

DOI: 10.5846/stxb202207152024

杨明新, 杨秀春, 赵云, 黄青东智, 李成先, 曹文强, 陈昂, 谷强, 李泽宇, 王守兴. 黄河源园区高寒草地碳储量估算及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(9): 3546-3557.

Yang M X, Yang X C, Zhao Y, Huang Q D Z, Li C X, Cao W Q, Chen A, Gu Q, Li Z Y, Wang S X. Estimated carbon storage and influencing factors of alpine grassland in the source region of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3546-3557.

## 黄河源园区高寒草地碳储量估算及其影响因素

杨明新<sup>1,2</sup>, 杨秀春<sup>2,\*</sup>, 赵 云<sup>1</sup>, 黄青东智<sup>1</sup>, 李成先<sup>1</sup>, 曹文强<sup>1</sup>, 陈 昂<sup>2</sup>, 谷 强<sup>1</sup>,  
李泽宇<sup>1</sup>, 王守兴<sup>1</sup>

1 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 西宁 810000

2 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100089

**摘要:** 高寒草地碳储量及其影响因素研究是认识青藏高原草地生态系统乃至陆地生态系统碳循环和气候变化的关键之一。利用 2021 年 8 月上旬地面调查数据与同期高分 6 号遥感数据建立回归关系, 在反演研究区植被地上、地下生物量碳密度和 0—40cm 土壤层有机碳密度基础上, 估算了黄河源园区高寒草地有机碳储量, 并通过路径分析探讨了土壤理化性质对碳密度的影响驱动机制。结果表明: (1) 2021 年黄河源园区地上生物量、地下生物量、0—40cm 土壤层碳密度分别为 37.65g/m<sup>2</sup>、1305.28g/m<sup>2</sup>、4769.11g/m<sup>2</sup>; 总碳储量为 100.44Tg (1Tg=10<sup>12</sup>g), 植被层和土壤层碳储量分别分为 22.06Tg、78.38Tg, 占总碳密度的 21.96%、78.04%。(2) 黄河源园区高寒草甸和高寒草原两种草地类型地上生物量碳密度分别为 41.27g/m<sup>2</sup>、30.76g/m<sup>2</sup>; 地下生物量碳密度分别为 1661.41g/m<sup>2</sup>、618.74g/m<sup>2</sup>; 0—40cm 土壤层有机碳密度分别为 5790.99g/m<sup>2</sup>、2804.04g/m<sup>2</sup>; 研究区碳密度总体呈现南高北低的空间分布现状, 分布格局与地表植被类型分布特点较为吻合; (3) 路径分析表明, 研究区土壤理化性质与草地碳密度关系密切, 其中地上生物量碳密度主要受土壤全磷含量和土壤含水率驱动, 地下生物量碳密度主要受土壤全氮含量和容重驱动, 土壤有机碳密度主要受地下生物量碳密度、土壤容重和 pH 值驱动。

**关键词:** 碳储量; 高寒草地; 黄河源园区; 路径分析; 高分遥感数据

## Estimated carbon storage and influencing factors of alpine grassland in the source region of the Yellow River

YANG Mingxin<sup>1,2</sup>, YANG Xiuchun<sup>2,\*</sup>, ZHAO Yun<sup>1</sup>, HUANG Qingdongzhi<sup>1</sup>, LI Chengxian<sup>1</sup>, CAO Wenqiang<sup>1</sup>, CHEN Ang<sup>2</sup>, GU Qiang<sup>1</sup>, LI Zeyu<sup>1</sup>, WANG Shouxing<sup>1</sup>

1 Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Xining 810000, China

2 School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100089, China

**Abstract:** The study of alpine grassland carbon storage and its influencing factors is one of the keys to understand the carbon cycle and climate change of grassland ecosystem and even terrestrial ecosystem on the Qinghai Tibet Plateau. In this paper, the regression relationship between the ground survey data in early August 2021 and the remote sensing data of Gaofen-6 in the same period was established. Based on the inversion of the above-ground and below-ground biomass carbon density of vegetation and the organic carbon density of 0—40 cm soil layer in the study area, the organic carbon storage of alpine grassland in the source region of the Yellow River was estimated, and the driving mechanism of the impact of soil physical and chemical properties on carbon density was discussed through path analysis. The results showed that: (1) In 2021, the above-ground biomass, below-ground biomass and carbon density of 0—40 cm soil layer in the source region of

基金项目: 2021 年度全国草原资源调查项目 (DD20211601); 国家自然科学基金项目 (41371125)

收稿日期: 2022-07-15; 采用日期: 2022-12-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Yangxiuchun@bjfu.edu.cn

the Yellow River were  $37.65 \text{ g/m}^2$ ,  $1305.28 \text{ g/m}^2$  and  $4769.11 \text{ g/m}^2$ , respectively. The total carbon storage was  $100.44 \text{ Tg}$  ( $1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$ ). The carbon storage of vegetation layer and soil layer was  $22.06 \text{ Tg}$  and  $78.38 \text{ Tg}$ , accounting for 21.96% and 78.04% of the total carbon density respectively. (2) The above-ground biomass carbon density of alpine meadow and alpine steppe in the source region of the Yellow River was  $41.27 \text{ g/m}^2$  and  $30.76 \text{ g/m}^2$  respectively; The below-ground biomass carbon density was  $1661.41 \text{ g/m}^2$  and  $618.74 \text{ g/m}^2$  respectively; The organic carbon density of 0—40 cm soil layer was  $5790.99 \text{ g/m}^2$  and  $2804.04 \text{ g/m}^2$  respectively; The spatial distribution of carbon density in the study area was generally high in the south and low in the north, and the distribution pattern was consistent with the distribution characteristics of surface vegetation types. (3) Path analysis showed that the physical and chemical properties of soil in the study area were closely related to the carbon density of grassland. The above-ground biomass carbon density was mainly driven by soil total phosphorus content and soil moisture, the below-ground biomass carbon density was mainly driven by soil total nitrogen content and soil bulk, and the soil organic carbon density was mainly driven by the below-ground biomass carbon density, soil bulk and pH.

**Key Words:** carbon storage; alpine grassland; the source region of the Yellow River; path analysis; Gao fen-6 remote sensing data

草地作为我国第二大陆地生态系统碳库,其碳储量占整个生态系统碳库的 40.4%<sup>[1]</sup>,在陆地生态系统碳循环中发挥着重要的作用。青藏高原作为全球气候变化敏感区,同时也是具有高碳储功能的高寒草地典型分布区,准确掌握高寒草地生态系统碳储量,深入分析其影响因素,对于揭示碳循环在全球变化中的作用具有重要科学意义,同时也是面向国家“双碳目标”中陆地生态系统碳汇强度核算的战略需要<sup>[2]</sup>。

草地碳储量包括地上生物量碳储量、凋落物生物量碳储量、地下根系生物量碳储量<sup>[3]</sup>和土壤有机碳储量<sup>[4]</sup>,准确估算不同层次的碳储量是掌握草地生态系统碳储量的关键<sup>[5-6]</sup>。许多学者在国家尺度上先后开展过比较全面的草地生态系统碳储量估算,但不同的研究结果存在较大的差异<sup>[1,6-11]</sup>。在典型区也有不少学者做过相关研究<sup>[12-14]</sup>,尤其是高寒草地分布区,由于气候恶劣、采样难度大、成本高、地下生物量的采集方法不一致等,导致不同的研究得到的不同草地类型的根冠比差异较大<sup>[8,15-16]</sup>。近年来遥感在草地地上生物量估算中应用较为广泛,该方法具有时效强、成本低、大面积估算、连续观测的优势<sup>[17-18]</sup>。传统的草地地上生物量遥感估算是基于绿色生物量与遥感植被指数密切相关的特点,通过构建地面和遥感结合的统计模型来实现<sup>[19]</sup>;地下生物量是在地上生物量估算的基础上,结合地下生物量与地上生物量的根冠比或者建立关系模型得到<sup>[7,10-11]</sup>,目前由于草地存在空间异质性,根冠比推算的地下生物量一方面精度不能很好的满足需求,另一方面也不能较好的展示空间上的分布格局<sup>[20]</sup>。此外,也有学者使用遥感方法估算地下生物量以及土壤有机碳<sup>[1,12,21-23]</sup>,但空间分辨率不够高。因此,应用高分遥感数据分别估算草地地上、地下和土壤三者的碳储量来综合研究草地碳储量,是一种节约成本且保障精度的方法,同时也是较好的展示碳储量空间分布格局的方法。

目前针对草地生物量的影响因素研究较多,大多数研究分析了地上生物量与气候因素的关系<sup>[24]</sup>。也有学者分析了地上生物量与地理位置、地形的关系,并将这些因素作为变量参与到模型反演中<sup>[25-26]</sup>。此外,也有学者研究了土壤砂粒、黏粒、土壤水分与生物量的关系<sup>[24,27]</sup>。但以上多数研究仅针对地上生物量与地上环境因子做了相关性研究,深入探讨生物量与地下土壤理化性质的关系研究尚显不足。

三江源地区高寒草地是我国草地碳储量研究的热点地区之一,近些年来为有效应对三江源地区草地退化问题,国家实施了一系列的生态保护工程,草地退化得到有效遏制,草地的碳储碳汇功能有效提升<sup>[28]</sup>。黄河源园区作为三江源国家级自然保护区核心腹地,同时也是黄河发育的源头,草地生态功能极其重要。本研究以三江源国家公园黄河源园区的高寒草地为研究对象,利用 2021 年地面调查数据,结合野外调查同期的高分 6 号(GF-6)遥感数据,通过草地地上生物量碳、地下生物量碳以及土壤有机碳的遥感监测分析,来综合估算

研究区的草地碳储量,并分析其空间格局以及主要影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究以三江源国家公园的黄河源园区为研究区(图 1),黄河源园区位于青海省果洛藏族自治州玛多县境内,地理坐标  $97^{\circ}1'20''\text{E}$ — $99^{\circ}14'57''\text{E}$ ,  $33^{\circ}55'5''\text{N}$ — $35^{\circ}28'15''\text{N}$ ,包括三江源国家级自然保护区的扎陵湖、鄂陵湖和星星海两个保护分区,面积  $1.90 \text{万 km}^2$ 。涉及玛多县的黄河乡、扎陵湖乡和玛查理镇,共 19 个行政村。全区平均海拔在  $4500\text{m}$  以上,属高原大陆性气候,年均气温  $-4^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $303.9\text{mm}$ ,全年无四季之分,仅有冷季和暖季之分,自然条件十分恶劣,高寒缺氧,生态脆弱。黄河源园区草地面积  $1.42 \text{万 km}^2$ ,主要分布高寒草原和高寒草甸两种草地类型。

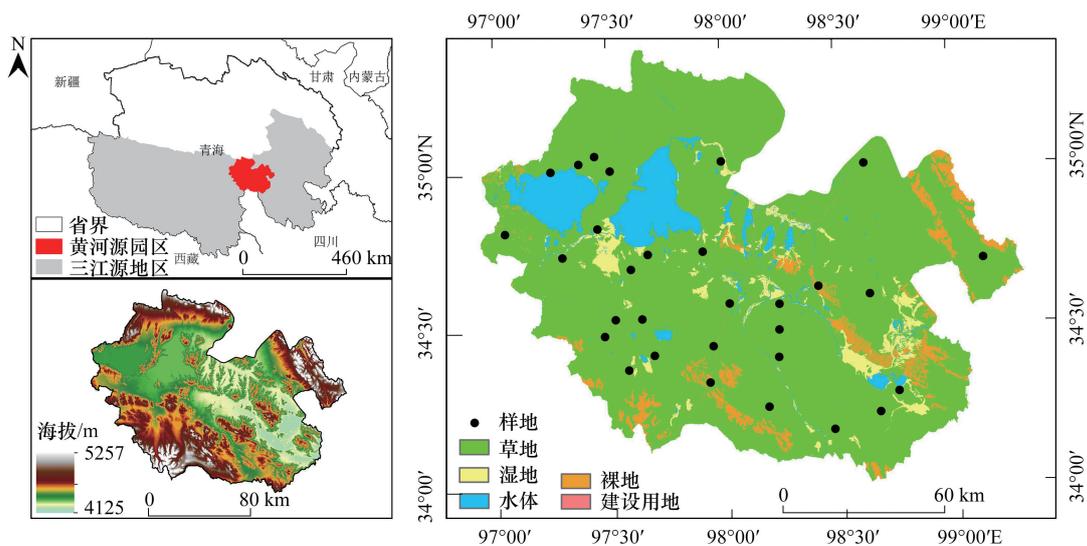


图 1 研究区样地分布图

Fig.1 Distribution map of sample plot in the study area

### 1.2 地面数据采集和分析

在 2021 年 8 月上旬研究区草地植被生长盛期时,选择生境条件、植物群落种类组成和结构、利用方式和利用强度等相对一致的典型草地类型地段设置样地,共设置 30 个样地(图 1),每个样地设置 5 个重复的  $1\text{m} \times 1\text{m}$  样方,样方间距不小于  $100\text{m}$ ,在样方内调查所有出现草地植物物种的频度、多度、高度、盖度,收集枯落物后齐地面刈割了地上生物量。在收集地上生物量后的样方内,利用根钻分层钻取  $0-10\text{cm}$ 、 $10-20\text{cm}$ 、 $20-30\text{cm}$ 、 $30-40\text{cm}$  四个不同深度的地下根系生物量以及土壤样品,每个样方中取 5 钻并同层混合,用  $2\text{mm}$  孔径的筛子筛选,并用水冲洗后的根系(包括死根)作为地下生物量,取适量筛出的土壤作为样品进行土壤理化性质分析。同时,用环刀钻取不同深度的土壤,测定容重。室内将地上、地下生物量风干至恒重后称重,其中地下生物量是利用根钻的内径计算得到钻取面积并进行换算。

室内对不同分层的土壤样品进行了测试分析,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化滴定法测定,全氮采用定氮仪测试,全磷、全钾采用 ICP 光谱分析仪测定,土壤含水量采用容重样品湿重和干重数据计算。

研究区实测 30 个样地 150 个样方数据,将每个样地 5 个样方的实测数据计算平均值代表该样地的实测值。经过样方数据整理筛选后,地上生物量实测数据有 30 个,地下生物量剔除两个不合格数据后有 28 个,土壤数据 30 个。

### 1.3 遥感数据来源与预处理

2021 年 GF-6 WFV 的分辨率 16m 的遥感数据通过中国资源卫星数据中心 (<http://36.112.130.153:7777/DSSPlatform/>) 获取。为了使影像数据的成像时间与地面调查时间差异最小,筛选了成像时间(8 月 1 日—8 月 26 日)与野外调查时间(7 月 30 日—8 月 19 日)最接近,云量 20% 以下的影像共计 6 景。对影像进行辐射定标、FLASSH 大气校正、正射校正、影像镶嵌、投影转换等预处理。利用 GF-6 号影像数据包含的红、绿、蓝和近红外 4 个波段,计算得到归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)、修正后土壤调节植被指数(Modified soil-adjusted vegetation index, MSAVI)(表 1)。根据调查样方的时间和空间信息,提取与样方对应的植被指数并构建地面和遥感匹配数据集。

表 1 植被指数计算方法

Table 1 Calculation formula of vegetation index

植被指数 Vegetation Index	计算公式 Formula	特点 Character	参考文献 References
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$	反映地表植被状况,但是在植被高覆盖地区容易饱和。	[29]
EVI	$\text{EVI} = \frac{2.5(\text{NIR} - \text{Red})}{\text{NIR} + 6\text{Red} - 7.5\text{Blue} + 1}$	能够减少残留气溶胶污染、不易饱和。	[30]
MSAVI	$\text{MSAVI} = \frac{2\text{NIR} + 1 - \sqrt{(2\text{NIR} + 1)^2 - 8(\text{NIR} - \text{Red})}}{2}$	适用于裸土比例高、植被稀疏或者植物中叶绿素含量低的情况。	[31]

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; EVI: 增强型植被指数 Enhanced vegetation index; MSAVI: 修正后土壤调节植被指数 Modified soil-adjusted vegetation index; NIR: 近红外波段; Red: 红光波段; Blue: 蓝光波段

### 1.4 其他数据来源与处理

草地数据从 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com/>) 下载了 2020 的 30m 空间分辨率的地表覆盖数据,从数据中心掩膜提取了研究区草地分布范围,计算了草地覆盖面积和碳储量。此外,从 NASA 数据中心 (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>) 下载了 ASTER30 分辨率的 DEM 数据作为研究区海拔空间分布的参考数据。

数据采用 Excle 2013 进行梳理,遥感数据预处理运用 ENVI 5.3 进行处理,模型反演与制图运用 ArcGIS 10.7 和 RStudio 4.0,土壤理化性质对不同草地类型的碳密度的影响路径使用了 Amos 24 进行了路径分析。

### 1.5 碳密度计算

植被地上生物量、地下根系生物量和枯落物生物量的碳密度计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$C_b = B \times C_f \quad (1)$$

式中,  $C_b$  为植被生物量碳密度 ( $\text{g}/\text{m}^2$ );  $B$  为生物量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ );  $C_f$  为植被生物量中总碳含量 (%)。

通过实验室植物样品测试分析得到研究区地上植被总碳含量均值为 31.52%, 地下根系总碳含量均值为 29.62%。此外,通过样地调查统计,研究区枯落物生物量均值为  $5.86\text{g}/\text{m}^2$ , 由于枯落物量少,误差大于总量,因此本研究忽略了凋落物碳储量。

土壤有机碳密度计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$\text{SOC}_d = C_i \times \theta_i \times (1 - \delta_i) \times D_i \times 100 \quad (2)$$

式中,  $i$  为土层,  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳的平均含量 (%),  $\theta_i$  为第  $i$  层的土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\delta_i$  为第  $i$  层中砾石含量体积百分比 (%),  $D_i$  为第  $i$  层土壤厚度 (cm)。

### 1.6 碳密度模型构建及碳储量计算

利用地面调查的地上、地下生物量数据分别与相关系数最高的植被指数建立回归模型,通过精度评价选取最优模型,然后反演研究区地上、地下生物量,再利用采集的植物地上、地下样品测试的有机碳含量,分别与对应的生物量相乘,得到每个像元尺度上的碳密度,结合 GIS 空间统计分析功能,分别统计研究区全区以及不

同的草地类型的碳储量。土壤碳储量是根据每个采样点有机碳密度与相关系数最高的植被指数建立回归模型,选取最优模型反演土壤有机碳密度,再利用 GIS 统计研究区以及不同的草地类型的土壤有机碳碳储量。

### 1.7 模型精度评价

植被生物量和土壤碳储量的最优反演模型通过决定系数 ( $R^2$ ) 和均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 来进行精度评价,主要采用留一法交叉验证。其计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: $y_i$  为实测生物量; $f_i$  为估算生物量; $\bar{y}$  为样本平均值; $n$  为样本个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 地面实测碳密度数据统计分析

针对地面调查的实测碳密度数据,结合不同草地类型进行描述性统计和分析(表 2)。其中,高寒草甸和高寒草原的地上生物量碳密度分别为  $47.79\text{g/m}^2$  和  $32.35\text{g/m}^2$ ,地下生物量碳密度分别为  $1990.93\text{g/m}^2$  和  $508.62\text{g/m}^2$ ,土壤碳密度分别为  $71139.94\text{g/m}^2$  和  $22684.23\text{g/m}^2$ 。两种草地类型的碳密度差异较大(表 2),高寒草甸碳密度最小值、最大值、平均值和标准差均要高于高寒草原,而且两种草地类型的地下生物量碳密度均要小于土壤碳密度。

表 2 实测数据描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of measured data

类别 Class		最小值 Minimum/ ( $\text{g/m}^2$ )	最大值 Maximum/ ( $\text{g/m}^2$ )	平均值 Mean/ ( $\text{g/m}^2$ )	标准差 SD/ ( $\text{g/m}^2$ )	变异系数 CV
地上生物量碳密度	高寒草甸	19.87	80.45	47.79	14.75	0.31
Carbon density of above-ground biomass	高寒草原	18.96	51.62	32.35	10.40	0.32
地下生物量碳密度	高寒草甸	94.65	3792.84	1990.93	1323.98	0.67
Carbon density of below-ground biomass	高寒草原	97.78	1391.02	508.62	361.13	0.71
土壤有机碳密度	高寒草甸	20986.81	142567.38	71139.94	37092.05	0.52
Soil organic carbon density	高寒草原	12493.16	40286.04	22684.23	7067.09	0.31

SD:标准差 Standard deviation; CV:变异系数 Coefficient of variation

### 2.2 草地碳密度建模与反演

根据地面样方空间位置提取了 NDVI、EVI、MSAVI,构建了地面样方生物量和对应空间位置的各种植被指数的数据集。为了分析三种植被指数与地上生物量(Above-ground biomass, AGB)、地下生物量(Below-ground biomass, BGB)和 40cm 深度土壤有机碳密度(Soil organic carbon density, SOC)的相关性,利用 Pearson 法进行相关性分析。结果表明三种植被指数均与生物量有极显著的相关性( $p < 0.01$ ),其中 NDVI 的相关系数高于其他两种植被指数。因此,选择 NDVI 与地面调查的 AGB、BGB、SOC 建立回归模型。

本研究分别建立了线性、指数、对数以及幂指数回归模型,并利用留一交叉验证法进行精度评价<sup>[32]</sup>。通过评价各模型的决定系数  $R^2$  和均方根误差 RMSE(表 3),优选出反演 AGB 的最优模型为指数模型,其  $R^2$  为 0.49, RMSE 为  $33.74\text{g/m}^2$ ,反演 BGB 的最优模型为指数模型,其  $R^2$  为 0.72, RMSE 为  $1692.63\text{g/m}^2$ ,反演 SOC 的最优模型为指数模型,其  $R^2$  为 0.82, RMSE 为  $1586.98\text{g/m}^2$ 。

表 3 反演模型及其精度表

Table 3 Inversion model and precision table

变量 Variable	模型 Model	$R^2$	均方根误差 RMSE/ ( $g/m^2$ )	变量 Variable	模型 Model	$R^2$	均方根误差 RMSE/ ( $g/m^2$ )
AGB-NDVI	$y = 0.0267x + 35.48$	0.52	34.13	SOC-NDVI	$y = 2.47x - 3674.39$	0.77	1777.58
	$y = 57.506e^{0.0002x}$	0.49	33.74		$y = 698.081e^{0.0005x}$	0.82	1586.98
	$y = 81.278\ln(x) - 528.95$	0.45	36.57		$y = 7417.44\ln(x) - 55077$	0.66	2174.71
	$y = 0.6529x^{0.6446}$	0.43	35.21		$y = 0.0178x^{1.52}$	0.74	1854.04
BGB-NDVI	$y = 2.8313x - 5274.62$	0.79	1995.62				
	$y = 246.42e^{0.0007x}$	0.72	1692.63				
	$y = 8556.1\ln(x) - 64600$	0.68	2473.49				
	$y = 0.00004x^{0.22}$	0.68	1971.31				

AGB-NDVI:地上生物量与归一化植被指数 Above-ground biomass and normalized vegetation index;BGB-NDVI:地下生物量与归一化植被指数 Below-ground biomass and normalized vegetation index;SOC-NDVI:土壤有机碳密度与归一化植被指数 Soil organic carbon density and normalized vegetation index

为更好地评价优选模型的反演效果,本研究利用实测数据和模型预测数据进行了比较。整体而言 AGB、BGB、SOC 的实测值与预测值有较好的线性关系(图 2)。AGB 的估测解释度为 0.53, RMSE 为 34.87 $g/m^2$ ; BGB 的估测解释度为 0.86, RMSE 为 1528.39 $g/m^2$ ;SOC 的估测解释度为 0.83, RMSE 为 1455.25 $g/m^2$ 。通过图 3 可以看出,在 AGB 的模型估测值中位数低于实测值中位数,估测数据整体稍低估了实际值,AGB 在 100 $g/m^2$ 左右的区域明显高估了实际值;从 BGB 和 SOC 模型估测值与实测值对比看,BGB 在 8000 $g/m^2$ 左右的区域稍有高估,SOC 在 10000 $g/m^2$ 左右的区域稍有低估,但整体上看 BGB 和 SOC 模型拟合能力较为突出,能较好的反映实际情况。

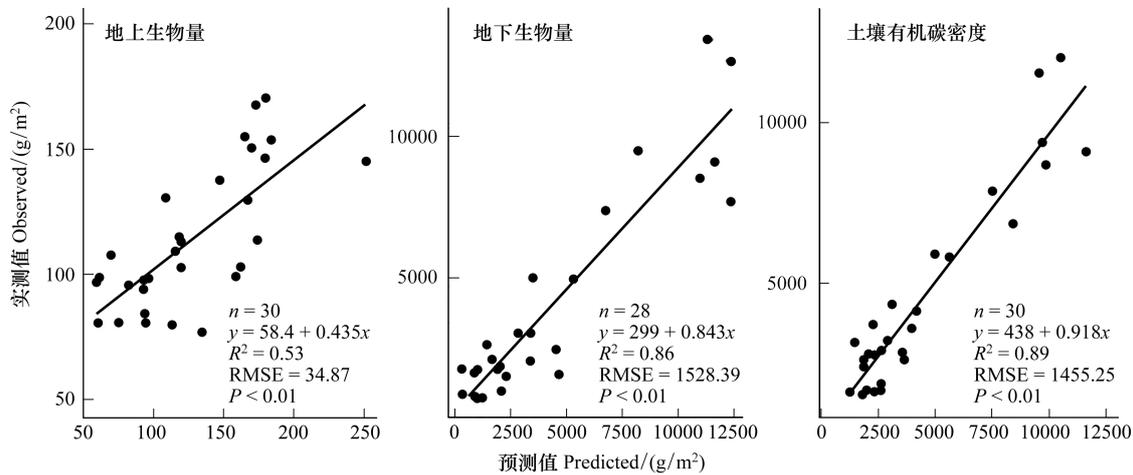


图 2 实测值与最优模型预测值的关系

Fig.2 The relationship between the measured value and the predicted value of the optimal model

### 2.3 黄河源区高寒草地碳密度和碳储量特征

利用 2.2 构建的最优模型反演生成了地上生物量、地下生物量、土壤有机碳以及草地总碳的碳密度空间分布图(图 4)。通过 GIS 汇总分析(表 4),研究区总碳储量为 100.44Tg,平均碳密度为 8321.59 $g/m^2$ ;其中,地上生物量碳储量为 0.61Tg,占总碳储量的 0.61%,平均碳密度为 37.65 $g/m^2$ ;地下生物量碳储量为 21.45Tg,占总碳储量的 21.36%,平均碳密度为 1305.28 $g/m^2$ ;0—40cm 深度土壤有机碳储量为 78.38Tg,占总碳储量的 78.04%,平均碳密度为 4769.11 $g/m^2$ 。

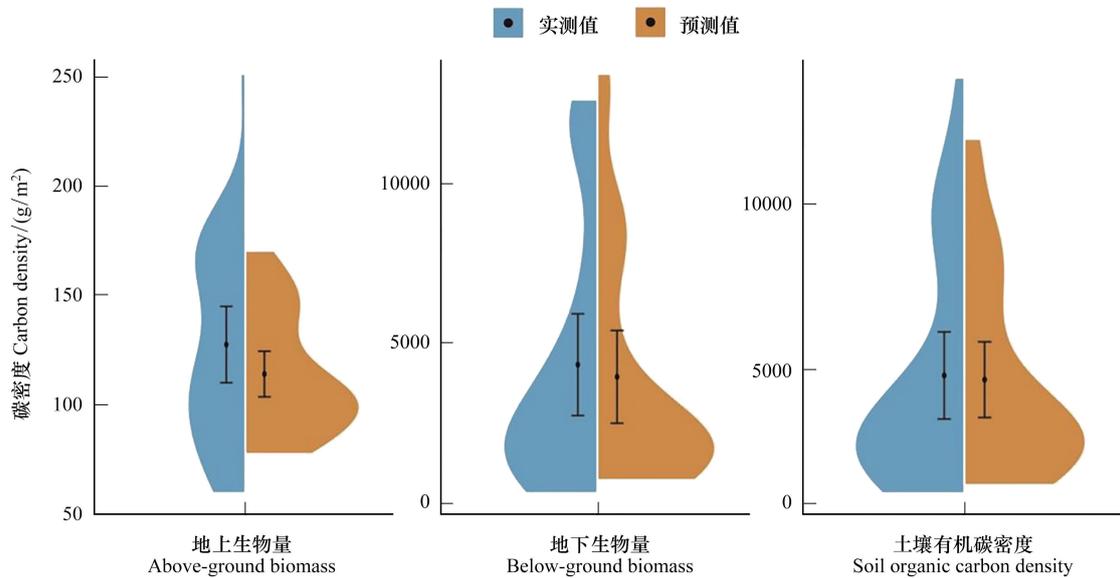


图3 模型估测能力分析,其中蓝色图示为实际观测值,黄色图示为最优模型预测值

Fig.3 Model estimation capability analysis, where the blue graph shows the actual observation value and the yellow graph shows the optimal model prediction value

从空间分布格局来看(图4),研究区草地碳密度整体表现为南高北低的分布现状,高碳储区主要分布在黄河源南部及中部地区,低碳储区主要分布在北部及沿黄河流域,这种分布现状跟研究区植被类型的地带性分布特点比较吻合,表现为研究区高海拔地区除冰川裸岩以外,主要以高寒草甸为主,植被盖度高、水分充足,模型反演的碳储量较高,而低海拔地区主要以高寒草原为主,植被较为稀疏,地表干旱,模型反演的碳储量也比较低。

表4 碳储量汇总表

Table 4 Summary of carbon storage

类别 Class	碳密度 Carbon density/(g/m <sup>2</sup> )				碳储量 Carbon storage/Tg	占比 Proportion/%
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD		
地上生物量 Above-ground biomass	18	91	37.65	12.06	0.61	0.61
地下生物量 Below-ground biomass	76	18585	1305.28	1445.29	21.45	21.36
土壤有机碳 Soil organic carbon	698	35343	4769.11	3783.05	78.38	78.04
研究区总碳 Total carbon in the study area	94	95676	8321.59	8563.72	100.44	100

为进一步分析研究区高寒草甸和高寒草原两种草地类型的碳密度差异,提取分析了研究区高寒草甸和高寒草原两种草地类型的碳密度分布状况。统计分析表明高寒草甸的地上、地下、土壤有机碳密度显著高于高寒草原(图5),高寒草甸的地上、地下、土壤碳密度及总碳密度分别为 41.27g/m<sup>2</sup>、1661.41g/m<sup>2</sup>、5790.99g/m<sup>2</sup>、7493.67g/m<sup>2</sup>,高寒草原的地上、地下、土壤碳密度及总碳密度分别为 30.76g/m<sup>2</sup>、618.74g/m<sup>2</sup>、2804.04g/m<sup>2</sup>、3453.54g/m<sup>2</sup>。其中,以地下生物量差异最为显著,高寒草甸地下生物量是高寒草原的 2.69 倍,其次为土壤碳密度的差异,高寒草甸土壤碳密度是高寒草原的 2.07 倍。就地上、地下、土壤有机碳密度而言,高寒草甸土壤碳密度占比为 77.28%,高寒草原土壤碳密度占比为 81.19%,可见,无论是高寒草甸还是高寒草原碳绝大多数存储在土壤中。

#### 2.4 土壤理化性质对草地碳密度的影响因素分析

为深入探讨土壤理化性质对不同草地类型的地上、地下生物量碳密度和土壤有机碳密度的驱动机制,本

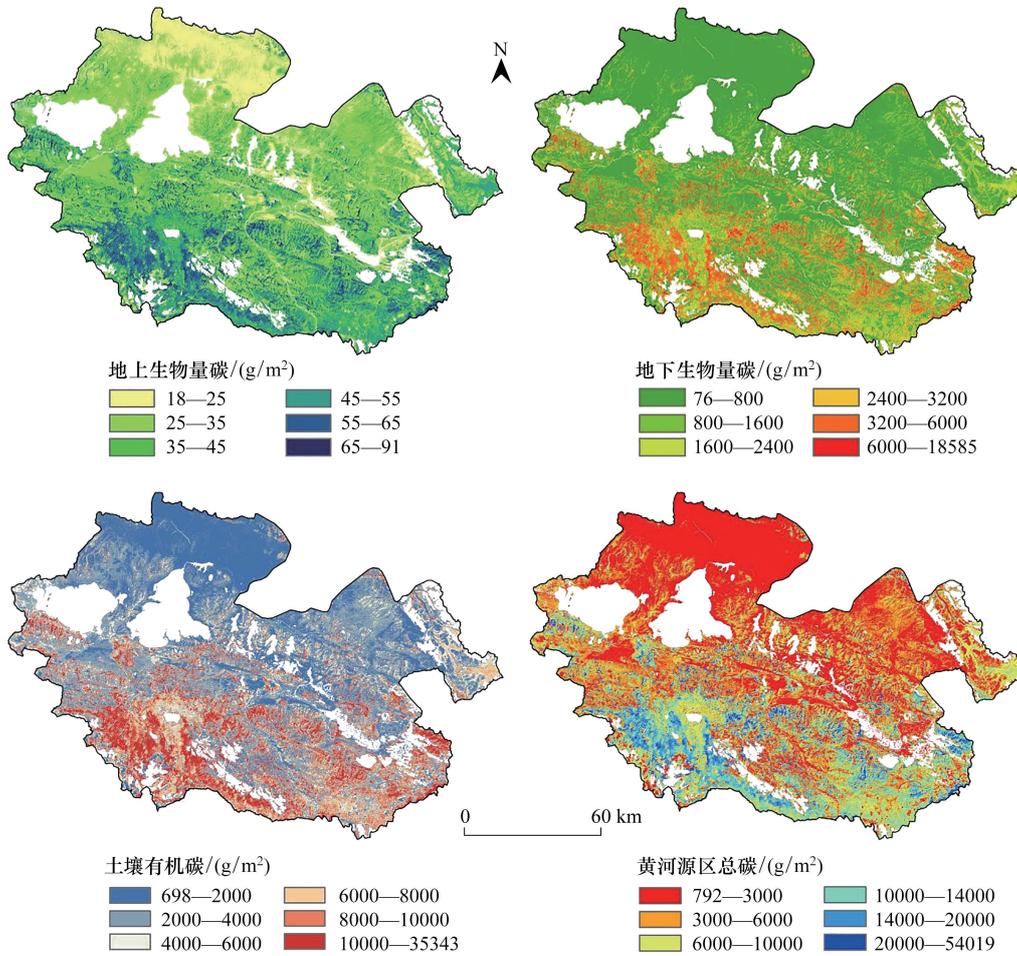


图 4 碳密度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of carbon density

文采用结构方程模型分析了各观测变量之间的因果关系。从结果来看(图 6),在高寒草甸中地上生物量碳密度 AGBC 的各因子解释率为 12%,其中全磷含量  $TP$  (-0.32)显著负向影响,土壤含水率  $SW$  (0.38)显著正向影响。地下生物量碳密度 BGBC 的各因子解释率为 38%,其中全氮含量  $TN$  (0.22)显著正向影响,土壤容重  $SBD$  (-0.45)极显著负向影响。土壤有机碳密度 SOC 的各因子解释率为 69%,其中地下生物量碳密度 AGBC (0.31)极显著正向影响,土壤容重  $SBD$  (-0.47)极显著负向影响, $pH$  (-0.34)极显著负向影响。

在高寒草原中地上生物量碳密度 AGBC 的各因子解释率为 12%,其中全磷含量  $TP$  (-0.32)显著负向影响,土壤含水率  $SW$  (0.39)显著正向影响。地下生物量碳密度 BGBC 的各因子解释率为 35%,其中全氮含量  $TN$  (0.23)显著正向影响,土壤容重  $SBD$  (-0.46)极显著负向影响。土壤有机碳密度 SOC 的各因子解释率为

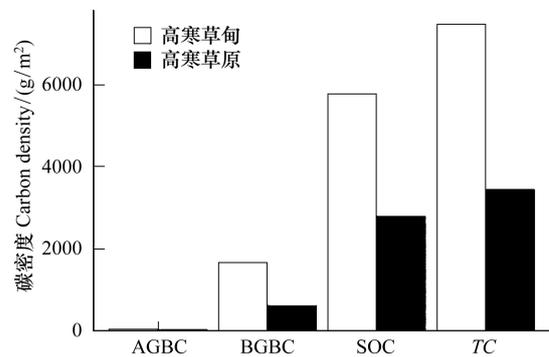


图 5 不同草地类型碳密度对比

Fig.5 Comparison of carbon density of different grassland types

AGBC:地上生物量碳密度 Above-ground biomass carbon density; BGBC:地下生物量碳密度 Below-ground biomass carbon density; SOC:土壤有机碳密度 Soil organic carbon density; TC:研究区总碳密度 Total carbon density of study area

70%,其中地下生物量碳密度 BGBC (0.30) 极显著正向影响,土壤容重 SBD (-0.46) 极显著负向影响,pH (-0.32) 极显著负向影响。

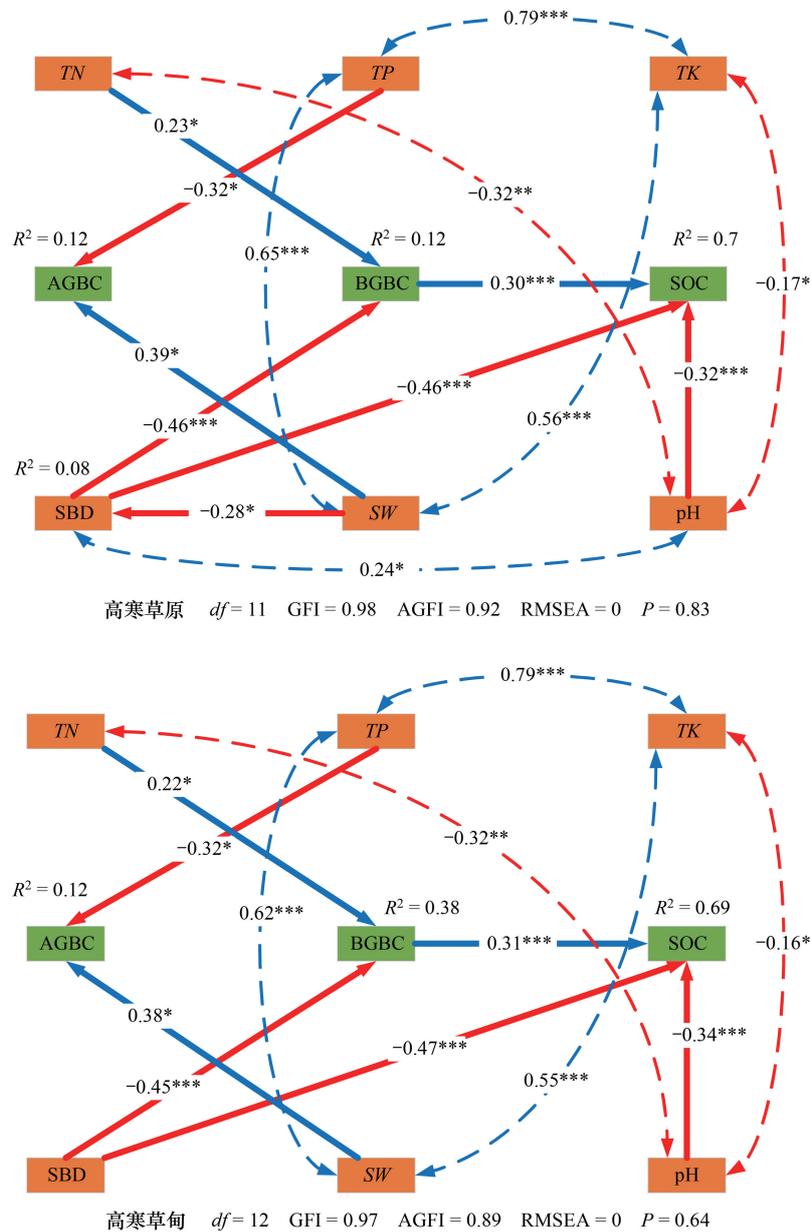


图 6 不同草地类型碳密度与土壤特性的结构方程模型

Fig.6 Structural equation models of carbon density and soil properties in different grassland types

TN:全氮含量 Total nitrogen content; TP:全磷含量 Total phosphorus content; TK:土壤全钾含量 Total potassium content; SBD:土壤容重 Soil bulk density; SW:土壤含水率 Soil moisture; pH:土壤酸碱度 Acidity and alkalinity level; df:自由度 Degrees of freedom; GFI:拟合优度指数 Goodness of fit index; AGFI:调整拟合优度指数 Adjusted goodness of fit index; RMSEA:近似误差均方根 Root mean square error of approximation; 蓝色实线单向箭头表示观测变量间的显著正向影响; 红色实线单向箭头表示观测变量间的显著负向影响; 蓝色虚线双向箭头表示残差间的显著正向影响, 红色实线双向箭头表示残差间的显著负向影响; \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$

从两种草地类型碳密度驱动机制来看,各因子驱动机制基本相似,地上生物量碳密度 AGBC 主要受土壤含水率 SW 和土壤全磷含量 TP 驱动,地下生物量碳密度 BGBC 主要受土壤容重 SBD 和土壤全氮含量 TN 驱动,土壤有机碳密度 SOC 主要受地下生物量碳密度 BGBC、土壤容重 SBD 和 pH 值驱动。

### 3 讨论

#### 3.1 基于遥感反演的草地碳储量可靠性分析

基于面积加权平均方法估算碳储量是比较传统的方法<sup>[6]</sup>,文中进一步利用地面调查数据采用面积统计的方法计算了地上生物量、地下生物量、土壤碳以及研究区总碳储量(表 5),结果与本研究基于遥感反演方法的结果比较接近。面积统计方法的碳储量稍大于遥感反演方法的碳储量(图 7),表现为面积统计方法的总碳储量、地上生物量碳储量、地下生物量碳储量和土壤有机碳储量分别较遥感反演方法的碳储量偏大了 1.57Tg、0.08Tg、0.66Tg 和 0.83Tg。表明遥感反演估算碳储量的方法结果可靠。此外,基于面积统计的碳储量只能得出总值,而遥感反演方法不仅能计算出碳储量,而且能更好的展示草地空间异质性带来的碳密度的空间差异。

表 5 基于面积统计的黄河源区碳储量

Table 5 Carbon storage in the source region of the Yellow River based on area statistics

类别 Class	面积 Area/m <sup>2</sup>	碳密度 Carbon density/(g/m <sup>2</sup> )		碳储量 Carbon storage/Tg	占比 Proportion/%
		平均值 Mean	标准差 SD		
地上生物量 Above-ground biomass	16.45×10 <sup>9</sup>	42.02	15.46	0.69	0.69
地下生物量 Below-ground biomass		1344.24	1273.14	22.11	22.01
土壤有机碳 Soil organic carbon		4815.02	3539.17	79.21	78.86
研究区总碳 Total carbon in the study area		6201.28	4827.77	102.01	100

在植被碳密度的相关研究中,苏淑兰等<sup>[12]</sup>2015 年基于实测研究得到三江源地区高寒草甸和高寒草原地上生物量平均碳密度为 43.52g/m<sup>2</sup>、33.73g/m<sup>2</sup>,地下生物量平均碳密度分别为 2215g/m<sup>2</sup>、1327g/m<sup>2</sup>,两种草地类型的地上生物量碳密度与本研究结果较为接近,但地下生物量碳密度明显高于本研究。张琛悦等<sup>[33]</sup>2022 年基于第二次土壤普查和草地资源清查数据,估算了青海省不同功能区的碳密度,研究得到三江源地区高寒草甸平均碳密度为 17.41kg/m<sup>2</sup>,高寒草原平均碳密度为 16.97kg/m<sup>2</sup>,这个结果远大于本研究结果。YANG 等<sup>[22]</sup>2008 年在青藏高原高寒草地 0—30cm 深度土壤有机碳研究中,用 EVI 植被指数估算的碳密度为 3.1kg/m<sup>2</sup>,用 NDVI 指数估算的碳密度为 3.93kg/m<sup>2</sup><sup>[34]</sup>,苏淑兰等<sup>[12]</sup>研究得到三江源草地 0—30cm 深度土壤有机碳密度在 5.24—13.20kg/m<sup>2</sup>之间,本研究用 NDVI 估算的 0—40cm 深度土壤有机碳密度为 4.8kg/m<sup>2</sup>,结果

略高于 YANG 等的结果,并与苏淑兰等最低值的研究结果接近。误差原因可能来自于三方面,一是遥感数据的差异,本研究利用 16m 分辨率的 GF-6 号遥感数据,而 YANG 等使用的是 MODIS 遥感数据,空间分辨率不同,MODIS 数据由于分辨率较粗可能存在混合像元的影响;二是研究时段存在差异,YANG 等研究时段为 2008 年以来,期间三江源地区实施了一系列草地生态修复工程,草地植被逐渐向好,碳储量存在快速累积的过程,本研究是在 2021 年进行的采样,在草地保护的背景下碳储量已经累积到一定的阶段;三是采样深度的差异,前两者的研究采用深度均为 0—30cm,而本研究的采样深度为 0—40cm。总之,由于不同研究者所采用的估算方法、数据来源、研究区域、土层厚度等不尽相同,得到的结果存在明显的差异。

本研究通过野外采集的样品实测分析,得到草本植物地上部分及地下根系平均含碳量均为 32%、30%,枯

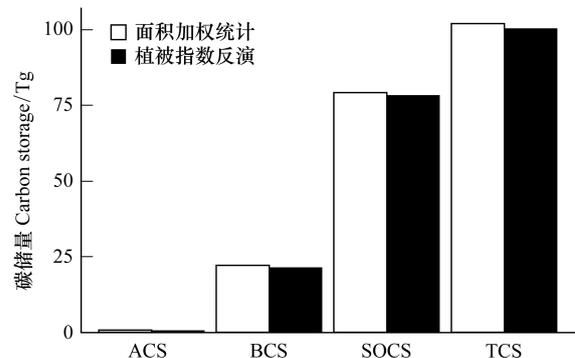


图 7 两种方法估算结果的比较

Fig.7 Comparison of estimation results of the two methods

ACS:地上生物量碳储量 Above-ground biomass carbon storage;BCS:地下生物量碳储量 Below-ground biomass carbon storage;SOCS:土壤有机碳储量 Soil organic carbon storage;TCS:研究区总碳储量 Total carbon storage in the study area

落物含碳量为 31%。哈琴<sup>[35]</sup>测得的内蒙古地区草地植被、枯落物及根系含碳量分别为 41%、24% 和 31%。从以上数据看,草本植物地上部分、枯落物和地下根系含碳含量均小于 45%,而且不同地区的植被类型、气候、土壤条件不同,测得的植被的不同组份的碳含量也不同。因此,如果采用常用的 0.45 碳含量转换系数<sup>[18]</sup>来估算生物量碳储量,势必存在一定的高估。

### 3.2 土壤理化性质对高寒草地碳密度的影响分析

本文分析得到土壤理化性质对草地不同组分的碳密度影响不同,地上生物量碳密度主要受土壤含水率正向驱动,受土壤全磷含量负向驱动。土壤含水率的增加提高了植被覆盖度和生物量,从而积累更多的生物量碳<sup>[36]</sup>,李若玮<sup>[37]</sup>、王吉鹏<sup>[38]</sup>等人在青藏高原研究得到与本研究一致的结果:土壤全磷含量与生物量碳密度呈负相关关系,本研究从调查数据的氮磷比推断,研究区大多数地区植被可能受到氮限制较强,植被在氮限制较强的情况下如果磷越多,氮吸收就会越困难,从而抑制了植物生长<sup>[39-40]</sup>;本研究得到地下生物量碳密度主要受土壤全氮含量正向驱动,受土壤容重负向驱动,这与鄢燕<sup>[20]</sup>、李若玮<sup>[37]</sup>、厉方祯<sup>[41]</sup>等在高寒草地上的研究结果吻合,土壤容重越大,表明土壤越紧实,不利于根系的生长,也不利于土壤微生物生存和分解,致使地下生物量碳密度、土壤有机碳密度积累较少。另外 pH 值的增加会抑制土壤有机碳密度的积累,研究区作为黄河源水源涵养地土壤偏碱性,pH 值越大则土壤碱性越强,不利于土壤微生物的活性和数量,从而减缓了有机质的分解,减低了土壤有机碳密度的积累,这也与张亚亚<sup>[42]</sup>在青藏高原研究的结果一致。此外,王荔等<sup>[43]</sup>在研究青藏高原土壤碳储量的过程中提出利用植被指数构建简单的估算模型会降低碳储量的估算精度,土壤性质、地理因素、气候因素、生物因素等与青藏高原土壤碳储量表现出一定的空间分布规律,加入更多的环境变量是有效提高模型估算精度的主要方式之一。今后在大尺度的研究中可以考虑增加地面调查的数据,尝试利用公开的土壤数据做为变量,结合遥感植被指数、地形、气候数据等多变量来反演地上、地下生物量以及土壤有机碳<sup>[27]</sup>。

## 4 结论

本文利用地面实测数据结合国产 GF-6 号卫星遥感数据建模估算了黄河源园区高寒草地碳储量,研究得到黄河源园区总碳储量为 100.44Tg,其中地上生物量碳储量为 0.61Tg,地下生物量碳储量为 21.45Tg,土壤有机碳储量为 78.38Tg,该方法与面积加权估算的碳储量(102.01Tg)结果差异不大,说明遥感反演方法估算碳储量具有可行性。分析得到研究区高寒草甸的地上、地下、土壤有机碳密度显著高于高寒草原,研究区草地碳密度整体表现为南高北低的空间分布格局,这与研究区南部主要是高寒草甸,北部主要分布高寒草原的植被分布特征比较吻合。此外,路径分析表明土壤理化性质对草地不同组分的碳密度影响不同,其中地上生物量碳密度主要受土壤全磷含量和土壤含水率驱动,地下生物量碳密度主要受土壤全氮含量和容重驱动,土壤有机碳密度主要受地下生物量碳密度、土壤容重和 pH 值驱动,在下步多源遥感反演草地碳储的研究中可以将土壤理化性质作为有效变量参与建模,来提高模型反演的精度。

### 参考文献(References):

- [1] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [2] 杨元合,石岳,孙文娟,常锦峰,朱剑霄,陈蕾伊,王欣,郭焱培,张宏图,于凌飞,赵淑清,徐亢,朱江玲,沈海花,王媛媛,彭云峰,赵霞,王襄平,胡会峰,陈世苹,黄玫,温学发,王少鹏,朱彪,牛书丽,唐志尧,刘玲莉,方精云. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.
- [3] 卢欣石. 内蒙古草原碳汇现状与发展潜力. *地球*, 2021, (4): 28-33.
- [4] 任继周,林慧龙. 草地土壤有机碳储量模拟技术研究. *草业学报*, 2013, 22(6): 280-294.
- [5] 樊江文,钟华平,梁颺,石培礼,于贵瑞. 草地生态系统碳储量及其影响因素. *中国草地*, 2003, 25(6): 51-58.
- [6] 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.
- [7] Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements

- of above- and below-ground biomass. *CLIMATIC CHANGE*, 2008, 86(3/4): 375-396.
- [ 8 ] Ma A N, He N P, Yu G R, Wen D, Peng S L. Carbon storage in Chinese grassland ecosystems; influence of different integrative methods. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 21378.
- [ 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 ] 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.
- [ 11 ] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Tan K, Tao S. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): GB2002.
- [ 12 ] 苏淑兰. 三江源草地生态系统碳储量及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2015: 69-69.
- [ 13 ] 官惠玲, 樊江文, 钟华平. 海南岛天然草地碳分布格局及碳储量估算. 2018 中国草学会年会论文集. 成都: 中国草学会, 2018: 9-9.
- [ 14 ] 辛晓平, 丁蕾, 程伟, 朱晓昱, 陈宝瑞, 刘钟龄, 何广礼, 青格勒, 杨桂霞, 唐华俊. 北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2757-2768.
- [ 15 ] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 韩彬. 中国草地地下生物量研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1095-1101.
- [ 16 ] 马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 王秋风, 彭舜磊. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 769-776.
- [ 17 ] 邢晓语, 杨秀春, 徐斌, 金云翔, 郭剑, 陈昂, 杨东, 王平, 朱立博. 基于随机森林算法的草原地上生物量遥感估算方法研究. *地球信息科学学报*, 2021, 23(7): 1312-1324.
- [ 18 ] 金云翔, 徐斌, 杨秀春, 李金亚, 高添, 于海达, 马海龙. 草原生物量及碳密度遥感估算——以内蒙古正蓝旗为例. *中国农学通报*, 2013, 29(5): 11-16.
- [ 19 ] 杨元合. 青藏高原高寒草地生态系统碳氮储量[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [ 20 ] 鄢燕, 张建国, 张锦华, 范建容, 李辉霞. 西藏那曲地区高寒草地地下生物量. *生态学报*, 2005, 25(11): 2818-2823.
- [ 21 ] Xia J Z, Ma M N, Liang T G, Wu C Y, Yang Y H, Zhang L, Zhang Y J, Yuan W P. Estimates of grassland biomass and turnover time on the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1): 014020.
- [ 22 ] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, 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.
- [ 23 ] Ding L, Li Z W, Shen B B, Wang X, Xu D W, Yan R R, Yan Y C, Xin X P, Xiao J F, Li M, Wang P. Spatial patterns and driving factors of aboveground and belowground biomass over the eastern Eurasian steppe. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149700.
- [ 24 ] Liang T G, Yang S X, Feng Q S, Liu B K, Zhang R P, Huang X D, Xie H J. Multi-factor modeling of above-ground biomass in alpine grassland: a case study in the Three-River Headwaters Region, China. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 164-172.
- [ 25 ] Ge J, Hou M J, Liang T G, Feng Q S, Meng X Y, Liu J, Bao X Y, Gao H Y. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground biomass and its driving factors in North China over the past 20 years. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154226.
- [ 26 ] Yu H, Wu Y F, Niu L, Chai Y F, Feng Q S, Wang W, Liang T G. A method to avoid spatial overfitting in estimation of grassland above-ground biomass on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107450.
- [ 27 ] Luo C, Zhang X L, Meng X T, Zhu H W, Ni C P, Chen M H, Liu H J. Regional mapping of soil organic matter content using multitemporal synthetic Landsat 8 images in Google Earth Engine. *CATENA*, 2022, 209: 105842.
- [ 28 ] Shao Q Q, Cao W, Fan J W, Huang L, Xu X L. Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 183-204.
- [ 29 ] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [ 30 ] Liu H Q, Huete A. A Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [ 31 ] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, Kerr Y H, Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119-126.
- [ 32 ] 冯琦胜, 高新华. Excel 在留一法交叉验证实验教学中的作用. *实验科学与技术*, 2015, 13(2): 49-51.
- [ 33 ] 张琛悦, 赵霞, 辛玉春, 唐文家, 王蕾. 青海省草地生态系统碳储量及其分布特征. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(2): 286-292.
- [ 34 ] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, Ma W H, Su S S, Tang Z Y. Soil inorganic carbon stock in the Tibetan alpine grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): GB4022.
- [ 35 ] 哈琴. 赛罕乌拉国家级自然保护区不同草地类型碳储量研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012: 45-45.
- [ 36 ] 张法伟, 李红琴, 李文清, 王军邦, 仪律北, 罗方林, 张光茹, 王春雨, 杨永胜, 李英年. 三江源国家公园表层土壤有机碳和全氮密度的特征评估和等级区划. *生态学报*, 2022, 42(14): 5593-5602.
- [ 37 ] 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 韩国栋, 孙建. 基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析. *草地学报*, 2021, 29(S1): 43-51.
- [ 38 ] 王吉鹏, 吴艳宏. 磷的生物有效性对山地生态系统的影响. *生态学报*, 2016, 36(5): 1204-1214.
- [ 39 ] 林丽, 李以康, 张法伟, 杜岩功, 郭小伟, 李婧, 刘淑丽, 曹广民. 高寒矮蒿草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2013, 33(17): 5245-5251.
- [ 40 ] 刘天源, 周天财, 孙建, 王毅, 叶冲冲. 青藏高原东缘沙化草甸植物氮磷的分配和耦合特征. *草业科学*, 2021, 38(2): 209-220.
- [ 41 ] 厉方桢, 钟华平, 欧阳克蕙, 赵小敏, 李愈哲. 基于机器学习的阿勒泰地区草地地下生物量估测与数字制图. *草业学报*, 2022, 31(8): 13-23.
- [ 42 ] 张亚亚. 青藏高原植物-土壤碳氮磷化学计量特征及其对环境因子的响应[D]. 天津: 天津师范大学, 2017.
- [ 43 ] 王荔, 曾辉, 张扬建, 赵广, 陈宁, 李军祥. 青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3506-3515.