DOI: 10. 11686/cyxb2025429
http://cyxb. magtech. com. cn
李捷, 于雪婷, 赵恕轲, 等. 草地生态系统碳储量估算方法及影响因素研究进展. 草业学报, 2026, 35(10): 222－236.
LI Jie, YU Xue-ting, ZHAO Shu-ke, *et al*. Progress in research on methods for estimating carbon stock in grassland ecosystems and factors influencing it. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 222－236.

草地生态系统碳储量估算方法及影响因素研究进展

李捷[1*], 于雪婷[1**], 赵恕轲[2], 戈西求尕[3], 尕玛东周[3], 吴昊[1], 单俞霖[1], 于鹤英[1]
(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 山东省调水工程运行维护中心平度管理站, 山东 青岛 266300; 3. 玉树州生态环境监测站, 青海 玉树 815000)

摘要: 草地生态系统是全球陆地碳库的重要组成部分, 其碳储量变化对气候变化和生态平衡具有重要影响。本研究在系统综述草地生态系统碳储量的主要估算方法基础上, 分析了自然因素与人为活动对草地碳储量的影响, 并基于中国知网(CNKI)数据库, 采用文献计量方法对近 30 年来草地类型碳储量相关研究进行可视化分析。结果表明, 草地碳储量估算方法主要包括以实测数据为基础的传统方法和基于多源数据分析的新兴方法。不同草地类型划分体系会显著影响草地面积统计及单位面积碳密度取值。高寒草地和温带草地是我国的主要草地类型, 其碳储量合计占全国草地生态系统碳储量的 85% 以上。同一草地类型中, 不同估算方法得到的碳储量的结果差异显著。气候条件、地形特征、土地利用方式及人为干扰通过调控植被生产力和土壤碳稳定性, 共同影响草地生态系统的碳储量动态。

关键词: 草地生态系统; 草地类型; 碳储量; 文献计量; 估算方法

Progress in research on methods for estimating carbon stock in grassland ecosystems and factors influencing it

LI Jie[1*], YU Xue-ting[1**], ZHAO Shu-ke[2], YIXI Qiu-ga[3], GAMA Dong-zhou[3], WU Hao[1], SHAN Yu-lin[1], YU He-ying[1]
1. *School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao* 266520, *China*; 2. *Pingdu Station of Operation and Maintenance Center of Shandong Water Transfer Project, Qingdao* 266300, *China*; 3. *Yushu Prefecture Environmental Monitoring Station, Yushu* 815000, *China*

Abstract: Grassland ecosystems constitute a vital component of the global terrestrial carbon pool, and fluctuations in their carbon stocks significantly impact climate change and ecological balance. In this review, we outline the primary methods for estimating grassland carbon stocks and discuss the effects of natural factors and human activities on grassland carbon stocks, on the basis of a bibliometric analysis of research on grassland carbon stocks over the last three decades in the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database. The main points covered in this review are as follows: Grassland carbon stock estimation methods primarily encompass traditional approaches based on field measurements and emerging methods utilizing multi-source data analysis. The use of different grassland classification systems significantly influences grassland area statistics and carbon density values per unit area. Alpine

收稿日期: 2025-10-18; 改回日期: 2025-12-25
基金项目: 青海省重点研发与转化项目: 基于玉树地区高寒草原生态系统修复的碳汇评估及增汇技术研究(2024-SF-143)和山东省重点研发计划(2025TSGCCZZB0189)资助。
作者简介: 李捷(1972－), 男, 山东青岛人, 博士。E-mail: jli@qut. edu. com; 于雪婷(2001－), 女, 山东聊城人, 硕士。E-mail: 2776377150@qq. com。 ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.
* 通信作者 Corresponding author. E-mail: jli@qut. edu. com

grassland and temperate grasslands constitute China's predominant grassland types, collectively accounting for over 85% of the nation's grassland ecosystem carbon stocks. Estimates of carbon stocks for the same grassland type differ depending on the methodologies applied. Climate conditions, topographic features, land-use practices, and anthropogenic disturbances collectively influence grassland ecosystem carbon stock dynamics by regulating vegetation productivity and soil-carbon stability.

Key words: grassland ecosystem; grassland type; carbon stock; bibliometrics; estimation method

气候变化目前已成为全球瞩目的热点问题和面临的重大挑战之一，据 IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会，Intergovernmental Panel on Climate Change）第六次评估报告（IPCC sixth assessment report，AR6）指出，全球地表温度较工业化前水平已升高 1.1 ℃，且变暖速率持续加快[1-2]。在不断变化的气候背景下，陆地植物的光合作用不仅有助于减少温室气体的排放，而且对于减缓全球温度上升具有重要意义。其中全球草地面积约为 52.5 亿 hm^2，占全球陆地总面积的 40.5%，草地碳储量占全球陆地总碳储量的 30%～34%，是仅次于森林的第二大碳库，也是减少温室气体和调节气候的关键因素[3-4]。

在草地生态系统中，植被碳库和土壤碳库作为草地生态系统碳库的两大核心组分，其分布格局与变化机制也受到自然因素和人类活动的双重调控，碳储量估算方法也有所不同[5]。植被碳库的估算主要依赖于植被生物量及其碳含量。植被生物量不仅是反映草地生态系统中物质流、能量流和生产力的重要指标，更是衡量草地生态系统碳循环和碳收支的关键要素[6]。植被碳储量主要取决于植物群落的生产力、物种组成和生物量分配模式，而气候、地形因子、放牧及刈割等管理措施通过改变植被结构与功能间接影响碳固定过程[7]。土壤碳库作为维持土壤肥力与结构稳定性的关键组分，其含量变动对草地生态系统的碳储量具有显著调控作用，且土壤碳储量的稳定性与有机质的输入－输出平衡密切相关，受微生物分解速率、土壤理化性质以及土地利用方式变化的显著影响[8]。

近年来，尽管在草地碳循环机理方面取得了很多进展，但对多尺度下植被－土壤碳储量的协同响应机制、自然与人为干扰的交互作用及其长期动态仍缺乏更深入的系统认知。因此分析草地生态系统碳储量关键驱动因子和估算方法的研究现状，梳理不同生态过程中碳库的调控路径，有助于进一步优化草地固碳管理、应对气候变化和促进生态恢复。

1　草地碳库及其估算方法

草地碳库主要包含植被碳库和土壤碳库。其中，植被碳库又可以分为地上植被和地下植被两大子碳库。

1.1　植被碳库

1.1.1　地上植被碳库　　草地地上生物量是计算植被地上碳储量的基础，也是衡量草地群落生长状况和物质循环的关键参数[9]。地上植被碳库估算方法可以分为传统取样调查方法和大尺度监测方法两大类。前者主要有样地实测法（直接估算法）和生物量回归模型法（间接估算法），后者主要是基于遥感技术和无人机监测的方法，但更多的还是趋向于多源数据、多种方法相结合的方式（表 1）。

样地实测法（直接估算法）是指设置样方，收割植被后烘干称重测定干物质产量，通过碳含量转换系数（如重铬酸钾氧化法测定有机碳含量）从而计算碳储量[10-11]。目前，大多数学者都把草原类型作为一个地区单元来进行研究，并以碳含量的均值或中间值来计算。这种方法虽然精度高、简单易行且成本可控，但仅适用于小区域研究。因此，对于较大的区域，学者们大多采用生物量回归模型法（间接估算法）进行研究。它指通过获取植被高度、盖度、株高等易测参数与生物量建立回归模型，进而估算碳储量。常用的模型有线性模型、幂函数模型等。阿力米日·阿力木江等[12]通过建立群落高度与地上生物量之间的回归模型估测地上生物量，其精度可达 90% 以上。刘霞等[13]则利用冠幅面积、灌木高度和植冠体积与灌木生物量构建幂函数模型，结果表明幂函数是预测灌木生物量模型的最佳形式。生物量回归模型法虽适用于大区域研究，但其严重依赖本地参数且跨区域需校准。

遥感技术是结合地面实测数据，通过卫星传感器获取的不同植被指数[如归一化植被指数，normalized

difference vegetation index, NDVI]与生物量建立关系模型,进而估算碳储量。研究表明,不同的指数适用于不同的植被类型和生长阶段:如归一化指数(NDVI)在草甸等均质草地类型中表现较好[14],而增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)和土壤调整植被指数(modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)适用于表征植被覆盖度,尤其是MSAVI更适用于干旱半干旱地区[15]。与单一植被指数相比,融合植被指数能够更全面地反映植被生长状况,提高碳储量估算的准确性[16]。随着遥感技术的不断发展,许多高分辨率遥感数据(MODIS、Landsat)已被应用于草地资源遥感领域,特别是轻便灵活的无人机技术[17],其亚米级分辨率可有效降低混合像元效应,李淑贞等[18]通过无人机多光谱数据反演呼伦贝尔草原地上生物量,精度均高于卫星影像,这表明该方法对小范围内的草地监测十分有效。

遥感数据、地面实测数据以及模型输出数据,这些数据在估算方法中单独使用或多或少都有其局限性,将多种不同来源、尺度、分辨率的遥感及地面数据进行整合,通过数据同化、云计算平台以及机器学习等关键技术,实现多源数据分析可提高估算精度和可靠性。王婷等[19]利用高空间分辨率的遥感数据与野外实测生物量数据,并结合机器学习算法构建了估算模型,估测了青海省兴海县草地地上生物量,结果表明两种估算模型的精度均较高。这种将遥感数据与地面实测数据结合,并利用机器学习算法构建估算模型的方法,不仅利用了遥感技术高时空探测能力和地面实测数据的高精度优势,还充分将机器学习算法的高效性、稳健和精确性融入其中,弥补了各自的不足,提高了估算的准确性。但该方法也存在多源数据处理复杂且模型依赖程度高的缺点[20-21]。

表1 草地植被地上碳储量估算方法及优缺点

Table 1 Methods for estimating above-ground carbon stocks in grassland vegetation and their advantages and disadvantages

方法 Method	估算方法 Estimation methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
传统方法 Traditional methods	样地实测法(直接估算法) Field measurement method (direct estimation method)	操作简便、成本低廉、小尺度高精度、强数据兼容性。Simple operation, low cost, high precision at small scales, and strong data compatibility.	工作量大、小尺度适用、随尺度扩大误差显著增加。A high workload is applicable to small scales, with errors increasing significantly as the scale expands.
	生物量回归模型法(间接估算法) Biomass regression modeling method (indirect estimation method	快速、低成本,适用于大区域研究。It is fast, low cost, and suitable for large-scale studies.	依赖本地参数、跨区域需校准。It depends on local parameters, and cross-region calibration is required.
新兴方法 Emerging methods	遥感技术 Remote sensing technology	适用于大范围快速监测、支持动态评估。It is suitable for large-scale rapid monitoring and supports dynamic assessments.	依赖地面数据校准,易受云层、分辨率限制。It relies on ground-based data calibration, making it susceptible to cloud cover and resolution limitations.
	无人机技术 Drone technology	易获取高分辨率图像、轻便灵活、适用于小范围。High-resolution images are easily obtained, light weight, flexible, and suitable for small areas.	覆盖范围有限、数据处理复杂、易受环境限制。These methods have limited coverage, complex data processing, and are susceptible to environmental constraints.
	多源数据分析 Multi-source data analysis	克服单一数据局限性、提高精度、支持长期动态监测。Overcome the limitations of single data source, improve accuracy, and support long-term dynamic monitoring.	数据异质性处理复杂、模型依赖性高、技术门槛高。Data heterogeneity poses complex challenges, exhibits high model dependency, and requires high technical expertise.

1.1.2 地下植被碳库　草地地下生物量是指草地生态系统中地下部分的有机物质总量,包括植物的根系、根茎、块茎以及与根系共生的微生物等[22]。对于地下生物量的测量方法有很多,可分为根系采样法、根冠比法和相关关系法(表2),其中根系采样法主要包括挖土块法、根钻法、内生长土芯法和微根区管法等[23-24]。目前,地下植被碳库的量化研究主要采用以下两种方法体系:一是基于根冠比或地上-地下生物量回归关系的间接估算法;二是依托环境因子与根系分布的统计模型进行预测。其中,前者通过建立冠层生物量与根系生物量的数学关系实现碳储量推算,后者则利用温度、降水等环境参数与地下生物量的相关性进行估算[25-26]。而目前最常用的方法是

根冠比，但根冠比数据相对缺乏，且估算差异较高。Piao 等[27]研究发现 17 类草地根冠比范围为 0.45～15.68，方精云等[28]对中国 6 类草地根冠比测算范围为 0.38～25.00。这表明根冠比数据来源不同最终导致地下生物量估值结果差异显著。Mokany 等[29]甚至认为在全球各类植被的 786 个根冠比中约有 62% 的数据存在问题。

表 2　草地植被地下碳储量估算方法及优缺点

Table 2　Methods for estimating below-ground carbon stocks in grassland vegetation and their advantages and disadvantages

估算方法 Estimation methods		优点 Advantages	缺点 Disadvantages
根系采样法 Root sampling methods	挖土块法 Block excavation method	应用范围广、操作简便、可获取大量重复数据。They have a wide range of applications, are easy to operate, and can obtain large amounts of duplicate data.	耗时耗力、破坏性采样、动态监测易中断。Time-consuming and labor-intensive, destructive sampling and dynamic monitoring are prone to interruption.
	根钻法 Root drilling method	操作简便，对样地破坏性小，采样率高。It is simple to operate, minimally disruptive to sample plots, and has a high sampling rate.	根系易缺失，且采样面积小而导致数据代表性较差。Root systems are prone to loss, and small sampling areas result in poor data representativeness.
	内生长土芯法 Internal growth soil core method	根易采集，样地破坏小，可精准测定土壤初级生产力季节动态。Root systems are easy to collect, cause minimal disturbance to plots, and enable precise measurements of seasonal dynamics in soil primary productivity.	易受到环境因素的干扰，产生误差。It is susceptible to interference from environmental factors, leading to errors.
	微根区管法 Micro-root zone tube method	省时省力，精确采样，样本代表性高，准确可靠。Time-saving and effort-saving, precise sampling, highly representative samples, accurate and reliable.	成本高、测量范围小，不能全面反映植物根系的特征。The high cost and limited measurement range prevent it from fully reflecting the characteristics of plant root systems.
根冠比法 Root-shoot ratio method		操作简便，简化生物量估算，对样地破坏小。Simple operation, streamlined biomass estimation, and minimal disturbance to the plot.	样本代表性较差，物种类型差异显著，易受环境影响。The sample lacks representativeness, exhibits significant variations in species composition, and is highly susceptible to environmental influences.
相关关系法 Correlation method		非线性优化、估算效率提高。Nonlinear optimization improves estimation efficiency.	根系－地上部生长异步性显著，模型假设可靠性不足。The significant asynchrony between root and shoot growth indicates insufficient reliability of the model assumption.

1.2　土壤碳库

土壤碳库主要由土壤有机碳库和无机碳库组成，其中土壤有机碳库所占比例较大，是全球碳循环中重要的流通途径[30]。土壤有机碳库主要集中在植物根系分布的表层，由于气候、植被和土壤类型等不同，土壤有机碳储量地理差异较大[31]。

土壤有机碳库估算的传统方法主要包括土壤类型法，生命地带、生态系统类型法和植被类型法以及相关关系统计法（表 3）。其中，土壤类型法适用于大尺度区域估算，李春亮等[32]针对黄土高原甘肃省境内表层土壤有机碳进行了不同土壤类型、土地利用方式及地形地貌中的分布研究，结果表明灰褐土、林地以及地形地貌中呈塬面有机碳密度最大。生命地带、生态系统类型法和植被类型法则是利用土壤碳含量及面积来进行碳储量估算。这些方法能够在一定程度上反映植被与气候之间的联系，提高计算精度，但由于受分类体系的主观因素及区域适应性的限制，反演的结果也会有一定的误差[33]。而相关关系统计法通过统计学模型建立土壤有机碳与影响因子的关系来计算土壤碳储量。该方法能揭示土壤有机质与其驱动因子间的关联性，可通过实测数据结合气候、土壤属性和植被等数据，分析土壤有机碳含量的关键因子[34]。但这种方法在模型构建过程中存在一定的局限性，且在较大尺度中依据少量样点建立的模型可信度低。

随着信息技术发展，模型模拟法[35－36]、GIS（地理信息系统，geographic information system）估算法[37]与 ^{13}C 同位素示踪法逐渐被广泛应用（表 3）。模型模拟法通过建立数学模型和计算模拟来估算碳储量，主要模型有 CENTURY、Roth C 和 DNDC 等，其中 CENTURY 和 Roth C 应用较广。该方法能全面反映各种因素带来的影

响,具有较好的完整性和系统性。曹瑞红等[35]运用CENTURY模型成功模拟了甘南高寒草甸土壤有机碳储量的动态,Singhi等[36]则通过DNDC和Roth C模型揭示水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)等种植系统对土壤有机碳储存的影响,但是该方法所有数据依赖实测值且存在参数精度限制。GIS估算法结合了地理信息系统、遥感技术与实地采样数据,通过空间分析提高估算的精确度。Man等[37]基于RS-GIS(遥感-地理信息系统,remote sensing-geographic information system)技术发现1992—2012年间三江平原旱田土壤有机碳年减17.5×10^6 t,稻田年增2.1×10^7 t。^{13}C同位素示踪法同前面所提的方法有所不同,它是一种利用碳的稳定同位素^{13}C作为标记,追踪碳元素在土壤有机碳库中的来源、转化路径及动态平衡的研究方法。这种方法适合在土壤的微尺度上进行研究,能够更加直接地分辨出各部分碳在土壤中的转化情况,从而对外部输入到土壤中的碳进行准确的估计[38-39]。但它同样也存在局限性,由于技术和成本的限制,它更适用于小范围估算,在大范围内不能保证数据的精度,且不能长期持续地进行碳储量的监测。

表3 土壤碳储量估算方法及优缺点

Table 3 Methods for estimating soil carbon stocks and their advantages and disadvantages

方法 Method	估算方法 Estimation methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
传统方法 Traditional methods	土壤类型法 Soil classification method	适用于大尺度范围监测、精准估算。It is suitable for large-scale monitoring and precise estimation.	依赖高精度数据,但数据获取难度大。It relies on high-precision data, but obtaining such data is challenging.
	生命地带、生态系统类型法和植被类型法 Life zones, ecosystem classification method, and vegetation classification method	一定程度上可以反映植物与气候之间的关系,精度较高。To a certain extent, this can reflect the relationship between plants and climate with high accuracy.	生态类型与面积统计误差大,模型无法捕捉土壤碳非线性变化。Large statistical errors exist in the ecosystem type and area data, preventing the model from capturing nonlinear changes in soil carbon.
	相关关系统计法 Correlation statistics method	能揭示土壤有机质与其驱动因子间的关联性,精度较高。This can reveal the relationship between soil organic matter and its driving factors with high precision.	模型局限性强,大尺度下少样点建模可信度不足。The model has strong limitations, with insufficient reliability for large-scale modeling owing to sparse data points.
新兴方法 Emerging methods	模型模拟法 Model simulation method	可综合多因子影响,具有较好的系统性和完整性。It can integrate the influence of multiple factors, demonstrating good systematics and completeness.	空间数据需要采集、数据量大,模型需要长期训练。Spatial data require collection and involve large volumes, whereas models require long-term training.
	地理信息系统估算法 Geographic information system (GIS) estimation method	适合大尺度研究,估算精度较高。It is suitable for large-scale studies with relatively high estimation accuracy.	所需参数较多,且也需要地区的空间特性数据。A large number of parameters are required, and regional spatial characteristic data are also needed.
	^{13}C同位素示踪法 ^{13}C isotope tracing method	适用于微尺度研究,可精准分辨土壤碳转化路径,揭示微观碳储量动态[38-39]。Suitable for micro-scale research, it enables the precise resolution of soil carbon transformation pathways and reveals the dynamics of microscopic carbon reserves[38-39].	仅适用于小规模定量核算,大尺度应用时数据准确性受限。Applicable only to small-scale quantitative calculations; data accuracy is limited when applied to large-scale applications.

1.3 中国草地类型与碳储量的关系

我国草地生态系统碳储量为17.3~59.5 Pg,其中植物碳储量为0.6~4.7 Pg,土壤碳储量为16.7~56.3 Pg,中值分别为44.1、1.2和37.7 Pg[40-41]。而中国草地类型众多,不同草地类型碳储量估算值也有很大差别。运用CiteSpace对近30年来发表的有关我国不同草地类型碳汇碳储量的2051篇文献,使用“草地碳汇”、“草地类型”与“草地碳储量”为主题检索词,通过对中文期刊关键词进行共现分析,采用“寻径网络算法”与“修建切片网络”方式进行网络裁剪,关键词共现结果如图1所示。近30年来发表的中文期刊中草地类型(265次)、草地(179次)、气候变化(82次)、天然草地(80次)和青藏高原(80次)为出现频次较高的5个词,且草地类型、草地、天然草地和草地资源为中介中心性大于0.1的关键词,出现频次和中介中心性排名前10的关键词如表4所示。其中,草地类型、

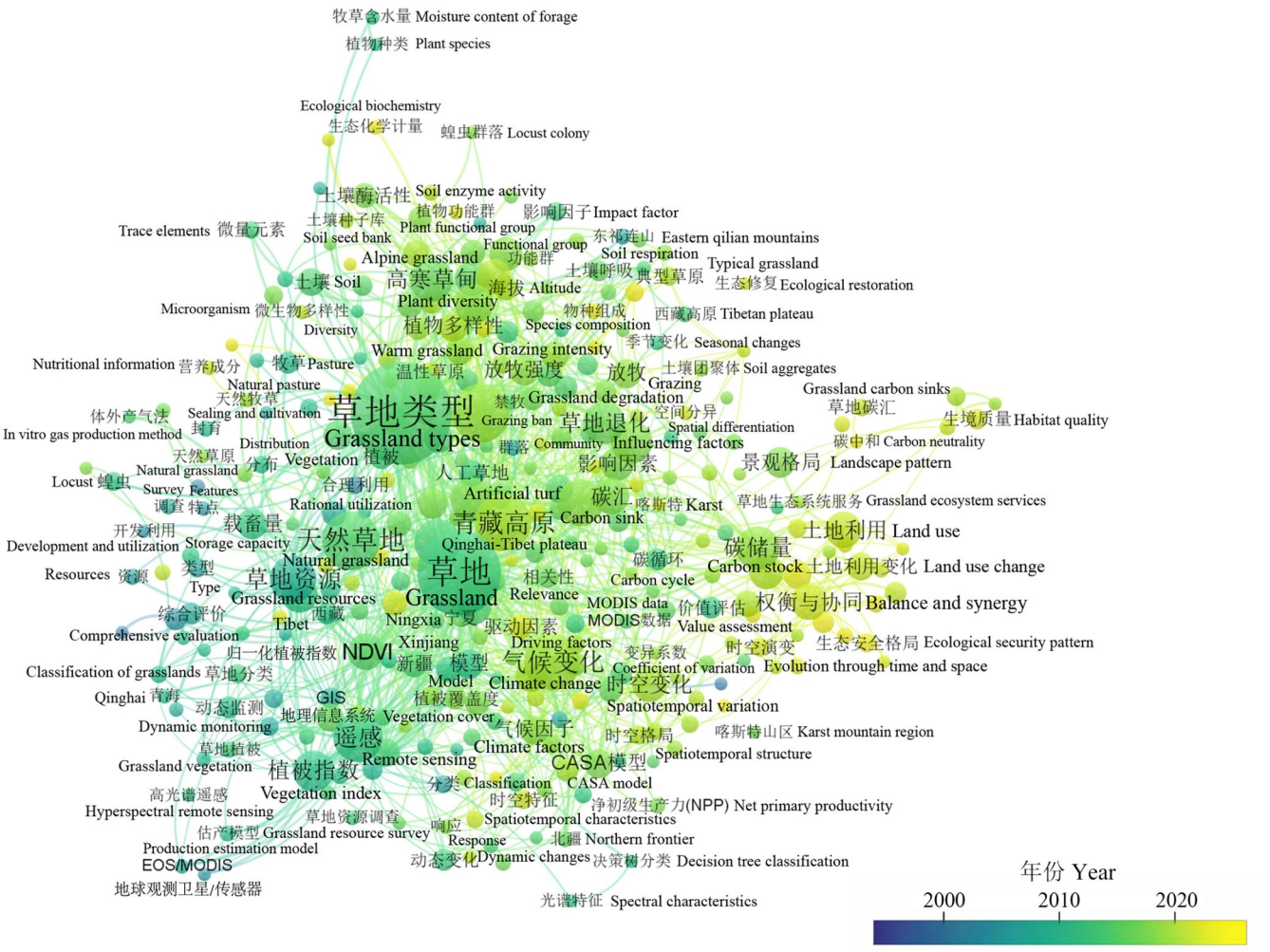


图 1　关键词共现图

Fig. 1　Keyword co-occurrence diagram

草地和气候变化的出现频次排名前三。图 2 表明，近 5 年来草地类型、气候变化、土壤有机碳、净初级生产力（net primary production，NPP）等关键词关系密切。草地类型是气候变化影响下草地生态系统的核心因素，温度和降水模式的变化直接影响草地类型的分布与生长状况，从而进一步影响净初级生产力和土壤有机碳储量[42]。不同草地类型的 NPP 均值有很大差异，其中高山亚高山草甸及草甸的 NPP 均值较高，荒漠草地最低，这主要是受到降水和气温的影响[43]。此外，温度的升高也能够促进土壤微生物对碳和氮的转化速率，进而促进土壤有机碳的分解并降低其稳定性[44]。草地类型作为研究的核心因素，通过与气候变化、NPP 和土壤有机碳之间的关系，深刻影响草地生态系统的碳储存与功能，尤其在青藏高原等特定地区，这些变化对生态系统的稳定性和碳循环具有重要意义。

基于上述文献分析，进一步探究草地类型碳储量估算方法之间的差异性。由于数据来源、草地类型划分系统的不同不仅会影响草地总面积的统计结果，也会显著改变单位面积碳密度的取值[45]。Olson 等[46]构建的全球植被碳密度数据库在国际研究中广泛应用，但由于其对全球生态系统的高度概括及各国植被分类体系的差异，直接用于中国草地碳库估算可能会引入较大误差[25,45]。Ni[11]利用全球平均植被碳密度参数估算了中国草地生物量碳库，其结果为 3.06～4.67 Pg，平均碳密度为 1020～1148 g C·m^{-2}，明显高于方精云等[47]和朴世龙等[48]基于实地调查数据估算得到的草地生物量碳库（1.05～1.15 Pg）。此外，不同草地类型碳储量的估算结果也存在显著差异。青藏高原的高寒草地和内蒙古的温带草地生态系统是我国两种主要草地类型，两者占全国草地碳储量的 85% 以上[49]。张琛悦等[50]根据实测数据估算了我国青海省草地生态系统碳储量约为 6.12 Pg，其中高寒草地碳储量最

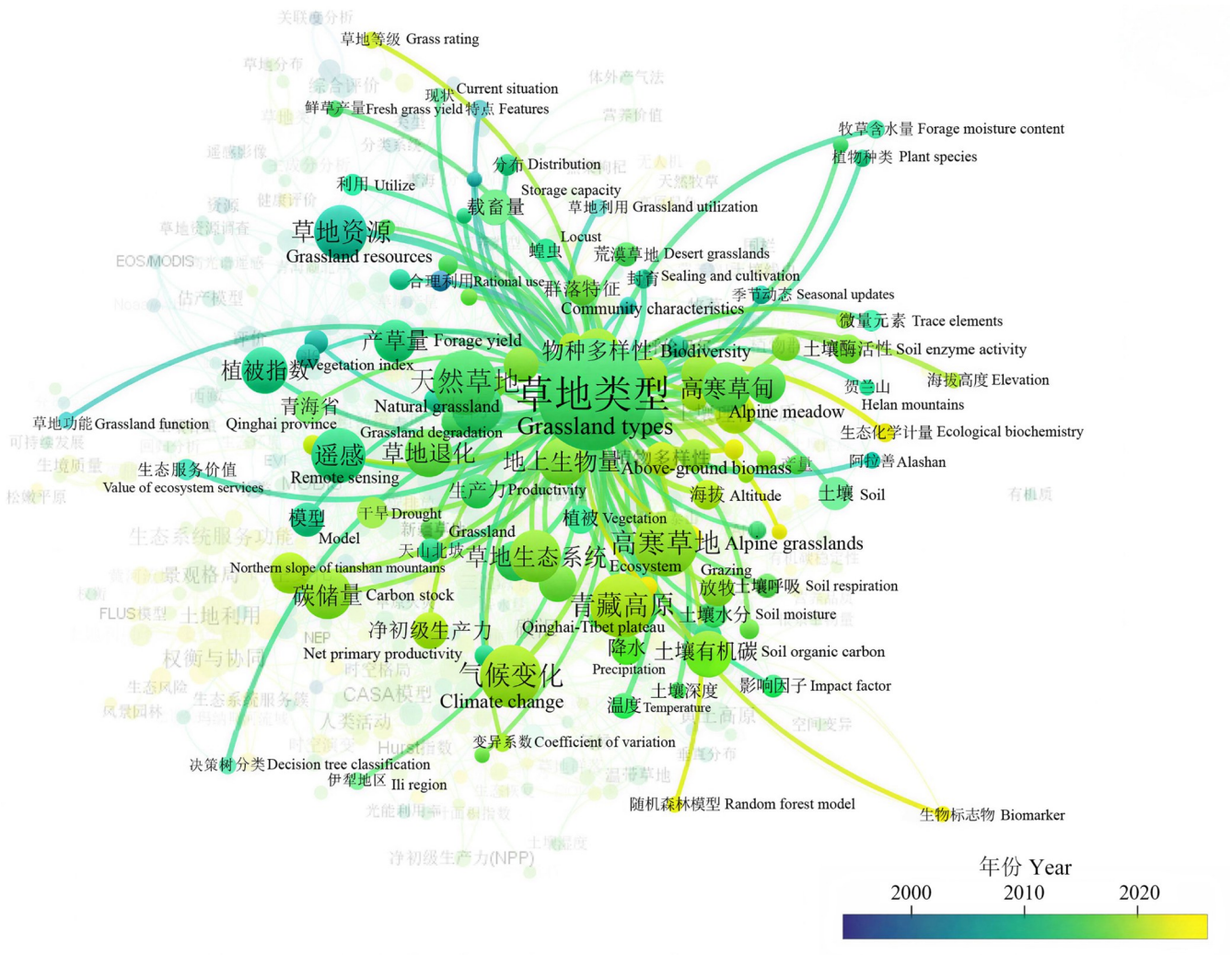


图2 草地类型关系图谱

Fig. 2 Grassland type relationship diagram

表4 中国知网数据库出现频次和中介中心性前10的关键词

Table 4 Top 10 keywords by frequency and intermediary centrality in the China national knowledge infrastructure (CNKI) database

排名 Ranking	按出现频次排名 Ranked by frequency of occurrence		按中介中心性排名 Ranked by intermediary centrality	
	关键词 Keywords	出现频次 Occurrence frequency	关键词 Keywords	中介中心性 Intermediary centrality
1	草地类型 Grassland types	265	草地类型 Grassland types	0.52
2	草地 Grassland	179	草地 Grassland	0.44
3	气候变化 Climate change	82	天然草地 Natural grassland	0.12
4	天然草地 Natural grassland	80	草地资源 Grassland resources	0.12
5	青藏高原 Qinghai-Tibet plateau	80	气候变化 Climate change	0.08
6	高寒草地 Alpine grasslands	76	高寒草地 Alpine grasslands	0.08
7	遥感 Remote sensing	44	遥感 Remote sensing	0.08
8	碳储量 Carbon stock	44	青藏高原 Qinghai-Tibet plateau	0.07
9	草地资源 Grassland resources	38	产草量 Forage yield	0.06
10	生物量 Biomass	37	生物量 Biomass	0.04

高，其次是高寒草甸草原和低地草甸。马文红等[51]根据实测数据估算内蒙古温带草原碳储量约为 22.6×10^7 t，碳密度依次为草甸草原＞草甸＞典型草原＞荒漠草原。

不同的估算方法也会使草地碳库存在较大差异。以青藏高原为例，在基于地面调查的生物量估算中，不同方法在样地尺度、组分构成及由样地尺度向区域尺度的外推方式等方面存在明显差异。基于样地实测估算青藏高原植被生物量碳库为 0.2 Pg，碳密度为 169 g·m^{-2}[52]，而通过生物量密度法测得碳库值为 1.9 Pg[25]，远远高于前者的估算值，这可能由于植物样方里还包括了凋落物和立枯物。基于遥感技术的植被碳储量估算依赖植被指数与生物量之间的经验关系，其估算结果介于 0.2～0.5 Pg 之间[29,40,48]。模型模拟法中的不同模型在结构设定和参数假设上的差异，可导致青藏高原草地生物量碳储量估值相差约 3 倍[26,53]。对于土壤碳库，利用模型模拟法估算土壤有机碳密度值约为 6.6～21.7 kg C·m^{-2}[54-55]。而结合实测与遥感数据所得土壤碳密度（6.5 kg C·m^{-2}）及碳库（7.4 Pg）则相对偏低[56]。从尺度转换角度看，估算碳储量的方法还可以分为“自下而上”和“自上而下”两大类，前者包括清查法、涡度相关法和生态系统过程模型模拟法，后者主要为大气反演法。汪涛等[57]利用“自下而上”和“自上而下”方法综合评估了青藏高原陆地生态系统的碳汇现状，研究发现 2001－2015 年间青藏高原陆地生态系统碳汇为 33.12×10^6～37.84×10^6 t C·a^{-1}。

2　草地生态系统碳库的影响因素

草地生态系统碳储量的估算受到诸多因子及其交互作用的影响，主要包括自然因素和人为因素两部分。其中自然因素包括地理位置（海拔、坡向、坡度等）、气候条件（温度、降水）、土壤条件（土壤质地、理化性质、植被类型等）；人为因素包括农业管理措施（放牧、施肥等）和土地利用方式[58]。

2.1　自然因素

地理因素，海拔影响区域降水和温度等水热条件，造成区域植被类型、土壤温湿度以及土壤微生物种类等差异，进而影响土壤碳的输入和输出[59]。宁夏罗山干旱温带山地草地随着海拔的升高，土壤碳库呈现逐渐上升的趋势，祁连山南麓高寒草地土壤有机碳随着海拔的变化而变化，但超过一定海拔高度后，土壤有机碳含量又会开始下降[60-61]。这是由于海拔上升到一定高度后，在土壤条件较为恶劣的草地上，植物生长受到影响，土壤有机碳输入减少，致使有机碳含量下降[62]。不同坡度和坡向会形成差异化的光照、降水、生物群落及微生物活动等微环境条件，从而显著影响土壤有机碳的积累与分解过程。研究发现，土壤有机碳密度和储量一般随坡度增大而降低，而沿阳坡至阴坡变化时，随着坡向角度的增加，土壤碳密度呈上升趋势[63]。

气候因素，气温和降水对植被和土壤碳库的影响尤为显著。温度和降水的时空分布直接决定了植被的生长状况和生产力，它们是植被碳储存能力的决定性因素[64]。研究表明，温度上升和降水量增加会导致部分地区植被生长季延长，从而促进植物生物量的积累，最终提高草地净初级生产力（NPP）[65]。Wan 等[66]在夏季温度升高的条件下，发现美国高草草原的总生物量显著增加，间接延长了植物的生长季。值得注意的是，在干旱或半干旱地区，气候变暖会加剧水分蒸发，降低土壤有效含水量，进而对草地 NPP 产生抑制作用[67]。气候变化还引发了降水模式的变化，有研究表明，降水与植被生物量存在显著的相关关系[68]。张锦涛等[69]基于实测数据，发现青藏高原不同草地类型的年均降水量与地上生物量之间存在显著正相关关系。除此之外，温度和降水也是影响土壤有机碳（soil organic carbon，SOC）输入和分解的主要因子。在暖干化气候条件下，气温升高会加速土壤微生物的分解过程，这种生物地球化学效应可能会抑制植物的生长发育，并造成区域土壤碳储量的持续降低[70]；而在高寒草地区域，温度的升高反而会使土壤有机碳含量升高[71]。降水对土壤碳库的影响机理也较为复杂。降水量的增加会增强微生物活性，促进土壤呼吸影响碳储量，但强降水又会抑制土壤呼吸，降低土壤的 CO_2 通量[72]。

土壤质地也会对土壤碳库产生一定的影响。一般认为土壤有机碳含量与黏粒含量之间存在正相关关系，主要是因为黏粒对土壤有机碳具有保护作用[73]。高黏粒土壤因其优越的水分保持能力，为植被生长提供了良好的水分条件，从而显著促进了土壤有机质的形成与积累，同时由于黏粒的存在，可有效吸附有机物，进而降低微生物对其的分解作用[74]。当然，也有一些学者认为黏粒含量与土壤碳储量无关。Yang 等[56]认为青藏高原高寒草地土壤有机碳密度与土壤黏粒含量呈正相关关系，而与土壤砂粒含量呈负相关关系。此外，不同类型的植被会通过影

响凋落物的分解速度间接影响土壤有机碳的分解速率。

2.2 人为因素

不同的农业管理措施可以改变土壤性质,影响土壤有机碳库。其中,放牧作为对草地影响最为广泛的土地利用方式,不仅是人类施于草地生态系统最强大的影响因素,同时也是导致草地碳储量变化的重要因素。过度放牧会导致草地植被因家畜过度啃食,使植物无法通过光合作用积累足够的生物量,降低草地的地上和地下生物量,也会破坏草地表层的土壤结构,导致土壤肥力下降,影响植物的生长和生物量的积累[75]。武帅楷等[76]采用收获法在山西监测不同放牧强度干扰下植物的生物量,研究表明放牧降低了植物群落的地上、地下生物量,轻度和重度放牧对植物生物量影响较大,中度较小。在中国天山北坡山地草甸上设立不同的放牧强度试验区分析得出,随着放牧强度的增加土壤有机碳含量呈下降趋势[77]。但也有不少学者认为短期内的轻度放牧对土壤有机碳含量没有显著影响,也有研究认为适度放牧可以增加土壤有机质含量[78]。

施肥作为重要的农业管理方式,通过调控土壤理化特性和微生物群落功能,不仅能够提高作物生产力,还显著影响土壤碳库动态。根据肥料来源差异,可将其区分为有机和无机两大类型。研究表明,二者协同施用可有效提升土壤总有机碳储量,其中对活性有机碳组分的提升效果尤为显著。与不施肥料相比,施肥料更能提高土壤有机碳储量[79-80]。长期单独施用无机肥会降低有机碳总量,但有的学者却认为对土壤有机碳含量没有显著影响[81]。另外,秸秆还田、灌溉、轮作等农业管理方式也会对土壤碳库产生一定影响。

土地利用方式作为土壤碳库的关键调控因子,通过改变有机碳的输入-输出平衡,直接决定着陆地生态系统的碳循环过程。基于InVEST模型的流域土地利用格局与碳储量之间的变化研究表明,耕地、林地和草地等土地利用方式的转变是研究区碳储量减少的主要原因[82]。耕地和林地的转出导致土壤团聚体结构遭到破坏,使原本受植被保护的有机质暴露于分解环境中,加速了碳元素的释放过程,最终造成土壤碳储量减少[83]。但目前,对于林地转变为草地对土壤碳库有机碳含量的影响还存在较大争议[84-85],有待通过更多试验加以验证。

3 展望

植被碳库和土壤碳库是研究草地生态系统碳储量及碳过程的主要方向之一,其估算方法各有不同,受到的影响因素也各异。因此今后的工作将主要集中在以下几个方面。

1)完善碳库估算方法,提高估算精度。由于方法不同、样本量的限制以及数据来源的不同,导致生态系统中碳储量的估算存在较大的差异[1]。虽然目前已经有了多源数据分析方法,但未来仍需进一步探索其发展方向,解决不同尺度下的难题,提高碳储量评估的准确性和可靠性。

2)多时空尺度多种草地生态系统类型下的碳储量影响因素机制。草地生态系统类型多样,不同草地类型在碳循环过程中作用各异。深入研究各类草地生态系统的碳储量变化规律及其影响因素,有助于揭示草地生态系统碳循环的内在机制[86]。同时,需进一步研究植被-土壤碳库的协同响应机制,尤其是自然与人为因素的交互作用及其长期动态,特别是存在人类活动干扰时,植物群落结构、组成、功能的变化以及土壤微生物活性的改变都会对土壤碳循环产生深刻的影响。

3)不同管理措施对碳库的影响机制。除了草地群落的演替和气候变化等自然因素,过度放牧等不合理利用方式也会导致出现不同程度的退化现象。因此如何优化放牧强度、刈割、有机-无机肥的配施等土地利用方式,对草地碳储量的影响和提升草地碳汇功能具有重要的现实意义。

参考文献 References:

[1] Xie L J, Bai Z K, Yang B Y, *et al*. Carbon sequestration assessment methods at home and abroad for terrestrial ecosystems: Research progress in achieving carbon neutrality. Earth Science Frontiers, 2023, 30(2): 447-462.
谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展. 地学前缘, 2023, 30(2): 447-462.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 synthesis report: Climate change 2023. (2023-03-20) [2025-07-20]. https://

www. ipcc. ch/report/ar6/syr/.

[3] Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands. Global and Planetary Change, 2009, 67(1/2): 20－28.

[4] Schuman G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 391－396.

[5] Ha Q. The carbon storage of different grassland patterns in Saihanwula National Nature Reserve. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
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. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.

[6] Yan Y, Zhu J J, Zhang B, *et al*. A review of belowground biomass allocation and its response to global climatic change in grassland ecosystems. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(5): 585－596.
严月, 朱建军, 张彬, 等. 草原生态系统植物地下生物量分配及对全球变化的响应. 植物生态学报, 2017, 41(5): 585－596.

[7] Lozano-Garcia B, Parras-Alcantara L, Brevik E C. Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. Science of the Total Environment, 2016, 544(8): 963－970.

[8] Hoffmann T, Glatzel S, Dikau R. A carbon storage perspective on alluvial sediment storage in the Rhine catchment. Geomorphology, 2009, 108(1): 127－137.

[9] Fan X, Cai J, Liu J P, *et al*. Effects of grassland plant communities on ramet expansion ability and biomass allocation of *Potentilla anserina*. Pratacultural Science, 2017, 34(1): 119－128.
樊星, 蔡捡, 刘金平, 等. 草地植物群落组成对鹅绒委陵菜无性系拓展能力及生物量配置的影响. 草业科学, 2017, 34(1): 119－128.

[10] Trissanti V N, Amalo L F, Handayani L D W, *et al*. The estimation of biomass and carbon stocks in mangrove forest ecosystem of Karawang Regency, West Java. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1109(1): 012099.

[11] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205－218.

[12] Alimiri A J, Tang B J, Kong F X, *et al*. Study on convenient estimation technique of aboveground biomass of natural grassland in Xinjiang. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4): 1308－1315.
阿力米日·阿力木江, 唐邦洁, 孔繁晰, 等. 新疆天然草地地上生物量的便捷估测技术研究. 草地学报, 2025, 33(4): 1308－1315.

[13] Liu X, Ling C X, Chen Y F, *et al*. Additive biomass models and carbon content of thirteen typical shrubs in Erdos Region. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(4): 117－128.
刘霞, 凌成星, 陈永富, 等. 鄂尔多斯地区13种典型灌木的可加性生物量模型及含碳率. 林业科学, 2025, 61(4): 117－128.

[14] Wang S J, Liu W H, Jin G L, *et al*. Temporal and spatial changes of grassland aboveground biomass and its response to climate factors in Xinjiang. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2320－2332.
王生菊, 刘文昊, 靳瑰丽, 等. 新疆草地地上生物量时空变化及对气候因子的响应. 草地学报, 2025, 33(7): 2320－2332.

[15] Liang B M, Liu X, Hao Y Y, *et al*. Extraction of desert vegetation information based on five vegetation indices. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 647－654.
梁博明, 刘新, 郝媛媛, 等. 基于5种植被指数的荒漠区植被生物量提取研究. 干旱区研究, 2023, 40(4): 647－654.

[16] Hou Z Q, Yan A, Xie K Y, *et al*. Estimation of aboveground biomass of *Diarthron tianschanicum* based on vegetation index fusion. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(11): 2787－2796.
侯正清, 颜安, 谢开云, 等. 基于植被指数融合天山假狼毒地上生物量的估测. 新疆农业科学, 2024, 61(11): 2787－2796.

[17] Liu Y Y, Feng T, Chen B J, *et al*. Estimation of multi-scale biomass and carbon storage in the coastal wetlands of Ningbo City through Field-UAV-Satellite synergy. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(1): 147－166.
刘杨毅, 冯添, 陈镔捷, 等. 星空地协同的多尺度宁波市滨海湿地生物量及碳储量估算. 遥感学报, 2025, 29(1): 147－166.

[18] Li S Z, Xu D W, Fan K K, *et al*. Research of grassland aboveground biomass inversion based on UAV and satellite remoting sensing. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 272－278.
李淑贞, 徐大伟, 范凯凯, 等. 基于无人机与卫星遥感的草原地上生物量反演研究. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 272－278.

[19] Wang T, Zhou W, Xiao J Y, *et al*. Estimating the grassland aboveground biomass based on remote sensing data and machine learning algorithm. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(2): 753-762.
王婷, 周伟, 肖洁芸, 等. 基于遥感数据和机器学习算法的草地地上生物量估算研究. 冰川冻土, 2023, 45(2): 753-762.

[20] Xiu X M, Zhou S F, Chen Q, *et al*. Above-ground biomass estimation of provincial scattered grassland based on Google Earth Engine and machine learning. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(3): 46-52, 75.
修晓敏, 周淑芳, 陈黔, 等. 基于Google Earth Engine与机器学习的省级尺度零散分布草地生物量估算. 测绘通报, 2019(3): 46-52, 75.

[21] Ren G B, Wang J B, Wu P Q, *et al*. Remote sensing-based estimation methods and future development directions for carbon storage in coastal wetland vegetation. Satellite Application, 2025, 16(5): 21-25.
任广波, 王建步, 吴培强, 等. 滨海湿地植被碳储量遥感估算方法及发展方向. 卫星应用, 2025, 16(5): 21-25.

[22] Yang W Y, Sun L Y, Song F B, *et al*. Research advances in species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in terrestrial agro-ecosystem. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3971-3979.
杨文莹, 孙露莹, 宋凤斌, 等. 陆地农业生态系统丛枝菌根真菌物种多样性研究进展. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3971-3979.

[23] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. Climatic Change, 2001, 49(3): 339-358.

[24] Ingram K T, Leers G A. Software for measuring root characters from digital images. Agronomy Journal, 2001, 93(4): 918-922.

[25] Fan J W, Zhong H P, Harris W, *et al*. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground. Climatic Change, 2008, 86(3/4): 375-396.

[26] Tan K, Ciais P, Piao S L, *et al*. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(1): 425-427.

[27] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, *et al*. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(2): B2001-B2002.

[28] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. China's terrestrial ecosystem carbon pool. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 109-128.
方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 109-128.

[29] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. Global Change Biology, 2006, 12(1): 84-96.

[30] Yang J J, Li A Y, Yang Y F, *et al*. Soil organic carbon stability under natural and anthropogenic-induced perturbations. Earth-Science Reviews, 2020, 205: 103199.

[31] Zheng J F, Chen S T. Soil organic matter and soil carbon sequestration. Science, 2021, 73(6): 13-17.
郑聚锋, 陈硕桐. 土壤有机质与土壤固碳. 科学, 2021, 73(6): 13-17.

[32] Li C L, Wang X, Zhang W, *et al*. Topsoil organic carbon storage and its spatial and temporal variation in the western Loess Plateau. Geoscience, 2022, 36(2): 655-661.
李春亮, 王翔, 张炜, 等. 黄土高原西段表层土壤有机碳储量及时空变化规律. 现代地质, 2022, 36(2): 655-661.

[33] Xu S Q, Kou W, Shi R X, *et al*. Soil organic carbon content and composition characteristics of different vegetation types in the northern Shaanxi Hongliulin coal mining area. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(3): 220-232.
许世奇, 寇威, 时若萱, 等. 陕北红柳林煤矿区不同植被类型土壤有机碳含量及组成特征. 干旱地区农业研究, 2025, 43(3): 220-232.

[34] Chen J Z, Shen C C, Fan Z H, *et al*. Influencing factors of soil organic carbon in citrus orchard in the Three Gorges Reservoir area. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(11): 2440-2450.
陈吉臻, 沈琛琛, 樊子豪, 等. 三峡库区柑橘园土壤有机碳关键影响因子分析. 长江流域资源与环境, 2024, 33(11): 2440-2450.

[35] Cao R H, Zhang M L, Li X J, *et al*. Simulation analysis of the spatial and temporal distribution of soil organic carbon storage in Gannan alpine meadow. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(11): 2145-2153.
曹瑞红, 张美玲, 李晓娟, 等. 甘南高寒草甸土壤有机碳储量时空分布特征的模拟分析. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2145-2153.

[36] Singhi P, Benbi D K. Modeling soil organic carbon with DNDC and RothC models in different wheat-based cropping systems in

north-western India. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51(9): 1184－1203.

[37] Man W D, Yu H, Li L, *et al*. Spatial expansion and soil organic carbon storage changes of croplands in the Sanjiang Plain, China. Sustainability, 2017, 9(4): 563.

[38] Liu Z. Research on the application of stable carbon isotope tracing technology in the soil organic carbon cycle//Proceedings of the sub-forum on environmental engineering technology innovation and application, 2019 annual science and technology conference of the Chinese society for environmental sciences (I). Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2019: 288－291, 375.
刘哲. 稳定碳同位素示踪技术在土壤有机碳循环中的应用研究//中国环境科学学会2019年科学技术年会－环境工程技术创新与应用分论坛论文集(一). 北京: 中国环境科学学会, 2019: 288－291, 375.

[39] Cai Y N, Ju Z S, Huang Q, *et al*. Analysis on the contents and methods of soil organic carbon dink. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 602－611.
蔡亚楠, 鞠正山, 黄勤, 等. 土壤有机碳汇内涵与核算方法辨析. 生态学报, 2024, 44(2): 602－611.

[40] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, *et al*. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. Scientia Sinica Vitae, 2022, 52(4): 534－574.
杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 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.

[41] Peng Y F, Chang J F, Zhao X, *et al*. Grassland carbon sink in China and its promotion strategies. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(4): 587－602.
彭云峰, 常锦峰, 赵霞, 等. 中国草地生态系统固碳能力及其提升途径. 中国科学基金, 2023, 37(4): 587－602.

[42] Huang L M, Zhao F, Hu G Z, *et al*. A study of differential vegetation responses to extreme climate events across grassland types in Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 1－13.
黄琳铭, 赵芬, 胡国铮, 等. 中国北方不同草地类型植被响应极端气候的差异研究. 生态学报, 2025, 45(24): 1－13.

[43] Liu Y Y, Zhang Z Y, Tong L J, *et al*. Spatiotemporal dynamics of China's grassland NPP and its driving factors. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 349－363.
刘洋洋, 章钊颖, 同琳静, 等. 中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素. 生态学杂志, 2020, 39(2): 349－363.

[44] Wu Q, Zhu A M, Ju X, *et al*. Advances in effects of climate change and grazing disturbance on soil organic carbon in grasslands. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 73－80.
武倩, 朱爱民, 鞠馨, 等. 气候变化和放牧干扰对草地土壤有机碳的影响研究进展. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 73－80.

[45] Wang S Q, Zhou C H, Luo C W. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. Progress in Geography, 1999, 18(3): 238－244.
王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, 1999, 18(3): 238－244.

[46] Olson J S, Watts J A, Allison L J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Washington D C: U. S. Department of Energy, 1983.

[47] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, *et al*. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981－2000. Science in China (Series D), 2007, 50(9): 1341－1350.
方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981－2000年间中国陆地植被碳汇. 中国科学D辑, 2007, 50(9): 1341－1350.

[48] Piao S L, Fang J Y, He J S, *et al*. Spatial distribution of grassland biomass in China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 491－498.
朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491－498.

[49] Wang S Z, Fan J W, Liu S. A comprehensive analysis of difference in carbon stock estimation in the grasslands of China. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(5): 905－913.
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.

[50] Zhang C Y, Zhao X, Xin Y C, *et al*. Carbon storage and distribution of grassland ecosystems in Qinghai Province. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58(2): 286－292.
张琛悦, 赵霞, 辛玉春, 等. 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.

[51] Ma W H, Han M, Lin X, *et al*. Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 192－195.

马文红, 韩梅, 林鑫, 等. 内蒙古温带草地植被的碳储量. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 192－195.

[52] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, *et al*. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(2): 268－277.

[53] Zhang F. Inventory of Chinese grasslands carbon storage and greenhouse gases emission. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
张峰. 中国草原碳库储量及温室气体排放量估算. 兰州: 兰州大学, 2010.

[54] Zhang Y Q, Tang Y H, Jiang J, *et al*. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. Science in China (Series D), 2007, 50(1): 113－120.
张永强, 唐艳红, 姜杰, 等. 青藏高原草原土壤有机碳动态表征. 中国科学D辑, 2007, 50(1): 113－120.

[55] Zhang L, Zhou G S, Ji Y H, *et al*. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China. Scientia Sinica (Terrae), 2016, 46(10): 1392－1405.
张利, 周广胜, 汲玉河, 等. 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.

[56] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, *et al*. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1592－1599.

[57] Wang T, Wang X Y, Liu D, *et al*. The current and future of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(7): 1506－1516.
汪涛, 王晓昳, 刘丹, 等. 青藏高原碳汇现状及其未来趋势. 中国科学(地球科学), 2023, 53(7): 1506－1516.

[58] Xu H K, Lu H, Liu H, *et al*. Research trends and focus areas on the global grassland carbon sink－A bibliometric analysis for 1992－2022. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2169－2178.
徐恒康, 逯辉, 刘灏, 等. 全球草地碳汇研究趋势与重点领域－基于1992－2022年文献计量分析. 草地学报, 2024, 32(7): 2169－2178.

[59] Wang L, Zeng H, Zhang Y J, *et al*. A review of research on soil carbon storage and its influencing factors in the Tibetan Plateau. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3506－3515.
王荔, 曾辉, 张扬建, 等. 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.

[60] Li J Z, Li W, Liu C, *et al*. Characteristics of soil carbon, nitrogen and C/N stoichiometry at different altitudes in warm mountain steppe in arid region. Pratacultural Science, 2025, 42(10): 2442－2454.
李锦臻, 李雯, 刘超, 等. 干旱区温性山地草原不同海拔土壤碳氮及其C/N化学计量变化特征. 草业科学, 2025, 42(10): 2442－2454.

[61] Li Y Z, Wei Y, Liu K H, *et al*. Spatiotemporal variation characteristics and drivers of soil organic carbon at different elevations in an alpine grassland. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(3): 357－372.
李宇章, 魏瑶, 刘坤和, 等. 高寒草地不同海拔土壤有机碳时空变化特征及驱动因素. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3): 357－372.

[62] Zhou H, Tian F P, Lu Y, *et al*. A review on influencing factors of grassland soil organic carbon storage. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(23): 153－157.
周恒, 田福平, 路远, 等. 草地土壤有机碳储量影响因素研究进展. 中国农学通报, 2015, 31(23): 153－157.

[63] Han X S, Liu G Q, Xu H, *et al*. Spatial variation and scale effect of surface soil organic carbon content on typical slopes in the loess region, Ningxia. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(1): 19－31.
韩新生, 刘广全, 许浩, 等. 宁夏黄土区典型坡面表层土壤有机碳含量的空间变化特征及尺度效应. 林业科学, 2024, 60(1): 19－31.

[64] Chen C, Xu Y F. Temporal and spatial variation characteristics and driving forces of stable grassland net primary productivity in the northern slope of Tianshan Mountains economic zone. Pratacultural Science, 2023, 40(5): 1154－1167.
陈宸, 许玉凤. 天山北坡经济带稳定草地净初级生产力时空变化特征及其驱动力. 草业科学, 2023, 40(5): 1154－1167.

[65] Guan Q Y, Yang L Q, Guan W Q, *et al*. Assessing vegetation response to climatic variations and human activities: spatiotemporal NDVI variations in the Hexi Corridor and surrounding areas from 2000 to 2010. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135(3/4): 1179－1193.

[66] Wan S Q, Hui D F, Wallace L, *et al*. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): 1－13.

[67] Wang H, Liu G H, Li Z S, *et al*. Impacts of climate change on net primary productivity in arid and semiarid regions of China. Chinese Geographical Science, 2016, 26(1): 35－47.

[68] Liu Z T, Cui Y Y, Bai L, *et al*. Effects of simulated precipitation on aboveground and belowground biomass and their allocation

proportion of plant community in desert steppe. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(6): 1632－1639.
刘倬彤, 崔媛媛, 白柳, 等. 模拟降水变化对荒漠草原地上、地下生物量及其分配比例的影响. 草地学报, 2023, 31(6): 1632－1639.

[69] Zhang J T, Zhao F X, Chen J H, *et al*. Correlations of species diversity and biomass with environmental factors in alpine grasslands across the Qingzang Plateau. Pratacultural Science, 2023, 40(3): 616－626.
张锦涛, 赵峰侠, 陈俊合, 等. 青藏高原不同类型高寒草地物种多样性与生物量的关系及影响要素. 草业科学, 2023, 40(3): 616－626.

[70] Chang S, Yu H B, Cao C M, *et al*. Distribution characteristics of soil organic carbon in Xilin Gol steppe and its influencing factors. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1355－1366.
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. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355－1366.

[71] Yao S T, Lu G X, Zhou H K, *et al*. Effect of simulated temperature increase on carbon and nitrogen changes in alpine meadow. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 218－224.
姚世庭, 芦光新, 周华坤, 等. 模拟增温对高寒草甸土壤性质的影响. 草地学报, 2021, 29(S1): 218－224.

[72] Sotta D E, Meir P, Malhi Y, *et al*. Soil CO_2 efflux in a tropical forest in the central Amazon. Global Change Biology, 2004, 10(5): 601－617.

[73] Hontoria C, Rodriguez-Murillo J C, Saa A. Relationships between soil organic carbon and site characteristics in peninsular Spain. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 614－621.

[74] Nichols J D. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern Great Plains. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(6): 1382－1384.

[75] Zhao X Y, Han G Q, Zhang S W, *et al*. Effects of grazing on plant diversity and their carbon stocks in different types of grasslands. Environmental Science, 2024, 45(9): 5395－5405.
赵星宇, 韩国强, 张圣微, 等. 放牧对不同类型草原植物多样性及其碳储量的影响. 环境科学, 2024, 45(9): 5395－5405.

[76] Wu S K, Hao J, Diao H J, *et al*. Response of grassland biomass to short-term grazing intensities in the agro-pastoral ecotone in Northern Shanxi. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(8): 2446－2454.
武帅楷, 郝杰, 刁华杰, 等. 晋北农牧交错带草地生物量对短期放牧强度的响应. 草地学报, 2023, 31(8): 2446－2454.

[77] Li H, Jiang K W, Yang Y Q, *et al*. Response of vegetation characteristics and soil nutrients to grazing in mountain meadows on the north slope of the Tianshan Mountains. Pratacultural Science, 2023, 40(4): 874－884.
李宏, 江康威, 杨永强, 等. 天山北坡山地草甸植被特征和土壤养分对放牧的响应. 草业科学, 2023, 40(4): 874－884.

[78] Chen S S, Wang M, Zhang C, *et al*. Effects of different grazing intensities on soil active organic carbon in *Leymus chinensis* meadow steppe in Hulunbuir. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023, 60(11): 16－24.
陈思思, 王淼, 张楚, 等. 不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响. 中国土壤与肥料, 2023, 60(11): 16－24.

[79] Zhang Y R, Liu Y L, Huang X C, *et al*. Organic carbon mineralization characteristics in rhizosphere and bulk soil of rice under organic fertilization modes in yellow paddy fields. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(3): 449－458.
张雅蓉, 刘彦伶, 黄兴成, 等. 不同有机肥施用模式下黄壤稻田根际和非根际土壤有机碳的矿化特征. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 449－458.

[80] Li W J, Huang Q H, Li D M, *et al*. Variation characteristics of organic carbon pools with different protection methods in upland red soil under long-term fertilization. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(1): 106－115.
李文军, 黄庆海, 李大明, 等. 长期施肥下旱地红壤不同保护态有机碳库变化特征. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 106－115.

[81] Hai X. Effects of fertilization on soil carbon and nitrogen and microbial communities in wheat-maize rotation farmland in north China. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024.
海香. 施肥对华北小麦玉米轮作农田土壤碳氮及微生物群落的影响. 北京: 中国农业科学院, 2024.

[82] Wang S, Sheng Y, Fan S H, *et al*. Response of carbon storage changes to land use pattern in Kuye River Basin based on InVEST model. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 149－158.
王硕, 盛艳, 范淑花, 等. 基于InVEST模型的窟野河流域碳储量变化对土地利用格局的响应. 水土保持研究, 2025, 32(3): 149－158.

[83] Lal R, Follett R F, Kimble J, *et al*. Managing U. S. cropland to sequester carbon in soil. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(1): 374－381.

[**84**] Rhoades C C, Eckert G E, Coleman D C. Soil carbon differences among forest, agriculture, and secondary vegetation in lower montane Ecuador. Ecological Applications, 2000, 10(2): 497－505.

[**85**] Zhao Q, Zou D J, Chai Z M, *et al*. Effects of land use change on the temporal and spatial dynamics of ecosystem carbon storage in the Wujiang River Basin, Guizhou. China Rural Water and Hydropower, 2025, 67(5): 9－16.
赵乔, 邹东景, 柴周茂, 等. 贵州乌江流域土地利用变化对生态系统碳储量时空演变特征的影响. 中国农村水利水电, 2025, 67(5): 9－16.

[**86**] Zhao W, Li L, Wang Y J, *et al*. Carbon sequestration characteristics and regional differences of typical warm and tropical grasslands in Henan Province, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1867－1875.
赵威, 李琳, 王艳杰, 等. 河南典型暖(热)性草地固碳特征及区域差异. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1867－1875.