

# 草地碳循环主要影响因素及研究方法进展

王乐<sup>1</sup>, 朱求安<sup>1,2\*</sup>, 杜灵通<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210009; 2. 国家地球系统科学数据中心, 国家科技基础条件平台, 北京 100101; 3. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**在气候变化和人类活动的耦合影响下,草地生态系统碳循环过程发生显著变化。本文首先介绍了草地碳循环研究的背景与重要性,详细分析了国内外草地碳循环的研究进展,包括草地生态系统碳源汇的界定和土壤呼吸的研究近况,气候变化和人类活动等主要因素对草地碳循环的影响,草地碳循环研究过程中主要采用的技术方法,以及已取得的重要结果与结论。在此基础上讨论了现有草地碳循环研究存在的不足与问题,阐述了未来草地碳循环研究前景及重点研究方向,以期在“双碳”背景下为陆地生态系统碳循环研究提供理论依据。

**关键词:**碳储量;碳源与碳汇;土壤呼吸;湍度相关;生态模型

**中图分类号:**S812.29 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)04-0144-13

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2023.04.019



联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在《全球变暖1.5℃》特别报告中指出:全球平均气温已比工业化之前上升1℃左右<sup>[1]</sup>。过去的100年见证了全球升温1℃的各种气候变化影响,如更频繁的高温热浪、海平面上升和频发的极端降雨、洪涝天气事件<sup>[2]</sup>。在气候变化背景下,由人类活动导致的全球性地球变绿(Global Greening)显著改变了陆地生态系统植被结构和群落组成<sup>[3]</sup>。二者的相互作用势必会对全球陆地生态系统的碳循环过程产生深刻影响。其中,草地面积约占全球陆地面积的30%<sup>[4]</sup>,作为全球碳循环的重要组成部分,全球排放的CO<sub>2</sub>中有相当一部分被草地固定<sup>[5]</sup>,而巩固和提升草地生态系统碳汇功能,是实现碳达峰、碳中和(以下简称“双碳”)目标的重要途径之一<sup>[6-7]</sup>。因此,研究气候变化和人类活动影响下的草

地碳循环过程、格局及常用方法,不仅对评价草地生态系统对全球变化的响应及其在碳收支中的作用具有重要意义,更为“双碳”背景下的碳中和目标及应对气候变化提供可行路径。

## 1 草地碳循环研究进展

### 1.1 草地碳源汇格局

草地生态系统在全球碳循环中表现出碳汇的特征<sup>[8-9]</sup>。陈智等<sup>[10]</sup>对全球陆地生态系统的研究发现草地是碳汇,并指出欧洲草地的碳固定能力居于全球首位,显著高于亚洲与北美,除欧洲外的其余地区草地生态系统碳汇的作用较为微弱<sup>[10]</sup>;而针对欧洲9个草地生态系统的研究表明草地仅表现为弱碳汇<sup>[11]</sup>;Hunt等<sup>[12]</sup>研究发现新西兰稀疏草原也呈碳汇格局;美国加州草原可能比森林具有更强的碳汇潜力<sup>[13]</sup>;非洲、南亚等地草原生态系统表现为强碳汇<sup>[14]</sup>。在过去的100年中,全球草地生态系统吸收了总计113.9 Pg当量的CO<sub>2</sub><sup>[14]</sup>。有研究表明北半球草地生态系统的碳通量会随纬度的变化,具有明显的空间异质性<sup>[15-16]</sup>;亦有研究发现南北半球草地碳通量随季节特征变化的规律相反,且北半球的碳通量变化受纬度影响更大<sup>[17]</sup>。此外,部分研究认为全球草地的碳源汇功能尚不明确<sup>[18]</sup>。例如,Dennis等<sup>[19]</sup>认为草地生态系统在未来几

收稿日期:2022-09-02;修回日期:2022-10-25

基金项目:国家自然科学基金(42041005,U2243203);第二次青藏高原科学考察研究项目(2019QZKK0304)

作者简介:王乐(1995-),女,陕西宝鸡人,博士研究生。

E-mail:wangle2020@hhu.edu.cn

\*通信作者。E-mail:zhuq@hhu.edu.cn

十年中有变为碳源的趋势,Dangal等<sup>[14]</sup>发现欧洲的牧场已经表现为弱碳源。

作为全球陆地生态系统的重要组成部分,草地占我国国土面积的41.7%<sup>[20-21]</sup>,在陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用<sup>[22]</sup>。中国的草地碳储量占全球草地碳储量的9%~16%<sup>[23]</sup>。退耕还林还草工程实施前,我国草地退化面积扩大至可利用草地面积的1/3<sup>[24-25]</sup>,这在很大程度影响了草地碳循环过程。而对由人类活动引起的草地碳动态变化缺少量化分析,且这一过程所引起草地碳源汇关系的研究相对薄弱。同时,准确估算草地碳储量动态变化的模型及其系统理论较为缺乏<sup>[26]</sup>,因此,我国草地生态系统碳循环的研究急需加强。已有研究表明内蒙古温带草原不同类型草地碳储量差异较大,按草地类型碳密度进行排序,由高到低依次为草甸草原>草甸>典型草原>荒漠草原<sup>[27]</sup>。青藏高原高寒草甸草原的土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)储量约为18.37 Pg,而其总碳储量为20 Pg左右<sup>[28]</sup>。此外,多位学者分别对青藏高原高寒草甸土壤有机碳储量进行了估算,发现其碳储量分布在19.23~49.00 Pg<sup>[29-32]</sup>。由此可见,在草地生态系统土壤碳占总碳储量比例较高。

当草地的碳吸收能力大于排放能力时,生态系统表现为碳汇,反之则表现为碳源<sup>[33]</sup>。但碳的排放与吸收能力会随外界环境的影响而波动。例如,草地退化引起的土壤理化性质和结构的改变也会使草地生态系统碳排放的行为模式发生变化<sup>[34]</sup>,逐渐失去碳汇的功能,进而转变为弱碳源<sup>[35]</sup>。张金霞等<sup>[36]</sup>发现虽然青藏高原高寒矮嵩草草甸生态系统是碳源,而高寒草甸生态系统的退化部分却表现为碳汇。因此,在探究草地生态系统碳源汇格局时应充分考虑由气候变化或人类活动带来的影响。

## 1.2 草地土壤呼吸研究进展

土壤呼吸作为生态系统下垫面与大气之间碳交换的重要途径,在全球范围内每年排放碳50~75 Pg·C<sup>[37-38]</sup>。土壤呼吸是研究草地碳交换的重要环节,是草地生态系统下垫面碳输出的主要途径<sup>[39]</sup>,不仅是表征土壤质量的重要生态参数之一<sup>[40]</sup>,也是表征土壤通气性能的重要参数<sup>[41]</sup>。草地生态系统的变化会通过影响土壤的物理化学性质从而影响土壤呼吸强度。因此,土壤呼吸不仅能反映土壤特性,在研究草地格

局变化背景下的碳循环过程中也具有重要的指示意义。同时,土壤呼吸也是反映草地生态系统对环境胁迫响应的指标之一<sup>[42]</sup>。土壤呼吸除了与降水、气温等环境因子相关外,还与土地利用方式的改变有密切的联系<sup>[43]</sup>。因此,它在一定程度上可以当做生态系统演替或类型变化的判断依据。

全球范围内的人类活动(放牧、土地利用变化和施肥)和气候变化对天然草地土壤呼吸的影响已经引起了广泛关注。温带和热带地区天然草地土壤呼吸会随着气温、降水增加而增加,但在多雨地区会表现出相反趋势<sup>[44]</sup>。对瑞士山地草原的定位检测表明,土壤呼吸的主要驱动因子是温度,人为产生的农业管理手段并不会对其产生显著影响<sup>[45]</sup>。英国温带草地的试验揭示了气候变化和人为管理草地之间的相互作用是短期内决定草地CO<sub>2</sub>呼吸速率的重要决定因素<sup>[46]</sup>。南非的退化草原中,土壤呼吸速率与地上生物量和地表温度呈正相关关系,且轮牧下的CO<sub>2</sub>净排放量出现下降趋势<sup>[47]</sup>。然而,针对加拿大北方温带草原的研究发现,是否放牧对草地土壤CO<sub>2</sub>气体通量没有显著影响,土壤呼吸主要受到耕作历史、土壤含水量和土壤容重等因素的调控<sup>[48]</sup>。Chen等<sup>[49]</sup>发现,澳大利亚北部热带稀疏草原会通过土壤呼吸作用释放碳,其中约有70%的碳在丰水期释放,30%在旱季释放。在西班牙东南部干旱半干旱草原,退化草地土壤CO<sub>2</sub>通量主要受水分的影响,天然草地土壤CO<sub>2</sub>通量主要受季节、温度和水分的共同影响<sup>[50]</sup>。此外,火灾也是影响草地土壤呼吸的因素之一,有研究认为野火会通过破坏植被和土壤中的微生物来降低草地土壤中的CO<sub>2</sub>浓度,从而减小土壤呼吸作用<sup>[51]</sup>。

目前,中国已在内蒙古高原、东北松嫩平原和青藏高原开展了大量有关草地土壤呼吸作用的研究,这些研究所涉及的草原类型有草甸草原、典型草原、荒漠草原以及亚高山草原等<sup>[52]</sup>,研究内容多集中于土壤呼吸变化规律、气象因素、放牧制度及不同土地利用方式对土壤呼吸的影响等方面。松嫩平原贝加尔针茅草甸草原土壤呼吸日变化呈明显单峰曲线,其空间差异的主要影响因素是地上及地下生物量<sup>[53]</sup>。刈割及放牧使内蒙古呼伦贝尔地区温带草甸草原土壤呼吸日均速率及其对水热因子的响应发生了变化<sup>[54-56]</sup>,

且不同放牧强度的土壤呼吸存在显著差异<sup>[57]</sup>,而在短花针茅荒漠草原的研究表明,不同放牧制度对其土壤呼吸的影响不大<sup>[58]</sup>。同时,研究表明土壤呼吸的季节变异与降雨频率及强度密切相关<sup>[59]</sup>。川西北高寒草甸土壤呼吸与大气温度之间存在指数关系<sup>[60-62]</sup>。在锡林河流域,相比于土壤温度,针茅属草地类型的土壤呼吸对其水分变化更敏感,这与高寒草甸的研究存在差异(即:土壤呼吸与土壤温度显著相关),这可能是因为在土壤温度适宜的条件下,温带草原区土壤水分成为限制土壤呼吸的主要因素<sup>[63]</sup>。此外,土壤呼吸还会受到植被变化的影响,例如在盐池荒漠草原地区,人工引入的柠条灌丛使得该区域的土壤呼吸被显著提高<sup>[64]</sup>。

## 2 气候变化对草地碳循环的影响

全球变化已影响到不同陆地生态系统的碳循环过程<sup>[65]</sup>,在全球变暖背景下,草地生态系统碳循环对 ENSO(El Niño/Southern Oscillation,厄尔尼诺/南方涛动)等气候事件的敏感性将继续增加<sup>[66]</sup>,但不同区域下垫面的异质性,使气候变化影响下的草地碳循环研究较为困难<sup>[67]</sup>。目前我国关于气候变化背景下草地生态系统碳循环的研究主要集中在青藏高原典型高寒草甸及内蒙古典型温带草原<sup>[68]</sup>。由于不同草地生态系统碳循环过程对气候变化的响应存在差异<sup>[69]</sup>,因此要探究气候变化对草地生态系统的影响,须针对不同的草地类型开展定量研究,明确不同气候条件下草地生态系统碳循环的变化规律<sup>[70]</sup>。此外,极端气候事件作为不同于普通气候变化的特殊气候事件,引起了广泛关注。然而以往关于气候变化对碳循环影响研究都集中在平均气候变化上<sup>[71]</sup>。Niu等<sup>[72]</sup>发现,由于植被内部的调节机制对极端气候事件(包括极端气温事件和极端降水事件)的敏感性不同,极端气候事件可能会从根本上影响草原生态系统的碳循环过程。

### 2.1 温度

气温是影响草地生态系统碳循环的主要气候因子之一<sup>[73]</sup>,会通过影响草地光合与呼吸过程,进而影响其碳通量。目前,有关气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响研究大多为增温控制试验<sup>[74]</sup>。已有 Meta 文献分析表明,气候变暖使陆地生态系统地上和地下植物碳储量分别增加 6.8% 和 7.0%<sup>[75]</sup>。由此可见,气

温升高会对全球陆地生态系统的碳循环产生深远影响<sup>[76]</sup>。草地作为对气候变化最敏感的陆地生态系统之一<sup>[77]</sup>,不仅生物量会随着年际间气候变化而波动<sup>[78]</sup>,其碳固定能力也会随气温波动而变化。短花针茅荒漠草原的增温控制实验表明,温度上升显著提高了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放通量<sup>[79]</sup>,这与 Barneze 等<sup>[46]</sup>在英国温带草地的研究结论一致。此外有研究表明增温显著增加了草甸草原生态系统土壤有机碳含量和有机碳储量<sup>[80]</sup>。然而, Katata 等<sup>[81]</sup>基于 SOLVEG 和 BAS-GRASS 模型模拟发现,全球变暖加剧可能会导致德国高山草原的土壤碳流失。同时,草地生态系统的碳吸收能力存在最佳温度区间,例如,荒漠草原碳吸收能力最强时所处的温度区间为 10~20 °C,一旦超过这一最佳范围,其固定碳的能力会迅速下降<sup>[73]</sup>。在内蒙古高原草地地区,杨方兴<sup>[82]</sup>发现 1982—2006 年内日间极端气温频率指数对草地归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的影响存在明显区域差异。Li 等<sup>[83]</sup>发现在年际尺度上,NDVI 与极端气温事件的强度指数均呈正相关关系,与表征暖的极端气温事件的频率指数呈正相关关系,与极端寒冷事件的频率指数呈负相关关系。

### 2.2 降水

除气温外,降水也是影响草地生态系统碳循环的重要影响因子之一。降水的增加可以改善土壤水分供给条件,增强草地的光合速率,从而提高其生产力。有研究表明降水量的增加可能是内蒙古净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)呈增加趋势的主要原因<sup>[69]</sup>,但降水增加会抑制内蒙古干旱草原的净生态系统碳交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)<sup>[84]</sup>;例如,在呼伦贝尔草原的研究发现,随着降水量的减少,土壤呼吸速率显著减小<sup>[85]</sup>。此外,内蒙古典型草原在湿润年内表现出弱碳汇性质,在干旱年则迅速变为碳源<sup>[86]</sup>,这表明草地生态系统碳吸收能力会受水分亏缺的影响而被严重抑制<sup>[87-88]</sup>。同时,降水量的增加会通过增加地上生物量、降低土壤温度促进内蒙古荒漠草原固碳能力<sup>[89]</sup>。宁夏荒漠草原地区的控制实验表明,增加降水量可能会加速荒漠草原土壤呼吸和碳排放<sup>[90]</sup>。在内蒙古典型草原生态系统中,降雨频率的减少显著促进了生态系统呼吸、刺激了净 CO<sub>2</sub> 交换,但降雨频率对碳固存的积极影响随着生长季降雨增加而

降低<sup>[91]</sup>。Yuan等<sup>[92]</sup>基于气候极端指数(Climatic Extreme Indices, CEIs)分析了全球总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)与极端降水的敏感性,发现GPP对热带地区的极端降水最为敏感。极端干旱事件能显著减少草原生态系统的净碳吸收,降低草原生态系统的碳累积,使生态系统由碳汇转变为碳源<sup>[93]</sup>。Aronson等<sup>[94]</sup>认为,如果南加州草原经历更频繁和极端的干旱,土壤呼吸速率将会下降。但也有研究表明,非洲大草原长期的极端干旱可能会通过减少CO<sub>2</sub>释放从而有助于保持其现有的草原土壤碳储量<sup>[95]</sup>。

### 2.3 CO<sub>2</sub>施肥效应

早在1894年,科学家就发现CO<sub>2</sub>对植物生长的促进作用<sup>[96]</sup>。在过去几十年中,全球多个大气监测站测得大气中CO<sub>2</sub>浓度逐年增加,现均已超过 $4 \times 10^{-4}$  mmol/mol (<http://co2now.org>)。由此可见,研究CO<sub>2</sub>浓度升高对草地的施肥效应及草地的适应机制是揭示全球变化下陆地植被系统碳平衡和循环的重要环节<sup>[97]</sup>。大气CO<sub>2</sub>浓度得升高会影响草地碳循环过程,但对草地光合作用的影响因其类型差异有所不同。C<sub>3</sub>草地对CO<sub>2</sub>浓度升高的敏感性高于C<sub>4</sub>草地,原因是C<sub>3</sub>草地的CO<sub>2</sub>补偿点和饱和点比C<sub>4</sub>草地高<sup>[98]</sup>。美国大平原中部草地生态系统的研究表明,大气CO<sub>2</sub>浓度升高对草地生态系统NPP有促进作用<sup>[99]</sup>。但Van Groenigen等<sup>[100]</sup>基于meta分析和数据同化发现草地土壤有机碳不仅会随着大气CO<sub>2</sub>浓度增加而增加,也会出现保持不变的情况,甚至表现出下降趋势。Terrer等<sup>[101]</sup>认为这是由于草地生态系统的植被和土壤碳储量之间存在权衡:当CO<sub>2</sub>强烈刺激植被时,草地土壤碳储量下降;相反,当植被受到刺激较弱时,土壤碳储量增加。也有研究表明过高浓度的CO<sub>2</sub>并不会显著改变草地土壤有机碳含量<sup>[102]</sup>,这可能是由于CO<sub>2</sub>浓度的增加不仅会增加碳固定速率,还促进了土壤呼吸,加速了草地生态系统向大气中释放二氧化碳的速率。

## 3 人类活动对草地碳循环的影响

“千分之四倡议”科学技术委员会的专家呼吁各国采取人为措施增加土壤碳储量以应对全球气候变化<sup>[103]</sup>,并指出种植植被是提高土壤碳储量的重要手

段。植被作为大气与生态系统之间CO<sub>2</sub>循环的重要媒介之一,会消耗掉约1/3的CO<sub>2</sub>,并最终将10%~15%的CO<sub>2</sub>截存在土壤中<sup>[104]</sup>。同样,有研究表明植被生物量的增加可提升土壤的碳截存能力<sup>[105]</sup>。由此可见,由人为介导的植被变化会显著影响草地碳循环过程,人类活动包括放牧活动以及生态工程等。

### 3.1 放牧

放牧是间接由人类活动引起、对草地生态系统影响最为广泛的行为。草食动物通过“采食—消化—排泄”这一过程实现了碳的次级累积,形成了草地生态系统的“流动”碳库<sup>[106]</sup>。动物会通过采食行为消耗草地地上生物总量。据报道,北美温带草原动物采食量约占地上总生物量的15%左右,而欧洲草地可达60%~85%,我国北方草地平均采食量在50%左右<sup>[106]</sup>。同时,草食动物通过呼吸和排泄将碳重新排放至草地生态系统。有研究表明,家畜采食牧草总量中27%~60%的干物质以粪便形式重返土壤<sup>[107]</sup>。过度放牧引起的草地退化问题也成为草地生态系统碳循环研究重点。全球退化草地中约有35%是由于过度放牧造成。例如,克什米尔温带草地的土壤有机碳储量由于放牧的影响而存在减小趋势<sup>[108]</sup>。内蒙古温带草原的放牧试验结果显示过度放牧导致地下生物量降低30%~50%<sup>[109]</sup>,中国松嫩平原在放牧强度由10%增加到80%时,其土壤有机碳储量减幅为2.49%~49.87%<sup>[109]</sup>,据Xie等<sup>[110]</sup>报道,在20世纪80年代至世纪末,因草地退化引起的我国土壤有机碳储量减少了3.56 Pg。但仍有一些在澳大利亚东北部半干旱草原的研究发现,轻度放牧对土壤有机碳没有显著影响<sup>[111]</sup>。此外,有些研究认为适度放牧反而有益于草地土壤碳的增加<sup>[112]</sup>。例如,美国蒙大拿州的温带草地实验站数据表明,适度放牧会显著提升土壤有机碳储量<sup>[113]</sup>。

### 3.2 生态工程

我国在1970—2000年大规模的造林运动使森林生态系统碳储量增长了40%<sup>[114]</sup>。2001—2010年,中国陆地生态系统总碳汇的56%是由种植人工林导致的<sup>[115]</sup>。同时,草地生态系统碳截存速率高于全国平均值 $[0.04 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ <sup>[115]</sup>,说明草地生态系统碳储量对植被结构的变化响应更加敏感。例如,在农牧交错带的研究发现植被结构的改变会导致其地上生物产

量翻倍,并使地下碳储量提升20%<sup>[116]</sup>;广泛发生的灌丛化过程会显著增加草地的表层土壤有机碳<sup>[117]</sup>。例如,宁夏荒漠草原地区,人为引入的灌丛使生态系统碳储量显著增加<sup>[118]</sup>。然而,一些学者持相反意见,认为灌木的入侵会导致土壤有机碳的减少<sup>[119-120]</sup>,这些截然不同的研究结果表明灌木入侵存在显著的空间差异性。因此,要分区域、分系统探究植被结构变化对生态系统碳收支的影响。

为从根本上扭转我国草地生态环境严重退化的局面,国家加大了对天然草地保护与建设力度,于2003年在西部11省区实施退牧还草工程<sup>[121]</sup>。为使退化的草地得以复原,退牧还草工程以围栏封育、补播改良以及禁牧、休牧、划区轮牧为主要手段,旨在减缓人类活动对自然生态系统的干扰<sup>[122]</sup>。例如,长期围栏封育显著提高了草地碳贮量,加快了土壤的碳固持速率<sup>[123]</sup>,Wang等<sup>[124]</sup>根据我国205个退化草原样点数据估测围栏封育后草原土壤有机碳平均每年增加6.3%。补播改良对宁夏退化荒漠草原土壤有机碳固存有促进作用<sup>[125]</sup>,使得其碳固存水平高于禁牧封育和传统放牧地区<sup>[126]</sup>。不同放牧强度的控制实验表明,土壤总有机碳含量会随着放牧强度的增加而呈现降低的变化趋势<sup>[127]</sup>,轻牧草地土壤有机碳含量显著高于中度、重度放牧以及禁牧草地<sup>[128]</sup>,由此可见禁牧并非合理的草原管理方式。内蒙古典型草原的定位检测表明,休牧区域的土壤呼吸速率>禁牧区>全年放牧区<sup>[129]</sup>,同时休牧地区的土壤有机碳含量大于自由放牧地区<sup>[130]</sup>。划区轮牧也是一种有效的人为干预措施,研究认为轮牧更有利于提升荒漠草原碳汇能力<sup>[131]</sup>,且相比于二区轮牧,四区轮牧和六区轮牧会提高荒漠草原净生态系统生产力,使其达到碳平衡状态<sup>[132]</sup>。

## 4 草地碳循环的主要研究手段

研究草地碳循环的方法可以按照测量手段分为3类:野外样方试验、涡度相关技术和生态模型模拟。野外样方法作为最基础和直接的测量手段在研究土壤碳储量、地上生物量方面发展相当成熟;近年来,生态系统过程模型和涡度相关技术作为大尺度、长时序草地碳循环的常用研究方法已逐渐被大众广泛认可。

### 4.1 野外样方法

野外样方法是常规生态学研究方法,通过野外试

验所获得的植被、土壤、微生物、水文及地理信息等实测数据不仅可信度较高,还是验证其他方法所获数据的重要参考。然而这种方法存在空间、时间局限性,测量结果会受试验样地实际情况、方案设计与样方大小的影响。因此,在利用野外样方法测量草地生态系统碳储量时,需要选择合适的样地设置方法。一般的样地设置方法有1)等距选样 按照相同的间隔在草地中等距离选取样本;2)随机选样 在研究区任意、不规则的选取样地。此外,样方最小面积的计算也是野外样方法需要关注的问题,最小面积是指包含组成群落大多数植物种类的最小空间。根据不同草地生态系统的下垫面属性,样方最小面积也存在差异。例如,董世魁等<sup>[133]</sup>认为高寒草地退化调查的最小样地面积应该达到82 m<sup>2</sup>才能获得较完全的代表性植物物种信息。

### 4.2 涡度相关技术法

雷诺在1895年提出的雷诺分解法(Reynolds Decomposition)为涡度相关技术(Eddy Covariance)奠定了理论基础。但直到30多年后才有学者进行了雷诺应力研究<sup>[134]</sup>。随后涡度相关的研究重点逐渐拓展到大气边界层结构和动量、热量传输方面<sup>[135]</sup>。随着计算机技术、测量仪器的进步,Swinbank在1955年首次利用涡度相关技术测量并计算蒸散量<sup>[136]</sup>。然而,受制于传感器性能和数据采集系统的不足,一直未能开展陆地生态系统CO<sub>2</sub>等温室气体的涡度相关观测。直到涡度测量技术设备取得突破性进展后才推动了碳通量观测及其相关研究的迅猛发展。20世纪90年代后期,欧洲和美国相继建立了通量网(EuroFLUX, AmeriFLUX),并在此基础上成立国际通量观测网络(FLUXNET)<sup>[137]</sup>,极大促进了草地碳循环的研究。中国通量网(ChinaFLUX)于2001年正式创建,现已构建了中国草地样带(CGT)和欧亚大陆草地样带(EACGT)等在内的5个观测网络,形成了亚洲区域通量观测和全球变化科学研究的样带体系,极大推动了中国草地碳通量观测研究的发展<sup>[138]</sup>。随着中国通量观测网络的建立,基于涡度相关的草甸草原、典型草原、荒漠草原、高寒草甸草原碳通量研究广泛开展,极大丰富了人们对草原生态系统碳通量规律的认识<sup>[139]</sup>。然而,基于涡度相关技术的碳通量贡献源区的空间代表性有限,且草原分布较广、种类繁多,其碳通量规律

存在明显的空间异质性,故需建立长时序、大空间尺度的草原通量站——以便涵盖各类型、各区域的草原生态系统,并对其进行针对性定量研究。

利用涡度相关技术测量草地碳通量时会受到大气和下垫面因素的影响。例如,当大气湍流层气体上下交换速率减缓时,便会出现 CO<sub>2</sub> 存储效应,即生态系统下垫面的 CO<sub>2</sub> 出现存储与滞留,不能达到仪器测定的高度,从而造成观测数据不准确<sup>[140]</sup>。其次,当观测草地生态系统下垫面的地形起伏度或粗糙程度发生改变时,会影响 CO<sub>2</sub> 的平流效应,从而导致观测结果的偏差<sup>[141]</sup>。此外,利用涡度相关技术测量碳通量时应考虑 CO<sub>2</sub> 的通量漏流,即一部分 CO<sub>2</sub> 流失,不会通过植被冠层与大气的交界面,从而使观测结果产生误差<sup>[142]</sup>。然而,草地生态系统的植被大多低矮,CO<sub>2</sub> 存储效应很弱,且草原区域地形也往往较为平缓,能极大的减弱 CO<sub>2</sub> 的水平平流效应,由此可见,涡度相关法是观测荒漠草原生态系统碳通量数据较为可靠和适宜的方法<sup>[143]</sup>。

#### 4.3 生态系统碳循环模型模拟

最早利用草地生态系统模型模拟碳循环的研究可追溯至 20 世纪 60 年代,Dyne 首次设计了碳循环分室模型用以测定美国蒙大拿中南部草地生物量<sup>[144]</sup>。10 年后,美国 IBP 计划建立了著名的 ELM 模型<sup>[144]</sup>。此后发展起来的大量草原生态系统碳循环模型都是基于 ELM 进行改进和完善。Jenkinson 等<sup>[145]</sup>建立了第一个草地土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)模型,这个概念性框架是后期 SOM 模型得以发展的基础<sup>[22,146]</sup>。20 世纪 90 年代后,Parton 等<sup>[147]</sup>建立了 CENTURY 模型,量化了土壤质地对有机碳动态变化的影响。由此可见,碳循环模型不仅是开展草地碳循环研究的重要手段,也是从时空角度进行大尺度长时序碳通量估算的有效途径,使草地生态系统碳循环研究的顺利开展成为可能,为深入了解草地碳循环过程奠定了基础。

生态系统碳循环模型可分为 3 类:1)统计模型 统计模型一般建立在因子与生态系统生产力之间的统计关系之上,例如 Miami 模型, Thornthwaite 模型<sup>[148]</sup>等。这些模型多依赖于建模时所用的观测数据,因此不具有普适性,无法推广应用。由于不能满足目前多样化的研究需求,已被逐步淘汰。2)光能利用模型

光能利用模型一般基于遥感数据,结合不同的反演算法来计算 GPP 及 NPP,代表有 Carnegie - Ames - Stanford Approach (CASA) 模型等<sup>[149]</sup>。3)生态系统过程模型 生态系统过程模型是一种根据生态过程循环机理所建立的模型<sup>[150-151]</sup>,如 Biome - BGC、CEVSA、Century、InTEC、BIOME3、IBIS、DOLY、LPJ、BEPS<sup>[152-153]</sup>等,且生态过程模型在描述碳循环的影响因子方面优于统计模型和光能利用模型。

但是,利用生态模型进行草地碳循环模拟过程要确保模拟值具有较高可信度,不仅需要驱动参数进行本地化处理,还需对模型的模拟结果进行验证,若发现模拟精度不高,可通过数据同化<sup>[154]</sup>或调整参数等方法来提高。若是由于模型本身普适性欠佳,应当考虑改进算法或更换模型。

## 5 问题与展望

气候变化和人类活动对草地碳循环的影响研究已经较为深入和全面,但仍存在以下问题:1)在草地碳通量测量过程中如何区分土壤呼吸与植被光合作用的组分比例、和草地碳循环不同时空尺度的差异对比等鲜有报道。2)生态过程模型作为研究草地碳循环的主要手段,还存在着模型普适性低、不确定性较高等问题。因此完善模型,提高观测技术和手段的准确性和可行性,都是草地碳循环研究亟待解决的问题。此外,如何耦合气象模型和生态系统模型也是目前需要解决的问题。3)研究发现土地利用变化对陆地碳平衡年际波动的影响被低估<sup>[155]</sup>,人类活动引起的土地利用变化对草地碳循环的影响研究还需进一步明确,如何提升估算的准确性仍是目前亟需解决的问题。

针对目前的研究状况和存在的问题,未来需要从以下几方面展开草地碳循环的研究:1)加强不同时空尺度下的草地碳循环机制研究,区分草地碳循环的组成成分,并在此基础上开展由个体一站点一区域尺度的跨尺度草地碳循环研究;2)加强长时序上草地碳循环的定位监测时应充分衡量气候变化和各种人类活动对草地碳循环过程的影响;3)提高草地碳循环相关模型模拟精度是必然的发展趋势,在进行参数优化、算法改进等前提下,多模型之间模拟结果的比较也应被给予重视;4)在人类活动和气候变化的持续影响

下,草地生态系统碳汇格局是否会发生转变?在这一过程中,如何量化草地生态系统对实现“双碳”背景下的“碳中和”目标的贡献程度需要深入研究。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C [R]. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.
- [3] Chen C, Park T, Wang X H, *et al.* China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122–129.
- [4] 张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 等. 放牧对草地生态系统影响的研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 553–564.
- [5] Lin H L, Feng Q S, Liang T G, *et al.* Modelling global-scale potential grassland changes in spatio-temporal patterns to global climate change [J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2013, 20(1): 83–96.
- [6] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 423–434.
- [7] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 490–501.
- [8] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] Bai Y, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions [J]. *Science*, 2022, 377(6606): 603–608.
- [10] 陈智, 于贵瑞, 朱先进, 等. 北半球陆地生态系统碳交换通量的空间格局及其区域特征 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 710–722.
- [11] Soussana J F, Allard V, Pilegaard K, *et al.* Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(1): 121–134.
- [12] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, *et al.* Long-term carbon exchange in a sparse, seasonally dry tussock grassland [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1785–1800.
- [13] Dass P, Houlton B Z, Wang Y P, *et al.* Grasslands may be more reliable carbon sinks than forests in California [J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(7). doi: 10.1088/1748-9326/aac339.
- [14] Dungal S R S, Tian H Q, Pan S F, *et al.* Greenhouse gas balance in global pasturelands and rangelands [J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10). doi: 10.1088/1748-9326/abaa79.
- [15] Kato T, Tang Y, Gu S, *et al.* Temperature and biomass influences on interannual changes in CO<sub>2</sub> exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1285–1298.
- [16] Yu G, Zhu X, Fu Y, *et al.* Spatial pattern and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798–810.
- [17] 安相. 陕北黄土丘陵区草地生态系统碳通量及其影响因素研究 [D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [18] 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 [J]. *Science China—Life Sciences*, 2022, 65(5): 861–895.
- [19] Dennis S, Dirks, Glenn, *et al.* Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, 70(1): 95–109.
- [20] 蔡文涛, 来利明, 李贺祚, 等. 草地灌丛化研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 531–537.
- [21] 李毓堂. 中国草原政策的变迁 [J]. *草业科学*, 2008, 25(6): 1–7.
- [22] Parton W J, Schimel D S, Cole C V. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plain grasslands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173–1179.
- [23] Ni J. Carbon storage in grassland of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205–218.
- [24] 苏大学. 中国草地资源的区域分布与生产力结构 [J]. *草地学报*, 1994, 2(1): 71–77.
- [25] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司. 中国草地资源数据 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1994.
- [26] 陈晓鹏, 尚占环. 中国草地生态系统碳循环研究进展 [J]. *中国草地学报*, 2011, 33(4): 99–110.
- [27] 马文红, 韩梅, 林鑫, 等. 内蒙古温带草地植被的碳储量 [J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 192–195.
- [28] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 933–942.
- [29] 方精云, 刘国华, 许嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库

- [M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [30] Wu H, Guo Z, Peng C. Distribution and storage of soil organic carbon in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2):1-11.
- [31] 王根绪,程国栋,沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6):10-17.
- [32] 陶贞,沈承德,高全洲,等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. *地理学报*, 2006, 61(7):720-728.
- [33] Matthias D, Christian K. Transient enhancement of carbon uptake in an alpine grassland ecosystem under elevated CO<sub>2</sub>[J]. *Article and Alpine Research*, 1998, 30(4):381-387.
- [34] 王俊峰,王根绪,吴青柏. 青藏高原腹地不同退化程度高寒沼泽草甸生长季节CO<sub>2</sub>排放通量及其主要环境控制因子研究[J]. *冰川冻土*, 2003, 30(3):408-414.
- [35] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤呼吸、碳平衡与碳储量[J]. *草业学报*, 2006, 15(5):25-31.
- [36] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. *生态学报*, 2003, 23(4):627-634.
- [37] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1):23-26.
- [38] 黄承才,葛滢,常杰,等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(3):324-328.
- [39] 周萍,刘国彬,薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2009, 18(2):184-193.
- [40] Liebig M A, Doran J W, Gardner J C. Evaluation of a field test kit for measuring selected soil quality indicators[J]. *Agronomy Journal*, 1966, 88(4):683-686.
- [41] Nielson J W, Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(2):428-432.
- [42] Espeleta J F, Eissenstat D M. Responses of citrus fine roots to localized soil drying a comparison of seedlings with adult fruiting trees[J]. *Tree physiology*, 1998, 18(2):113-119.
- [43] Henrik L. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth[J]. *Soil Science*, 1927, 23(6):417-453.
- [44] Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1-2):20-28.
- [45] Rogger J, Hortnagl L, Buchmann N, *et al.* Carbon dioxide fluxes of a mountain grassland: Drivers, anomalies and annual budgets[J/OL]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 314. doi: 10.1016/J. AGRFOR MET. 2021. 108801.
- [46] Barneze A S, Whitaker J, Mcnamara N P, *et al.* Interactions between climate warming and land management regulate greenhouse gas fluxes in a temperate grassland ecosystem[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833. doi: 10.1016/J. SCITOTENV. 2022. 155212.
- [47] Abdalla K, Mutema M, Chivenge P, *et al.* Grassland rehabilitation significantly increases soil carbon stocks by reducing net soil CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(2):1250-1265.
- [48] Ma Z L, Shrestha B M, Bork E W, *et al.* Soil greenhouse gas emissions and grazing management in northern temperate grasslands[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796. doi: 10.1016/J. SCITOTENV. 2021. 148975.
- [49] Chen X Y, Eamus D, Hutley L B. Seasonal patterns of soil carbon dioxide efflux from a wet-dry tropical savanna of northern Australia[J]. *Australian Journal of Botany*, 2002, 50(1):43-51.
- [50] Rey A, Carrascal L M, Baez C G G, *et al.* Impact of climate and land degradation on soil carbon fluxes in dry semiarid grasslands in SE Spain[J]. *Plant and Soil*, 2021, 461(1/2):323-339.
- [51] Coleborn K, Spate A, Tozer M, *et al.* Effects of wildfire on long-term soil CO<sub>2</sub> concentration: implications for karst processes[J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4). doi:10.1007/s12665-015-4874-9.
- [52] 鲍芳,周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6):713-726.
- [53] 孙伟. 松嫩草原贝加尔针茅群落土壤呼吸与个体水分生理生态研究[D]. 长春:东北师范大学, 2003.
- [54] 郭明英,徐丽君,杨桂霞,等. 不同刈割间隔对羊草草甸草原割草地土壤呼吸的影响[J]. *草原与草坪*, 2010, 30(6):10-14.
- [55] 郭明英,卫智军,徐丽君,等. 不同刈割年限天然草地土壤呼吸特性研究[J]. *草地学报*, 2011, 19(1):51-57.
- [56] 郭明英. 草地封育与不同利用方式对羊草草甸草原土壤

- 呼吸的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [57] 邓钰,柳小妮,闫瑞瑞,等. 呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸及其影响因子对不同放牧强度的响应[J]. 草业学报, 2013,22(2):22-29.
- [58] 徐海红,侯向阳,那日苏. 不同放牧制度下短花针茅荒漠草原土壤呼吸动态研究[J]. 草业学报,2011,20(2): 219-226.
- [59] 王旭,闫玉春,闫瑞瑞,等. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响[J]. 生态学报,2013,33(18):5631-5635.
- [60] 张宏,张伟,徐洪灵. 川西北高寒草甸生长季土壤氮素动态[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2011,34(4): 583-588.
- [61] 徐洪灵,张宏,张伟. 川西北高寒草甸土壤理化性质对土壤呼吸速率影响研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2012,35(6):835-841.
- [62] 徐洪灵,张宏,张伟. 川西北高寒草甸土壤呼吸速率日变化及温度影响因子比较[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2012,35(3):405-411.
- [63] 齐玉春,董云社,刘立新,等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2010,40(3):341-351.
- [64] 王乐. 气候变化和人工灌丛化对荒漠草原碳循环的影响[D]. 银川:宁夏大学,2020.
- [65] Mitchard E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change[J]. Nature,2018,559(7715):527-534.
- [66] Kim J S, Kug J S, Jeong S J. Intensification of terrestrial carbon cycle related to El Nino-Southern Oscillation under greenhouse warming [J]. Nature Communications, 2017,8(1):1674.
- [67] Xia J, Chen J, Piao S, *et al.* Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming[J]. Nature Geoscience,2014,7(3):173-180.
- [68] 曹广民,李英年,张金霞. 高寒草甸不同土地利用格局土壤CO<sub>2</sub>的释放量[J]. 环境科学,2001,22(6):14-19.
- [69] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报,2013,33(12):3752-3764.
- [70] 王乐,杜灵通,丹杨,等. 不同气候变化情景下荒漠草原生态系统碳动态模拟[J]. 生态学报,2020,40(2): 657-666.
- [71] 李春兰. 蒙古高原多时空尺度极端气候变化特征及其影响研究[D]. 华东师范大学,2019.
- [72] Niu S, Luo Y, Li D, *et al.* Plant growth and mortality under climatic extremes: An overview [J]. Environmental and Experimental Botany,2014,98:13-19.
- [73] Wang Y, Zhou G, Wang Y. Environmental effects on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange at half-hour and month scales over *Stipa krylovii* steppe in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2008,148(5):714-722.
- [74] Niu S, Sherry R A, Zhou X, *et al.* Ecosystem carbon fluxes in response to warming and clipping in a tallgrass prairie[J]. Ecosystems,2013,16(6):948-961.
- [75] Lu M, Zhou X, Yang Q, *et al.* Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: a meta-analysis [J]. Ecology,2013,94(3):726-738.
- [76] 李克让. 全球气候变化及其影响的研究进展和未来展望[J]. 地理学报,1996,51(s1):1-14.
- [77] 任继周,梁天刚,林慧龙,等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究[J]. 草业学报,2011,20(2): 1-22.
- [78] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 736-753.
- [79] Guo N, Lv S J, Lv G Y, *et al.* Effects of warming and precipitation on soil CO<sub>2</sub> flux and its stable carbon isotope composition in the temperate desert steppe [J]. Sustainability,2022,14(6):3351.
- [80] 赵双,张涛,石连旋,等. 模拟增温和施氮条件下丛枝菌根真菌对草甸草原土壤团聚体稳定性和土壤碳储量的影响[J]. 中国草地学报,2021,43(9):97-106.
- [81] Katata G, Grote R, Mauder M, *et al.* Wintertime grassland dynamics may influence belowground biomass under climate change: a model analysis [J]. Biogeosciences, 2020,17(4):1071-1085.
- [82] 杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与NDVI的相关性[D]. 西安:长安大学,2012.
- [83] Li C, Wang J, Hu R, *et al.* Relationship between vegetation change and extreme climate indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013[J]. Ecological Indicators,2018,89:101-109.
- [84] Hao Y B, Zhou C T, Liu W J, *et al.* Aboveground net primary productivity and carbon balance remain stable under extreme precipitation events in a semiarid steppe ecosystem[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2017,240: 1-9.

- [85] 范凯凯,李淑贞,陈金强,等. 呼伦贝尔草原土壤呼吸作用空间异质性分析[J]. 草地学报, 2022, 30(1): 205—211.
- [86] Hao Y, Wang Y, Sun X, *et al.* Seasonal variation in carbon exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia [J]. Science in China, 2006, 49(S2): 186—195.
- [87] Meyers T P. A comparison of summertime water and CO<sub>2</sub> fluxes over rangeland for well watered and drought conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106(3): 205—214.
- [88] Suyker A E, Verma S B, Burba G G. Interannual variability in net CO<sub>2</sub> exchange of a native tallgrass prairie [J]. Global Change Biology, 2003, 9(2): 255—265.
- [89] 崔媛媛,白柳,王梓晗,等. 模拟降水对荒漠草原生态系统碳交换的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(1): 3—9.
- [90] 许艺馨. 降水量对荒漠草原土壤呼吸的影响机制研究[D]. 银川:宁夏大学, 2022.
- [91] 都兰. 干旱与氮沉降对内蒙古典型草原生态系统碳通量的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2022.
- [92] Yuan M S, Zhu Q A, Zhang J, *et al.* Global response of terrestrial gross primary productivity to climate extremes [J/OL]. Science of the Total Environment, 2021, 750(14). doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142337.
- [93] 张彬,朱建军,刘华民,等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008—1018.
- [94] Aronson E L, Goulden M L, Allison S D. Greenhouse gas fluxes under drought and nitrogen addition in a Southern California grassland [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2019, 131: 19—27.
- [95] Munjonji L, Ayisi K K, Mudongo E I, *et al.* Disentangling drought and grazing effects on soil carbon stocks and CO<sub>2</sub> fluxes in a semi-Arid african savanna [J/OL]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8. doi: 10.3389/fenvs.2020.590665.
- [96] Kimball B A, J. R. Mauney, Nakayama F S, *et al.* Effects of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> on vegetation [J]. Vegetation, 1993, 104(1): 65—75.
- [97] 张臻. 时空异质条件下的大气 CO<sub>2</sub> 施肥效应对全球碳水循环影响的模拟研究[D]. 南京:南京大学, 2013.
- [98] Caemmerer S, Farquhar G. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves [J/OL]. Planta, 1981, 153(4): 376—387.
- [99] Zhang J E, Felzer B S, Troy T J. Projected changes of carbon balance in mesic grassland ecosystems in response to warming and elevated CO<sub>2</sub> using CMIP5 GCM results in the Central Great Plains, USA [J/OL]. Ecological Modelling, 2020, 434. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109247.
- [100] Van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, *et al.* Faster decomposition under increased atmospheric CO<sub>2</sub> limits soil carbon storage [J]. Science, 2014, 344(6183): 508—509.
- [101] Terrer C, Phillips R P, Hungate B A, *et al.* A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO<sub>2</sub> [J]. Nature, 2021, 591(7851): 599.
- [102] Van Groenigen K J, Harris D, Horwath W R, *et al.* Linking sequestration of <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N in aggregates in a pasture soil following 8 years of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. Global Change Biology, 2002, 8(11): 1094—1108.
- [103] Rumpel C, Amiraslani F, Koutika L, *et al.* Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges [J]. Nature Climate Change, 2018, 564(7734): 32—34.
- [104] Fang J, Yu G, Liu L, *et al.* Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4015—4020.
- [105] Tang Z, Xu W, Zhou G, *et al.* Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4033—4038.
- [106] 穆少杰,周可新,陈奕兆,等. 草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展 [J]. 草地学报, 2014, 22(3): 439—447.
- [107] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [108] Husain M, Geelani S N, Bhat G M. Effect of grazing on carbon stock and biomass production in temperate grassland of Kashmir, India [J]. Range Management and Agroforestry, 2021, 42(1): 1—6.
- [109] Wang Y, Zhou G, Jia B. Modeling SOC and NPP responses of meadow steppe to different grazing intensities in Northeast China [J]. Ecological Modelling, 2008, 217(1): 72—78.

- [110] Xie Z, Zhu J, Liu G, *et al.* Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s [J]. *Global Change Biology*, 2010, 13(9): 1989—2007.
- [111] Holt J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi—arid northeastern Australia [J]. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5(2): 143—149.
- [112] Reeder J D, Schuman G. E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi—arid mixed—grass and short—grass rangelands [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 457—463.
- [113] Reinhart K O, Worogo H S S, Rinella M J, *et al.* Livestock increase soil organic carbon in the northern great plains [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2021, 79(1): 22—27.
- [114] Fang J, Guo Z, Hu H, *et al.* Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 2019—2030.
- [115] Lu F, Hu H, Sun W, *et al.* Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039—4044.
- [116] Zhou Z, Sun O, Huang J, *et al.* Soil carbon and nitrogen stores and storage potential as affected by land—use in an agro—pastoral ecotone of northern China [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82(2): 127—138.
- [117] Li H, Shen H, Chen L, *et al.* Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28974.
- [118] 王乐, 杜灵通, 马龙龙, 等. 人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响 [J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 246—254.
- [119] Jackson RB, Banner JL, Jobbágy EG, *et al.* Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands [J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 623—626.
- [120] Coetsee C, Gray EF, Wake L J, *et al.* Low gains in ecosystem carbon with woody plant encroachment in a South African savanna [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2013, 29(1): 49—60.
- [121] 田晓艳. 退牧还草政策对我国牧民生活的影响 [J]. *中国草地学报*, 2011, 33(4): 1—4.
- [122] 穆少杰. 气候变化和LUCC对内蒙古草地碳循环时空格局及演变趋势的影响 [D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [123] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4270—4276.
- [124] Wang S P, Wilkes A, Zhang Z C, *et al.* Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grasslands: a synthesis [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4): 329—340.
- [125] 季波, 何建龙, 吴旭东, 等. 人工干预对宁夏荒漠草原土壤有机碳固存的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(9): 157—163.
- [126] 王星, 于双, 许冬梅, 等. 不同恢复措施对退化荒漠草原土壤碳氮及其组分特征的影响 [J]. *草业学报*, 2022, 31(1): 26—35.
- [127] 陈瑜, 潮洛濛, 周延林, 等. 放牧强度对内蒙古温性草甸草原土壤碳、氮及其转化的影响 [J]. *中国草地学报*. 2022, 44(2): 24—32.
- [128] 徐新影, 张卫青, 李金霞, 等. 克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 草原土壤与优势植物碳氮含量对放牧强度的响应 [J]. *草地学报*, 2022, 30(9): 2255—2263.
- [129] 聂成, 牛磊, 张旭博, 等. 放牧模式对内蒙古典型草原生长季土壤呼吸速率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(3): 402—411.
- [130] 杨勇, 宋向阳, 咏梅, 等. 不同干扰方式对内蒙古典型草原土壤有机碳和全氮的影响 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 204—210.
- [131] 程燕明, 马红彬, 马菁, 等. 不同放牧方式对荒漠草原土壤碳氮储量及固持的影响 [J]. *草业学报*, 2022, 31(10): 18—27.
- [132] 俞鸿千. 不同轮牧方式对荒漠草原土壤理化性状和碳平衡的影响 [D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [133] 董世魁, 汤琳, 王学霞, 等. 青藏高原高寒草地植物多样性测定的最小样地面积 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(6): 651—657.
- [134] 舒海燕. 浙江安吉毛竹林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量过程的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [135] 郝彦宾. 内蒙古羊草草原碳通量观测及其驱动机制分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (植物研究所), 2006.
- [136] 刘可. 荒漠草原人工柠条林多时间尺度蒸散特征研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [137] Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, *et al.* A

- Global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1):108–127.
- [138] 于贵瑞,孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征研究[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [139] 曲鲁平. 热浪对中国北方草地生态系统碳通量的影响研究[D]. 长春:东北师范大学,2016.
- [140] 查同刚. 北京大兴杨树人工林生态系统碳平衡的研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [141] 殷鸣放,杨琳,殷炜达,等. 森林固碳领域的研究方法及其最新进展[J]. *浙江林业科技*, 2010, 30(6):78–86.
- [142] 张坤. 森林碳汇计量和核查方法研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [143] 李思恩,康绍忠,朱治林,等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9):2720–2726.
- [144] Innis G S, George S. Grassland simulation model[J]. *Soil Science*, 1978, 126(5):316.
- [145] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351(6324):304–306.
- [146] McGill W B. Review and classification of ten soil organic matter(SOM) models[C]//*Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long Term Datasets*. Berlin, Heidelberg: Springer - Verlag, 1996, 38: 111–132.
- [147] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, *et al.* Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 7(4):785–809.
- [148] Lieth H, Box E. Evapotranspiration and primary productivity: Tharnthwaite Memorial[J]. *Climatology*, 1972, 25(2):37–46.
- [149] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycle*, 1993, 7(4):811–841.
- [150] 潘天石. BEPS 模型光合模块机理参数适用性分析及模拟应用[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2018.
- [151] 朱水勋,李新通,王德生. 基于 AE 的拉市海保护区 NPP 估算及影响因子分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(3):127–136.
- [152] Liu J, Chen J, Cihlar J, *et al.* A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing input [J]. *Remote sensing and environment*, 1997, 62(2):158–175.
- [153] Liu J, Chen J, Cihlar J, *et al.* Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(27):735–754.
- [154] 张廷龙,孙睿,张荣华,等. 基于数据同化的哈佛森林地区水、碳通量模拟[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2746–2754.
- [155] Yue C, Ciais P, Houghton R A, *et al.* Contribution of land use to the interannual variability of the land carbon cycle[J]. *Nature communications*, 2020, 11(1):3170.

## Main influence factors and research methods of grassland carbon cycling: a review

WANG Le<sup>1</sup>, ZHU Qiu-an<sup>1,2\*</sup>, DU Ling-tong<sup>3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210009, China; 2. National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China, Beijing 100101, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Under the coupling effects of climate change and human activities, the carbon cycles of the steppe eco-

system have changed significantly. This paper introduced the background and importance of the grassland carbon cycle, and then presented the domestic and overseas' grassland carbon cycle research progress, including discussions of carbon source and carbon sinks, the research status of soil respiration, the influence of climate change and human activities on the grassland carbon cycles, the main technology methods, as well as some important results and conclusions in studying grassland carbon cycle detailed. On this basis, deficiencies and problems, existing in the research of the grassland carbon cycle, were analyzed, future research prospects were expounded, and the key research directions were put forward, so as to provide a theoretical basis for the research of the terrestrial ecosystem carbon cycle in the context of "dual carbon" goal.

**Key words:** carbon storage; carbon sources and sinks; soil respiration; eddy covariance; ecological model