

我国草地生态系统碳循环机制及 碳蓄积核算研究回顾与展望

孙政国^{1,2}, 孙成明^{1,3}, 李建龙¹, 陈奕兆^{1,2}

(1. 南京大学生命科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095;

3. 扬州大学农学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:碳循环与碳蓄积等问题日益成为气候变化与地球科学研究领域的前沿与热点问题, 其中, 草地生态系统作为独特的生态系统类型又是全球碳循环中最复杂、受人类影响最大的部分。本研究从草地在气候变化中的作用谈起, 介绍了CO₂浓度变化、碳失汇与草地生态系统的关系, 并重点介绍了陆地生态系统与草地生态系统各自的碳循环过程及影响碳循环的因素。总结了不同研究中, 我国草地碳储量及分布格局, 分析了碳循环过程中源汇关系, 指出当前研究中存在的问题和今后工作的努力方向, 为我国草地生态系统碳蓄积及碳循环特征研究提供参考。

关键词:全球变化; 草地生态系统; 碳蓄积; 碳循环; 源汇关系

中图分类号: S812.29

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2011)09-1611-06

^{*1} 草原是地球上最重要的陆地生态系统类型之一, 草原植物通过光合作用吸收空气中的CO₂并固定在土壤和植被中, 这使得草原在缓解气候变暖、防风固沙、涵养水源、保持水土、净化空气以及维护生物多样性等方面具有重要作用。我国是世界上第二草原大国, 草地面积4亿hm², 约占我国国土面积的41%, 主要分布在具有温带大陆性干旱气候特征的北温带地区和海拔较高的青藏高原地区, 在暖温带、亚热带和热带地区草地面积较少, 是我国最大的陆地生态系统^[1-2], 其碳蓄积在空间格局上具有明显的分异特征, 碳循环也具有独特的生物地球化学循环过程和作用, 对区域气候变化的响应和全球的碳循环有着非同寻常的意义。人类活动对草原碳循环的影响, 主要通过对温室气体排放影响草原的碳氮比, 改变草原土壤的物理性质来起作用。研究表明, 放牧、农垦会对草原温室气体通量产生影响^[3-4], 但目前对影响这一变化过程的主要物理、化学和生物机制以及不同影响过程中的主导因子仍不十分了解^[5]。根据当前国内外碳循环研究的进展, 如何将已有的研究成果进行归纳, 区分人类活动和气候变化对中国草原碳循环影响的相对重要性, 也是全球变化领域研究的重要课题。在此基础上, 估算我国草地生态系统碳蓄积量和系统分析碳源汇特征对科学评价草地植被在全球变化中的生态价值和贡献, 研究陆地碳循环机制和全球碳收支平衡都具有重要意义, 这也是目前国际地圈-生物圈研究计划(IG-

BP)中碳循环研究的重要组成部分^[2]。

1 草地生态系统在气候变化中的作用

近百年来的全球气候变暖已经是一个无可争辩的事实, 并日益深刻地影响着人类社会的可持续发展。气候变化引起气象界和政府越来越多的关注, 各国学者从不同角度对这一问题作了研究, 获得了许多有意义的结果^[6]。草地生态系统作为陆地生态系统重要的类型之一, 在全球气候变化中具有调节大气CO₂浓度、涵养水源、减少大气粉尘、净化空气等特殊的作用。

1.1 草地生态系统与大气CO₂浓度变化

IPCC第3次气候变化评估报告指出, 在过去的100多年里, 大气中CO₂浓度明显增大, 使得过去140年中全球平均气温升高了0.4~0.8℃, 达到了1000年以来的最高值。由于人类活动, 目前大气CO₂浓度大约以每年2.36~3.54mg/m³速度增加, 据预测, 21世纪末可能为1200~1300mg/m³, 这样对陆地生态系统碳平衡将产生巨大的影响^[7]。

在草地生态系统中, 绿色植物通过光合作用吸收大气中的CO₂, 植物枯死后其中一部分凋落物经

* 收稿日期: 2010-12-15 接受日期: 2011-03-15
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB950702); 国家高技术(863计划)专题项目(2007AA10Z231); APN项目(ARCP2010-14NMY-Li)
作者简介: 孙政国(1981-), 男, 江苏宿迁人, 讲师, 在职博士, 主要从事草地生态与碳循环研究。
E-mail: sunzg@njau.edu.cn
通信作者: 李建龙 E-mail: Jlli2008@nju.edu.cn

腐殖化作用,形成土壤有机碳固定在土壤中,这部分有机碳经土壤动物和土壤微生物的矿化作用,部分分解产物被植物再次利用,构成了生态系统内部碳的生物循环。此外,植物光合作用固定的有机碳还有一部分通过植物自身的呼吸作用(自养呼吸)、凋落物层的异养呼吸作用以及土壤的呼吸代谢作用将碳重新释放到大气中,构成了系统与大气间的生物地球化学循环过程^[8]。总的来说,草地生态系统作为陆地生态系统重要的生态类型,对大气 CO₂ 浓度、全球碳平衡和碳收支具有一定的调节作用。

Grünzweig 和 Körner^[9]的研究表明,CO₂ 浓度增加改变了草本植物原有的生物量,导致物种组分的变化,生态系统重新装配。据南京大学全球变化研究小组^[10]多年的研究,CO₂ 浓度增加对草地生态系统及碳平衡具有重大的影响。CO₂ 浓度增加通过影响生态层次发生级联反应,导致草地生态系统碳通量变化,引起个体物种或基因型的生理生化反应。CO₂ 浓度增加,加速了光合作用,降低了叶片气孔导度和羧化酶的浓度,影响到生态系统的能量平衡和养分循环。

1.2 草地生态系统与全球碳失汇 碳源,《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》将碳源定义为向大气中释放碳的过程或活动。碳汇,一般是指从空气中清除二氧化碳的过程、活动和机制^[11]。

在 20 世纪 70 年代以前,人们一直认为森林作为地球陆地上最大的光合作用系统,如同巨大的海绵体,吸收着大气中的 CO₂,起着净化大气、减缓因人为释放 CO₂ 而导致大气 CO₂ 浓度快速增加的作用。换言之,森林起着大气 CO₂ 汇的作用。然而,这一常识在 20 世纪 70 年代后期遭到了质疑。一些科学家研究发现,全球森林,尤其是热带森林的破坏正导致陆地生态系统向大气净排放 CO₂,成为大气 CO₂ 浓度升高的罪魁祸首之一^[12]。这一结果让科学界感到震惊,同时也产生了一个重要的科学问题:如果森林生态系统不能起到 CO₂ 汇的作用,那么这部分的碳汇又该在何处呢?从 20 世纪 80 年代起,寻找陆地碳汇便成为生态学、生物地球化学、气候变化等领域的研究热点。

2 草地生态系统在陆地生态系统碳循环、碳蓄积中的作用

陆地生态系统是人类赖以生存和持续发展的生命支持系统,是受人类活动影响最强烈的区域,也是

全球碳循环的重要碳库之一。它的动态变化依赖于各种生物化学循环之间的相互作用,能建立许多 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的源和汇,因而会影响全球对人为活动释放温室气体的响应。其中,草地生态系统作为覆盖范围广、生态作用强、生境类型多的一类生态系统,在陆地生态系统碳循环、碳蓄积中发挥着独特的作用。

2.1 陆地生态系统碳循环的基本过程 在过去的 200 年中由于化石燃料燃烧、水泥产品和森林的土地利用及其变化,有(405±30) Pg C 的 CO₂ 释放到大气中,导致大气 CO₂ 浓度显著增加。大气 CO₂ 浓度的上升占这些人为释放 CO₂ 的 40%,剩下的由海洋和陆地生态系统吸收。全球陆地生态系统与大气间的净碳通量是由光合作用吸收量和返回过程释放量之间的不平衡决定的,植物、土壤微生物、生物化学过程、动物和其他自然因素的干扰对后者有一定的贡献。

陆地生态系统中的碳以植物为轴心,在大气圈—生物圈—土壤圈中进行着往复循环^[13]。植物通过光合作用吸收大气中的 CO₂,将碳储存植物体内,固定为有机化合物。其中,一部分有机物通过植物自身的呼吸作用(自养呼吸)和土壤及枯枝落叶层中有机质的腐烂(异养呼吸)返回大气,这样就形成了大气—陆地植被—土壤—大气整个陆地生态系统碳循环的基本过程。这个过程是在不同时间和空间尺度上发生的,包括从瞬时的总初级生产量(GPP)反应到生态系统长期的碳平衡以及从个体、生态系统到景观或更大尺度上的生物群系。影响不同尺度碳循环过程的环境要素也都各不相同,例如,GPP 主要受 CO₂ 浓度升高的影响^[14],而净初级生产力(NPP)要受 CO₂ 浓度升高、温度、降水、氮素供应等多个因子的影响^[15]。而且,由于陆地生态系统的复杂性和多样性,植被、土壤和气候均存在空间和时间的极大差异,各种不同生态系统类型的反应速度、分解速度和碳蓄积能力也存在较大差异^[14],这些都增加了陆地碳循环研究的不确定性。

随着 CO₂ 浓度的不断升高,陆地生态系统将是人类活动引起的碳排放的一个潜在碳汇,但不同类型植被对 CO₂ 升高的响应机制也各不相同:对 C₃ 植物来说,随着 CO₂ 浓度升高,光合作用和发育也加快;而对 C₄ 植物来说,其光合速率在目前浓度条件下已趋于饱和。因此,陆地生态系统的碳汇能力

将会由强变弱。从长期来看,所有 NPP 都将成为死生物量(残屑)并通过异养呼吸或自然及人为造成的火灾等扰动返回到大气碳库中。已有一些试验结果表明,由于营养限制,NPP 在现有水平上再增长 10%~20%后将有可能趋于稳定,相应的大气 CO₂ 浓度约为 1 200 mg/m³[16]。而且,由于呼吸作用的滞后响应,在长时间尺度上,温度的升高将可能使微生物的异养呼吸增强从而抵消甚至超过 NPP 的增量[17]。

2.2 草地生态系统碳循环的基本过程及影响因素分析 草地作为世界上最广布的植被类型,其碳素行为很活跃,具有相当大的碳蓄积能力,这些潜在碳汇在全球碳循环中具有很大的作用。因此,对草地生态系统碳循环主要过程及其影响因素的研究是认识陆地生态系统乃至全球碳循环的关键之一。

2.2.1 草地生态系统碳循环的过程分解 在草地生态系统中,植物、凋落物、土壤腐殖质构成了系统的三大碳库。对于各碳库碳贮量以及碳库间碳流量大小及其变化的研究是整个草地碳循环研究的核心[5]。关于碳素循环的过程包括:碳的固定、碳的储存和碳的释放。绿色植物通过光合作用将大气中的 CO₂ 转变为有机碳,是草地生态系统碳的主要来源,这一过程称为碳的固定过程。把固定的碳以各种形式储存在生态系统中,称为碳的储存。草地生态系统碳储量的特征明显区别于森林等其他陆地生态系统,不具有明显的地上碳库,其碳素贮量绝大部分集中在土壤中,在草地生态系统中,进入土壤中的碳主要以有机质的形式存在。草地生态系统碳素的释放包括植物自身的自养呼吸、凋落物层的异养呼吸以及土壤的呼吸代谢,其中草地土壤呼吸是草地生态系统释放 CO₂ 的重要途径。全球土壤呼吸作用的碳估计量为 68~100 Gt/a,仅次于全球陆地总初级生产力的估算值 100~120 Gt/a,而高于净初级生产力的量值 50~60 Gt/a,土壤呼吸作用向大气释放的 CO₂ 约占全球交换量的 25%[18]。

2.2.2 草地生态系统碳循环的影响因素及区域分异规律 草地群落中碳的输入量大小主要取决于群落初级生产力水平,而初级生产力主要受草地植物组成、水分、温度、生长季长短等因素的限制,此外,草地利用方式和强度对初级生产力有较大影响。对于草地群落而言,初级生产力的形成是碳素向群落内

输入的主要途径。总的来说,降水量、温度、土壤水分等环境因子和放牧、农垦等人类活动是影响草地生态系统植被固碳的主要因素,通过影响草地群落的种群组成、结构特征及其生理生态特性等间接对草地生态系统的植物固碳产生重要影响。放牧和农垦对草地覆盖状况、植物生长和土壤养分流动有不同程度的干扰和影响,进而对草地植物固碳产生直接影响[19]。长期过度放牧会导致植物与群落的初级生产力显著降低[20]。因此,确定合理的放牧强度和放牧制度对草地生态系统中植物固碳能力的提高具有重要影响。

不同土壤类型和同一土壤类型的不同剖面层次,土壤有机碳也有明显的差异。温度、水分、土壤质地、植被类型、微生物和动物及各因素的相互作用,人类活动对土壤有机碳含量也有较大影响。影响土壤呼吸的环境因子主要包括气温、土壤温度、土壤水分、土壤有机质含量、土壤微生物的数量和土壤初级生产力等[5]。放牧和农垦对于草地土壤呼吸作用的影响程度,目前的研究还基本上处在对观测结果的简单数值分析上。

关于草地碳循环区域分异方面的研究,李明峰等[21]利用静态暗箱法对内蒙古锡林河流域草甸草原及其开垦后的农田和休耕地的 CO₂ 通量进行了野外实地观测,从 CO₂ 排放量的平均值来看,农田>草甸>休耕地,其中草甸开垦为农田使 CO₂ 的排放增加了 81%。自由放牧地、轮牧地、围栏禁牧地等区域上,土壤与大气间原有的 CO₂ 气体通量的源/汇方向没有改变,也没有改变土壤呼吸的季节变化形式。对单个类型草地生态系统来说,与草地地上部相比,草地地下生物量在总生物量占有较大比例,土壤有机碳约占生态系统碳总量的 90%,它的来源主要是植物残根,凋落物层的分解也向土壤输入一部分有机碳。草原中土壤碳主要以有机质的形式存在,而且主要集中于 0~20 cm 的表层土壤中[22-23]。

3 我国草地生态系统碳储量及分布格局

草地是我国陆地最大的生态系统,其面积约为我国耕地面积的 4 倍,森林面积的 3.6 倍[24-25]。

3.1 我国草地生态系统碳储量概况 我国草地 85%以上的有机碳分布于高寒和温带地区,草原和草甸类型草地蓄积了全国草地有机碳的 2/3[26]。不同的研究报道的中国草地生物量碳库的大小有着

较大的差异^[27-37],估算范围在 0.56~4.67 Pg C(1 Pg=1×10¹⁵ g)。造成估算结果的差异,可能由草地分类系统、资料来源和估算方法的不同、地下生物量数据缺乏造成根冠比准确性下降等因素引起。同样,对整个中国草地土壤有机碳库的估算结果相差也较大。Xie 等^[38]基于第 2 次全国土壤普查资料估算的中国草地土壤碳库大小为 37.7 Pg C;Li 等^[39]通过 CEVSA 模型估算的中国草地土壤碳库大小为 16.7 Pg C;而 Ni^[36]通过全球土壤数据库估算的我国草地土壤碳库大小为 41.0 Pg C。分析引起差异的原因,大概由数据来源与估算方法、土壤砾石含量、土壤容重等参数、估算中使用的草地面积等参数信息不同引起的。

3.2 我国草地生态系统碳储量分布格局 我国拥有极为丰富的草地资源,分布自东北平原,越过大兴安岭,经辽阔的内蒙古高原,而后经鄂尔多斯高原、黄土高原,直达青藏高原南缘,绵延约 4 500 km,南北跨越 23 个纬度^[40]。我国草地单位面积地上生物量总体分布是,东南地区高,西北地区低。这可能与水热条件、土壤以及草地类型的分布有关。地下总生物量方面,西部地区高,而东部的地区低。在南北走向上,呈现出南方地下生物量低而北方高的趋势,这与占 60%以上面积的草地分布在我国北方干旱地区和青藏高原有关。

4 我国草地生态系统碳储存及源汇特征研究展望

在当今全球变化背景下,我国草地生态系统碳蓄积和碳循环过程以及源汇特征的研究还处于起步阶段,大量的研究主要集中在草原初级生产力、生物量动态、土壤有机碳动态等方面,对于碳元素固定、蓄积和释放的各个环节缺乏整个系统的综合研究。

4.1 存在的问题 由于起步较晚,前期科研力量不足,国家针对性政策出台较晚,与欧美发达国家相比差距较为明显。我国草地生态系统碳蓄积、碳循环及源汇关系研究开展过程尚存在以下问题。

4.1.1 试验观测数据的局限性及模型模拟的不确定性 如观测的试验数据设计在特定环境中,加之植被类型和地域的不同,不能代表区域的普遍性;试验观测数据仅局限于碳循环的部分过程,对于生态系统作为一个整体的响应很难基于简单的试验完成;另外,缺乏长期的定位观测数据。

目前,在利用模型模拟碳循环、碳蓄积及源汇关系时,大多数研究是通过影响过程简单地设定参数来实现;对于植物的年龄结构和生长情况也往往看作是静态的,这都将极大的影响了模型模拟的准确性。此外,在森林、农田等生态系统中相对成熟的模型较多,而在草地中吻合度高的模型还有待出台。

4.1.2 国家层面开展的普查较少 在森林资源普查上,国家层面已经开展了 6 次。在土壤清查资料和土壤数据库构建方面,1978 年以来我国开展了第 2 次土壤普查,加强了土壤分类、成分的研究。我国从 1979 年开始分 3 个阶段开展了全国草地资源的统一调查,调查范围覆盖了全国 2 000 多个县^[41]。这次全国范围的调查为进一步开展我国草地生态系统的研究提供了良好的基础,但由于土地利用和草地退化等原因造成的地上覆被改变,旧的普查资料亟需更新,第 2 次全国范围的草地调查迫切等待开展。

4.1.3 影响生态系统呼吸作用因素考虑的不足 EUROFLUX 计划在 1996—1998 年对欧洲 14 类森林的监测结果表明,生态系统呼吸作用(植物呼吸+土壤呼吸)在系统的碳平衡中起着支配作用^[42]。目前关于生态系统呼吸作用的估算公式仅考虑了环境因子(如温度、湿度或实际蒸散等)的影响作用^[43],对于草地植物或草食动物本身生物学特征影响考虑较少,甚至没有考虑,从而影响草地生态系统碳估算的准确性。因次,生态系统土壤呼吸作用必须综合考虑草地植物本身的生物学特征、草食动物和环境因子的综合影响。

4.1.4 草地生态系统碳循环机制研究不足 我国目前在对影响草地碳源汇的物理、化学和生物过程的研究需要进一步加强力量,对草地生态系统碳循环的机制剖析不够深入,尤其是在薄弱部分的细节研究存在较大的不确定性。如活根与死根、土壤呼吸与根系呼吸的区分、植物呼吸与凋落物呼吸的定量测定以及不同的时间尺度和空间区域下草地碳循环过程和强度的研究。

4.2 下阶段工作重点 针对以上问题,本研究认为还需要在以下几个方面开展进一步的工作:建立具有统一的观测方法与规范的草地生态系统碳通量观测网络,以保证资料的可比性和连续性;加强草地生态系统碳平衡主导控制因子研究,强调草地植物和草食动物生物学特性与环境因子以及人为活动对生态系统呼吸作用的影响作用;加强对气候变化及

人类活动驱动下的多尺度草地生态系统碳蓄积、碳循环过程和机制的研究,尤其加强草地碳源汇季节变化动态和区域分异的对比定位观测,注重碳循环过程源汇关系的分析,尤其关注对草地生态系统不同发展阶段、不同利用方式对草地生态系统碳循环过程与机理的理解;改进与完善现有的草地生态系统模型,并针对中国草地生态系统的特点,发展具有自主知识产权的草地生态系统碳蓄积、碳循环模型,以准确评价我国草地生态系统源汇关系和时空变异格局;强化现代化信息技术在草地生态系统碳平衡研究中的应用,以实现对于草地生态系统碳循环、碳蓄积和源汇特征的快速分析和诊断。

参考文献

- [1] 侯向阳,杨理.我国草地生态研究的重点任务[J].中国农业科技导报,2005,7(3):3-6.
- [2] 于贵瑞.全球变化与陆地生态系统碳循环与碳蓄积[M].北京:气象出版社,2003:181-183.
- [3] 李凌浩,刘先华,陈佐忠.内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究[J].植物学报,1998,40(10):955-961.
- [4] 王跃思,纪宝明,黄耀,等.农垦与放牧对内蒙古草原 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 吸收的影响[J].环境科学,2001,22(6):7-13.
- [5] 齐玉春,董云社,耿元波,等.我国草地生态系统碳循环研究进展[J].地理科学进展,2003,22(4):342-352.
- [6] 赵光平,杨淑萍,穆建华.全球变化对宁夏近40a极端气温变化的影响[J].中国沙漠,2009,29(6):1207-1211.
- [7] 国家发展和改革委员会能源研究所.减缓气候变化——IPCC第三次评估报告的主要结论和中国的对策[M].北京:气象出版社,2004:190-195.
- [8] 王建安,韩国栋,鲍雅静.我国草地生态系统碳氮循环研究概述[J].内蒙古农业大学学报,2007,28(4):254-258.
- [9] Grünzweig J M, Körner C. Growth water and nitrogen relations in grassland model ecosystems of the semiarid Negev of Israel exposed to elevated CO_2 [J]. Oecologia, 2001,128:251-262.
- [10] 杨峰,李建龙,钱育蓉. CO_2 浓度增加对草地生态系统及碳平衡的影响[J].中国草地学报,2008,30(6):99-102.
- [11] 刘娟妮.基于GIS的黄龙山主要森林类型碳储量的时空分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [12] Cao M, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their response to climate change [J]. Global Change Biology, 1998,4(2):185-198.
- [13] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):497-508.
- [14] Tian H Q, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle [J]. Global and Planetary Change, 2003,37:201-217.
- [15] 黄萍,黄春长.全球增温与碳循环[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2000,28(2):104-109.
- [16] 刘强,刘嘉麒,贺怀宇.温室气体浓度变化及其源与汇研究进展[J].地球科学进展,2000,15(4):454-460.
- [17] Dixon P K, Brown H, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263: 185-190.
- [18] 戴雅婷,那日苏,吴洪新,等.我国北方温带草原碳循环研究进展[J].草业科学,2009,26(9):43-48.
- [19] 牛建明.气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究[J].草地学报,2001,9(4):277-282.
- [20] 白哈斯.不同放牧率对草甸植被特征的影响[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):170-174.
- [21] 李明峰,董云社,齐玉春,等.农垦对温带草地生态系统 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量的影响[J].中国农业科学,2004,37(12):1960-1965.
- [22] 李玉娥,林而达.天然草地利用方式改变对土壤排放 CO_2 和吸收 CH_4 的影响[J].农村生态环境,2000,16(2):14-16,44.
- [23] 张金霞,曹广民,周党卫,等.放牧强度对高寒灌丛草甸土壤 CO_2 释放速率的影响[J].草地学报,2001,9(3):193-190.
- [24] 李博,雍世鹏,李瑶,等.中国的草原[M].北京:科学出版社,1990:213-218.
- [25] 徐柱.面向21世纪的中国草地资源[J].中国草地,1998(5):128.
- [26] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change [J]. Climatic Change, 2001,49:339-358.
- [27] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000 [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007,50:1341-1350.
- [28] 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 biomass [J]. Climatic Change, 2008,86:375-396.

- [29] Ni J. Carbon storage in grasslands of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 205-218.
- [30] 安尼瓦尔·买买提, 杨元合, 郭兆迪, 等. 新疆草地植被的地上生物量[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, 42: 521-526.
- [31] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[A]. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [32] 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: 192-195.
- [33] 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[J]. *植物生态学报*, 2004, 28: 491-498.
- [34] 王建林, 常天军, 李鹏, 等. 西藏草地生态系统植被碳贮量及其空间分布格局[J]. *生态学报*, 2009, 29: 931-938.
- [35] 马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 632-641.
- [36] Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China[J]. *Climatic Change*, 2004, 67: 237-246.
- [37] Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, *et al.* Aboveground biomass in Tibetan grasslands[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 91-95.
- [38] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, *et al.* Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1989-2007.
- [39] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47: 49-57.
- [40] 陈佐忠, 王艳芬, 汪诗平, 等. 中国草地生态系统分类初步研究[J]. *草地学报*, 2002, 10(2): 81-86.
- [41] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司. 中国草地资源[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1996.
- [42] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, 404: 861-864.
- [43] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-475.

Retrospect and prospect of carbon circle mechanism and carbon storage calculation of grassland ecosystem in China

SUN Zheng-guo^{1,2}, SUN Cheng-ming^{1,3}, LI Jian-long¹, CHEN Yi-zhao^{1,2}

(1. College of Life Science, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China;

2. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Nanjing 210095, China;

3. College of Agricultural Science, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225009, China)

Abstract: The carbon cycle and carbon storage becomes a hot spot in the filed of geo-science and global change in recent years, in which the grassland ecosystem as the unique type of ecological system is the most important and the most complicated part affected by man. This study reviewed the role of grassland in the global change, the relationships between the change of CO₂ concentration and missing carbon sink and the grassland ecosystem, emphasized on the carbon circle process of the terrestrial ecosystem and grassland ecosystem and factors affecting the carbon circle. This study also summarized the carbon storage value and distribution pattern of grassland ecosystem in China, and the relationships between the source and sink in the process of carbon circle by current documents and papers, and then proposed the some current problems and a perspective of carbon circle, which would provided some useful information for carbon circle and carbon storage of the grassland ecosystem in China.

Key words: global change; grassland ecosystem; carbon storage; carbon cycle; the link between carbon source and carbon sink