

陕西黄河湿地自然保护区碳储量估算

徐干君¹ 吴胜义¹ 李伟² 赵欣胜² 聂磊超² 唐希颖² 翟夏杰^{2*}

¹国家林业和草原局西北调查规划院, 西安 710048; ²中国林业科学研究院湿地研究所湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 生态保护与修复研究所, 北京 100091

摘要 湿地生态系统的固碳及其调节气候等生态系统服务十分重要, 准确评估黄河流域自然保护区的碳储量有助于碳中和研究和区域生态保护与高质量发展。该研究基于野外采样和室内分析, 并结合遥感数据, 评估了陕西黄河湿地省级自然保护区光滩和典型自然植被区的地上植被和0–50 cm土壤碳储量。碳储量评估区总面积13 086.52 hm², 占保护区面积的23.87%。结果表明, 高草植被的地上碳储量显著高于低草植被和矮灌丛植被, 其碳密度分别为496.73、23.45和138.38 g·m⁻²; 土壤0–50 cm的碳密度为7.15–11.98 kg·m⁻², 高草植被区的土壤碳储量(5.02 × 10⁵ t)显著高于光滩(2.09 × 10⁵ t)、低草植被区(3.40 × 10⁵ t)和矮灌丛植被区(1.45 × 10⁵ t); 最终核算出陕西黄河湿地省级自然保护区典型植被区的地上植被和0–50 cm土壤总碳储量约为1.22 × 10⁶ t, 其中光滩区、低草植被区、矮灌丛植被区、高草植被区的碳储量占比分别为17.13%、27.95%、12.13%和42.79%。研究结果可为黄河中游自然湿地的保护修复和碳汇功能提升研究提供一定的数据支持。

关键词 湿地; 碳储量; 植被; 土壤

徐干君, 吴胜义, 李伟, 赵欣胜, 聂磊超, 唐希颖, 翟夏杰 (2023). 陕西黄河湿地自然保护区碳储量估算. 植物生态学报, 47, 469–478. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0071

Estimation of carbon storage in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve

XU Gan-Jun¹, WU Sheng-Yi¹, LI Wei², ZHAO Xin-Sheng², NIE Lei-Chao², TANG Xi-Ying², and ZHAI Xia-Jie^{2*}

¹Northwest Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China; and ²Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract

Aims Ecosystem services such as carbon sequestration and climate regulation of wetland ecosystems are very important. Accurately assessing the carbon storage of natural reserves in the Yellow River Basin is helpful for carbon neutrality research and regional ecological protection and high-quality development.

Methods Based on field sampling and laboratory analysis, combined with remote sensing data, this study assessed carbon storage in the aboveground plant biomass and the top 50 cm soils of typical natural vegetation in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve. The total target area for assessment is 13 086.52 hm², accounting for 23.87% of the nature reserve.

Important findings The results showed that the aboveground carbon storage of the tall-grass vegetation was significantly higher than that of the short-grass vegetation and shrubland, and their carbon densities were 496.73, 23.45 and 138.38 g·m⁻², respectively; the carbon density of the soil at 0–50 cm was 7.15–11.98 kg·m⁻², and the soil carbon storage in the tall-grass vegetation area (5.02 × 10⁵ t) was significantly higher than that of the beach without vegetation (2.09 × 10⁵ t), the short-grass vegetation area (3.40 × 10⁵ t) and short-shrubland area (1.45 × 10⁵ t); finally, combining the aboveground carbon storage in plant biomass and the soil carbon storage in the top 50 cm, the total carbon storage is estimated around 1.22 × 10⁶ t for the natural vegetation area of Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve, of which proportions of carbon storage were 17.13%, 27.95%, 12.13% and 42.79% for beaches, short-grass vegetation area, short-shrubland, and tall-grass vegetation area. These results can provide basic data for the protection and restoration of natural wetlands and the improvement of carbon sink function in the middle reaches of the Yellow River.

Key words wetland; carbon storage; vegetation; soil

收稿日期Received: 2022-02-21 接受日期Accepted: 2022-07-28

* 通信作者Corresponding author (zhaixiajie@caf.ac.cn)

Xu GJ, Wu SY, Li W, Zhao XS, Nie LC, Tang XY, Zhai XJ (2023). Estimation of carbon storage in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 469-478. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0071

湿地生态系统具有调节气候、均化洪水、涵养水源、维持生物多样性等重要的生态系统服务,尤其在碳固定方面具有重大意义,其单位面积碳密度显著高于森林、灌丛、农田等生态系统(Pearse *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022)。河流湿地是将碳组分从陆地运输到海洋的重要路径,而湖泊是碳元素汇集地和大气CO₂的主要释放源之一,二者构成了地表碳循环的重要组成部分。包括河流和湖泊等在内的内陆水域可能是水和溶解物质的巨大运输通道,在生物地球化学循环中扮演着重要角色(Raymond *et al.*, 2013)。从1750到2013年,全球河流碳的运输量从0.75 Pg·a⁻¹增至0.90–0.95 Pg·a⁻¹,增加了约20%(Regnier *et al.*, 2013)。近年来的研究发现,不同纬度与类型的河流碳通量和碳循环的影响因素不同,主要由当地水循环过程以及水-气交换过程决定(段巍岩和黄昌, 2021)。河流湿地是黄河流域内陕西区域复合生态系统的重要组成部分,在黄河流域生态保护和高质量发展成为重大国家战略的背景下,湿地生态系统合理布局、管理和植被配置等直接关系碳增汇和碳中和(方精云, 2021)。黄河流域是我国重要的生态屏障,是连接三大阶梯重要的生态廊道,处于“一带一路”陆路的重要地带,也是我国七大重点生态功能区之一。新中国成立以来,人类活动导致黄河流域陆续出现了过度放牧、水土流失、水质污染等一系列生态问题(董盼盼等, 2020),对包括碳在内的物质循环影响巨大(Syvitski *et al.*, 2022)。因此,开展陕西黄河流域湿地碳汇核算研究具有重要的应用价值,并极具紧迫性。碳汇核算是研究湿地固碳能力以及湿地在全球变化中的地位和作用的基础,目前国内外有关碳汇核算多集中于森林和草地两大生态系统(贺少轩等, 2015; 辛晓平等, 2020; 李妙宇等, 2021),对湿地生态系统则主要是估算沼泽、湖泊、滨海等自然湿地中泥炭或土壤的固碳能力(Xiao *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022),其中对黄河流域的研究主要聚焦于上游的青藏高原和下游的三角洲,对中游地区关注较少。

黄河流域不同区域的湿地碳储量已有一定的研究积累(杨文焕等, 2018; 杨荣等, 2020; 林春英等, 2021; 刘京涛等, 2021)。湿地碳库主要包括植被碳库、土壤碳库和存在于水体中的溶解性有机碳。湿

地植被碳库是由光合作用的碳吸收、呼吸作用和凋落物分解的碳释放间的平衡决定的;土壤碳库是由植物分解、根际沉积的碳输入和分解过程中的碳输出间的平衡决定;水体中的碳含量则是由水体内源输入和边界交互作用共同决定的(刘亚男等, 2019)。植被生物量是反映湿地固碳能力的重要指标,我国9.7 × 10⁴ km²的草本沼泽湿地上承载的地上生物量碳为(22.2 ± 2.2) Tg (Shen *et al.*, 2021)。此外,土壤碳库作为陆地生态系统碳库的主体,在调节气候变化方面具有双重作用。在区域生态系统中,湿地土壤有机碳的固存和变化是一个关键的生态过程和热点研究方向,其过程及影响机制受到关注(Yao & Kong, 2018; 刘兴华等, 2019)。有研究表明,如果基于自然气候的解决方案去缓解气候变化,陆地生态系统土壤碳库的保护和重建可以贡献1/4的潜力,对湿地来说,湿地土壤碳库的保护和重建占湿地生态系统可贡献潜力的72%,远远高于农田和草地的47%和森林的9% (Bossio *et al.*, 2020)。湿地不仅与大气和陆地生态系统有着强烈的碳交换,而且其内部也存在着活跃的碳产生、分解和沉积。而目前湿地碳储量、固碳潜力以及气候变化和人为活动对湿地碳通量的互作机制等是全球碳循环研究的薄弱环节(王跃思和王迎红, 2008),需要借助地面观测以及遥感、地理信息技术获取流域陆地生态系统碳储量相关信息,在典型小流域开展多界面、多过程等长期同步观测和系统研究,建立统一的观测统计方法和实验方法来研究土壤有机碳储量和动态变化(裴会敏等, 2012; 周苗等, 2018)。

我国正在构建以国家公园为主体的自然保护地体系,未来自然保护地规模和管理将达到世界先进水平,碳中和和黄河流域的高质量发展均已成为国家战略,黄河湿地的碳储量研究亟待深入。陕西黄河湿地是我国黄河中游地区面积最大的湿地之一,也是陕西省面积最大的河流湿地,其重要的地理位置和生态价值一直受到国内外科学界的广泛关注。本研究采用湿地生态学、恢复生态学、系统学和数理统计等研究方法,同时结合野外调查、查阅资料、数据分析等手段,通过构建陕西省黄河省级自然保护区自然湿地碳储量核算体系;开展湿地不同植物群落下的碳储量核算,将有助于全面认识保护区湿

地生态系统的固碳作用, 研究成果能服务黄河流域湿地碳汇核算和碳交易需求。

1 材料和方法

1.1 研究样点

研究区陕西黄河湿地省级自然保护区位于关中平原的东端, 北起韩城禹门口(龙门), 南到潼关港口, 东以黄河河道治导控制线的中心线为界与山西省相接, 西界北段大致以黄河老岸为界, 南段以第二道防洪堤为界。包括韩城、合阳、大荔、华阴和潼关的黄河河道、河漫滩、洪泛平原和黄河、渭河、洛河的交汇地区。主要保护对象为湿地生态系统的自然环境和依附湿地生存的相关生物。研究区属暖温带大陆性半湿润季风气候, 四季分明, 雨热同季。春季干燥, 回暖早、升温快; 夏季炎热、日照长; 秋季降温快、多阴雨; 冬季寒冷、多风。年平均气温 13.5°C , 年降水量 $529\text{--}574\text{ mm}$, 降水多集中在7–9月, 占全年降水量的51.6%。年平均风速 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 无霜期210天。研究区土壤类型有盐土、新积土和沼泽土, 植被类型主要有灌丛沼泽、草丛沼泽、浅水湿地等, 高度差异明显。

1.2 实验设计与数据处理

1.2.1 植物部分采样和测定

选取陕西黄河湿地省级自然保护区的大荔县段、合阳县段和韩城市段作为研究区, 共确定24个 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 典型植被大样地作为采样区域, 其中包括大荔县8个, 合阳县7个, 韩城市9个(图1), 用奥维地图软件确定每处样地的经纬度以记录其地理位置。野外采样时间为2021年7月20日到2021年8月15日。在确定样地时, 尽可能保证所选样地为典型的湿地植被群落类型(低草植被、矮灌丛植被和高草植被), 每种类型6个重复样地, 并保证每个类型样地选择一条由水向陆的采样带且未有明显地表积水以防样品难以采集。光滩仅进行土壤采样。在每一个典型植被区域内随机选择3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的区域作为样方, 记录样方内植物种的生物生态学特性(种类、高度等), 用收获法齐地面剪下并剔除凋落物后立即称鲜质量, 带回实验室后在 65°C 下烘干48 h并称其干质量(精确至 0.01 g), 之后将烘干后的植物样本研磨过筛, 采用元素分析仪 (Vario Max CN, Elementary, Hanau, Germany) 测定所有植物样本的全碳含量。



图1 陕西黄河湿地省级自然保护区地理区位及采样点位分布。

Fig. 1 Geographical location and distribution of sampling sites in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve.

1.2.2 土壤部分采样和测定

在光滩、低草植被、矮灌丛植被和高草植被的样方内, 去除枯枝落叶层后, 用 5 cm 内径的土钻于 $0\text{--}25$ 、 $25\text{--}50\text{ cm}$ 分层采集样品, 3次重复。每个样品随机取3钻混合, 以减少土壤异质性带来的实验误差。实验室风干后, 过 2 mm 筛备用。将采集的不同深度土层样本分别装入不同的铝盒, 并做好土层标记。同时, 用环刀法取每层土样, 带回实验室测定土壤密度。土壤样品室内风干后, 粉碎, 过 0.149 mm 筛, 采用元素分析仪测定所有土壤样本的全碳含量。

1.2.3 遥感影像数据获取

基于Landsat遥感数据, 本研究从地理空间数据云官网(<https://www.gscloud.cn/>)上下载了陕西省大荔县、合阳县和韩城市的TM影像, 其空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 并将获取的影像进行几何校准、大气校正以提高影像精度。通过遥感数据最终判别研究区光滩、低草植被、矮灌丛植被和高草植被的相对面积, 用于研究区碳储量的估算。陕西黄河湿地省级自然保护区批复面积为 $57\,348\text{ hm}^2$ (陕政函[2005]152号), 本研究划定的保护区及周边典型植被总面积为 $54\,845.22\text{ hm}^2$, 误差主要存在于自然湿

地植被类型的遥感识别上。本研究中的碳储量估算主要关注保护区典型的自然生态系统类型, 面积为13 086.52 hm², 占保护区总面积的23.87%, 其中沼泽湿地涵盖了低草植被和高草植被两种类型。其他未进行碳储量估算的土地利用类型为农田、坑塘水面、河流和农村宅基地(表1)。

1.3 模型方法与构建

1.3.1 植物碳库计算方法

本研究中植物碳库由植物地上生物量碳库组成, 植物碳库计算公式如下(Deng *et al.*, 2017; 郭焱培等, 2017):

$$C_{\text{植物}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n \times S_q} \times S \quad (1)$$

式中, $C_{\text{植物}}$ 为植物生物量碳库, C_i 为第*i*个样方地上生物量碳库, S_q 是样方框面积(m²), S 是样地面积(m²), n 表示该样地内调查的样方数。

1.3.2 土壤碳库计算方法

对于调查样地中土壤样本, 其碳库计算过程(Deng *et al.*, 2017; 郭焱培等, 2017)如下:

$$C_{\text{土壤}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{i\text{土壤}}}{n \times S_q} \times S \quad (2)$$

式中, $C_{\text{土壤}}$ 为样地中土壤碳库(kg), $C_{i\text{土壤}}$ 为第*i*个样方土壤碳库(kg), 计算如下:

$$C_{i\text{土壤}} = \sum_{j=1}^l \frac{\rho_{i,j} \times h \times S_q \times CF_{i,j\text{土壤}}}{1000} \quad (3)$$

式中, $\rho_{i,j}$ 为第*i*个样方中第*j*层土壤密度(g·cm⁻³), h 为土层厚度(m), $CF_{i,j\text{土壤}}$ 为第*i*个样方第*j*层土壤碳含量(%), l 为第*i*个样方土壤剖面共分成*l*层。

环刀取样后将土壤样品进行称质量、烘烤, 最

后按以下公式计算土壤密度(ρ , g·cm⁻³):

$$\rho = (m \times 100) / (V \times (100 + W)) \quad (4)$$

式中, m 为环刀内湿土质量(g), W 为环刀内土壤质量含水率(%), V 为环刀体积(cm³)。

1.3.3 数据分析

本研究所有数据的统计分析采用Excel 2003与SPSS 19.0软件进行原始数据的正态性检验和方差分析, 之后进行独立样本的*t*检验。

2 结果和分析

2.1 陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被的空间分布

野外现场调查得知, 研究区的高草植被是以芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)为建群种的植物群落, 平均高度为2.0 m左右, 盖度为90%, 群落内几乎不生长其他植物。低草植被群落平均高度为0.5 m左右, 建群种为碱蓬(*Suaeda glauca*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、碎米莎草(*Cyperus iria*)等, 盖度为80%。矮灌丛植被以杠柳(*Periploca sepium*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、荻(*Miscanthus sacchariflorus*)等为建群种, 群落平均高度1.5 m左右, 盖度为75%, 伴生植物有酸模叶蓼(*Persicaria lapathifolia*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、马蔺(*Iris lactea*)、糙叶黄耆(*Astragalus scaberrimus*)、纤毛鹅观草(*Elymus ciliaris*)等。结合2021年的TM和DEM等遥感数据, 陕西黄河湿地省级自然保护区的光滩、低草植被、矮灌丛植被、高草植被的面积分别为2 916.70、4 196.63、1 786.34、4 186.85 hm² (图2)。

表1 陕西黄河湿地省级自然保护区不同土地利用类型基本特征

Table 1 Basic characteristics of different land use types in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Reserve

土地利用类型分类	Classification of land use type	土地利用类型	Land use type	面积	Area (hm ²)	占保护区面积比例	Area proportion of the reserve (%)
自然生态系统类型	Natural ecosystem type	光滩	Beach	2 916.70		5.32	
		沼泽湿地	Marsh	8 383.48		15.29	
		矮灌丛	Short shrubland	1 786.34		3.26	
其他土地利用类型	Other land use type	农田	Farmland	8 495.16		15.49	
		坑塘水面	Pond water surface	15 835.82		28.87	
		河流	River	15 138.42		27.60	
		农村宅基地	Rural homestead	2 289.30		4.17	

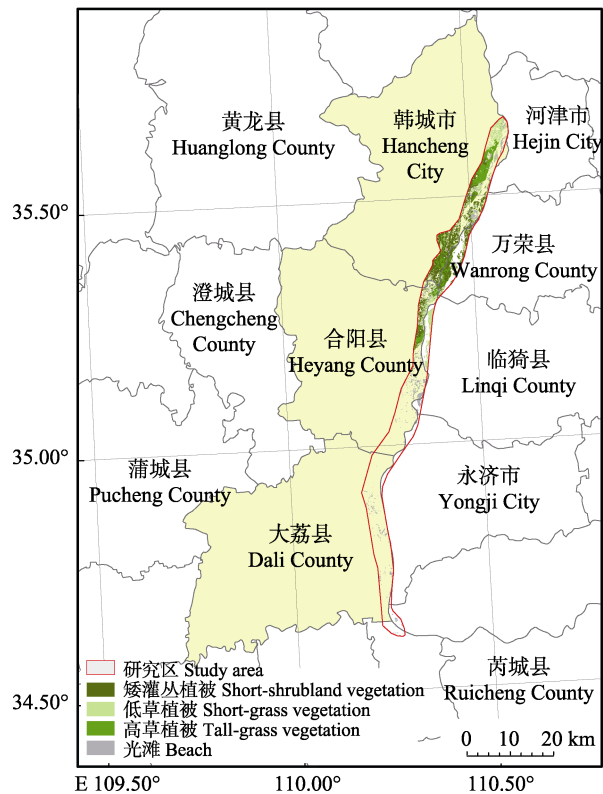


图2 陕西黄河湿地省级自然保护区及周边典型湿地植被类型分布。

Fig. 2 Distribution of vegetation types in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve and surrounding typical wetlands.

2.2 陕西黄河湿地省级自然保护区地上植被碳储量估算

陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被类型的固碳能力不同, 高草植被的碳密度显著高于低草植被和矮灌丛植被, 其碳密度分别为 (496.73 ± 44.33) 、 (23.45 ± 2.50) 和 $(138.38 \pm 17.98) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图3)。陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被类型的地上生物量差异显著(表2)。高草植被的平均生物量达到了 $1\,213.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 而低草植被和矮灌丛植被的平均生物量为 (62.80 ± 6.73) 和 $(340.05 \pm 44.96) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 均显著低于高草植被的群落生物量。结合遥感识别的分区面积数据, 研究区低草植被、矮灌丛植被、高草植被的地上植被碳储量分别为983.97、2 471.91和20 797.41 t。

2.3 陕西黄河湿地省级自然保护区土壤碳储量估算

如图4所示, 陕西黄河湿地省级自然保护区0–50 cm土壤的碳密度为 $7.15\text{--}11.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 高草植被区的土壤碳密度显著高于光滩、低草植被和矮灌丛植被, 而光滩、低草植被和矮灌丛植被的土壤碳密度之间无显著差异。高草植被区的0–25 cm土壤碳

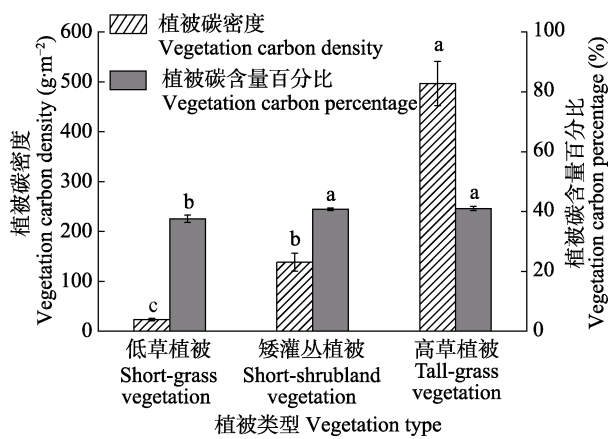


图3 陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被类型的碳密度和碳含量百分比(平均值±标准误)。不同小写字母表示植被类型间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Density and proportion of carbon content in different vegetation types in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve (mean \pm SE). Different lowercase letters indicate significant differences among vegetation types ($p < 0.05$).

表2 陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被类型生物量

Table 2 Biomass of different vegetation types in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Reserve

湿地植被类型 Wetland vegetation type	生物量干质量 Biomass dry mass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	标准误 Standard error ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
低草植被 Short-grass vegetation	62.80 ^c	6.73
矮灌丛植被 Short-shrubland vegetation	340.05 ^b	44.96
高草植被 Tall-grass vegetation	1 213.18 ^a	113.21

不同小写字母表示在0.05水平上具有显著差异。
Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level.

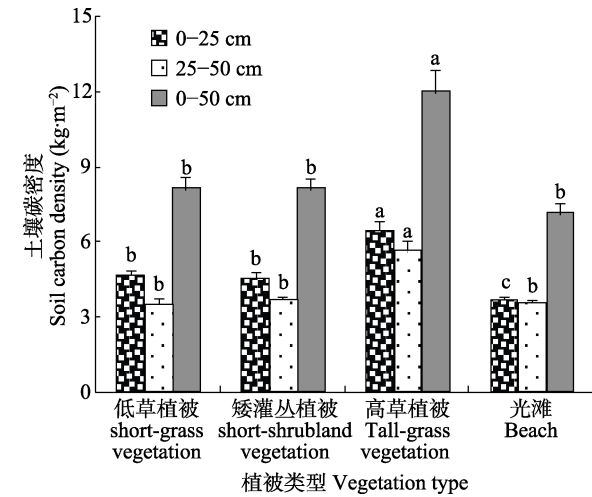


图4 陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被类型下的土壤碳密度(平均值±标准误)。不同小写字母表示植被类型间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 4 Soil carbon density under different vegetation types in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve (mean \pm SE). Different lowercase letters indicate significant differences among vegetation types ($p < 0.05$).

密度显著高于光滩、低草植被和矮灌丛植被, 而低草植被和矮灌丛植被之间的土壤碳密度无显著差异, 但均显著高于光滩的土壤碳密度。研究区25–50 cm土壤的碳密度为 $3.47\text{--}5.59\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 高草植被区的土壤碳密度显著高于光滩、低草植被和矮灌丛植被, 而光滩、低草植被和矮灌丛植被之间的土壤碳密度无显著差异。结合遥感统计的相关面积数据可知, 光滩0–50 cm土壤的碳储量为 $208\,622.80\text{ t}$, 低草植被和矮灌丛植被分别是 $340\,460.00\text{ t}$ 和 $145\,254.45\text{ t}$, 高草区0–50 cm土壤的碳储量为 $501\,630.69\text{ t}$ 。

结合植被部分的碳储量计算可知, 研究区低草植被区、矮灌丛植被区、高草植被区的地上植被和0–50 cm土壤的总碳储量分别为 3.41×10^5 、 1.48×10^5 和 $5.22 \times 10^5\text{ t}$ 。光滩区因没有植被, 碳储量计算仅包含土壤部分, 总计为 $2.09 \times 10^5\text{ t}$ 。总体上, 陕西黄河湿地省级自然保护区典型植被区的碳储量为 $1.22 \times 10^6\text{ t}$ 。

3 讨论

3.1 湿地植被碳储量估算

湿地碳储量是研究气候变化和人类耦合作用下的生态系统碳循环、碳中和的重要基础(Fang *et al.*, 2018; 方精云, 2021; Syvitski *et al.*, 2022)。湿地通过占据陆地表面面积的5%–8%, 储存了20%–30%的土壤碳(Lal, 2008; Mitsch *et al.*, 2013)。我国湿地生态系统的碳储量为 16.9 Pg , 每年约有 120 Tg 的碳汇, 其中河流湿地的碳汇速率为 $28.0\text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ (Xiao *et al.*, 2019)。从宏观尺度来说, 湿地生态系统碳储量反映的是植被和土壤碳输入速率、分解速率的长期平衡, 要同时考虑影响输入和分解两方面的因素, 包括植被和土壤结构、气候(气温、降水等)和土地利用等, 通过不同的过程或机制影响湿地生态系统碳储量状况和碳分布格局(刘亚男等, 2019), 而本研究对象为局域尺度的自然湿地生态系统, 无明显气候差异, 故本研究中重点分析不同植被类型下的碳储量分异和变化。陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被群落的碳含量占比有所差异(图3), 但主要影响陕西黄河湿地省级自然保护区地上碳储量的是植物群落的生物量(碳密度)。

植物经过光合作用将 CO_2 吸收转化为有机物质, 经微生物的分解和自身腐化最终以固体有机质形式存储于土壤中, 植物种类的差异使得植物群落的碳

储量和固碳能力也产生较大差别(宋亮平等, 2016; 常雄凯等, 2018; 王伯炜等, 2019)。在黄河湿地自然保护区基本一致的气候条件下, 从光滩、低草植被、矮灌丛植被到高草植被的植物水分利用、碳水循环、径流大小等的差异造成植被结构和功能的差异(王根绪等, 2021), 导致陕西黄河湿地省级自然保护区不同植被类型的地上生物量差异显著, 影响枯落物分解和根系进入土壤的碳含量, 最终导致不同的群落储碳能力。本研究中高草植被的碳密度($496.73\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)稍高于全国第二次湿地资源调查的植被碳密度的平均值($410\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, Xiao *et al.*, 2019), 但低于滨海草本沼泽湿地植被的碳密度($675.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, Shen *et al.*, 2021), 低草区和矮灌丛植被碳密度均低于全国平均值。由于根系采样难度大且精度不高, 故未估测根系的碳储量也会导致植被碳储量估计偏低。此外, 区域空间尺度的湿地碳储量差异主要是气候差异会导致固碳速率明显不同所致。全球尺度上, 热带湿地、温带湿地和北部寒带湿地的固碳速率分别为 1.3 、 0.9 和 $0.2\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (Villa & Bernal, 2018)。我国湿地草本植被碳密度在滨海地区最高, 从亚热带潮湿沼泽区、青藏高原沼泽区、温带干旱和半干旱沼泽区到湿润和半湿润沼泽区依次下降(Shen *et al.*, 2021)。本研究中不同植被区的地上生物量均显著低于滨海湿地的典型区域, 如杭州湾湿地的芦苇、互花米草(*Spartina alterniflora*)群落的生物量均在 $4\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右(张文敏等, 2014)。气候变化和人类活动的耦合作用则会在时间尺度上导致湿地生态系统的固碳速率发生变化(Yang *et al.*, 2022)。

3.2 湿地土壤碳储量估算

对湿地土壤碳储量的研究明显多于对湿地植被的研究, 全球湿地土壤碳储量中位值为 330 Pg , 中国为 7.6 Pg (Yang *et al.*, 2022), 美国连续大陆湿地的土壤碳储量为 11.5 Pg (Nahlik & Fennessy, 2016)。土壤有机碳是地表动植物残体在多种因素综合作用下与土壤颗粒结合的化合物, 其不同组分含量及分布受土地利用方式、土壤质地和气候等共同影响。例如高草植被每年产生较大的生物量, 一方面直接增加了湿地地上部分的固碳量, 另一方面通过根系分泌和凋落物分解间接增加了土壤碳的输入, 导致保护区湿地高草植被区0–50 cm的土壤碳储量显著高于光滩、低草植被和矮灌丛植被。从气候因素来说, 气温和降水在研究区范围内的空间差异性不明

显, 对土壤碳储量空间差异的影响较小(张俊华等, 2020), 而更大尺度上, 中国湿地生态系统0–20和0–100 cm深度的土壤碳储量在减少(1980–2010年), 气候变化影响了区域尺度湿地生态系统的水位和面积, 而水位下降和湿地面积减少会引起土壤温度升高、土壤孔隙度和渗透性增强等生态系统特征变化, 从而使得土壤有机质加速分解, 降低碳储量(刘子刚和张坤民, 2005; 周文昌等, 2016; 徐丽等, 2018)。水位变化同时增加了湿地植物分解环境的复杂性和分解产物的多样性, 是湿地植物残体分解的重要驱动因子(Dolinar *et al.*, 2016)。其中质量较低的湿地植物残体由于木质素含量较高, 比质量高的植物光降解更快(Angst *et al.*, 2017)。在群落水平上, 由于物种多样性较高, 会出现多种不同质量的植物残体混合分解的情况, 这时枯落物之间的营养盐、碳化合物和促进或抑制性化合物不断交换, 产生复杂的非加性效应, 影响该群落整体植物残体的分解(Santonja *et al.*, 2020)。从不同深度来看, 由于气候变化和人类活动干扰, 我国湿地生态系统在20世纪80年代到21世纪10年代间的0–20和0–100 cm深度的土壤有机碳密度分别从 $(8.49 \pm 2.73) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至 $(8.27 \pm 1.68) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 和从 $(28.12 \pm 10.18) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至 $(25.93 \pm 6.18) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (徐丽等, 2018)。本研究中0–25 cm土壤的碳密度为 $3.66\text{--}6.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 高草区土壤的碳密度接近于白洋淀的芦苇湿地(李瑾璞等, 2020), 整体上与我国湿地平均值接近但偏低, 一方面是研究区的差异, 滨海湿地碳储量一般高于内陆湿地碳储量, 另一方面湿地面积丧失和土地利用方式的改变导致土壤碳储量进一步下降(Lu *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022)。近年来, 研究区由于建设用地的大面积增加、湿地的波动减少及生境的严重破碎化, 导致湿地生态系统退化(包玉斌等, 2015), 进而导致 CO_2 和 CH_4 从土壤向大气排放, 从而减少湿地碳储量。

不同植被群落下土壤碳含量、碳密度以及单位面积碳储量存在差异性, 其中植被的生长对营养物质的吸收以及水盐条件的影响可能是造成这种差异的主要原因(宋红丽等, 2018; 杜书栋等, 2022)。光滩区的碳密度比有植被生长的湿地区域低, 这一方面与光滩有机质主要来源于水体有关, 也与光滩受到水位变化作用比较强烈有关。另一方面土壤水分通过改变土壤氧化还原电位和微生物活性影响土壤碳储量, 湿地土壤中的高含水量会导致低氧化还原电

位和低分解速率, 增加土壤碳储量, 这也是湿地生态系统碳储量很可能高于邻近的森林等陆地生态系统碳储量的重要原因(Pearse *et al.*, 2018)。碳在厌氧土壤中累积是因为淹水环境抑制了酚氧化酶活性, 而酚氧化酶能够分解酚类抑制剂, 降低土壤碳的分解速率(Dunn & Freeman, 2018), 这也是光滩区存在一定碳储量的重要因素。此外, 土壤质地对土壤碳的主导控制可能是由于土壤通过聚集体的内部封闭及矿物吸附形成有机矿物复合物, 限制微生物分解作用, 一定程度保证了碳储量的稳定(Unger *et al.*, 2016), 而黄河泥沙厚度和沉积过程的变化会对研究区土壤质地产生影响(张俊华等, 2020), 进而影响湿地植被演替, 形成多样的植被类型, 最终导致湿地生态系统的碳储量存在异质性。

4 结论

陕西黄河湿地自然保护区的光滩、低草植被区、矮灌丛植被区、高草植被区的总碳储量(地上植被碳储量和0–50 cm土壤碳储量之和)分别为 2.09×10^5 、 3.41×10^5 、 1.48×10^5 和 $5.22 \times 10^5 \text{ t}$, 占评估区总碳储量的比例分别为17.13%、27.95%、12.13%和42.79%。高草植被区的植物和土壤碳密度最大, 其余类型的碳密度差异不显著。总的来说, 土壤亚系统的碳储量是湿地生态系统碳储量的主要组成, 未来湿地生态系统的保护恢复应优先关注土壤结构和固碳功能的恢复; 植被碳储量次之, 不同高度植被群落碳储量的差异有助于湿地生态恢复中的物种选择和群落结构配置。

致谢 感谢国家林业和草原局西北调查规划院科技创新项目(XBY-KJCX-2021-12)的资助。感谢北京生命科学研究王建华博士帮助制图。

参考文献

- Angst Š, Cajthaml T, Angst G, Šimáčková H, Brus J, Frouz J (2017). Retention of dead standing plant biomass (marcescence) increases subsequent litter decomposition in the soil organic layer. *Plant and Soil*, 418, 571–579.
- Bao YB, Liu K, Li T, Hu S (2015). Effects of land use change on habitat based on InVEST model—Taking Yellow River Wetland Nature Reserve in Shaanxi Province as an example. *Arid Zone Research*, 32, 622–629. [包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜 (2015). 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区

- 为例. 干旱区研究, 32, 622-629.]
- Bossio DA, Cook-Patton SC, Ellis PW, Fargione J, Sanderman J, Smith P, Wood S, Zomer RJ, von Unger M, Emmer IM, Griscom BW (2020). The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3, 391-398.
- Chang XK, Zeng H, Liu M (2018). Relationships among vegetation types, biomass and soil environmental factors in the wetlands of Yellow Sea and Bohai coastal areas. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 3298-3304. [常雄凯, 曾辉, 刘淼 (2018). 黄渤海滨海湿地植被类型、生物量及其与土壤环境因子的关系. 生态学报, 37, 3298-3304.]
- Deng L, Han QS, Zhang C, Tang ZS, Shangguan ZP (2017). Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana korshinskii* Kom plantation development. *Land Degradation & Development*, 28, 906-917.
- Dolinar N, Regvar M, Abram D, Gaberšček A (2016). Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774, 69-80.
- Dong PP, Xiu YJ, Zhang ZM, Zhang MX (2020). Conservation and high quality development of wetlands in the Yellow River Basin. *Wetland Science*, 18, 350-355. [董盼盼, 修玉娇, 张振明, 张明祥 (2020). 黄河流域湿地保护与高质量发展. 湿地科学, 18, 350-355.]
- Du SD, Bai JH, Jia J, Guan YN, Zhang GL, Chen GZ, Zhang SY, Gai LY (2022). Changes of soil organic carbon storage in *Phragmites australis* wetlands along a salinity gradient in the Yellow River Delta. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 42(1), 80-87. [杜书栋, 白军红, 贾佳, 关亚楠, 张光亮, 陈国柱, 张树岩, 盖凌云 (2022). 黄河三角洲芦苇湿地土壤有机碳储量沿盐分梯度的变化特征. 环境科学学报, 42(1), 80-87.]
- Duan WY, Huang C (2021). Research progress on the carbon cycle of rivers and lakes. *China Environmental Science*, 41, 3792-3807. [段巍岩, 黄昌 (2021). 河流湖泊碳循环研究进展. 中国环境科学, 41, 3792-3807.]
- Dunn C, Freeman C (2018). The role of molecular weight in the enzyme-inhibiting effect of phenolics: the significance in peatland carbon sequestration. *Ecological Engineering*, 114, 162-166.
- Fang JY (2021). Ecological perspectives of carbon neutrality. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 1173-1176. [方精云 (2021). 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 45, 1173-1176.]
- Fang JY, Yu GR, Liu LL, Hu SJ, Chapin III FS (2018). Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 4015-4020.
- Guo YP, Yang X, Mohhamot A, Liu HY, Ma WH, Yu SL, Tang ZY (2017). Storage of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate shrubland ecosystems across Northern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 14-21. [郭焱培, 杨弦, 安尼瓦尔·买买提, 刘鸿雁, 马文红, 于顺利, 唐志尧 (2017). 中国北方温带灌丛生态系统碳、氮、磷储量. 植物生态学报, 41, 14-21.]
- He SX, Han RL, Liang ZS (2015). Effect of grass restoration on soil carbon and nitrogen in the hilly area of the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 60, 1932-1940. [贺少轩, 韩蕊莲, 梁宗锁 (2015). 黄土高原丘陵沟壑区草地恢复对土壤碳氮库的影响. 科学通报, 60, 1932-1940.]
- Lal R (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 815-830.
- Li JP, Yu XB, Xia SX, Zhao W, Wang ST, Xu C (2020). The spatial distribution of soil organic carbon density and carbon storage in Baiyangdian wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8928-8935. [李瑾璞, 于秀波, 夏少霞, 赵玮, 王树涛, 许策 (2020). 白洋淀湿地地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征. 生态学报, 40, 8928-8935.]
- Li MY, Shangguan ZP, Deng L (2021). Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 6786-6799. [李妙宇, 上官周平, 邓蕾 (2021). 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素. 生态学报, 41, 6786-6799.]
- Lin CY, Li XL, Sun HS, Sun HF, Ma CB, Han HB, Zhang YP, Li CY (2021). Responses of soil organic carbon component on different degrees of degradation of alpine wetland in the source of Yellow River. *Acta Agrestia Sinica*, 29, 1540-1548. [林春英, 李希来, 孙海松, 孙华方, 马程彪, 韩辉邦, 张宇鹏, 李成一 (2021). 黄河源高寒湿地有机碳组分对不同退化程度的响应. 草地学报, 29, 1540-1548.]
- Liu JT, Li AQ, Sun JK, Song AY, Xia JB (2021). Foliar C, N, and P stoichiometry of dominant shrubs in the chenier wetland of the Yellow River Delta, China. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 3805-3815. [刘京涛, 李安琦, 孙景宽, 宋爱云, 夏江宝 (2021). 黄河三角洲贝壳堤湿地优势灌木碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 41, 3805-3815.]
- Liu XH, Zhang HB, Li Y (2019). Variation of organic matter in soil aggregates with the succession of tidal flatland from barren land-saltmarsh-upland in the Yellow River Delta. *Acta Pedologica Sinica*, 56, 374-385. [刘兴华, 章海波, 李远 (2019). 黄河三角洲滩涂-湿地-旱地土壤团聚体有机质组分变化规律. 土壤学报, 56, 374-385.]
- Liu YN, Xi M, Zhang XL, Yu ZD, Kong FL (2019). Carbon storage distribution characteristics of wetlands in China and its influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 2481-2489. [刘亚男, 郝敏, 张希丽, 于政达, 孔范龙 (2019). 中国湿地碳储量分布特征及其影响因素. 应用生态学报, 30, 2481-2489.]
- Liu ZG, Zhang KM (2005). Wetland soils carbon stock in the Sanjiang plain. *Journal of Tsinghua University (Science &*

- Technology), 45, 788-791. [刘子刚, 张坤民 (2005). 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化. 清华大学学报 (自然科学版), 45, 788-791.]
- Lu MZ, Zou YC, Xun QL, Yu ZC, Jiang M, Sheng LX, Lu XG, Wang DL (2021). Anthropogenic disturbances caused declines in the wetland area and carbon pool in China during the last four decades. *Global Change Biology*, 27, 3837-3845.
- Mitsch WJ, Bernal B, Nahlik AM, Mander Ü, Zhang L, Anderson CJ, Jørgensen SE, Brix H (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28, 583-597.
- Nahlik AM, Fennessy MS (2016). Carbon storage in US wetlands. *Nature Communications*, 7, 13835. DOI: 10.1038/ncomms13835.
- Pearse AL, Barton JL, Lester RE, Zawadzki A, Macreadie PI (2018). Soil organic carbon variability in Australian temperate freshwater wetlands. *Limnology and Oceanography*, 63, S254-S266.
- Pei HM, Xu MX, Li Q, Tuo DF (2012). Advances in soil organic carbon losses under erosion. *Research of Soil and Water Conservation*, 19(6), 269-274. [裴会敏, 许明祥, 李强, 脱登峰 (2012). 侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展. 水土保持研究, 19(6), 269-274.]
- Raymond PA, Hartmann J, Lauerwald R, Sobek S, McDonald C, Hoover M, Butman D, Striegl R, Mayorga E, Humborg C, Kortelainen P, Dürr H, Meybeck M, Ciais P, Guth P (2013). Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503, 355-359.
- Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, MacKenzie FT, Gruber N, Janssens IA, Laruelle GG, Lauerwald R, Luyssaert S, Andersson AJ, Arndt S, Arnosti C, Borges AV, Dale AW, Gallego-Sala A, *et al.* (2013). Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6, 597-607.
- Santonja M, Rodríguez-Pérez H, Le Bris N, Piscart C (2020). Leaf nutrients and macroinvertebrates control litter mixing effects on decomposition in temperate streams. *Ecosystems*, 23, 400-416.
- Shen XJ, Jiang M, Lu XG, Liu XT, Liu B, Zhang JQ, Wang XW, Tong SZ, Lei GC, Wang SZ, Tong C, Fan HQ, Tian K, Wang XL, Hu YM, *et al.* (2021). Aboveground biomass and its spatial distribution pattern of herbaceous marsh vegetation in China. *Science China Earth Sciences*, 64, 1115-1125.
- Song HL, Liu XT, Wang LZ, Yu WN, Dong B (2018). Spatial and temporal distribution of soil organic carbon in vegetation communities of the Yellow River Delta under different disturbance levels. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32(1), 190-196. [宋红丽, 刘兴土, 王立志, 郁万妮, 董彬 (2018). 不同干扰程度下黄河三角洲植被群落有机碳分布特征. 水土保持学报, 32(1), 190-196.]
- Song LP, Chu XZ, Yang J (2016). Carbon sequestration capacity of typical plants in marginal zone of the Ebinur Lake Wetland. *Arid Land Geography*, 39, 136-143. [宋亮平, 楚新正, 杨晶 (2016). 艾比湖湿地边缘带典型植物固碳能力研究. 干旱区地理, 39, 136-143.]
- Syvitski J, Ángel JR, Saito Y, Overeem I, Vörösmarty CJ, Wang H, Olago D (2022). Earth's sediment cycle during the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 179-196.
- Unger V, Elsey-Quirk T, Sommerfield C, Velinsky D (2016). Stability of organic carbon accumulating in *Spartina alterniflora*-dominated salt marshes of the Mid-Atlantic US. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 182, 179-189.
- Villa JA, Bernal B (2018). Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: an overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. *Ecological Engineering*, 114, 115-128.
- Wang BW, Mu CC, Wang B (2019). Carbon storage of a primary coniferous forested wetland ecosystem in the temperate Changbai Mountain of China. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 3344-3354. [王伯炜, 牟长城, 王彪 (2019). 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量. 生态学报, 39, 3344-3354.]
- Wang GX, Xia J, Li XY, Yang D, Hu ZY, Sun SQ, Sun XY (2021). Critical advances in understanding ecohydrological processes of terrestrial vegetation: from leaf to watershed scale. *Chinese Science Bulletin*, 66, 3667-3683. [王根绪, 夏军, 李小雁, 杨达, 胡兆永, 孙守琴, 孙向阳 (2021). 陆地植被生态水文过程前沿进展: 从植物叶片到流域. 科学通报, 66, 3667-3683.]
- Wang YS, Wang YH (2008). *Observation of Carbon Exchange Between Terrestrial and Freshwater Lakes and the Atmosphere in China*. Science Press, Beijing. [王跃思, 王迎红 (2008). 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测. 科学出版社, 北京.]
- Xiao D, Deng L, Kim DG, Huang C, Tian K (2019). Carbon budgets of wetland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 25, 2061-2076.
- Xin XP, Ding L, Cheng W, Zhu XY, Chen BR, Liu ZL, He GL, Qing GL, Yang GX, Tang HJ (2020). Biomass carbon storage and its effect factors in steppe and agro-pastoral ecotones in northern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 53, 2757-2768. [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 (2020). 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, 53, 2757-2768.]
- Xu L, Yu GR, He NP (2018). Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Acta Geographica Sinica*, 73, 2150-2167. [徐丽, 于贵瑞, 何念鹏 (2018). 1980s-2010s中国陆地生态系统土壤碳储量的变化. 地理学报, 73, 2150-2167.]
- Yang R, Sai N, Su L, Shang HJ, Liu YH, Guo YS (2020). Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of the Yellow River wetland in

- Baotou, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 2205-2214. [杨荣, 塞那, 苏亮, 尚海军, 刘永宏, 郭永盛 (2020). 内蒙古包头黄河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征. *生态学报*, 40, 2205-2214.]
- Yang WH, Wang MH, Li WP, Fan AP, Miao CL, Yu LH (2018). Effects of land use types on soil organic carbon in the South China Sea wetland. *Ecology and Environmental Sciences*, 27, 1034-1043. [杨文焕, 王铭浩, 李卫平, 樊爱萍, 苗春林, 于玲红 (2018). 黄河湿地包头段不同地被类型对土壤有机碳的影响. *生态环境学报*, 27, 1034-1043.]
- Yang YH, Shi Y, Sun WJ, Chang JF, Zhu JX, Chen LY, Wang X, Guo YP, Zhang HT, Yu LF, Zhao SQ, Xu K, Zhu JL, Shen HH, Wang YY, *et al.* (2022). Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China Life Sciences*, 65, 861-895.
- Yao JT, Kong XB (2018). Modeling the effects of land-use optimization on the soil organic carbon sequestration potential. *Journal of Geographical Sciences*, 28, 1641-1658.
- Zhang JH, Li GD, Wang YS, Zhu LQ, Zhao WL, Ding YP (2020). Spatial characteristics and variation mechanism of different soil organic carbon components in the alluvial/sedimentary zone of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 75, 558-570. [张俊华, 李国栋, 王岩松, 朱连奇, 赵文亮, 丁亚鹏 (2020). 黄河泥沙冲/沉积区土壤有机碳不同组分空间特征及变异机制. *地理学报*, 75, 558-570.]
- Zhang WM, Wu M, Wang M, Shao XX, Jiang XS, Zhou B (2014). Distribution characteristics of organic carbon and its components in soils under different types of vegetation in wetland of Hangzhou Bay. *Acta Pedologica Sinica*, 51, 1351-1360. [张文敏, 吴明, 王蒙, 邵学新, 姜小三, 周斌 (2014). 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征. *土壤学报*, 51, 1351-1360.]
- Zhou M, Li SL, Ding H, Qin CQ, Yue FJ (2018). Advances in study on organic carbon characteristics in the riverine systems. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 255-264. [周苗, 李思亮, 丁虎, 覃蔡清, 岳甫均 (2018). 地表流域有机碳地球化学研究进展. *生态学杂志*, 37, 255-264.]
- Zhou WC, Suolang D, Cui LJ, Wang YF, Li W (2016). Effects of drainage on soil organic carbon stock in the Zoige peatlands, eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 2123-2132. [周文昌, 索郎夺尔基, 崔丽娟, 王义飞, 李伟 (2016). 排水对若尔盖高原泥炭地土壤有机碳储量的影响. *生态学报*, 36, 2123-2132.]

责任编辑: 陈 槐 责任编辑: 赵 航