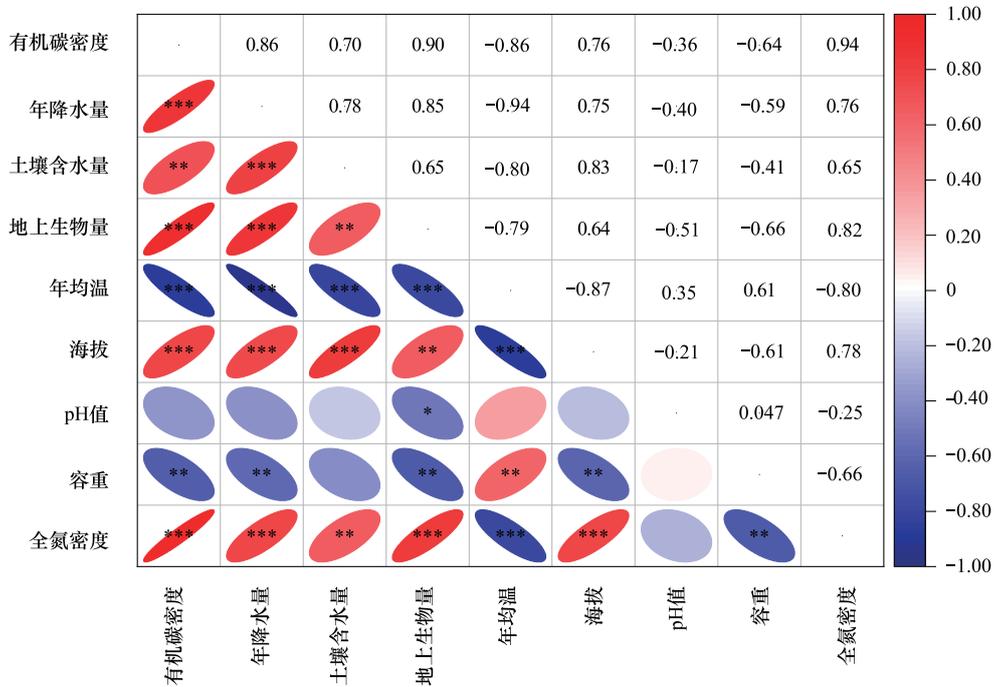


图 4 草地土壤有机碳密度与影响因素之间相关系数

Fig.4 Correlation between organic carbon density and factors

\*  $P \leq 0.05$ ; \*\*  $P \leq 0.01$ ; \*\*\*  $P \leq 0.001$

有机碳密度负相关。直接效应来看:生物量的直接效应最高(0.559),降水量次之(0.279),海拔为0.227。而间接效应的绝对值:海拔高度(0.554)>降水量(0.260)>年均温(-0.253)>含水量(0.007)。总的来看,生物量对草地 SOCD 的直接作用最明显,草地有机碳主要来源于草地植物,受初级生产量的输入过程与分解过程的制约。海拔高度对有机碳分布的总效应和间接效应最大,即海拔高度引起降水和温度等要素区域分异进而对 SOCD 产生影响。降水量对 SOCD 正向作用也较大,降水量一方面直接影响土壤有机碳形成,同时通过生物量和土壤含水量间接对 SOCD 产生效应;温度对有机碳具有负面效应,更多是通过作用于地上生物量间接影响 SOCD;土壤含水量对 SOCD 呈正向效应,仅解释 SOCD 空间变异的 0.7%。宁夏草地有机碳分布的空间格局,是和植被的带状分布及相应的气候条件密切相关。宁夏南部山区受东南湿气流影响大,加上地势抬升带来地形雨的增加,年降水量较大且温度较低,草地生物量大,利于草地有机碳的积累。而在中部干旱带,降水量少,温度高,草地生产力低,不利于有机碳的积累。

表 2 草地土壤有机碳影响因素的总效应、直接效应和间接效应

Table 2 Direct, indirect and total effects of influencing factors on grassland SOCD

影响因素 Factors	总效应 Total effects	直接效应 Direct effects	间接效应 Indirect effects
海拔 Altitude	0.780	0.227	0.554
地上生物量 Aboveground biomass	0.559	0.559	—
年降水量 Annual precipitation	0.539	0.279	0.260
年均温 Annual mean temperature	-0.253	—	-0.253
土壤含水量 Soil water content	0.007	—	0.007

SOCD:土壤有机碳密度 Soil organic carbon density

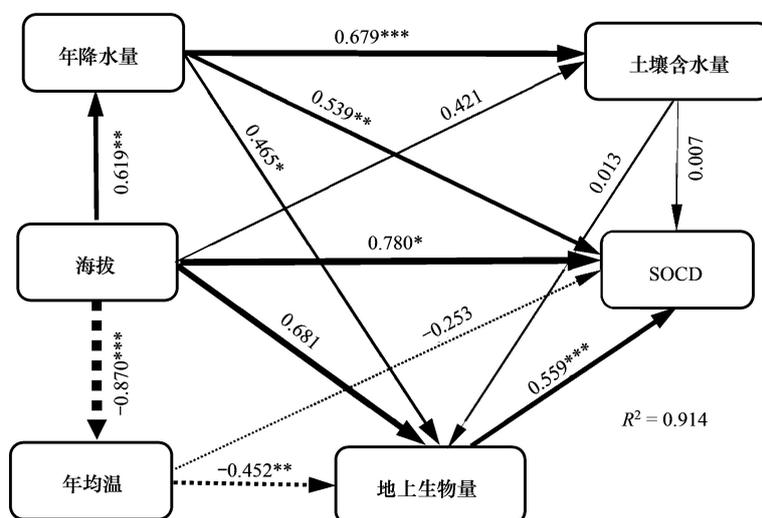


图5 草地土壤有机碳密度影响因素路径分析

Fig.5 Pathway analysis of soil organic carbon densities in grassland

SOC D: 土壤有机碳密度 Soli organic carbon density; 实线和虚线分别代表正路径系数和负路径系数, 线粗细代表路径系数相对大小, 数字代表总作用效应;  $R^2$  表示变量方差被解释比例; \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$

### 3 讨论

#### 3.1 宁夏草地土壤有机碳与其他地区草地之间的对比

宁夏草甸草原有机碳含量高, 且空间变异系数小, 温性草原有机碳含量和空间变异程度居中, 荒漠草原有机碳含量最低且空间变异系数大。垂直剖面上, 自表层向下有机碳含量和密度逐渐降低。宁夏草地有机碳含量高于刘伟等<sup>[12]</sup>计算的黄土高原草地的平均值(草甸 14.05 g/kg、典型草原 4.24 g/kg、荒漠草原 1.47 g/kg), 一是样地选取差异性, 刘伟等选取的宁夏荒漠草原代表样地红寺堡由于干旱少雨, 有机碳含量处于宁夏荒漠草原中较低水平, 远低于同心下马关等地的荒漠草原; 二是时间累积效应, 刘伟等取样在 2009 年, 在国家“退耕还林草”和宁夏“禁牧封育”政策影响下, 人为干扰减少, 草地植被恢复, 有机碳含量变化。和内蒙古锡林郭勒草原<sup>[13]</sup>相比, 典型草原值基本一致 (11.57 g/kg), 草甸草原和荒漠草原值高于锡林郭勒草原的对应值 (15.07 g/kg、1.78 g/kg)。宁夏草地有机碳密度平均值为 14.25 kg/m<sup>2</sup>, 这与张利等<sup>[24]</sup>基于第二次全国土壤普查数据和陆地生态系统模型 (TEM) 得到的中国草地土壤有机碳密度值 14.30 kg/m<sup>2</sup> 非常接近, 略高于王穗子等<sup>[25]</sup>的研究结果 12.22 kg/m<sup>2</sup>。宁夏草甸草原的有机碳密度为 25.61 kg/m<sup>2</sup>, 略低于青藏高原海北站<sup>[22]</sup>草甸土壤平均有机碳密度 26.86 kg/m<sup>2</sup>。这是因为, 青藏高原海北站海拔更高且气候寒冷湿润, 有利于土壤有机碳的积累。荒漠草原 0—20 cm 土层平均碳密度为 1.63 kg/m<sup>2</sup>, 略高于新疆阿勒泰地区荒漠草地土壤 (0—20 cm) 有机碳密度 1.06 kg/m<sup>2</sup><sup>[26]</sup>, 二者有机碳密度的差异和两个区域不同的气候、植被条件和草地利用状况等密切相关。

#### 3.2 草地有机碳空间分异的主要影响因素和作用机制

草地土壤碳库的空间分布主要受温度、降水、地上生物量、海拔等因素的综合影响, 且各种因素间存在着交互作用。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。据国际地圈生物圈计划 (IGBP) 研究<sup>[27]</sup>, 土壤中的有机碳都来源于植物, 其根系或枝条死亡残体通过腐殖化过程形成土壤有机质, 植物生长过程中向根际释放根系分泌物或脱离物, 植被自然恢复过程中, 二者的数量和质量及其环境条件改变, 从而影响有机碳的储存量、组成和稳定性。故草地的生物量大小直接影响土壤有机碳的输入稳定性。Ruiz-Colmenero 等<sup>[28]</sup>研究表明高植被覆盖的地区可以有效保护土壤, 促进土壤有机碳的累积。海拔

高度对有机碳空间分异的总效应最大,随着海拔高度和地理位置的改变,研究区内降水量和年均温呈现明显的空间分异,植被和有机碳密度随之变化,故海拔对有机碳的影响更多体现在间接效应上。降水量对草地有机碳显著正向作用<sup>[13-14,24]</sup>,研究区降水量一方面直接影响 SOCD,同时通过影响草地生物量和土壤含水量间接对 SOCD 产生积极效应。降水能改善土壤水分状况,促进植物生长,降水的淋溶作用促进地表上层有机质进入土壤,加速土壤有机碳的输入和积累。已有研究表明中国草地生态系统碳循环受降水<sup>[9,29]</sup>影响显著,降水是中国北方温带草地生态系统生产力最主要的影响因子<sup>[30-31]</sup>。温度对草地有机碳影响在不同区域表现为正向<sup>[24]</sup>或负向<sup>[12-14]</sup>,研究区温度对草地有机碳密度具有负向影响,即年均温越高则有机碳密度小。主要缘于温度变化作用于植物光合速率、植物根系呼吸以及土壤微生物活动,进而影响生态系统碳库的输入和输出量<sup>[24]</sup>。在半干旱区草地生态系统中,降水少且温度升高会增加蒸发量,导致土壤水分损失,抑制植物生长,植被生物量降低,同时增强微生物分解作用<sup>[32]</sup>,从而使有机碳含量降低。Burke 等<sup>[33]</sup>在美国中部大平原草地上研究认为,土壤有机碳含量随降雨量和土壤粘粒含量增加而增加,随温度增加而降低。相对于其他因素,土壤含水量对 SOCD 的影响不显著,这可能由于土壤含水量易受到坡面、坡度、降水和温度等因素的影响,故需要长期定点监测方能进一步探讨其对有机碳的影响机制。研究区有机碳和全氮呈极显著正相关关系。氮元素是陆地生态系统的限制性肥力元素,土壤的碳固定受到生态系统中氮可利用性的限制,而水分缺乏会影响氮的循环和氮的可利用性。从宁夏荒漠草原到温性草原和草甸草原,土壤水分条件变好,提高了氮的可利用性和碳氮的固定。草地土壤碳氮耦合机制有待进一步深入研究。

### 3.3 人类活动等对草地土壤有机碳的影响

伴随着人口增加与资源需求增大,草地开垦、过度放牧等对草地生态系统造成严重影响。草地开垦为农田会造成土壤有机碳的严重损失,导致原来土壤中碳素总量减少 30%—50%<sup>[34]</sup>。Bouwman<sup>[35]</sup>指出,温带地区草地开垦为农田后 SOC 损失 20%—40%。我国内蒙古草甸草原植被下的黑钙土不同层次有机碳因农垦损失达 34%—38%<sup>[36]</sup>。重度放牧会破坏草地植被和土壤水肥条件,降低土壤有机碳含量<sup>[37]</sup>。人类活动对草地的积极作用主要表现为退耕还林草、围栏封育、人工种草等生态保护措施。宁夏于 2000 年和 2003 年先后实施退耕还林草工程和草原“禁牧封育”以遏制草原退化保护草原生态环境。根据全国第二次土壤普查资料《宁夏土种志》和《宁夏土壤》,退耕还林草工程实施前,研究区草甸草原、典型草原和荒漠草原的平均有机碳含量分别为:25.79 g/kg、6.66 g/kg 和 2.92 g/kg,2021 年三类草地有机碳含量较之前分别增加 19.00%、72.23%和 92.44%。宁夏草地有机碳分布主要受降水量和与其密切相关的草地生物量的影响,近 20 年来宁夏降水量增加<sup>[38-39]</sup>,草地人为干扰减少,草地碳储存功能显著。

## 4 结论

(1) 宁夏不同草地类型土壤有机碳含量和密度不同,草甸草原>典型草原>荒漠草原。在土壤剖面上,表层有机碳含量高于深层土壤,且表聚性显著,单位厚度有机碳密度自表层向深层逐渐降低。土壤有机碳密度分布存在较强的空间变异性,自南部山区向中部干旱带,土壤有机碳含量和密度均呈现下降态势。草甸草原和荒漠草原土壤有机碳空间变异程度自表层向深层逐渐增大,温性草原变异系数自表层向下先逐渐增大后降低,20—40 cm 土层空间变异系数最大。

(2) 年降水量、年均温、地上生物量、海拔高度、土壤水分等因素是草地土壤有机碳空间分异的主要影响因素。草地土壤有机碳密度与地上生物量、年降水量、海拔高度、土壤含水量等正相关( $P < 0.001$ ),与年均温负相关( $P < 0.001$ )。路径分析表明,各因素对土壤有机碳的作用方式和影响程度有差异。生物量对宁夏草地土壤有机碳密度的直接作用最显著,随着草地生物量增加,土壤有机碳密度明显增大。海拔高度对土壤有机碳密度的间接作用最大,海拔通过影响降水和温度格局作用于土壤有机碳密度。年降水量对土壤有机碳密度的直接影响和间接影响系数均较大。温度主要通过影响草地生物量进而影响土壤有机碳密度。

(3) 宁夏草地土壤有机碳含量呈现上升态势。近 20 年来,宁夏降水量增多,草地采取“禁牧封育”等生态

恢复措施,人类干扰减少,草地生态系统碳汇作用明显。草地土壤有机碳分布格局具有一定尺度效应,不同研究尺度草地土壤有机碳分布的主导因素有所差异,定量分析不同尺度草地碳汇机制以及在未来气候条件下如何合理进行草地生态系统碳汇管理,有待进一步深入研究。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Diffenbaugh N S, Field C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science*, 2013, 341(6145): 486-492.
- [ 2 ] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [ 3 ] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [ 4 ] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, Cheng J M. Ecosystem carbon and nitrogen accumulation after grazing exclusion in semiarid grassland. *PLoS One*, 2013, 8(1): e55433.
- [ 5 ] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10-21.
- [ 6 ] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [ 7 ] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [ 8 ] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [ 9 ] 方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566-576.
- [ 10 ] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C, He J S, Zhu B. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599.
- [ 11 ] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 699-704.
- [ 12 ] 刘伟, 程积民, 高阳, 程杰, 梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.
- [ 13 ] 常帅, 于红博, 曹聪明, 马梓策, 刘月璇, 李想. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1355-1366.
- [ 14 ] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 万长贵. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2004, 24(3): 469-476.
- [ 15 ] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 常天军, 李鹏, 沈振西, 钟志明. 念青唐古拉山东南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及影响因素. *地理科学*, 2009, 29(3): 385-390.
- [ 16 ] 丰思捷, 赵艳云, 李元恒, 闫勇智, 韩芳. 内蒙古典型草原表层土壤有机碳储量差异及影响因素. *中国草地学报*, 2019, 41(2): 116-120.
- [ 17 ] 王云英, 裴薇薇, 辛莹, 郭小伟, 杜岩功. 2008—2015 年高寒草甸土壤有机碳变化特征及影响因素解析. *中国草地学报*, 2021, 43(12): 47-54.
- [ 18 ] 朱猛, 冯起, 张梦旭, 秦燕燕. 祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素. *草地学报*, 2018, 26(6): 1322-1329.
- [ 19 ] 李龙, 姜丽娜, 白建华. 半干旱区土壤有机碳空间变异及其影响因素的多尺度相关分析. *中国水土保持科学*, 2018, 16(5): 40-48.
- [ 20 ] 李学斌, 张义凡, 陈林, 刘学东, 李月飞, 杨新国. 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究. *西北植物学报*, 2017, 37(8): 1635-1644.
- [ 21 ] 于双, 陶利波, 许冬梅, 许爱云, 刘金龙. 封育对荒漠草原土壤有机碳及其活性组分的影响. *草业学报*, 2019, 28(2): 190-196.
- [ 22 ] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. *地理学报*, 2006, 61(7): 720-728.
- [ 23 ] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 郭玉华. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 362-367.
- [ 24 ] 张利, 周广胜, 汲玉河, 白永飞. 中国草地碳储量时空动态模拟研究. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(10): 1392-1405.
- [ 25 ] 王穗子, 樊江文, 刘帅. 中国草地碳库估算差异性综合分析. *草地学报*, 2017, 25(5): 905-913.
- [ 26 ] 刘慧霞, 董乙强, 崔雨萱, 刘星宏, 何盘星, 孙强, 孙宗玖. 新疆阿勒泰地区荒漠草地土壤有机碳特征及其环境影响因素分析. *草业学报*, 2021, 30(10): 41-52.
- [ 27 ] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science*, 1998, 280(5368): 1393-1394.
- [ 28 ] Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Eldridge D J, Marques M J. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena*, 2013, 104: 153-160.
- [ 29 ] 韩彬, 樊江文, 钟华平. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 553-562.
- [ 30 ] Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Climatic Change*, 2004, 67(2-3): 237-246.
- [ 31 ] 高添. 内蒙古草地植被碳储量的时空分布及水热影响分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013: 1-81.
- [ 32 ] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [ 33 ] Burke I C, Yonker C M, Parton W J, Cole C V, Flach K, Schimel D S. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 800-805.
- [ 34 ] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 161-193.
- [ 35 ] Bouwman A F. *Soils and Greenhouse Effect*. Chichester: John Wiley & Sons, 1990, 61-127.
- [ 36 ] 王艳芬, 陈佑忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 545-551.
- [ 37 ] Smith S W, Vandenberghe C, Hastings A, Johnson D, Pakeman R J, Wal R, Woodin S J. Optimizing carbon storage within a spatially heterogeneous upland grassland through sheep grazing management. *Ecosystems*, 2014, 17(3): 418-429.
- [ 38 ] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 候静, 胡悦. 近 30a 气候变暖对宁夏植被的影响. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2095-2106.
- [ 39 ] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 王劲松, 王芝兰, 王圣杰, 张宇. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征. *生态学报*, 2015, 35(5): 1359-1370.