

1980s-2010s 内蒙古草地表层土壤 有机碳储量及其变化

戴尔阜¹, 翟瑞雪^{1,2}, 葛全胜¹, 吴秀芹³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 以我国内蒙古草原为研究区域, 结合 1982-1988 年第二次土壤普查资料以及 2011-2012 年实地考察数据, 构建了基于遥感数据和土壤数据的区域表层土壤有机碳储量估算方法, 对研究区 1980s 和 2010s 表层土壤有机碳储量、空间分布特征及其变化进行研究, 结果表明: (1) 1980s、2010s 内蒙古草地表层土壤 (0~20 cm) 有机碳储量分别为 2.05 Pg C、2.17 Pg C, 土壤有机碳密度约为 3.48 kg C·m⁻²、3.69 kg C·m⁻², 其空间分布上呈现从草甸草原、典型草原、荒漠草原逐渐降低的特征; (2) 1982-2012 年间, 内蒙古草地表层土壤有机碳储量略有增加, 但增加幅度较小, 其中草甸草原和典型草原表层土壤有机碳储量增加, 荒漠草原则表现为减少。研究结果将为研究区因地制宜地采取固碳措施, 实现草地可持续管理提供科学参考。

关键词: 表层土壤; 有机碳储量; 气候变化; 区域差异; 内蒙古草原

DOI: 10.11821/dlxb201411006

1 引言

土壤是陆地生态系统中最大的碳库, 全球约有 1400~1500 Pg 的碳以有机质的形式封存在土壤中, 占全球陆地总碳库的 2/3~3/4^[1-2]。由于土壤有机碳储量的巨大库容, 其较小幅度的变化就可通过向大气排放 CO₂ 而对全球气候产生影响, 因此土壤固碳能力和固碳潜力在全球碳循环研究占据重要地位^[3]。草地生态系统在全球分布最为广泛, 约占地表面积的 1/5^[4], 草地生态系统的碳主要集中于地下碳库, 据估算中国草地生态系统中约有 96.6% 的碳储存在地下^[5]。草地广大的分布面积和土壤巨大的碳储存能力, 使其可能成为陆地生态系统潜在的碳汇, 草地土壤固碳能力及潜力的研究将对减缓和适应气候变化提供科学基础。

研究表明, 草地土壤碳储量至少占据了 10% 的全球土壤碳储量^[6], 也有研究估计占据高达 30% 的全球土壤碳储量^[7]。许多学者对草地土壤有机碳储量进行了估算, 主要采用植被类型法、土壤类型法和模型法进行^[8-15]。由于草地定义及研究方法的不同, 不同研究中的得出的碳储量也不尽相同, 至少可以肯定的是草地土壤的确是一个很重要的碳汇^[16]。目前国内关于草地土壤有机碳库动态变化的研究很少, 而且不同研究得到的草地土壤有机碳库的变化方向存在较大的差异。就北方草地生态系统而言, Xie 等人^[17]估算了近 20 年来中国草地表层土壤有机碳库的变化, 认为近 20 年来中国草地土壤丢失了大量的有机碳, 约

收稿日期: 2013-10-22; 修订日期: 2014-04-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 课题 (2011CB403206; 2012CB416906); 国家科技支撑计划课题 (2013BAC03B04) [Foundation: National Basic Research Program of China (973 Program), No.2011CB403206; No.2012CB416906; National Key Technology R&D Program, No.2013BAC03B04]

作者简介: 戴尔阜 (1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员 (S110004569M), 主要研究方向土地利用和气候变化对生态系统影响。E-mail: daief@igsnrr.ac.cn

有 3.56 Pg C, 其中北方草地占了 94.7%, 约有 3.47 Pg C。Yang 等人^[14]基于 1980s 的全国二次土壤普查数据和 2001-2005 年的实测数据, 评估了近 20 年中国北方草地土壤有机碳库的动态变化, 未发现显著变化, 基本保持平衡状态。

内蒙古草原是中国北方温带草原的主体, 其土壤碳库大小及动态变化在我国草地碳库中具有重要意义。我国学者已对内蒙古自治区的碳循环做了大量研究, 包括锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究^[18], 针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性^[19], 内蒙古土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征^[20]; 从人类干扰角度, 也开展了长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响^[21], 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响^[22], 不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应^[23]等研究。如何从整体上把握内蒙古草地土壤碳库大小以及变化, 目前研究尚不多。遥感数据和实地采样数据的结合, 是当前草地土壤有机碳储量估测的重要趋势, 如 Yang 等人^[24]在青藏高原的草地中观测到了归一化植被指数 NDVI 与土壤有机碳密度存在密切的正相关关系, 利用 NDVI 遥感数据估算了青藏高原草地生态系统 30 cm 土层的有机碳储量和密度。本文在结合内蒙古自治区第二次土壤普查资料以及 2011-2012 年的实地考察数据的基础上, 基于回归分析明晰土壤有机碳密度与 NDVI 的线性关联, 估算了内蒙古草地生态系统在 1980s 和 2010s 的表层土壤 (0~20 cm) 有机碳储量, 以期揭示研究区不同草地类型土壤有机碳储量的变化情况, 为因地制宜地采取固碳措施和草地管理提供参考。

2 研究数据与研究方法

2.1 研究区概况

内蒙古草原位于我国北纬 38°~51°、东经 125°~107°的中高纬度地区, 面积约 $58.77 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占全国草原总面积的 22%, 是我国畜牧业生产的重要基地和重要绿色生态屏障^[25]。本区属典型的温带大陆性季风气候, 年均温为 -5~9 °C, 年降水量为 100~450 mm, 蒸发量在 1200~2500 mm 之间, 日照丰富、水热同季, 温度呈现从南向北递减的趋势, 降水表现为从西南向东北递增的趋势。内蒙古草原是全球典型的中纬度半干旱温带草原生态类型, 在温带草原中具有代表性, 并位于国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 全球变化研究典型陆地样带—中国东北陆地样带之内, 是对全球变化最为敏感的区域^[26]。草地生态系统土壤碳主要集中于 0~20 cm 的表层土壤中, 在全球变暖的背景下, 这部分有机碳对人类活动最为敏感^[18, 27]。对草地表层土壤有机碳分布格局及其变化趋势的分析, 将是减缓和适应气候变化、采取适宜的人类活动的科学基础。

研究区自东北到西南分布有草甸草原、典型草原和荒漠草原 3 种草原类型 (图 1)。其中, 草甸草原位于草原向山地针叶林过渡区, 集中分布在大兴安岭山地及岭东、岭西的高平原、低山丘陵地带, 气候特征为温带半湿润、寒冷半湿润气候, 土壤呈地带性分布, 东部为淋溶黑钙土, 西部为黑钙土, 岛状森林下发育了灰色森林土; 群落以多年生旱生、中旱生植物占优势, 主要建群和优势植物有贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*)、线叶菊 (*Filifolium sibiricum*)、羊草 (*Leymus chinensis*) 等。典型草原分布于内蒙古高原中部, 是内蒙古草原的主体, 属于温带半干旱气候, 土壤主要有暗栗钙土、典型栗钙土; 植被主要由典型的旱生性多年生草本植物组成, 主要建群和优势物种包括大针茅 (*Stipa grandis*)、克氏针茅 (*Stipa kryovii*)、羊草 (*Leymus chinensis*)、本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 等, 最具代表性群落类型有大针茅草原、羊草草原、克氏针茅草原、本氏针茅和冰草草原等。荒漠草原分布在内蒙古西部, 处于欧亚大陆腹地的温带干旱地区, 土壤主要是沙砾质或壤质灰棕荒漠土、灰漠土、灰钙土、淡棕钙土; 植被主要由旱生性更强的多年生矮小草本植物组成, 其主要建群和优势植物为小针茅 (*Stipa klemenzi*)、沙生针茅 (*Stipa glareosa*)、短花针

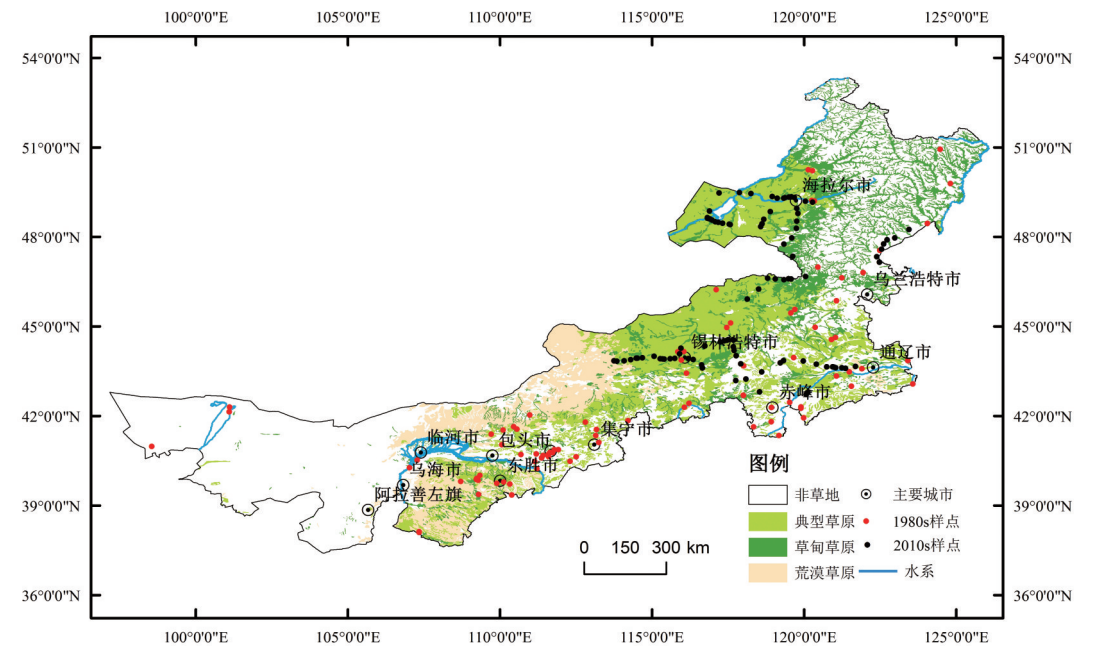


图1 研究区草原类型及采样点

Fig. 1 Grassland distribution and location of the sampling sites in the study area

茅 (*Stipa breviflora*) 等, 地面覆盖度较低, 退化后往往形成多根葱、无芒隐子草等群落。

2.2 研究数据

本项研究采用的数据包括土壤数据、NDVI数据和植被类型分布数据, 植被类型分布数据来自于中华人民共和国植被图 (1:1000000), 土壤数据和NDVI数据采用如下方法处理。

2.2.1 土壤数据 主要来自全国第二次土壤普查数据整理和土壤野外采样。根据全国第二次土壤普查资料《内蒙古土种志》和《内蒙古土壤资源数据册》, 研究区共收集到80个草地类型的土壤剖面, 每个剖面包括土壤类型、地理位置、剖面描述、土层划分、土层厚度、有机质含量、容重>2 mm的砾石含量等属性。由于绝大部分土壤剖面没有测定土壤容重, 因而容重数据主要来自文献^[20]。为获取当前土壤数据, 我们于2011年9月及2012年7月在内蒙古草地代表性地段进行土壤采样, 采集不同草地类型的表层土壤 (0~20 cm) 样品, 共计102个 (图1)。每个样地取3个对照样点, 取回的土样置于室内风干、去除细根及杂质, 研磨后用0.25 mm土壤筛进行过筛处理。土壤有机碳采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定, 土壤含水量和土壤容重采用烘干法测得, 在(105±2) °C条件下烘干至恒重。

2.2.2 NDVI数据 考虑数据的可获得性, 本研究采用的NDVI数据包括: 1982-1988年NASA GLCF (Global Land Cover Facility) 的GIMMS NDVI数据, 时间分辨率为15d, 图像的空间分辨率为8 km×8 km, 2011-2012年NASA提供的MOD13C2三级产品MODIS NDVI数据, 时间分辨率为30 d, 图像的空间分辨率为0.05°×0.05°。两种数据都已经过几何精纠正、辐射校正、大气校正等处理, 其质量符合研究要求。采用月最大值合成法获得上述时段研究区NDVI值。由于GIMMS和MODIS两种数据采用了不同的传感器, 分析碳储量变化前需要对两种数据集的数据进行一致性检验。通过对两种数据源的重叠时间段2000-2003年的NDVI进行一元线性回归分析, 并采用重采样的方法, 获取内蒙古1982-2012年空间分辨率为8 km的月NDVI值。将修正后2000-2003年月NDVI与对应月份MODIS NDVI进行一致性检验, 修正结果通过置信度0.05检验, R²为0.95。由此集成

1980s 以及 2010s 的 NDVI 数据集^[28]。根据内蒙古自治区的气候特征和植被生长状况, 研究中将 5-9 月定义为生长季, 在此基础上得到内蒙古区草原在 1980s (1982-1988 年) 与 2010s (2011-2012 年) 两个阶段的 NDVI 生长季平均值。

2.3 研究方法

土壤有机碳密度是指单位面积 (1 m^2) 中一定厚度的土层中有机碳储量, 它不仅是统计土壤有机碳储量的主要依据, 也是反映土壤特性的重要指标^[29-30]。本文计算 0~20 cm 表层土壤的碳储量, 其计算公式为:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n 0.58 \times T_i \times BD_i \times SOM_i \times (1 - C_i) / 100 \quad (1)$$

式中, $SOCD$ 为土壤有机碳密度 ($\text{kg C} \cdot \text{m}^{-2}$), 0.58 为 Bemmelen 换算系数, T_i 为 i 层土壤的厚度 (cm), BD_i 为 i 层土壤的容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), SOM_i 为 i 层土壤的有机质含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_i 为 i 层土壤 $>2 \text{ mm}$ 的砾石所占的体积百分比 (%)。

由于研究区 1980s 土壤二次普查中各土壤剖面深度无一定标准, 因此需要将不同土壤深度换算为 20 cm 的表层土壤, 根据实际情况采取两种方法处理, 一是对土壤剖面数据建立趋势方程进行换算, 二是土壤厚度 $>20 \text{ cm}$ 的直接取其数据代入计算, 不到 20 cm 的取下一层数据填补。

得到 $SOCD$ 后, 根据样点的经纬度, 采用点对点的匹配方式, 随机选取 80% 的数据与对应的 1980s、2010s 的 NDVI 值进行回归分析, 建立线性方程, 剩余 20% 的数据进行验证。基于 ArcGIS 10.0 软件, 分别计算研究区 1980s、2010s 土壤有机碳密度空间分布及其变化, 在此基础上叠加研究区草地类型图, 可分析不同草地生态系统有机碳库大小及其变化。

3 结果与分析

3.1 NDVI 和 SOCD 的关系

随机选取研究区 1980s 与 2010s 80% 像元的 $SOCD$ 数据, 建立 $SOCD$ 与相应 NDVI 的关系 (图 2):

$$SOCD_{1980s} = 13.137NDVI - 1.3467 \quad (R^2 = 0.5396, P < 0.0001) \quad (2)$$

$$SOCD_{2010s} = 20.432NDVI - 4.1711 \quad (R^2 = 0.53, P < 0.0001) \quad (3)$$

利用剩余 20% 的 $SOCD$ 数据, 与利用上述关系计算得到的 $SOCD$ 预测值进行比较 (图 2), 相关系数分别为 0.7942 ($P < 0.0001$) 和 0.5952 ($P < 0.0001$)。

内蒙古草地表层 $SOCD$ 和 NDVI 数据的相关系数在 1980s 和 2010s 期间分别为 0.5396 和 0.53, 利用相关关系获得的 $SOCD$ 预测值与实测值接近, 基本可以反映土壤有机碳密度分布格局及其变化, 这也说明表层土壤有机碳与地上植被密切相关, 因为土壤有机碳主要源于地上枯落物和根系分解产生的有机质。

3.2 内蒙古草地表层土壤有机碳储量估算

利用 $SOCD$ 和 NDVI 的关系, 计算内蒙古草地表层土壤有机碳密度及碳储量 (表 1), 可以看出: 1980s 内蒙古草地表层土壤的有机碳储量约 2.05 Pg C , 土壤有机碳密度平均约 $3.48 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$, 2010s 内蒙古草地表层土壤的有机碳储量约 2.17 Pg C , 土壤有机碳密度平均约 $3.69 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中以草甸草原和典型草原土壤有机碳积累量为主, 两者之和达 2.14 Pg C , 占草地土壤有机碳库的 98% 以上。从土壤有机碳密度来看, 草甸草原 $>$ 典型草原 $>$ 荒漠草原。典型草原因其分布面积广大, 使其有机碳储量较大。2010s 内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原的表层土壤 (0~20 cm) 有机碳密度分别是 6.65、3.41、 $0.27 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Yang^[14]等人基于 2001-2005 年间实测数据, 估算得到内蒙古草甸草原、典型草原和

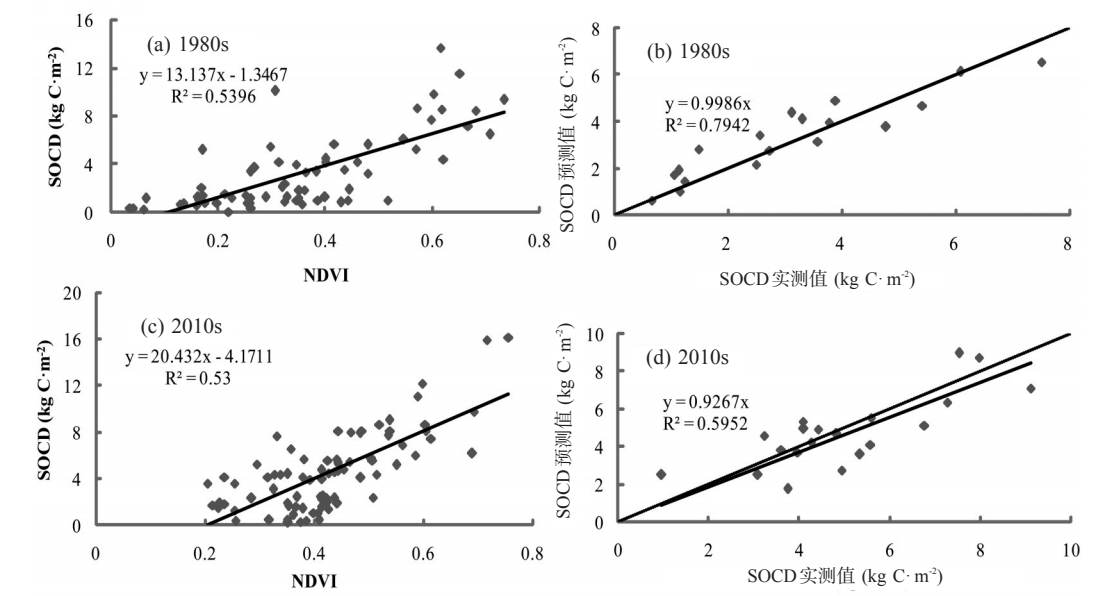


图2 1980s和2010s NDVI与SOCD的关系及SOCD实测值与预测值的比较
Fig. 2 The relationship of NDVI & SOCD and comparison between predicted and measured SOCD in the 1980s and 2010s

荒漠草原表层土壤 (0~30 cm) 有机碳密度分别是 6.97、4.08、2.46 kg C·m⁻²，可以看出典型草原的估算值较为接近土壤剖面数据的分析特征，草甸草原的估算值相对较高，荒漠草原的估算值差异较大，主要采样点数目不同、分布相异有关，本研究中的样点集中于草甸草原与典型草原，而 Yang 等人则集中于典型草原与荒漠草原。

表1 1980s-2010s内蒙古草地表层土壤有机碳储量
Tab. 1 Topsoil organic carbon stocks in Inner Mongolia grassland in the 1980s-2010s

草地类型	面积 (10 ⁴ km ²)	SOC 储量 (1982-1988)		SOC 储量 (2011-2012)	
		SOCD (kg C·m ⁻²)	碳储量 (Pg C)	SOCD (kg C·m ⁻²)	碳储量 (Pg C)
草甸草原	17.25	5.80	1.00	6.65	1.15
典型草原	28.96	3.31	0.96	3.41	0.99
荒漠草原	12.56	0.70	0.09	0.27	0.03
总计	58.77	3.48	2.05	3.69	2.17

根据 Yang 等人^[14]的研究，我国北方草地表层土壤 (0~30 cm) 有机碳密度在 5.33 kg C·m⁻²左右，本研究 2010s 内蒙古草地生态系统的 0~20 cm 平均有机碳密度 3.69 kg C·m⁻²，相比之下略低于北方草地生态系统土壤有机碳的平均水平。Xie 等人^[31]采用第二次土壤普查数据进行全国表层土壤 (0~20 cm) 有机碳储量计算结果为有机碳储量约 27.4 Pg C、有机碳密度约为 2.96 kg C·m⁻²，可以看出内蒙古草地表层土壤有机碳密度高于我国总体水平，有机碳储量约占全国的 7.5%。

从空间分布来看，内蒙古草地土壤有机碳分布空间异质性较大 (图 3)。总体上看，土壤有机碳由东北向西南减少，其分布与温度呈负相关而与年均降水量呈正相关。在荒漠草原地区，有机碳密度最小值接近于 0，该地区降水量小，地上生物量和有机质年积累量较少，植被覆盖度低，有机碳密度较小。土壤有机碳密度最高区域分布在草甸草原，该地区年均温相对较低，降水相对最高，植被覆盖度高，有机质分解慢而积累较多。因此在内蒙古草原上就形成了以东北区域为中心的高密度有机碳和以西南区域为中心的低密度有机碳的分布格局，这与陈庆美等人^[20]对内蒙古自治区土壤有机碳空间分布格局的研究结论相一致。

3.3 内蒙古草地表层土壤有机碳储量变化

从 1980s-2010s 内蒙古草地表层土壤有机碳变化 (表 2) 可看出：研究区土壤有机碳储

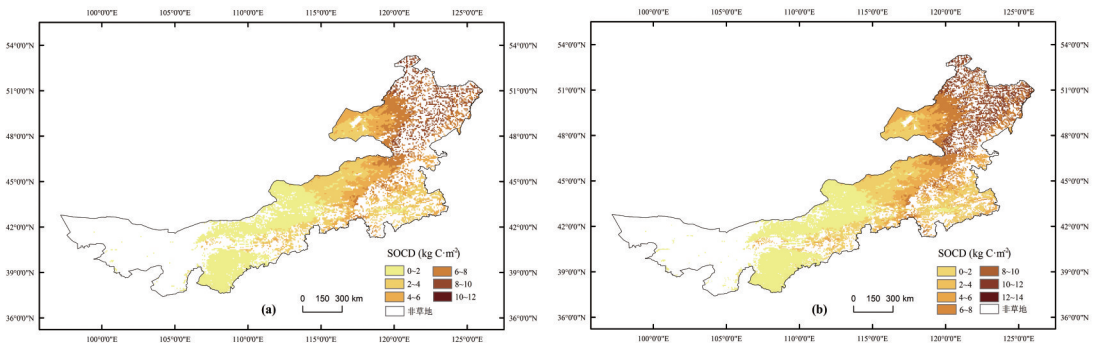


图3 1980s(a) 和 2010s(b) 内蒙古草地表层土壤有机碳密度空间分布

Fig. 3 Topsoil organic carbon density in Inner Mongolia grassland in the 1980s (a) and 2010s (b)

量表现出了轻微的增长,增加了0.12 Pg C。其中草甸草原表层土壤表现为碳汇,土壤有机碳增加了0.15 Pg C,平均年变化率为28.33 g C·m⁻²;典型草原表层土壤表现为碳汇,土壤有机碳增加了0.03 Pg C,平均年变化率为3.33 g C·m⁻²;荒漠草原表层土壤表现为碳源,土壤有机碳减少了0.06 Pg C,平均年变化率为-14.33 g C·m⁻²。

表2 1980s-2010s内蒙古草地表层土壤有机碳储量变化
Tab. 2 Changes of topsoil organic carbon stocks in Inner Mongolia grassland in the 1980s-2010s

草地类型	面积 (10 ⁴ km ²)	SOC 储量变化 (1980s-2010s)		
		变化量 (kg C·m ⁻²)	变化率 (g C·m ⁻² ·yr ⁻¹)	总碳 (Pg C)
草甸草原	17.25	0.85	28.33	0.15
典型草原	28.96	0.10	3.33	0.03
荒漠草原	12.56	-0.43	-14.33	-0.06
总计	58.77	0.21	7.00	0.12

由表2可知,1980s-2010s期间,内蒙古草地表层土壤有机碳储量略有增加但不显著。同期我国北方草地在全球气候变化条件下,生物量碳储量由20世纪80年代初(1982-1986年)的531.6 Tg C增加到21世纪初(2002-2006年)的557.5 Tg C^[32]。虽然气候变暖下微生物活动的加快加速了碳的释放,但氮素有效性和草地生物量的提高也增加了碳固定。另外,一定程度的放牧活动虽然降低了植被覆盖度,减少了碳输入,但动物粪便等新形式的碳输入可能减弱了这种影响^[33-34]。

根据图4可以得知,内蒙古草地表层土壤有机碳密度降低的区域主要表现在荒漠草原。草甸草原、典型草原、荒漠草原分别以74.9%、52.4%、18.7%的面积表现出土壤有机碳密度的增加。内蒙古草地表层土壤有机碳动态变化在空间上呈现异质性,说明不同草地碳库对全球变化的响应不同,可能与植被类型、气候变化强度、放牧强度有关,

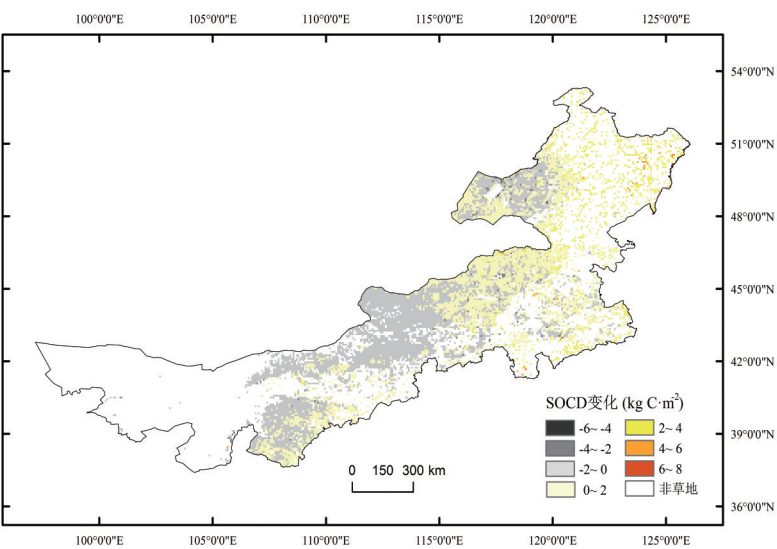


图4 1980s~2010s内蒙古草地表层土壤有机碳密度变化量水平分布特征

Fig. 4 Changes of topsoil organic carbon density in Inner Mongolia grassland in the 1980s-2010s

Yang^[24]等人在青藏高原的研究也有同样结论。碳汇碳源的形成取决于土壤固碳与土壤呼吸的差额,荒漠草地生态系统比较脆弱,对全球变暖的变化更为敏感,一方面温度的升高加速了碳的分解,另一方面愈加干旱的环境影响了植物的生长,因此有趋于碳源的趋势。草甸草原分布于较为湿润的环境,温度的升高为碳蓄积带来的正向效应更加明显,表现为碳汇,而典型草原分布在半干旱地区,正负效应交互相抵,碳库略微增加。Susane^[33]提出土壤有机碳库由活性碳库、缓效性碳库和惰性碳库三部分组成,由于三者周转时间不同,土壤有机碳库响应全球变化的部分主要是活性碳库与缓效性碳库,所以对不同草地生态系统响应机制的研究可以从活性碳库与缓效性碳库入手,目前国内关于这方面研究较少^[35-37],这或许是未来研究草地生态系统响应机制的一个方向。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文在构建 NDVI 和土壤表层有机碳关系的基础上,对内蒙古草地表层土壤近 30 年来有机碳库大小及其变化进行了估算,取得如下结论。

(1) 构建了土壤有机碳与 NDVI 数据的线性相关关系,通过对 1980s 与 2010s 两项统计数值的检验,发现利用该方法计算得到的土壤有机碳密度预测值与实测值接近,说明该方法基本可以科学地计算表层土壤有机碳储量及其变化。

(2) 1980s 内蒙古草地表层土壤有机碳储量约 2.05 Pg C,土壤有机碳密度约为 3.48 kg C·m⁻²,2010s 上述数值分别为 2.17 Pg C 和 3.69 kg C·m⁻²。内蒙古草地表层土壤有机碳密度空间分布异质性较为明显,从东北向西南分布的草甸草原、典型草原、荒漠草原土壤有机碳密度逐渐降低。

(3) 1982-2012 年间,内蒙古草地表层土壤有机碳储量仅增加了 0.12 Pg C,增加幅度不显著。但不同草地类型土壤有机碳库的变化方向存在差异,内蒙古各草地类型土壤的碳源/汇趋势不同。草甸草原和典型草原表层土壤表现为碳汇,土壤有机碳分别增加了 0.15 和 0.03 Pg C,荒漠草原则表现为碳源,表层土壤有机碳减少了 0.06 Pg C,可以看出不同草地碳库对环境变化的响应可能存在差异,可能与植被类型,区域气候类型,放牧强度有关。

4.2 讨论

本文根据 NDVI 和表层土壤碳密度之间的关系对碳储量进行估算,该方法可以较好的估算区域尺度草原的碳储量,但结果也会存在一定的不确定性,而且应用有一定的限制性。目前国内外有关草原土壤有机碳储量的研究中,由于数据来源、土壤区域差异等因素影响,不同研究估算结果存在很大差异。文中研究发现内蒙古草地生态系统中 NDVI 和 SOCD 之间存在较好的正相关关系,傅华等人^[38]在对内蒙古阿拉善地区主要草地类型的研究中同样发现,影响 0~20 cm 土层有机碳含量最主要的因素是植被盖度,草地生产力和年降水量,其偏相关系数分别为 0.777, 0.697 和 0.429。本研究通过建立土壤有机碳密度与遥感数据之间的相关关系来计算土壤碳储量,影响研究结果的不确定性包括:(1) 本研究中采用的遥感数据源自 GIMMS 和 MODIS 两种数据集,在数据转换处理过程中会产生一定误差;(2) 全国土壤二次普查中绝大多数的土壤剖面缺少容重数据,在以往的研究中,一般使用现阶段土壤容重的实测数据或是根据已有容重数据与土壤有机质含量建立的线性方程来估算缺失的容重数据,本文采用已有研究成果来确定研究区土壤容重数据,利用剖面所属的内蒙古土壤亚类的容重数据来代替缺失数据;(3) 2010s 的土壤调查中涉及到的荒漠草原的剖面数据较少,因此相对于 1980s,2010s 期间 SOCD 预测值与实测值的相关系数较低,对荒漠草原土壤有机碳的估算存在一定的影响。但是荒漠草原面积占比相对较低,

其土壤有机碳密度较低,这对我们估算内蒙古草地土壤碳库动态的影响实际上可能不会很大,尤其是对于表层土壤。上述几个方面会对内蒙古草地表层土壤有机碳储量的计算结果产生一定的影响。在目前草地土壤有机碳储量的估算中需要解决研究数据更为可信、方法更为科学和结果更为可靠等问题,未来应该发展机理性模型进行表层土壤有机碳储量估算。

草地土壤有机碳的动态变化过程主要体现在,一方面是碳素的输入,腐殖质过程将动植物残体的一部分固化到土壤中,另一方面是碳素的输出,主要表现为土壤呼吸。从微观层面来讲,土壤表层和土壤层内微气候,影响凋落物和根系的分解速率,在一定程度上控制着土壤有机碳的形成和分解过程^[30]。从宏观层面来看,影响草地土壤碳储量的因子主要是气候条件和人类活动,全球气候变化改变了温度,降水,CO₂浓度等环境因子;温度上升会加速植物生长,增加了对土壤的碳输入量,同时也会刺激微生物加速分解,从而增加土壤向大气的碳输出量。人类活动(开垦、放牧、割草等)也会对草地碳储量产生影响,多体现为负向影响。本文研究发现研究区过去30年间表层土壤有机碳储量略有增加,但其主要驱动因素及其作用过程尚需继续深入研究。

陆地生态系统碳循环与全球变化之间的相互关系长期以来是全球变化研究的前沿和热点,当前我国草地生态系统土壤碳库的相关研究已有大量成果发表,本文同样发现不同草地生态系统对气候变化的响应存在差异。根据IPCC《排放情景特别报告》B2中低排放情景,区域气候模式预估中国21世纪20s, 40s, 70s气温将上升1.16、2.20、3.20℃,相应的降水增加情况分别为3.7%、7.0%、10.2%,极端冷害减少,极端高温增加,北旱南涝加剧^[39]。在未来气候变化情景下,草地土壤碳库将如何变化,不同草地类型的响应机制如何,将会产生怎样的长期和短期影响,这些问题同样需要深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(8): 156-159.
- [2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil. *Nature*, 1990, 348(15): 232-234.
- [3] Xu Naizheng, Liu Ying, Wei Feng. Research progress on soil carbon pool and its changes. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(2): 1-5. [许乃政, 刘樱, 魏峰. 土壤碳库及其变化研究进展. *江苏农业科学*, 2011, 39(2): 1-5.]
- [4] Lal R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change*, 2001, 51(1): 35-72.
- [5] Fang Jingyun, Yang Yuanhe, Ma Wwenhong et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences*, 2010, 53: 757-765.
- [6] Escaran H, Vanden B E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192-196.
- [7] Anderson J M. The effects of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forest. *Ecological Applications*, 1991, 1: 326-337.
- [8] Tao Zhen, Shen Chengde, Gao Quanzhou et al. Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 720-728. [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. *地理学报*, 2006, 61(7): 720-728.]
- [9] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S et al. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biol.*, 1995, 1(1): 13-22.
- [10] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [11] Jobbagy E G, Jackson R G. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, 2000, 10: 470-483.
- [12] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Arid Environment*, 2002, 50(2): 205-218.
- [13] Zeng Yongnian, Feng Zhaodong, Cao Guangchao et al. The soil organic carbon storage and its spatial distribution of alpine grassland in the source region of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 497-504. [曾永年, 冯兆东, 曹广超 等. 黄河源区高寒草地土壤有机碳储量及分布特征. *地理学报*, 2004, 59(4): 497-504.]
- [14] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s

- to 2000s. *Global Change Biol.*, 2010, 16(11): 3036-3047.
- [15] Yang Yuhai, Chen Yaning, Li Weihong et al. Soil organic carbon distribution of different vegetation types in the Ili River Valley. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 605-612. [杨玉海, 陈亚宁, 李卫红 等. 伊犁河谷不同植被带下土壤有机碳分布. *地理学报*, 2010, 65(5): 605-612.]
- [16] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4: 229-233.
- [17] Xie Zubin, Zhu Jianguo, Liu Gang et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [18] Li Linghao, Liu Xianhua, Chen Zuozhong. Study on the carbon cycle of *Leymus chinensis* steppe in the Xilin River Basin. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(10): 955-961. [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. *植物学报*, 1998, 40(10): 955-961.]
- [19] Bai Yongfei, Xu Zhixin, Li Dexin. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture, carbon and nitrogen in stipa communities of the Inner Mongolia Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1209-1217. [白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. *生态学报*, 2002, 22(8): 1209-1217.]
- [20] Chen Qingmei, Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 699-704. [陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 699-704.]
- [21] Yan Yuchun, Song Changchun, Chang Ruiying et al. Variation of below-ground carbon sequestration under long term cultivation and grazing in the typical steppe of Nei Monggol in north China. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1388-1393. [闫玉春, 宋长春, 常瑞英等. 长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响. *环境科学*, 2008, 29(5): 1388-1393.]
- [22] Liu Nan, Zhang Yingjun. Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe. *Pratacultural Science*, 2010, 27(4): 11-14. [刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响. *草业科学*, 2010, 27(4): 11-14.]
- [23] Yang Yang, Han Guodong, Li Yuanheng et al. Response of soil respiration to grazing intensity, water contents, and temperature of soil in different grasslands of Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 8-14. [杨阳, 韩国栋, 李元恒 等. 内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应. *草业学报*, 2012, 21(6): 8-14.]
- [24] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H et al. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. *Global Change Biology*, 2009, 15(11): 2723-2729.
- [25] Dong Xiaobin, Zhang Xinshi. The grassland in the Inner Mongolia is overloaded and changes of the production pattern are highlighted. *Resources Science*, 2005, 27(4): 175-179. [董孝斌, 张新时. 内蒙古草原不堪重负, 生产方式亟须变革. *资源科学*, 2005, 27(4): 175-179.]
- [26] Dong Yunshe, Zhang Shen, Qi Yuchun et al. Study on the CO₂, N₂O, CH₄ flux characteristics and diurnal variation in a typical grassland of Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 318-322. [董云社, 章申, 齐玉春 等. 内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化. *科学通报*, 2000, 45(3): 318-322.]
- [27] Zhou Zhiyong. Effects of land use on agro-pastoral ecotone in Inner Mongolia grassland ecosystem [D]. Beijing: Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, 2006: 41-45. [周志勇. 土地利用方式对内蒙古农牧交错区草地生态系统的影响[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2006: 41-45.]
- [28] Zhang Qingyu, Zhao Dongsheng, Wu Shaohong et al. Research on vegetation changes and influence factors based on eco-geographical regions of Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 594-600. [张清雨, 赵东升, 吴绍洪 等. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究. *地理科学*, 2013, 33(5): 594-600.]
- [29] Jin Feng, Yang Hao, Cai Zucong et al. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 522-528. [金峰, 杨浩, 蔡祖聪 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522-528.]
- [30] Yang Hongfei, Mu Shaojie, Sun Chengming et al. Summary of research on estimation of organic carbon storage in grassland ecosystem. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(5): 107-114. [杨红飞, 穆少杰, 孙成明 等. 草地生态系统土壤有机碳估算研究综述. *中国草地学报*, 2011, 33(5): 107-114.]
- [31] Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35-47. [解宪丽, 孙波, 周慧珍 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-47.]
- [32] Ma W H, Fang J Y, Yang Y H et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982-2006. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 841-850.
- [33] Susane Trumbore. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *PNAS*, 1997, 94(16): 8284-8291.
- [34] Sun Jinyu, Peng Shushi, Wang Xuhui et al. NDVI based space-time change in global vegetation growth from 1982 to 2006. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 522-530. [孙进瑜, 彭书时, 王旭辉 等. 1982-2006年全球植被生长时空变化. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 522-530.]

- [35] Wang Jianlin, Ouyang Hua, Wang Zhonghong et al. Distribution of soil active organic carbon of alpine grassland on Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 771-781. [王建林, 欧阳华, 王忠红 等. 青藏高原高寒草原土壤活性有机碳的分布特征. *地理学报*, 2009, 64(7): 771-781.]
- [36] Hua Juan, Zhao Shiwei, Zhang Yang et al. Distribution characteristics of soil labile organic carbon of different grassland communities in Yunwu Mountain. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(3): 315-320. [华娟, 赵世伟, 张扬 等. 云雾山不同草地群落土壤活性有机碳分布特征. *草地学报*, 2009, 17(3): 315-320.]
- [37] Jiao Yan, Zhao Jianghong, Xu Zhu. Effects of land use changes on soil physi-chemical properties in farm-grazing transition belt of Inner Mongolia autonomous region. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(2): 234-238. [焦燕, 赵江红, 徐柱. 内蒙古农牧交错带土地利用对土壤性质的影响. *草地学报*, 2009, 17(2): 234-238.]
- [38] Fu Hua. Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 469-476. [傅华. 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*, 2004, 24(3): 469-476.]
- [39] IPCC. Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

Topsoil organic carbon storage and its changes in Inner Mongolia grassland from the 1980s to 2010s

DAI Erfu¹, ZHAI Ruixue^{1,2}, GE Quansheng¹, WU Xiuqin³

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China ;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil carbon sequestration and potential has been a focal issue in global carbon research. Under the background of global change, the estimation of the extent well as its change of soil organic carbon (SOC) storage is of great importance. Based on soil data from the second soil survey of China and field survey during 2011-2012, this paper studied spatial distribution and changes of topsoil (0-20 cm) organic carbon storage in Inner Mongolia grassland between the 1980s and 2010s, by using the regression relation between soil data and remote sensing data. The results showed that (1) the SOC storage values in Inner Mongolia grassland in the 1980s and 2010s were estimated to be 2.05 and 2.17 Pg C, with an average density of 3.48 and 3.69 kg C · m⁻², respectively. The SOC storage was mainly distributed in the typical steppe and meadow steppe, which accounted for over 98% of the total. The spatial distribution showed a decrease trend from the meadow steppe, typical steppe to the desert steppe, corresponding to the temperature and precipitation gradient. (2) SOC variations during 1982-2012 were estimated to be 0.12 Pg C, at 7.00 g C · m⁻² · yr⁻¹, which did not show a significant change. This indicates that SOC storage in grassland ecosystem of Inner Mongolia remained relatively stable over this period. However, topsoil organic carbon of different grassland ecosystems showed different trends of carbon source/sink during the past three decades. Meadow steppe and typical steppe, as a carbon sink, had sequestered at 0.15 and 0.03 Pg C, respectively, while desert steppe, as a carbon source, had lost 0.06 Pg C. It is concluded that SOC storage in grassland ecosystem may respond differently to climate change, which is related to vegetation type, regional climate type and grazing intensity. These results will provide references for decision makers to find proper resolutions to protect grassland soil resource.

Key words: surface soil; organic carbon storage; climate change; regional differences; Inner Mongolia grassland