



论文

中国草地碳储量时空动态模拟研究

张利^{①②}, 周广胜^{①③*}, 汲玉河^{①③}, 白永飞^①

① 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

② 中国科学院大学, 北京 100049;

③ 中国气象科学研究院, 北京 100081

* 通讯作者, E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn; gszhou@camsma.cn

收稿日期: 2016-03-25; 接受日期: 2016-05-12; 网络版发表日期: 2016-09-18

中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA-05050408)资助

摘要 基于陆地生态系统模型(Terrestrial Ecosystem Model, TEM 5.0), 利用温度、降水和太阳辐射等气象资料, 结合草地植被类型、土壤质地、海拔、经纬度以及大气 CO₂ 浓度数据, 模拟研究了 1961~2013 年中国草地碳储量和碳密度的时空特征及其影响因素. 结果表明: (1) 1961~2013 年间, 面积 $394.93 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的中国草地碳储量为 59.47Pg C, 其中植被碳 3.15Pg C(约占全球植被碳储量的 1.3~11.3%), 土壤碳 56.32Pg C(约占全球土壤有机碳储量的 9.7~22.5%). 草地碳储量以 19.4 Tg C a^{-1} 年平均增长速率从 1961 年的 59.13Pg C 增加到 2013 年的 60.16Pg C. (2) 研究时段内, 青藏高原草地碳储量贡献最大, 占总碳储量的 63.2%, 其次是新疆草地(15.8%)和内蒙古草原(11.1%). (3) 1961~2013 年, 植被碳储量呈增加趋势, 年平均增长速率为 9.62 Tg C a^{-1} , 温度是植被碳库变化的主要因素, 二者相关系数可达 0.85. 在空间分布上, 植被碳变化以增加为主, 减少主要出现在南方草地中部, 内蒙古西部和中部以及一部分青藏高原草地区. 土壤碳储量以 7.96 Tg C a^{-1} 的速率呈极显著增加趋势, 其中 20 世纪 80 年代和 90 年代降水较多温度较低, 降水是土壤碳增加的主要影响因素.

关键词 中国草地, 土壤碳, 植被碳, 时空动态, 模拟

1 引言

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 是世界上分布最广的植被类型之一, 在全球碳循环中起着重要作用. 根据国家草地资源调查数据结果(中华人民共和国农业畜牧兽医司和全国畜牧兽医总站, 1996), 中国草地面积约 $394.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 41.1%. 中国草地分布经纬跨度大, 海拔区间

广, 主要分布在东北平原、内蒙古高原、黄土高原、青藏高原以及新疆山地, 而南方的平原、盆地和丘陵也分布着零散的、斑块状的草地, 是全球草地生态系统的重要组成部分(Scurlock等, 2002). 草地是个巨大的碳库, 草地生态系统碳贮量占全球陆地生态系统的 1/3(Schuman等, 2002), 仅次于森林生态系统, 在中国陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色(Scurlock和Hall, 1998; 方精云等, 2006). 因此, 研究

中文引用格式: 张利, 周广胜, 汲玉河, 白永飞. 2016. 中国草地碳储量时空动态模拟研究. 中国科学: 地球科学, 46: 1392-1405. doi: 10.1360/N072015-00599
英文引用格式: Zhang L, Zhou G S, Ji Y H, Bai Y F. 2016. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China. Science China Earth Sciences, 59: 1946-1958. doi: 10.1007/s11430-015-5599-4

中国草地生态系统碳循环过程及其气候影响因素, 有助于准确评估中国草地生态系统对全球草地生态系统碳收支的贡献及其对全球气候变化的响应.

近年来, 我国有不少学者在区域或国家尺度上采用不同的方法对草地碳循环作了大量研究. 由于估算过程涉及的草地分布范围、草地面积、时段和估算方法的差异, 导致草地碳库估算结果存在较大差异. 区域尺度上, Ma等(2010)、Ni(2002)、Piao等(2007)和Fan等(2008)估算的北方草地植被碳密度为 $0.28\sim 1.29\text{kg C m}^{-2}$, 方精云等(1996)、Yang等(2010b)对北方草地土壤碳密度的估算结果分别为 16.7kg C m^{-2} 和 8.49kg C m^{-2} ; 青藏高原土壤碳密度估算结果范围在 $6.5\sim 21.4\text{kg C m}^{-2}$ 之间(方精云等, 1996; 张永强等, 2006; Wang等, 2002; Yang等, 2008, 2010b); 内蒙古温带草地植被碳密度 $269\sim 1250\text{g C m}^{-2}$ (方精云等, 1996; Ni, 2002; 朴世龙等, 2004; 马文红等, 2006). 国家尺度上, 已有研究表明, 中国草地土壤有机碳密度位于 $10.0\sim 15.1\text{kg C m}^{-2}$ 之间(方精云等, 1996; 李克让等, 2002; Ni, 2001, 2002; Xie等, 2007), 植被碳密度估算范围在 $0.22\sim 1.21\text{kg C m}^{-2}$ 之间(方精云等, 1996, 2006; 李克让等, 2002; Peng和Apps, 1997; Ni, 2001, 2002; 朴世龙等, 2004; Piao等, 2007; Fan等, 2008; Yang等, 2010a; Yu等, 2010; 张峰, 2010). 由于草地植被分布与面积的差异, 使得估算的草地碳库差异更大(植被碳 $0.9\sim 4.66\text{Pg C}$, 土壤有机碳 $16.7\sim 74.5\text{Pg C}$). 而且, 目前仍没有关于1961年以来长时间尺度的中国草地生态系统碳收支和碳库时空格局的整体认识, 制约着草地生态系统碳收支动态及其对气候变化响应的理解.

本研究关注较大尺度草地植被碳与土壤碳库及其动态变化的研究, 因此试图基于利用中国草地的碳收支调查数据及相应的气象数据, 结合陆地生态过程模型, 模拟研究1961~2013年中国草地生态系统碳储量的时空动态, 分析各草地区碳储量及其对中国草地生态系统碳储量的贡献, 为增进对中国草地生态系统碳储量动态的理解及其科学管理提供参考.

2 材料与方法

2.1 研究范围

由于草地分类系统和资料来源的不同, 已有研

究使用的草地面积差异较大. 按照中国植被图(侯学煜, 1982, 2001)估算我国草地面积分别为 $280.0\times 10^4\text{km}^2$ (基于1:1000000中国植被图)(沈海花等, 2016)和 $406.0\times 10^4\text{km}^2$ (基于1:4000000中国植被图)(Ni, 2001). 而按照草地清查资料的估算结果则位于 $299.0\times 10^4\sim 569.9\times 10^4\text{km}^2$ 之间(方精云等, 1996, 2006; 中华人民共和国农业部畜牧兽医司和全国畜牧兽医总站, 1996; Ni, 2002, 2004; 朴世龙等, 2004; Piao等, 2007; Fan等, 2008). 此外, 卫星遥感数据也是估算草地面积的来源之一. 基于2000年1:100000土地利用数据(Landsat TM图像)、2001年MODIS草地覆盖数据和NOAA/AVHRR(8km)全球植被图估算的我国草地面积分别为 $185\times 10^4\text{km}^2$ (王思远等, 2010)、 $225\times 10^4\text{km}^2$ (陈世荣等, 2008)和 $167\times 10^4\text{km}^2$ (李克让等, 2002). 在众多草地面积来源中, 草地资源普查资料和1:1000000中国植被图, 是确定我国草地面积比较可信的两个基本数据源(沈海花等, 2016). 因此, 本研究基于中国草地资源清查资料(中华人民共和国农业部畜牧兽医司和全国畜牧兽医总站, 1996), 通过数字化处理获得中国草地总面积约 $394.93\times 10^4\text{km}^2$, 以此作为研究范围. 草地资源调查以省(市、自治区)为单位开展, 每个省以县为基本单位开展野外调查, 调查范围覆盖全国2000多个县, 95%以上的国土面积均按统一规程进行了调查. 研究中将中国草地分为七大草地区: 青藏高原草地区、内蒙古草原区、新疆草地区、黄土高原草地区、华北暖温性草地区、南方草地区以及东北草地区. 其中, 青藏高原草地面积最大($165.38\times 10^4\text{km}^2$), 其次是内蒙草原($84.07\times 10^4\text{km}^2$)和新疆草地($65.97\times 10^4\text{km}^2$), 三者共占中国草地面积的80%左右. 中国草地生态系统共包含了高寒草原、低地盐化草甸、高寒草甸、温性草原、温性荒漠和暖性灌草丛等在内的19种草地类型, 以及未分类草地.

2.2 数据资料

本研究基于陆地生态系统过程模型(TEM模型)模拟研究1961~2013年中国草地生态系统碳库的时空变化特征. TEM模型所需资料包括: 气象数据(温度、降水和太阳辐射)及其他环境数据(经度、纬度、海拔、土壤质地、植被类型、草地面积以及大气 CO_2 浓度数据). 模型可输出包括总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)、土壤呼吸(RH)、净生态系统生产力

(NEP)、植被含碳量(VEGC)、土壤有机碳(SOC)等共101个植被和土壤系统的碳、水和热量等相关变量,可根据研究需要指定所需变量输出. 气象数据来自于气象数据共享网1961~2013年中国基本、基准地面气象观测站的日值数据集. 对于区域尺度上生态系统过程的模拟研究, TEM模型需要在格点上运行完成. 为将全国1961~2013年的站点数据插值到相应网格点上, 利用Thornton等(1997)的截断高斯滤波算子空间插值算法, 结合各气象站地理信息, 将地面站点的温度、降水等观测资料通过空间插值, 形成10km×10km分辨率的栅格数据. 其中温度资料采用高斯滤波算子插值方法, 降水资料采用薄盘样条插值方法, 并利用Thornton和Running(1999)提出的方法得到日值空间格点的太阳辐射数据. 海拔高程数据来自于国家基础地理信息库, 分辨率为1km×1km, 在使用前将其统一至10km×10km的分辨率. 土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所整理成的中国土壤数据库(于东升等, 2005), 数据库来源于第二次全国土壤普查的结果, 包含了模型所需的土壤砂粒(%)、黏粒(%)和粉粒含量(%)等. 草地植被类型及面积数据来源于中国草地资源清查资料(中华人民共和国农业畜牧兽医司和全国畜牧兽医总站, 1996)(图1). 1961~2013年的大气CO₂数据来自NOAA发布的全球CO₂浓度观测数据(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>).

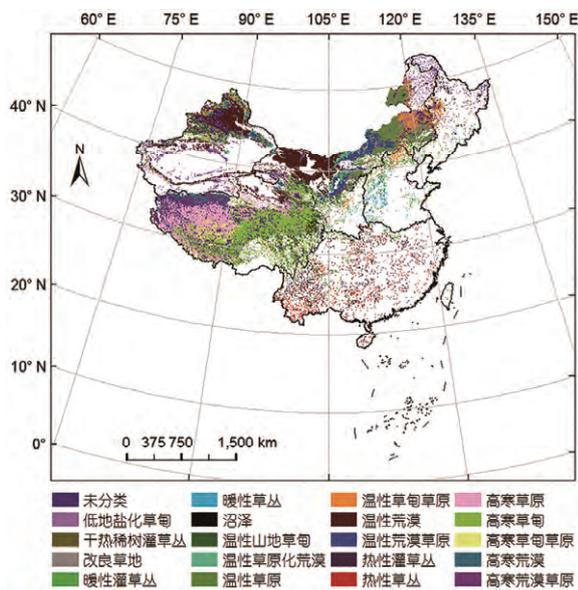


图1 中国草地分布图

2.3 研究方法

TEM模型是适用于全球和区域尺度的基于格点的生态系统过程模型, 利用空间相关的气候、海拔、土壤和植被数据, 以月为时间步长对陆地生态系统的碳、氮通量和库的大小进行评估(Raich等, 1991). 本研究中, 格点大小为10km×10km, 具体模型介绍详见已有研究(Raich等, 1991; Zhuang等, 2003; McGuire等, 1992). TEM模型包括CTEM和XTEM两部分, 其中CTEM用于模型的参数率定, XTEM则将CTEM率定后的参数文件作为输入, 从而按需求进行不同时空尺度的模拟. 为评估中国草地生态系统碳收支, 首先采用2011~2013年草地碳收支调查数据以及文献中提供的具有代表性的植被和土壤碳/氮库及库间通量作为目标值, 在340ppm的CO₂浓度以及多年平均气象条件下, 通过CTEM模型对控制各个过程的速率参数进行率定(Calibration). 参数率定过程的完成需满足以下三个条件: (1) CTEM模拟的中国草地植被年NPP及年GPP与初始估计值接近(绝对误差<0.1); (2) CTEM模拟的中国草地生态系统年氮吸收量(NUPTAKE)接近于观测值(绝对误差<0.1); (3) CTEM模拟的中国草地植被年NEP接近于零(平衡状态假设)(Zhuang等, 2010; Sui和Zhou, 2013). 本研究针对中国七大草地区的特征共率定8套参数, 其中青藏高原草地2套, 其他草地区各1套, 参数化方案详见网络版附录表1~8(<http://earthcn.scichina.com>). 参数率定完成后, 利用2011~2013年草地碳收支调查资料对模拟结果进行验证. 当多个观测点位于同一个格点(10km×10km)时, 对该格点内的观测值进行平均.

将通过参数率定和精度检验得到的参数用于1961~2013年中国草地生态系统碳收支的模拟研究. 对研究区域内的每一个格点, 首先采用1961~2013年的多年月平均气象资料, 在固定大气CO₂浓度和当前生态系统条件下, 运行XTEM模型达到平衡状态. 然后, 利用1961~1975年15年的气象资料, 连续运行3×15年以考虑年际间的气候变化对目前生态系统初始条件的影响. 最后, 利用1961~2013年间月步长的气象数据进行整个中国草地区域模拟. 模拟完成后, 利用草地普查的面积数据与模拟结果的乘积统计中国区域草地植被碳库和土壤碳库, 以及净生态系统生产力的时空动态.

用于参数率定和模拟验证的植被碳和土壤碳数据来源于2011~2013年草地碳收支调查(图2a)。其中,参数率定数据的选取是从全国752个气象站点中随机选出每个草地区内分布均匀的10个气象站点(图2b),然后通过GIS软件获取气象站点周围50km内的草地调查点作为参数率定数据源,余下的调查点作为精度检验的数据源。

3 研究结果

3.1 模型验证

剔除用于参数率定的植被碳和土壤碳数据,将剩下的植被碳和土壤碳数据用于模拟精度检验。首先,针对2011~2013年草地碳收支实测资料,删除地

上植被碳密度或地下植被碳密度,以及各层次土壤碳密度均为零的不合理数据;然后采用拉依达准则(即3 δ 法),剔除观测数据中与平均值的偏差超过3倍标准差范围的数据;最后利用余下的数据进行精度验证。结果表明,本地参数化后的TEM模型对中国草地生态系统碳库的模拟与观测结果基本一致。中国7个草地区精度检验结果如图3所示, $0.4 < R^2 < 0.6$, 均通过0.01的显著性检验,基本满足模型的精度要求。可见,TEM模型可用于中国地区草地生态系统植被碳与土壤碳的模拟研究。

3.2 中国草地生态系统碳储量和碳密度时空动态

1961~2013年中国草地生态系统年平均碳储量为59.47Pg C,其中,植被碳储量为3.15Pg C,土壤碳储

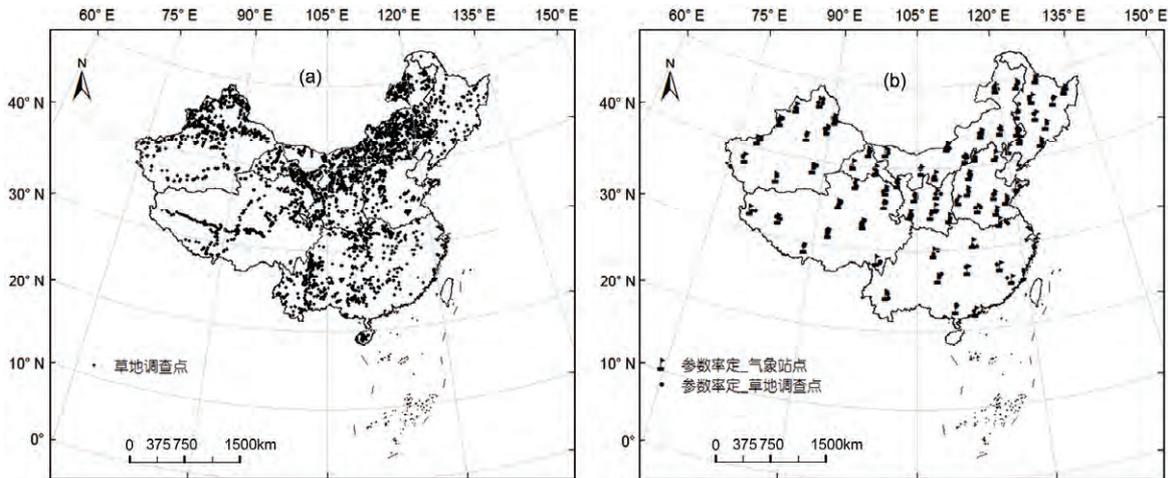


图2 中国草地调查样点分布(a)和参数率定点分布(b)

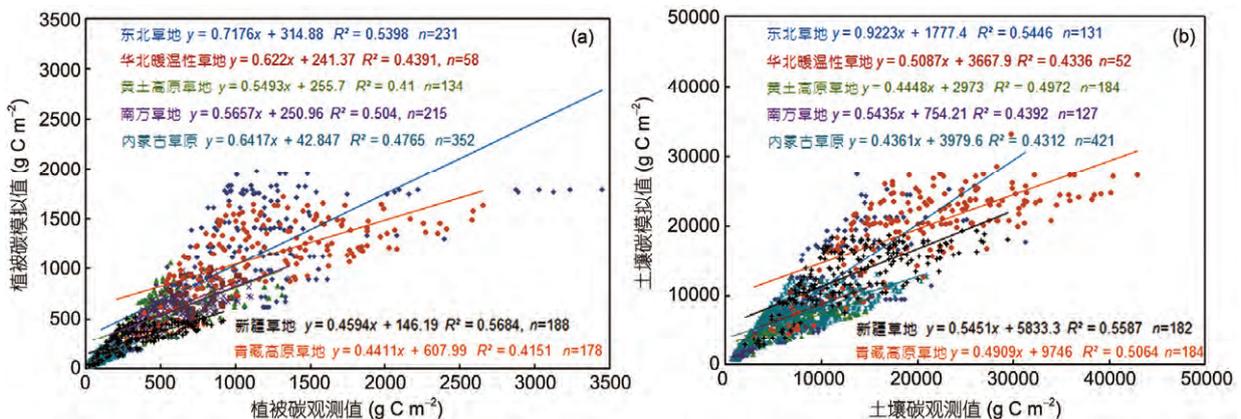


图3 TEM模拟的植被碳(a)、土壤碳(b)与2011~2013年样地实测的比较

量为56.32Pg C, 土壤碳储量为植被碳储量的约18倍. 近53年来, 中国草地碳储量从1961年59.13Pg C增加到2013年的60.16Pg C, 年平均增长速率为19.4Tg C a⁻¹, 年际变化差异显著($R^2=0.81$, $P<0.001$, $N=53$) (图4). 研究时段内, 中国草地生态系统平均碳密度为15.06 kg C m⁻² a⁻¹, 在草地面积不变的情况下, 草地生态系统碳密度以4.7g C m⁻² a⁻¹的增长速率呈显著的增加趋势.

青藏高原草地、内蒙古草原和新疆草地面积占中国草地面积的80%. 其中, 青藏高原草地面积最大(165.4×10⁴km²), 年平均碳储量为37.61Pg C, 占全国草地总碳储量的63.2%; 其次是新疆草地(69.8×10⁴km²)和内蒙古草原(89.8×10⁴km²), 年平均碳储量分别为9.38Pg C和6.63Pg C. 中国中东部地区草地面积较少, 且分布零散, 草地生态系统碳储量较小(表1).

3.3 中国草地生态系统植被碳和土壤碳储量及碳密度年际变化

1961~2013年中国草地生态系统的植被碳库年平均值为3.15Pg C, 植被碳从1961年的3.05Pg C增加至

2013年的3.56Pg C, 以9.62Tg C a⁻¹的速率呈现极显著的增加趋势($R^2=0.51$, $P<0.001$, 图5a), 年平均植被碳密度为797g C m⁻² a⁻¹. 草地土壤碳储量呈波动式增加趋势, 整体上以7.96Tg C a⁻¹的速率呈现极显著的增加趋势($R^2=0.82$, $P<0.001$, 图5b), 从1961年的56.08Pg C增加至2013年的56.60Pg C, 年平均为56.32Pg C. 其中, 以面积最大的青藏高原土壤碳储量的贡献最大(63.1%), 储量为35.56Pg C, 其次是新疆草原(9.11Pg C)和内蒙古草原(6.46Pg C), 土壤碳储

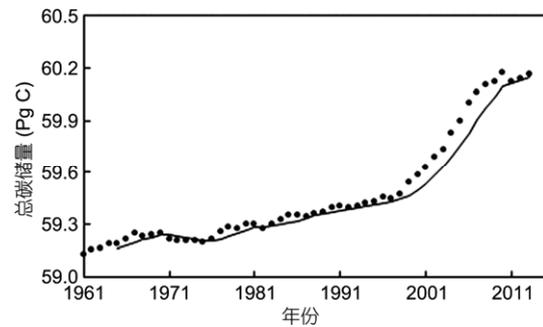


图4 中国草地生态系统总碳储量的时间动态

表1 1961~2013年中国各草地区平均碳储量和碳密度

草地区	面积 (×10 ⁴ km ²)	植被碳密度 (g C m ⁻²)	土壤碳密度 (kg C m ⁻²)	植被碳 (Tg C)	土壤碳 (Pg C)	总碳 (Pg C)	总碳密度 (kg C m ⁻²)
青藏高原草地	165.38	1241	21.5	2052	35.56	37.61	21.7
内蒙古草原	84.07	205	7.7	172	6.46	6.63	7.9
新疆草地	65.97	409	13.8	270	9.11	9.38	14.2
南方草地	29.43	840	1.3	247	0.39	0.64	2.1
黄土高原草地	26.31	538	6.0	142	1.57	1.71	6.5
东北草地	13.39	1202	18.3	161	2.45	2.61	19.5
华北暖温性草地	10.39	1010	7.6	105	0.79	0.90	8.6
总计或平均	394.93	797	14.3	3149	56.32	59.47	15.1

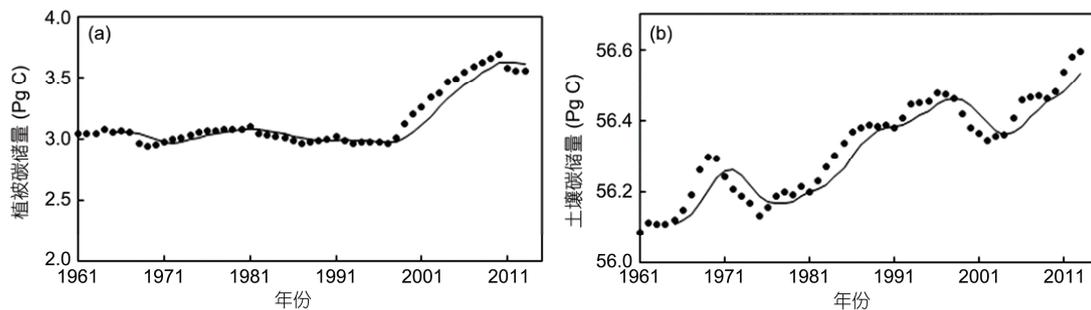


图5 中国草地植被碳储量(a)和土壤有机碳储量(b)动态变化

量的贡献分别为16.2%和11.5%。1961~2013年间平均土壤有机碳密度为 $14.3\text{kg C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ (表1)。

1961~2013年, 中国草地区温度呈显著增加趋势($0.06^\circ\text{C a}^{-1}$, $R^2=0.52$, $P<0.001$), 而降水增加趋势不明显(0.74mm a^{-1} , $R^2=0.13$, $P>0.05$)(图6a), 温度增加主要出现在1998年以后, 且同时期降水呈显著下降趋势。模拟结果显示, 1961~2013年温度和降水变化使得中国草地生态系统碳库约增加 1.03Pg C ($\sim 0.34\text{Pg C a}^{-1}$), 其中, 1980年前碳库增加不明显, 20世纪80年代和90年代以土壤碳增加为主, 同期降水较多温度较低, 降水是土壤碳增加的主要影响因素, 2000年后以植被碳增加为主, 同期温度呈显著增加趋势而降水呈减少趋势, 温度与生物量呈正相关, 温度的增加影响植被光合速率, 促进植被生长。整个研究时段内, 温度显著增加而降水增加不显著, 且生长季降水均大于300mm(属较湿润年份)。Yang等(2009)研究表明, 在较湿润青藏高原地区(生长季降水大于200mm), 温度的增加会加速高寒草地的植被生长, Piao等(2007)的研究表明草地生物量随温度增加而增加。本研究结果同样表明在降水满足草地植被生长的条件下, 温度成为影响植被碳库的主要因素(图6a和b)。

3.4 中国草地植被碳密度和土壤碳密度空间分布

中国草地植被碳密度现状空间异质性较大(图7a), 植被碳密度较大的地区分布在青藏高原草地和东北草地, 内蒙古草原和新疆草地南部大部分地区则较小。植被碳密度在 $9\sim 2943\text{g C m}^{-2}$ 之间, 主要集中在 $200\sim 1600\text{g C m}^{-2}$ 之间。图7b~d为中国植被碳密度的年代际变化的空间特征, 其中负值表示在年代际变化上碳密度减少, 反之正值表示增加。统计表

明, 从20世纪60年代至80年代, 约占研究区域总面积58%的草地区植被碳密度表现为增加, 其余42%则减少, 减少的区域主要出现在青藏高原草地区(图7b); 从20世纪80年代至21世纪初, 约96%的草地区植被碳密度增加, 仅4%的草地区植被碳减少, 且主要分布在内蒙古中西部草地区(图7c); 从21世纪初到2011~2013年, 约56%的草地面积的植被碳密度减少, 增加的区域主要分布在青藏高原东南部, 以及少部分东北草地区 and 新疆草地区(图7d)。

中国草地土壤碳密度现状的空间异质性较草地植被碳密度大(图8a), 土壤碳密度较大的地区分布在青藏高原东南部草地、东北草地以及新疆草地北部。黄土高原草地、华北暖温性草地以及南方草地土壤有机碳密度较小。土壤有机碳密度分在 $0.4\sim 49.4\text{kg C m}^{-2}$ 之间, 主要集中在 $4\sim 30\text{kg C m}^{-2}$ 之间。由各年代际土壤碳密度的空间分布差异可知, 从20世纪60年代至80年代、20世纪80年代至21世纪初、以及21世纪初到2011~2013年间, 土壤碳密度均以增加为主, 分别约占总研究草地面积的71%、53%和61%(图8b~d)。

近53年来, 中国草地区温度以增温为主, 增温最明显的区域为青藏高原草地区(图9a), 最强增温速率可达 0.2°C a^{-1} 以上。绝大部分草地区降水变化在 $-3\sim 3\text{mm a}^{-1}$ 之间, 降水减少主要出现在南方草地西部、黄土高原草地东南部以及大部分华北暖温带草地区(图9b)。在研究时段内, 植被碳变化以增加为主, 减少主要出现在南方草地中部, 内蒙古西部和中部以及一部分青藏高原草地区(图9c)。土壤碳变化空间差异显著, 减少主要出现在青藏高原草地区、东北草地区、华北暖温带草地北部和东部, 以及部分南方草地区。其中, 温度和降水增加较明显的地区如青藏高原草

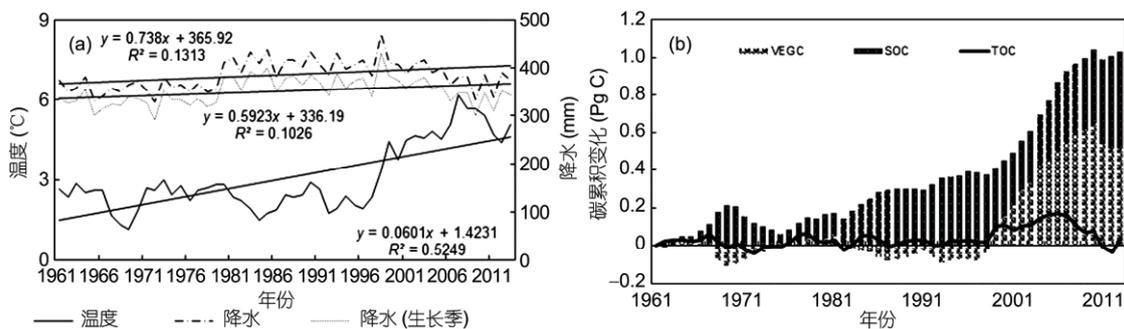


图6 中国草地温度、降水和生长季降水的年际变化(a)以及植被碳、土壤碳和总碳相对于1961年的变化(b)

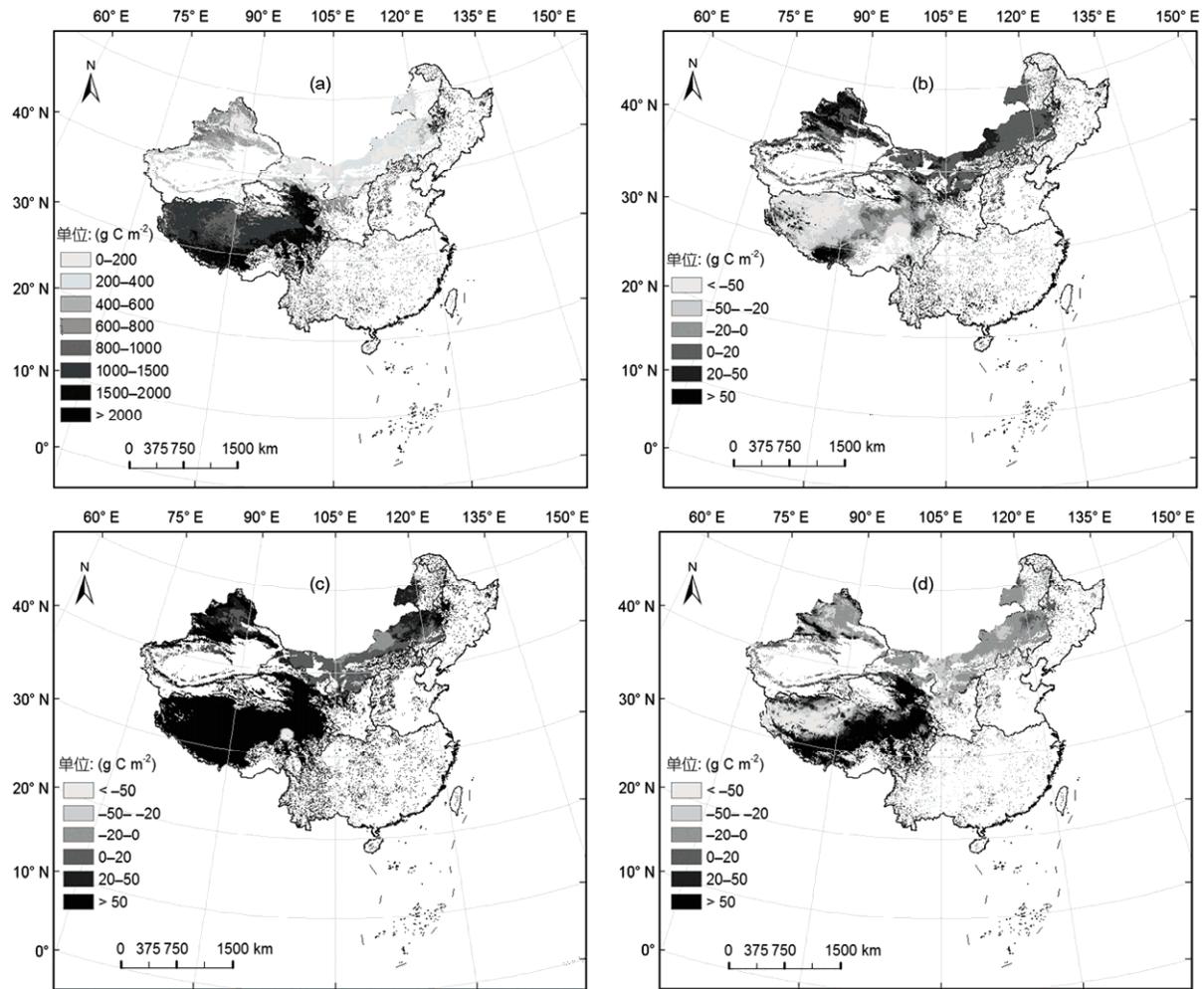


图7 植被碳密度变化的空间分布特征

(a) 2011~2013年植被碳密度; (b) 20世纪80年代与60年代; (c) 21世纪初与20世纪80年代; (d) 2011~2013年与21世纪初

地区, 其植被碳库略有增加, 而土壤碳库略有减少, 可能原因是高海拔高寒地区因增温增雨促进植被生长, 同时因温度升高导致土壤冰冻时间缩短, 加速土壤碳的氧化分解和土壤呼吸速率, 增加土壤碳向大气的输出量。

4 讨论

4.1 中国草地生态系统碳储量和碳密度

本研究结合草地分布、气象数据以及土壤和植被碳密度, 基于陆地生态系统模型(TEM)模拟了1961~2013年中国草地生态系统植被碳和土壤有机碳储量、密度的时空变化特征, 并利用2011~2013年间

研究区域内的草地碳密度调查资料对TEM模型的模拟结果进行精度检验。其中, 草地分布数据来源于中国草地资源调查, 土壤有机碳和植被碳密度来源于2011~2013年草地碳收支调查。各草地区验证结果: $0.4 < R^2 < 0.6$, 且均通过了0.01的相关性检验, 表明TEM模型可用于模拟中国草地植被碳、土壤有机碳储量和密度的时空变化。

结果显示, 中国草地植被碳库为3.15Pg C, 植被碳密度为 0.8kg C m^{-2} , 处于已有中国草地植被碳储量研究结果范围($0.6\sim 4.7\text{Pg C}$, $0.22\sim 1.21\text{kg C m}^{-2}$) (方精云等, 1996, 2006; 李克让等, 2002; Peng和Apps, 1997; Ni, 2001, 2002; 朴世龙等, 2004; Piao等, 2007; Fan等, 2008; Yang等, 2010a; Yu等, 2010; 张峰,

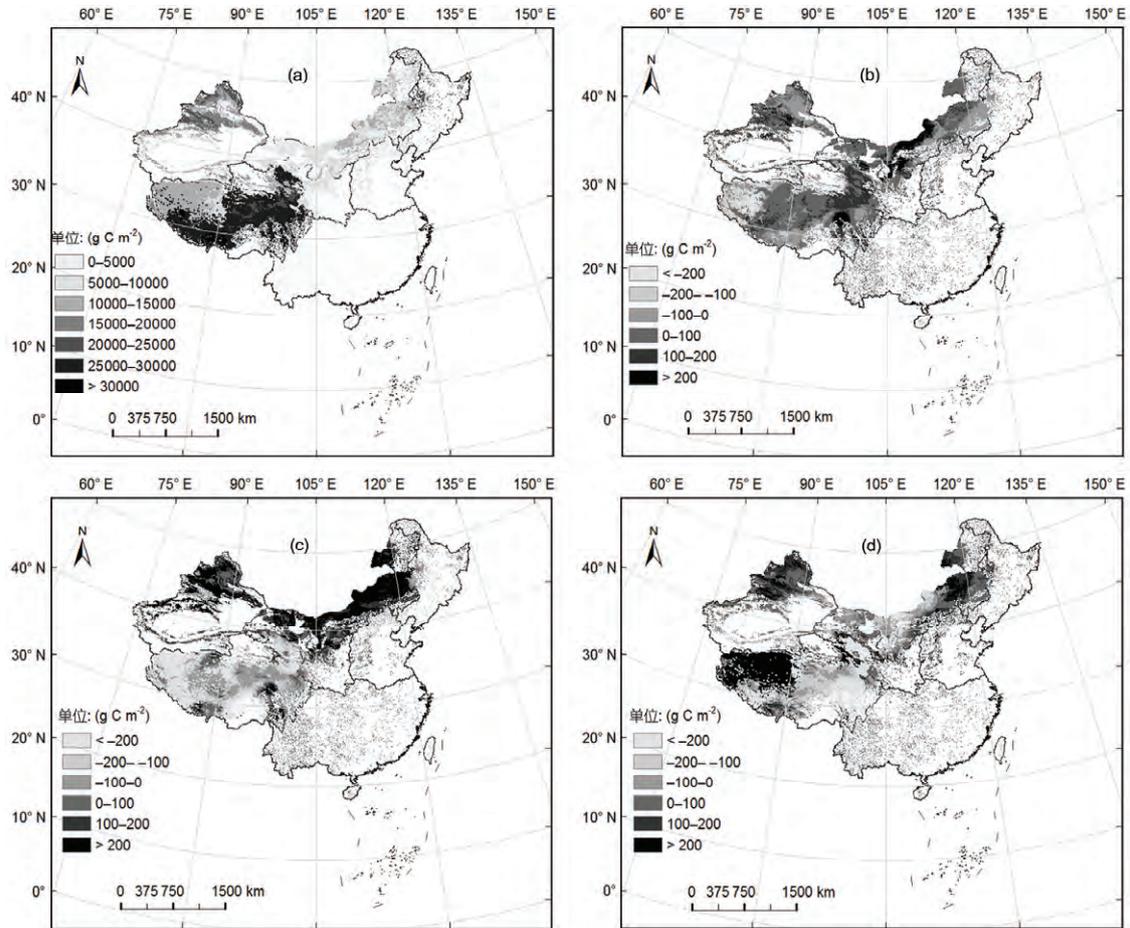


图8 土壤碳密度变化的空间特征

(a) 2011~2013年土壤碳密度; (b) 20世纪80年代与60年代; (c) 21世纪初与20世纪80年代; (d) 2011~2013年与21世纪初

2010). 其中, 面积较大的青藏高原草地植被碳库为2.05Pg C, 平均碳密度为 1.24kg C m^{-2} ; 内蒙古草地植被碳库为172Tg C, 平均碳密度为 205g C m^{-2} ; 新疆草地植被碳库为270Tg C, 平均碳密度为 409g C m^{-2} . 中国草地土壤碳库为56.32Pg C, 土壤碳密度为 14.3kg C m^{-2} , 位于已有研究结果的范围内(16.7~74.5Pg C, $10.0\sim 15.1\text{kg C m}^{-2}$)(方精云等, 1996; 李克让等, 2002; Ni, 2001, 2002; Xie等, 2007). 其中, 青藏高原草地土壤碳库为35.56Pg C, 平均碳密度 21.5kg C m^{-2} , 而现有研究的土壤碳库范围为7.4~74.9Pg C, 平均碳密度为 $6.5\sim 21.4\text{kg C m}^{-2}$ (方精云等, 1996; 王根绪等, 2002; Yang等, 2008); 内蒙古草原土壤有机碳储量为6.46Pg C, 密度为 7.7kg C m^{-2} , 略高于Yang等(2010b)估算的结果(6.63kg C m^{-2}); 新疆草地土壤碳储量为9.1Pg C, 密度为 13.8kg C m^{-2} , 接近买买提安尼瓦尔等(2006)

的土壤碳密度估算($11.8\sim 50.2\text{kg C m}^{-2}$), 与Yang等(2010b)估算的新疆草地平均土壤碳密度 12.11kg C m^{-2} . 不同研究结果估算的草地碳库差异较大, 具体分析见已有研究(Ni, 2002; 马文红等, 2006; 方精云等, 2010; 高添等, 2012).

4.2 气候因素对中国草地生态系统碳循环的影响

本研究未考虑人类活动和土地利用变化对草地生态系统的影响, 因此碳库变化主要受气候因素变化的影响. 已有研究也表明中国草地生态系统碳循环受降水(Xiao等, 1995; 韩彬等, 2006; 买买提安尼瓦尔等, 2006; 马文红等, 2010)和温度(买买提安尼瓦尔等, 2006; Yang等, 2009)等气候因素的影响较显著. 降水变化通过改变植被生长和土壤微生物活动所需水量, 以及土壤含水量, 来影响凋落物碳素向土壤的

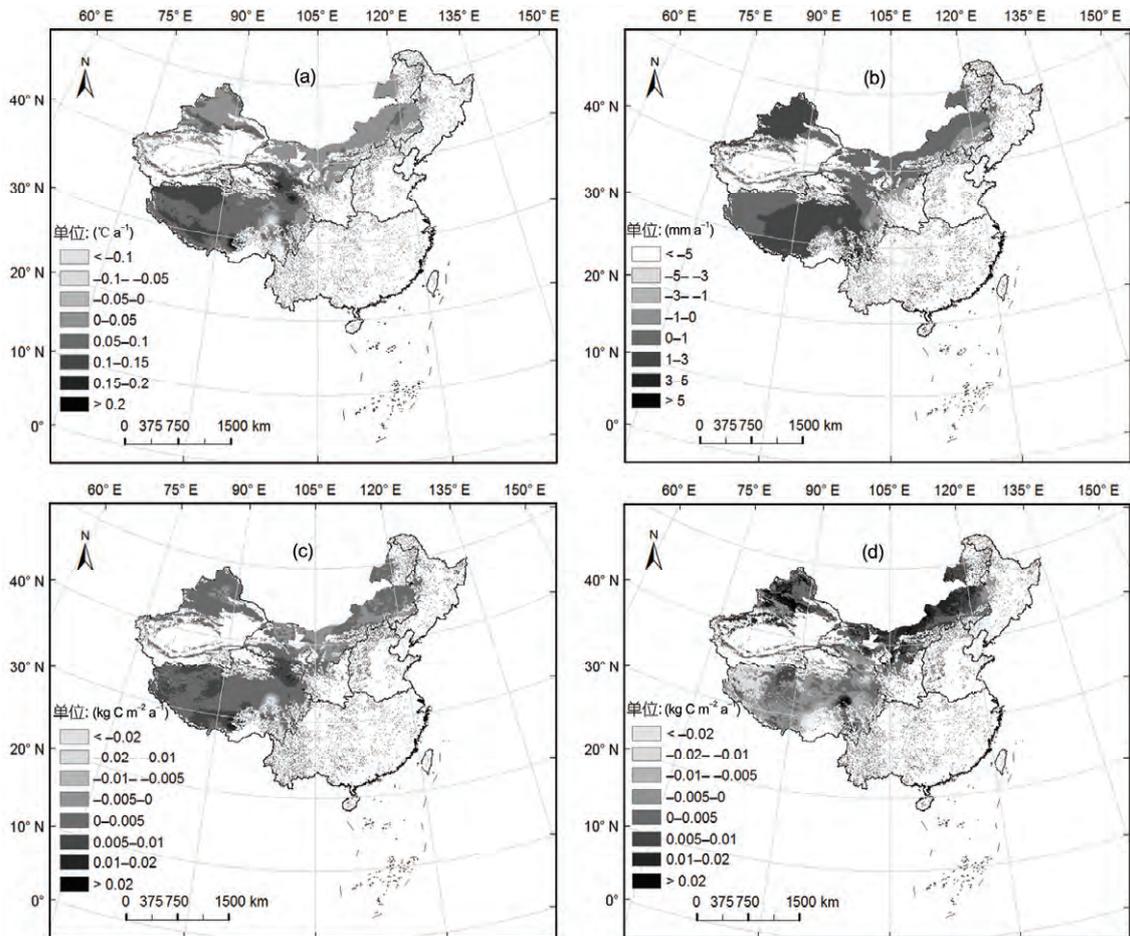


图9 1961~2013年温度(a)、降水(b)、植被碳(c)以及土壤碳(d)变化空间分布

输入和土壤呼吸速率,从而影响到草地生态系统碳库。而温度变化则主要作用于植物光合速率、植物根系呼吸以及土壤微生物活动,进而影响生态系统碳库的输入和输出量。因此,草地生态系统碳储量的变化取决于输入与输出量之间的制衡作用(穆少杰等,2014)。1961~2013年中国草地地区增温速率为 $0.06^{\circ}\text{C a}^{-1}$,同期年降水增加趋势不明显(0.74mm a^{-1} , $R^2=0.13$, $P>0.05$),1998年后增温显著,而同期年降水明显减少(图6a)。研究结果表明,温度是植被碳变化的主要影响因子,二者相关系数可达 $0.85(R^2=0.85, P<0.0001, N=53)$,20世纪80年代和90年代中国草地碳库变化以土壤碳增加为主,同期温度较低降水较丰富,降水是土壤碳增加的主要影响因素(图6a和b)。自1961年以来,青藏高原草地区温度升高降水增加的气候条件促进植被生长,使得植被碳以增加为主,同时温度升

高延长生长季,并提高土壤碳的氧化分解和土壤呼吸速率,增加土壤碳向大气的输出量,从而土壤碳以减少为主。降水是中国北方温带草地生态系统生产力最主要的限制因子(Ni, 2004; 高添, 2014),降水增加促进大气碳素向植被的输入,因此内蒙古草地和新疆草地的大部分植被碳略有增加。高磊(2013)研究表明温度增加可促进土壤有机碳密度的分解释放,而降水增加则可促使土壤有机碳密度增加,由于降水增加引起的土壤有机碳密度增加大于温度增加产生的土壤有机碳密度的消耗,因而内蒙古草地和新疆草地土壤有机碳以增加为主。

本研究结果表明:中国草地生态系统植被碳和土壤有机碳的年际波动主要受年均温的影响。总研究区域以及各个草地区植被碳库的年际波动与年均温均呈显著正相关(表2),总研究区域土壤有机碳与

表2 中国草地植被碳和土壤有机碳与气象因子的相关性分析^{a)}

地区	植被碳			土壤有机碳		
	年均温	年降水量	辐射	年均温	年降水量	辐射
青藏高原草地	0.86**	0.01	0.53**	0.86**	0.01	0.38**
内蒙古草原	0.56**	0.04	0.17**	0.57**	0.00	0.12*
新疆草地	0.67**	0.23**	0.02	0.60**	0.22**	0.06
南方草地	0.72**	0.02	0.00	0.04	0.05	0.19**
黄土高原草地	0.82**	0.01	0.01	0.61**	0.00	0.00
东北草地	0.36**	0.00	0.30**	0.21**	0.01	0.14**
华北暖温性草地	0.61**	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02
总区域	0.85**	0.02	0.22**	0.24**	0.15**	0.02

a) * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

年均温呈显著正相关($R^2=0.24$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2), 其中青藏高原草地($R^2=0.86$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)和东北草地($R^2=0.21$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)土壤碳与年均温呈显著负相关, 华北暖温性草地土壤碳与年均温的年际波动相关性不显著. 新疆草地植被碳($R^2=0.23$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)与土壤碳($R^2=0.22$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)均与年降水量呈显著正相关. 总研究区域植被碳与辐射呈显著正相关($R^2=0.22$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2), 其中青藏高原草地与辐射呈显著负相关($R^2=0.53$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2), 内蒙古草原($R^2=0.17$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)和东北草地($R^2=0.3$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)与辐射呈显著正相关, 青藏高原草地($R^2=0.38$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)、南方草地($R^2=0.19$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)及内蒙古草原($R^2=0.12$, $P < 0.05$, $N=53$, 表2)土壤碳与辐射呈显著正相关, 而东北草地($R^2=0.14$, $P < 0.001$, $N=53$, 表2)与土壤碳呈显著负相关.

4.3 人类活动对草地生态系统碳循环的影响

近年来, 由于人口增加与资源有限之间矛盾的加剧, 草地生态系统遭遇越来越严重的人类活动影响, 如放牧、草地开垦为农田以及施肥等(肖胜生等, 2009; 陈晓鹏和尚占环, 2011; 穆少杰等, 2014). 但人类活动也包含积极的方面, 如草原生态恢复与重建、种草、草地围封和禁牧等(陈晓鹏和尚占环, 2011; 高添等, 2012; 张一心等, 2014; 邹婧汝和赵新全, 2015).

放牧是干扰草地生态系统最广泛的人类活动, 是造成草地碳储量变化的重要因素. 放牧按不同强

度可分为无牧、轻度、中度和重度, 草地生产力随着放牧强度的增大呈先增大而后降低趋势. 放牧对草地植被生长(韩国栋等, 2007)和土壤固碳(Schuman等, 2002)存在着一定的补偿作用, 因此适度放牧可增加地上生物量(Ojima等, 1993)和土壤碳库(Reeder等, 2004), 而过度放牧则导致地上生物量的下降, 加速土壤有机碳损失(Fernandez等, 2008). 这是因为随着放牧强度的增大, 地表盖度和植物群落高度下降, 导致地上生物量(张伟华和关世英, 2000)和凋落物量减少, 同时减少了草地植被固定的碳素向土壤的输入以及向地下生物量的分配(胡庆货等, 2015). 现有研究表明, 放牧对草地生态系统碳的影响因草地类型、放牧强度、放牧年限以及研究方法的不同, 结果不尽一致(肖胜生等, 2009), 但都一致认为过度放牧会引起草地退化, 从而减少土壤有机碳含量. 北方草地是我国的主要牧区, 包括青藏高原草地区、内蒙古草原区、新疆草地区和黄土高原草地区(面积共 $341.73 \times 10^4 \text{ km}^2$), 依据农业部统计全国约50~60%的天然草地存在着不同程度的退化趋势(主要分布在西北、西南和内蒙等牧区)(Liu等, 2003), 据此推算, 本研究中北方草地约有 $170.86 \times 10^4 \sim 205.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ 属于过度放牧区. Meta分析方法显示过度放牧导致中国草地土壤有机碳损失达 $0.23 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (石锋等, 2009), 因此, 本研究至少高估北方草地土壤有机碳 $0.40 \sim 0.48 \text{ Pg C a}^{-1}$.

除放牧外, 开垦是影响草地生态系统的最大人类活动之一(傅华等, 2004; Qi等, 2007). 我国约有18.2%的耕地来自于草地开垦(樊江文等, 2002; Qi等, 2007). 草地开垦为农田对草地生态系统碳库的影响

主要表现在对土壤有机碳的影响, 有关研究的结论基本一致. 草地开垦为农田会造成土壤有机碳的严重损失, 损失可达土壤中碳素总量的20~50%, 且主要发生表层土壤中(约20或30cm)(Davidson和Ackerman, 1993; Wang等, 1999; Franzluebbbers, 2005; Qi等, 2007). 损失主要发生在开垦后最初几年, 并在20年后基本趋于稳定(Houghton等, 1991; Davidson和Ackerman, 1993; 李凌浩, 1998). 草地开垦为农田后生态系统碳储量下降的原因可能是: (1) 与草地植被相比, 农作物碳素向土壤的分配比例减少, 而农作物的收获又进一步减少了植被向土壤输入的碳素(McConnell和Quinn, 1988); (2) 农耕中的翻耕犁土等措施会促进土壤呼吸作用, 降低碳素在土壤中的存留时间, 而开垦时的烧荒措施则使草地地上生物量碳释放到大气中; (3) 开垦可在一定程度上破坏土壤团聚体结构, 使土壤有机质暴露在大气中, 加速其分解. 此外, 农耕过程中的施肥措施可在一定程度上缓解有机碳的损失(穆少杰等, 2014; 肖胜生等, 2009), 使开垦若干年后土壤有机碳出现增加的可能(陈伏生等, 2004). 自1949年以后的50年间, 我国共开垦草地约 $19.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ (樊江文等, 2002), 2001~2010年全国共开垦草地约 $2.91 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中草地开垦农田所占比例约41.8%(吴炳芳等, 2014). 估算1961~2013年我国共开垦草地约 $23.54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中草地开垦农田约 $9.84 \times 10^4 \text{ km}^2$. 就全球碳平均而言, 草地开垦成农田导致1m深度土层内的土壤碳损失20~30%(WBGU, 1998). 因此, 基于本研究结果可得出, 土壤碳因草地开垦农田损失约0.28~0.42Pg C.

4.4 中国草地碳库对世界草地碳库的贡献

本研究结果表明, 中国草地生态系统面积约有

$394.93 \times 10^4 \text{ km}^2$, 总碳储量为59.47Pg C, 其中土壤碳储量是植被碳储量18倍. 已有研究表明, 世界草地面积约 $3510 \times 10^4 \sim 5650 \times 10^4 \text{ km}^2$, 植被碳库为27.9~231Pg C, 土壤碳库为250.49~579Pg C(表3), 因此, 基于以上研究结果可知, 中国草地生态系统约占全球草地面积的7.0~11.3%, 植被碳储量约占全球植被碳储量的1.3~11.3%, 土壤碳储量约占全球土壤有机碳储量的9.7~22.5%.

5 结论

本研究表明, 1961~2013年中国草地生态系统碳储量为59.47Pg C, 平均碳密度为 $15.06 \text{ kg C m}^{-2}$, 其中94.7%的碳储存在土壤有机质中. 近53年来, 草地总碳储量以 19.4 Tg C a^{-1} 年平均增长速率显著增长, 在草地面积不变情况下草地生态系统碳密度以 $4.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的增长速率呈显著的增加趋势. 在中国7个草地区, 青藏高原的年平均草地总碳储量为37.61Pg C, 占总碳储量的63.2%.

在研究时段内, 中国草地植被碳库以 9.62 Tg C a^{-1} 的速率呈现极显著的增加趋势, 年平均植被碳密度为 $797 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. 其中, 青藏高原植被碳库最大, 占总植被碳库的63.8%. 在空间分布上, 植被碳变化以增加为主, 减少主要出现在南方草地中部, 内蒙古西部和中部以及一部分青藏高原草地区. 温度是植被碳库变化的主要因素, 二者相关系数可达0.85. 中国草地土壤碳储量呈波动式增加趋势, 整体上以 7.96 Tg C a^{-1} 的速率呈现极显著的增加趋势, 年平均土壤碳密度为 $14.3 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. 土壤碳减少主要出现在青藏高原草地区、东北草地区、华北暖温带草地北部和东部, 以及部分南方草地区. 降水影响土壤碳变化的主要因素.

表3 中国草地碳库对世界草地碳库的贡献

世界草地面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	植被碳库 (Pg C)	土壤碳库 (Pg C)	中国草地占世界草地的比重(%)			数据来源
			面积	植被碳	土壤碳	
5200	54.9		7.6	5.7		Whittaker和Likens(1975)
3510		435.7	11.3		12.9	Post等(1982)
5155	50.4		7.7	6.3		Olson等(1983)
3500	75.0	559	11.3	4.2	10.1	WBGU(1998)
5650	58.67	259.05	7.0	5.4	21.7	Adams等(1990)
4160	27.9	250.49	9.5	11.3	22.5	Prentice等(1993)
5260	71~231	579	7.5	1.3~4.4	9.7	吕超群和孙书存(2004)

据相关文献报道,世界草地面积约 $3510 \times 10^4 \sim 5650 \times 10^4 \text{ km}^2$,植被碳库约 $27.9 \sim 231 \text{ Pg C}$,土壤碳库为 $250.49 \sim 579 \text{ Pg C}$ 。据此,粗略估计中国草地生态系统约占全球草地面积的7.0~11.3%,植被碳储量约占全球植被碳储量的1.3~11.3%,土壤碳储量约占全球土壤有机碳储量的9.7~22.5%。

致谢 感谢碳专项草地野外调查组为研究提供的数据帮助,感谢唐隽、王秋玲和宋健对研究给予的支持和帮助。

参考文献

- 陈伏生,曾德慧,陈广生. 2004. 开垦对草甸土有机碳的影响. 土壤通报, 35: 413-419
- 陈世荣,王世新,周艺. 2008. 基于遥感的中国草地生产力初步计算. 农业工程学报, 24: 208-212
- 陈晓鹏,尚占环. 2011. 中国草地生态系统碳循环研究进展. 中国草地学报, 33: 99-110
- 樊江文,钟华平,杨旭疆. 2002. 50年来我国草地开垦状况及其生态影响. 中国草地, 24: 69-72
- 方精云,郭兆迪,朴世龙,陈安平. 2006. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 804-812
- 方精云,刘国华,徐嵩龄,王庚辰,温玉璞. 1996. 中国陆地生态系统的碳库. 王庚辰,温玉璞,编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社. 391-397
- 方精云,杨元合,马文红,买买提安尼瓦尔,沈海花. 2010. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 40: 566-576
- 傅华,陈亚明,王彦荣,万长贵. 2004. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. 生态学报, 24: 469-476
- 高磊. 2013. 我国典型草地生态系统土壤碳库及影响因素研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-72
- 高添,徐斌,杨秀春,金云翔,马海龙,李金亚,于海达. 2012. 青藏高原草地生态系统生物量碳库研究进展. 地理科学进展, 31: 1724-1731
- 高添. 2014. 内蒙古草地植被碳储量的时空分布及水热影响分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院. 1-81
- 韩彬,樊江文,钟华平. 2006. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究. 植物生态学报, 30: 553-562
- 韩国栋,焦树英,毕力格图,敖登高娃. 2007. 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响. 生态学报, 27: 182-188
- 侯学煜. 1982. 中华人民共和国植被图(1:4000000). 北京: 中国地图出版社
- 侯学煜. 2001. 1:100万中国植被图集. 北京: 科学出版社
- 胡庆贺,徐海峰,张习敏,张宇斌,刘伦衍,乙引. 2015. 不同管理方式对贵州典型暖性草地土壤有机碳的影响. 江苏农业科学, 43: 330-333
- 李克让,王绍强,曹明奎. 2002. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 72-80
- 李凌浩. 1998. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响. 植物生态学报, 22: 300-302
- 吕超群,孙书存. 2004. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 28: 692-703
- 马文红,方精云,杨元合,安尼瓦尔·买买提. 2010. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系. 中国科学: 生命科学, 40: 632-641
- 马文红,韩梅,林鑫,任艳林,王志恒,方精云. 2006. 内蒙古温带草地植被的碳储量. 干旱区资源与环境, 20: 192-195
- 买买提安尼瓦尔,杨元合,郭兆迪. 2006. 新疆草地植被的地上生物量. 北京大学学报(自然科学版), 42: 521-526
- 穆少杰,周可新,陈奕兆,孙成明,李建龙. 2014. 草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展. 草地学报, 22: 439-447
- 朴世龙,方精云,贺金生,肖玉. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 28: 491-498
- 沈海花,朱言坤,赵霞,耿晓庆,高树琴,方精云. 2016. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 61: 139-154
- 石锋,李玉娥,高清竹,万运帆,秦晓波,金琳,刘运通,武艳娟. 2009. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响. 草业科学, 26: 9-15
- 王根绪,程国栋,沈永平. 2002. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. 冰川冻土, 24: 693-700
- 王思远,刘纪远,张增祥,周全斌,赵晓丽. 2010. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 6: 631-639
- 吴炳方,苑全治,颜长珍,王宗明,于信芳,李爱农,马荣华,黄进良,陈劲松,常存,刘成林,张磊,李晓松,曾源,包安明. 2014. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化. 第四纪研究, 34: 723-731
- 肖胜生,董云社,齐玉春,彭琴,何亚婷,杨智杰. 2009. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展. 地球科学进展, 24: 1138-1148
- 于东升,史学正,孙维侠,王洪杰,刘庆花,赵永存. 2005. 基于1:100万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报, 16: 2279-2283
- 张峰. 2010. 中国草原碳库储量及温室气体排放量估算. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学. 1-86
- 张伟华,关世英. 2000. 不同牧压强度对草原土壤水分、养分及其地上生物量的影响. 干旱区资源与环境, 14: 61-64
- 张一心,赵吉,王立新,马文红,梁存柱,吴婧. 2014. 不同管理措施下内蒙古草地碳汇潜势分析. 内蒙古大学学报(自然科学版), 3: 318-323
- 张永强,唐艳鸿,姜杰. 2006. 青藏高原草地生态系统土壤有机碳动态特征. 中国科学D辑: 地球科学, 36: 1140-1147
- 中华人民共和国农业部畜牧兽医司,全国畜牧兽医总站. 1996. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社
- 邹婧汝,赵新全. 2015. 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响. 草业科学, 32: 1748-1756
- Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, Mcglade J M, Woodward F I. 1990. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present. Nature, 348: 711-714
- Davidson E A, Ackerman I L. 1993. Changes in soil carbon inventories

- following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 20: 161–193
- Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. 2008. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above-and below-ground biomass. *Clim Change*, 86: 375–396
- Fernandez D P, Neff J C, Reynolds R L. 2008. Biogeochemical and ecological impacts of livestock grazing in semi-arid southeastern Utah, USA. *J Arid Environ*, 72: 777–791
- Franzuebbers A J. 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil Till Res*, 83: 120–147
- Houghton R A, Skole D L, Lefkowitz D S. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 II. Net release of CO₂ to the atmosphere. *For Ecol Manage*, 38: 173–199
- Liu L M, Zhao Y W, Xie H L. 2003. Study on regional characteristics of rangeland degradation of China and its control strategies for sustainable use and management. *China Popul Res Environ*, 13: 46–50
- Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, Mohammad A. 2010. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982–2006. *Sci China Life Sci*, 53: 841–850
- McConnell S G, Quinn M L. 1988. Soil productivity of four land use systems in southeastern Montana. *Soil Sci Soc Am J*, 52: 500–506
- McGuire A D, Melillo J M, Joyce L A, Kicklighter D W, Grace A L, Moore B III, Vorosmarty C J. 1992. Interactions between carbon and nitrogen dynamics in estimating net primary productivity for potential vegetation in North America. *Glob Biogeochem Cycle*, 6: 101–124
- Ni J. 2001. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Clim Change*, 49: 339–358
- Ni J. 2002. Carbon storage in grasslands of China. *J Arid Environ*, 50: 205–218
- Ni J. 2004. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Clim Change*, 67: 237–346
- Ojima D S, Dirks B O M, Glenn E P, Owensby C E. 1993. Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world. *Water Air Soil Pollut*, 70: 95–109
- Olson J S, Watts J A, Allison L J. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Technical Report. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory. 50–51
- Peng C, Apps M J. 1997. Contribution of China to the global carbon cycle since the last glacial maximum. *Tellus B*, 49: 393–408
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Tan K, Tao S. 2007. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Glob Biogeochem Cycle*, 21: GB2002
- Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298: 156–159
- Prentice I C, Sykes M T, Lautenschlager M, Harrison S P, Denissenko O, Bartlein P J. 1993. Modelling global vegetation patterns and terrestrial carbon storage at the last glacial maximum. *Glob Ecol Biogeogr Lett*, 3: 67–76
- Qi Y C, Dong Y S, Liu J Y, Domroes M, Geng Y B, Liu L X, Liu X R, Yang X H. 2007. Effect of the conversion of grassland to spring wheat field on CO₂ emission characteristics in Inner Mongolia, China. *Soil Till Res*, 94: 310–320
- Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, Kicklighter D W, Steudler P A, Peterson B J, Vorosmarty C J. 1991. Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecol Appl*, 1: 399–429
- Reeder J D, Schuman G E, Morgan J A, LeCain D R. 2004. Response of organic and inorganic carbon and nitrogen to long-term grazing of the shortgrass steppe. *Environ Manage*, 33: 485–495
- Schuman G E, Janzen H H, Herrick J E. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environ Pollut*, 116: 391–396
- Scurlock J M, Hall D O. 1998. The global carbon sink: A grassland perspective. *Glob Change Biol*, 4: 229–233
- Scurlock J M, Johnson K, Olson R J. 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Glob Change Biol*, 8: 736–753
- Sui X H, Zhou G S. 2013. Carbon dynamics of temperate grassland ecosystems in China from 1951 to 2007: An analysis with a process-based biogeochemistry model. *Environ Earth Sci*, 68: 521–533
- Thornton P E, Running S W, White M A. 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J Hydrol*, 190: 214–251
- Thornton P E, Running S W. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agric For Meteorol*, 93: 211–228
- Wang G X, Ju Q, Cheng G D, Lai Y M. 2002. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. *Sci Total Environ*, 291: 207–217
- Wang Y, Amundson R, Trumbore S. 1999. The impact of land use change on C turnover in soils. *Glob Biogeochem Cycle*, 13: 47–57
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). 1998. The Accounting of biological sinks and sources under the Kyoto Protocol—A step forwards or backwards for global environmental protection. Bremerhaven: WBGU. 46
- Whittaker R H, Likens G E. 1975. The biosphere and man. In: Lieth H, Whittaker R H, eds. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag. 305–328
- Xiao X, Ojima D S, Parton W J, Chen Z, Chen D. 1995. Sensitivity of Inner Mongolia grasslands to climate change. *J Biogeogr*, 22: 643–648
- Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. 2007. Soil organic carbon stocks in China and

- changes from 1980s to 2000s. *Glob Change Biol*, 13: 1989–2007
- Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, He J S, Zhu B. 2008. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Glob Change Biol*, 14: 1592–1599
- Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, Han W X. 2009. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands. *J Veg Sci*, 20: 177–184
- Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Guo D L, Mohammat A. 2010a. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Glob Ecol Biogeogr*, 19: 268–277
- Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Smith P, Mohammat A, Wang S P, Wang W E. 2010b. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. *Glob Change Biol*, 16: 3036–3047
- Yu G R, Li X R, Wang Q F, Li S G. 2010. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China. *J Res Ecol*, 1: 97–109
- Zhuang Q L, McGuire A D, Melillo J M. 2003. Carbon cycling in extratropical terrestrial ecosystems of the Northern Hemisphere during the 20th century: A modeling analysis of the influences of soil thermal dynamics. *Tellus B*, 55: 751–776
- Zhuang Q L, He J S, Lu Y, Ji L, Xiao J F, Luo T X. 2010. Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20th century: An analysis with a process-based biogeochemical model. *Glob Ecol Biogeogr*, 19: 649–662