



# 中国草地生态系统碳库及其变化

方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花

北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

收稿日期: 2010-03-05; 接受日期: 2010-03-11

国家自然科学基金(批准号: 90711002 和 30721140306)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB950600)资助项目

**摘要** 准确评估草地生态系统碳库及其年际变化, 对揭示草地在中国陆地生态系统碳循环中的作用以及合理利用有限的草地资源有着极为重要的意义. 虽然中国学者在研究草地碳库及其动态变化方面已开展了很多工作, 但目前仍缺乏对中国草地生态系统碳库及其动态变化特征的全面认识. 通过综述当前中国草地碳循环研究的最新进展, 结合本研究组的工作, 试图全面评价中国草地生态系统碳库(植被生物量碳库和土壤有机碳库)及其动态变化. 结果显示: (1) 不同研究得到的中国草地生物量碳密度(单位面积生物量)存在较大差异, 为 215.8~348.1 g C/m<sup>2</sup>, 平均值为 300.2 g C/m<sup>2</sup>. 同样, 对中国草地土壤有机碳密度(单位面积土壤碳库)的估算也存在显著差异, 在 8.5~15.1 kg C/m<sup>2</sup> 之间变动, 但考虑到 8.5 kg C/m<sup>2</sup> 的估算值是基于近千个土壤剖面的实测数据计算得到, 全国平均水平的土壤碳密度一般不会超过此值. 因此, 若采用目前最广泛使用的草地面积(331×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>), 那么中国草地生态系统碳库约为 29.1 Pg C(1 Pg=1×10<sup>15</sup> g), 其中 96.6%的碳储存于土壤有机质中. (2) 文献报道的近 20 年中国草地生物量和土壤有机碳库的变化方向和变化量均存在差异. 按照最新的估算, 中国草地生物量和土壤有机碳库在过去 20 年里没有发生显著变化, 即中国草地生态系统处于中性碳汇状态. (3) 中国草地生物量的时空变异与降水量的变化关系密切. 土壤有机碳库的空间变异主要受与降水量密切相关的土壤水分的影响, 但土壤质地等因素也起一定作用. 此外, 放牧与围封等人类活动将对草地生物量和土壤碳库及其动态变化产生强烈影响.

## 关键词

温带草地  
高寒草地  
生物量  
土壤有机碳库  
气候变化  
碳汇  
土壤质地

草地是地球上广泛分布的陆地生态系统类型之一, 在全球碳循环中起着重要作用<sup>[1]</sup>. 中国草地主要分布在东北平原、内蒙古高原、黄土高原、青藏高原及新疆山地, 是全球草地生态系统的重要组成部分<sup>[2]</sup>. 其中, 天然草地总面积约为 4.0×10<sup>8</sup> ha, 约占国土面积的 41.7%<sup>[3,4]</sup>. 草地是个巨大的碳库, 在中国陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色<sup>[5,6]</sup>. 准确评估中国草地生态系统碳库及其动态变化, 将有助于预测全

球气候变化与草地生态系统之间的反馈关系以及草地资源的可持续利用<sup>[7,8]</sup>.

近年来, 中国学者在草地碳循环方面开展了大量工作, 有力地推动了中国草地生态学的发展. 过去的研究主要通过定位监测<sup>[9-12]</sup>、样带观测<sup>[7,13-16]</sup>及国家尺度上的分析<sup>[17-19]</sup>, 定量评估中国草地生态系统碳库及其动态变化, 但往往仅针对某个区域的草地碳库及其动态特征, 或评估某个生态组分的碳库及

其变化(植被或土壤部分). 目前, 仍然缺乏对中国草地生态系统碳库及其变化的整体认识.

为此, 北京大学生态学系自 2001 年, 对中国温带和高寒草地进行了大范围调查取样及分析, 基本阐明了其生态系统碳库(包括植被生物量碳库和土壤有机质碳库)的分布格局和变化趋势. 本文在广泛综述中国草地生态系统碳库及其动态变化研究的基础上, 结合本研究组的相关工作, 试图阐明: (1) 中国草地生物量及其动态变化; (2) 中国草地土壤碳库及其动态变化; (3) 影响草地碳库及其动态变化的主要因素.

为更好地理解本文及避免用语歧义, 作如下术语界定和说明: (1) 本文主要关注较大尺度草地生物量或土壤碳库及其动态变化的研究, 小尺度上的观测研究不在本文的综述范围之列; (2) 本文主要针对温带和高寒草地, 基本不涉及南方草地; (3) 本文中, 草地碳库与草地生态系统碳库是同义语, 主要包括

生物量碳库和土壤有机碳库; 生物量碳库包括地上生物量碳库和地下生物量碳库.

## 1 草地生物量碳库及其变化

### 1.1 生物量碳库的大小

自 20 世纪 90 年代后期, 不少学者对中国区域和国家尺度的草地生物量进行了估算<sup>[5,13,17,18,20-28]</sup>. 然而, 不同研究给出的估算值存在很大差异, 中国草地生物量碳库的估算范围在 0.56~4.67 Pg C 之间(1 Pg=1×10<sup>15</sup> g), 相差约 8 倍(表 1); 生物量碳密度平均值范围也存在较大差异(215.8~1148.2 g C/m<sup>2</sup>), 相差约 5 倍. 同样, 不同研究对区域草地生物量的估算也存在较大差异, 其中 Ni<sup>[17]</sup>和 Fan 等人<sup>[13]</sup>对中国北方草地的估算结果差异较大, 分别为 1.9 和 2.4 Pg C. Ma 等人<sup>[25]</sup>基于 2001~2005 年地面实测数据和遥感观测资料估算的中国北方草地的生物量碳库仅为 0.6 Pg C,

表 1 不同研究得出的中国草地生物量密度及生物量碳库<sup>a)</sup>

研究区域	面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	生物量密度/g C·m <sup>-2</sup>			生物量碳库/Tg C			数据来源与方法	参考文献
		地上	地下	总生物量	地上	地下	总生物量		
草原 <sup>†</sup>	430.7			236.8			1020	国家草地资源调查数据, 根茎比	[21]
中国草地	569.9			215.8			1230		
草原 <sup>‡</sup>	220.1			1208.5			2660	全球不同草地类型的平均生物量碳密度	[26]
中国草地	405.9			1148.2			4660		
北方草地 <sup>*</sup>	189.2			1020.0			1930	全球不同草地类型的平均生物量碳密度	[17]
中国草地	299.0			1023.5			3060		
北方草地 <sup>*</sup>	189.2	35.4			68.0			国家草地资源调查数据	[27]
中国草地	299.0	55.6			134.1				
中国草地	331.4	45.0		346.0	150.0		1150	国家草地资源调查数据	[5]
中国草地	331.4	44.1	271.1	315.3	146.2	898.6	1045	国家草地资源调查数据, 根茎比; NDVI 数据	[23]
中国草地	167.0			340.0			562	CEVSA 模型; NDVI 数据	[29]
北方草地 <sup>*</sup>	227.8	41.5	306.6	348.1	94.6	698.4	793	国家草地资源调查数据; NDVI 数据	[18]
中国草地	334.1	43.5	271.7	315.2	145.4	907.7	1053		
北方草地 <sup>*</sup>	189.2	77.3	1209.7	1287.0	146.3	2288.7	2435	草地资源清查数据; 实测生物量数据	[13]
中国草地	331.0	119.0	883.0	1002.0	393.4	2922.7	3316		
北方草地 <sup>*</sup>	196.3	39.5	244.6	284.0	77.4	480.1	558	实测生物量数据; NDVI 数据	[25]

a) †: 草甸草原、典型草原、荒漠草原、高寒草原、草丛、荒漠地区的灌丛草地; ‡: 干旱的灌丛/草原、温带稀树草原、温带荒漠草原、高寒草原、高寒草甸和沼泽; \*: 温带草甸草原、温性草原、温带荒漠草原、高寒草甸草原、高寒草原、高寒荒漠草原、高寒草甸、温带山地草甸. 1 Tg=1×10<sup>12</sup> g

与 Piao 等人<sup>[18]</sup>的结果较接近(0.8 Pg C), 而远低于 Ni<sup>[17]</sup>和 Fan 等人<sup>[13]</sup>的结果. 考虑到 Fan 等人<sup>[13]</sup>和 Ni<sup>[17,26]</sup>的估算值远大于其他同类研究, 故未纳入本文统计之列. 中国草地生物量密度平均值为 300.2 g C/m<sup>2</sup>, 在 215.8~348.1 g C/m<sup>2</sup> 之间. 因此, 若采用目前使用最广泛的草地面积(331×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>), 则中国草地生物量碳库约为 1.0 Pg C.

导致生物量估算差异的原因可能有 3 个方面:

(1) 草地分类系统和资料来源的不同<sup>[29]</sup>. 具体来讲, 采用不同的草地类型划分系统将直接导致草地面积的不同以及单位面积碳密度的不同<sup>[17,30]</sup>. Ni<sup>[17,26]</sup>使用 Olson 等人<sup>[31]</sup>的全球平均碳密度值估算的中国草地生物量碳库为 3.06~4.67 Pg C, 平均碳密度为 1020~1148 g C/m<sup>2</sup>, 与其他估算结果相比, 此数值显著偏大. 朴世龙等人<sup>[23]</sup>、Fang 等人<sup>[5]</sup>基于草地生物量调查数据估算的中国草地生物量碳库为 1.05~1.15 Pg C, 平均碳密度为 315~346 g C/m<sup>2</sup>, 比前者的估算结果小 3 倍多. 尽管 Olson 等人<sup>[31]</sup>建立的全球植被碳密度数据库在国际上被广泛使用, 但全球植被碳密度是对地球上各类生态系统的高度简化, 并且世界各地植被分类系统不统一、不同的草地类型之间在物种组成和群落结构方面差异较大, 因而以此为基础估算中国草地碳库可能会产生较大误差<sup>[13,30]</sup>.

(2) 估算方法的不同. Fan 等人<sup>[13]</sup>采用平均生物量碳密度乘以草地面积的方法, 利用 1980s 中国草地资源调查数据和 2003~2004 年野外调查补充数据估算的中国草地生物量碳库为 3.3 Pg C, 平均生物量密度为 1002 g C/m<sup>2</sup>, 远高于 Fang 等人<sup>[5]</sup>和朴世龙等人<sup>[23]</sup>基于草地资源清查数据和遥感信息的估算值(分别为 346 和 315 g C/m<sup>2</sup>). 尽管野外调查获得实测的生物量数据比较可靠, 但很难在整个研究区内进行大范围比较均匀地实地调查取样. 由于草地生物量分布的空间异质性较大, 因此如果简单地利用有限的实地调查所获得的平均生物量数据来推算整个区域的生物量则可能产生较大误差. 遥感数据的应用在很大程度上可以弥补地面调查取样的不足, 特别是结合地面实测数据和遥感信息所建立的遥感统计模型可以解决区域草地生物量估算中的尺度转换问题, 从而提高区域生物量的估算精度<sup>[18,25,28]</sup>.

(3) 地下生物量数据的缺乏. 根冠比(R:S)是估算草地地下生物量的最常见方法之一<sup>[13,18,21]</sup>. 然而,

由于根冠比数据十分缺乏, 基于有限的根冠比数据估算的地下生物量可能会产生较大误差. Fan 等人<sup>[13]</sup>报道的中国北方草地的根冠比范围在 2.4~52.3, 平均为 24.6; 而本实验室<sup>[21]</sup>和 Piao 等人<sup>[18]</sup>根据文献得到的根冠比范围在 5.3~10.1, 平均为 7.7, 二者估算的地下生物量相差 3 倍以上. Yang 等人<sup>[32]</sup>对中国北方草地进行的大量调查分析表明, 不同样地之间的根冠比变化很大(0.4~14.3, 中值为 5.7). 王亮等人<sup>[33]</sup>报道, 个体水平上中国北方草地平均根冠比仅在 0.67~0.84 之间. 显然, 使用不同研究得出的根冠比, 会产生显著不同的地下生物量估算值, 说明准确的根冠比是准确估算草地地下生物量的前提, 为草地生态系统生产力研究提出了一个重要命题.

除使用根冠比外, 基于地下生物量与地上生物量之间的关系也是推算地下生物量的常见方法之一<sup>[25]</sup>. 根据 Yang 等人<sup>[32,34]</sup>的报道, 中国温带和高寒草地地上和地下生物量之间均符合等速生长关系, 使用其相关生长关系和相对容易测定的地上生物量来推算地下生物量在很大程度上提高了地下生物量的估算精度. Ma 等人<sup>[25]</sup>基于这种方法估算的中国北方草地生物量碳库为 0.48 Pg C, 平均地下生物量密度为 244.6 g C/m<sup>2</sup>. 该结果低于 Piao 等人<sup>[18]</sup>和 Fan 等人<sup>[13]</sup>在相同区域估算的数值(分别为 306.6 和 1209.7 g C/m<sup>2</sup>).

## 1.2 生物量碳库的变化

准确估计生物量的动态变化是正确评估草地生态系统碳源汇功能的基础. 中国从 20 世纪 80 年代就开始了中国草地生物量的动态监测, 先后在内蒙、新疆和青藏高原等主要草地分布区建立了多个生态系统定位研究站开展生物量的长期监测<sup>[4]</sup>. 部分监测结果显示, 中国北方代表性草地群落的地上生物量在过去 20 多年里呈现较大的年际波动, 但并没有表现出显著增加或降低趋势<sup>[9,11,12,35]</sup>. 由于草地生物量空间分布的异质性, 基于定位观测的结果不能简单地外推到区域尺度. 遥感技术的应用为解决这一问题提供了重要途径. 基于遥感观测的结果表明, 在过去的近 20 年里, 中国草地地上生物量呈显著增加趋势<sup>[5,18,23,36,37]</sup>. Piao 等人<sup>[18]</sup>的研究显示, 1982~1999 年中国草地地上生物量平均增加 1.01 Tg C/年. 最大的增加出现在天山北部、阿尔泰山和内蒙东北部, 而青藏西北地区的草地则显著减少. 但最近基于更长时

间序列(1982~2006年)的研究结果却显示,中国北方草地的生物量增加趋势微弱,尤其是自1980s后期,生物量碳库没有明显的变化趋势<sup>[25]</sup>(图1).该结果与定位观测的数据一致<sup>[11,12]</sup>,也与近年来中国北方地区降水没有显著变化的趋势一致<sup>[25]</sup>.

## 2 草地土壤碳库及其变化

### 2.1 土壤碳库的大小

本实验室<sup>[38]</sup>最早估算了中国草地土壤及全国土壤有机碳库的大小.利用第一次全国土壤普查资料和文献中的资料,估算了全国43个土壤类型的有机碳库.之后,大量学者对不同区域的草地土壤碳库(如青藏高原高寒草地和内蒙古温带草地)及整个表2显示,

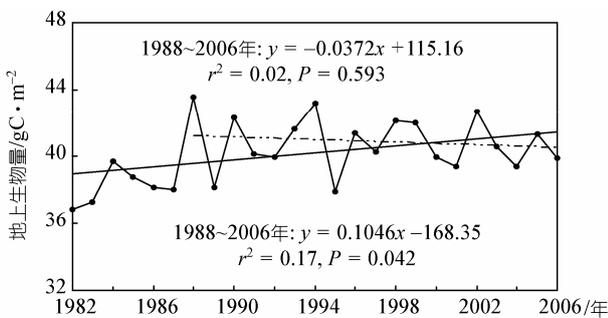


图1 1982~2006年中国北方草地地上生物量的年际变化<sup>[25]</sup>  
虚线:1988~2006年;实线:1982~2006年

中国草地的土壤有机碳库进行了估算<sup>[7,8,17,19,29,39-41]</sup>.不同研究结果之间存在较大差异.就青藏高原高寒草地而言,方精云等人<sup>[38]</sup>利用有限的全国第一次土壤普查数据和其他数据,估算得出青藏高原高寒草地土壤有机碳密度达21.4 kg C/m<sup>2</sup>,是所有估算值中最高的,主要是因为去除石砾的影响.王根绪等人<sup>[40]</sup>利用实测的土壤剖面数据结合土地资源调查资料,估算得到青藏高原高寒草地土壤有机碳密度为20.9 kg C/m<sup>2</sup>,对应的土壤有机碳库为33.5 Pg C. Yang等人<sup>[8]</sup>基于2001~2004年在青藏高原高寒草地调查的135处样地、405个土壤剖面的资料,并结合MODIS-EVI卫星遥感数据,估算得到青藏高原高寒草地1 m深土壤有机碳库为7.4 Pg C,平均有机碳密度为6.5 kg C/m<sup>2</sup>.可见, Yang等人<sup>[8]</sup>与方精云等人<sup>[38]</sup>、王根绪等人<sup>[40]</sup>的估算值相差达4~5倍.

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(表2). Xie等人<sup>[19]</sup>基于第二次全国土壤普查资料估算的中国草地土壤有机碳密度为15.1 kg C/m<sup>2</sup>. Yang等人<sup>[7]</sup>通过分析在中国北方草地调查的327个样地、981个土壤剖面的资料,发现中国北方草地1 m深的土壤有机碳密度约为8.5 kg C/m<sup>2</sup>. Yang等人<sup>[7]</sup>的估算结果与Li等人<sup>[29]</sup>基于CEVSA模型预测的结果(10.0 kg C/m<sup>2</sup>)较为接近.此外, Ni<sup>[17]</sup>基于全球土壤碳氮数据库估算得到中国草地1 m深土壤有机碳密度为13.2 kg C/m<sup>2</sup>(表2).考虑到 Yang等人<sup>[7]</sup>的

表2 不同研究得出的中国草地土壤有机碳密度及土壤有机碳库<sup>a)</sup>

研究区域	面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	土壤深度/ cm	土壤碳密度/ kg C · m <sup>-2</sup>	土壤碳库/ Pg C	数据来源与方法	参考文献
青藏高原*	165.0	68.5	21.4	35.4	第一次全国土壤普查数据及其他	[38]
青藏高原	160.3	65	20.9	33.5	实测数据,第二次全国土壤普查数据	[40]
青藏高原	112.8	100	6.5	7.4	2001~2004 实测数据及遥感数据	[8]
青藏高原	147.7	20	6.6	9.7	第二次全国土壤普查数据; Century 模型	[41]
内蒙古		112	10.2		第二次全国土壤普查数据	[39]
内蒙古	44.1	100	6.6	2.9	2001~2005 年实测数据	[7]
北方草地**	168.9	102.7	16.6	28.1	第一次全国土壤普查数据及其他	[38]
北方草地	196.3	100	8.5	16.7	2001~2005 年实测数据	[7]
中国草地	249.3	103	15.1	37.7	第二次全国土壤普查数据	[19]
中国草地	167.0	100	10.0	16.7	CEVSA 模型	[29]
中国草地	311.8	100	13.2	41.0	全球土壤数据库	[17]

a) \*: 亚高山草甸土、高山草甸土、亚高山草原土、高山草原土等; \*\*: 亚高山草甸土、高山草甸土、亚高山草原土、高山草原土、黑垆土、黑钙土、栗钙土、棕钙土、灰钙土、风沙土等

土壤碳密度估计值( $8.5 \text{ kg C/m}^2$ )基于近千个土壤剖面的实测结果计算得到,而且土壤剖面一般都选择在下垫面受人为影响较小的地块,因此,所估算的数值应该还是比较偏大的.即中国草地土壤的平均碳密度一般不会超过此值.由此,中国草地土壤有机碳库一般不应超过  $26.5 \text{ Pg C}$  (取草地面积为  $311.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ).

不同研究之间土壤有机碳库估算值的差异可能源自以下原因:

(1) 数据来源与估算方法不同. 以往的研究中,有使用第二次全国土壤普查数据<sup>[19,39,40]</sup>,和基于大范围的实际观测资料<sup>[7,8,40]</sup>,也有基于全球土壤碳氮数据库<sup>[17]</sup>或生物地球化学循环模型预测的结果<sup>[29,41]</sup>.目前,土壤碳库估算中广泛使用的第二次全国土壤普查资料的土壤剖面数明显少于 Yang 等人<sup>[7,8]</sup>所使用的土壤剖面数.尽管全国土壤普查资料提供了中国目前最为详尽的土壤理化特征,但大部分土壤剖面都集中在中国东部地区,来自青藏高原和新疆地区的土壤剖面较少<sup>[42-44]</sup>.除去农田等非草地植被中的土壤剖面,第二次全国土壤普查在北方草地的土壤剖面仅 300 个左右<sup>[7]</sup>.为了准确估算草地碳库, Yang 等人<sup>[7]</sup>在北方草地分布区追加调查了近 1000 个土壤剖面,大大提高了该区域的土壤采样密度.尽管如此,受当地交通以及自然条件等方面的限制,仍有一些地区(如青藏高原的藏北无人区)尚未获取足够多的土壤剖面信息,可能影响其土壤有机碳库估算的不准确性<sup>[8]</sup>.

(2) 土壤砾石含量和土壤容重等参数的缺失.众所周知,第二次全国土壤普查数据中有相当一部分土壤剖面缺乏容重和砾石含量信息,这会增加土壤有机碳库估算中的不确定性<sup>[42-46]</sup>.早期的土壤碳库估算更是缺乏此类资料,这是造成早期估算结果偏大的主要原因<sup>[21,38]</sup>.另外,不同研究对于缺失容重和砾石含量处理方法的不同也会造成土壤碳库估算的差异.有些研究采用同一土壤类型的平均容重来代替缺失的容重数据<sup>[39]</sup>,也有研究基于土壤容重与土壤有机碳含量之间的关系来推算缺失的容重资料<sup>[19]</sup>.此外,尽管大部分研究利用同一土壤类型的平均砾石含量来代替缺失的砾石信息,但也有少量研究在估算土壤碳库时并没有扣除砾石含量的影响<sup>[21,38]</sup>.根据 Wu 等人<sup>[45]</sup>的估计,忽略砾石含量可能会导致中国土壤有机碳库被过大估计 10%.实际上,中国的草地分布区往往处于干旱/半干旱地区,砾石

含量高于全国其他土壤类型的对应值.因此,缺乏砾石含量信息对草地土壤有机碳库估算的影响可能更大.

(3) 估算中的尺度转换问题. 以往的土壤有机碳库估算将土壤剖面水平的有机碳密度按照土壤或草地类型简单平均,然后乘以该土壤类型或植被类型的面积,在此基础上考虑不同草地类型或者土壤类型的面积权重后得到整个区域的土壤有机碳库大小<sup>[21,46]</sup>.如前所述,由于受土壤剖面数量的限制,再加上土壤本身较大的空间异质性,这种估算方法很容易导致碳库估算过程中出现偏差.近年来,人们开始使用克里格插值及卫星遥感等资料,将样地的土壤剖面信息上推到区域尺度土壤碳库的估算,这种方法将有助于降低土壤空间异质性对于土壤碳库估算的影响<sup>[7,8,47]</sup>.

(4) 面积差异. 不同研究使用的草地面积差异,也是造成草地土壤有机碳库估计值出现较大差异的重要原因. Li 等人<sup>[29]</sup>在估算中国草地土壤有机碳库时使用的草地面积为  $170.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约为 Ni<sup>[17]</sup>的一半.

## 2.2 土壤碳库的变化

土壤有机碳库的动态变化是当前全球变化领域中的热点和难点问题.近年来,不同研究报道了青藏高原高寒草地<sup>[14,41]</sup>及整个中国草地土壤有机碳库的动态变化<sup>[6,7,19]</sup>.然而,不同研究得到的中国草地土壤有机碳库的变化方向和变化量都存在很大差异.

就青藏高原高寒草地而言, Zhang 等人<sup>[41]</sup>基于 Century 模型的分析显示,1960~2002 年间青藏高原高寒草地土壤有机碳库的年际变化幅度很大,但近 20 年来呈现显著的下降趋势.然而, Yang 等人<sup>[14]</sup>基于 2001~2004 年间实测的 405 处土壤剖面信息,结合 20 世纪 80 年代的全国土壤普查资料,并借助卫星遥感数据估算了近 20 年来青藏高原高寒草地土壤有机碳库的动态变化.结果表明,近 20 年青藏高原高寒草地土壤有机碳库没有发生显著变化(图 2).

关于整个中国草地土壤有机碳库的动态变化也存在争议. Xie 等人<sup>[19]</sup>基于前人报道的由于草地退化导致的青藏高原高寒草地土壤有机碳损失速率,估算了近 20 年来中国草地土壤有机碳库的变化,认为近 20 年中国草地土壤丢失了大量的有机碳.然而, Piao 等人<sup>[6]</sup>基于草地土壤有机碳密度与温度、降水、植被指数等因素建立的统计模型的估算表明,近 20 年中

国草地土壤是一个碳汇. Yang 等人<sup>[7]</sup>基于 2001~2005 年间实际调查的 981 个土壤剖面数据, 并结合第二次土壤普查提供的 275 个剖面信息, 在样地和样带两个尺度上评估了近 20 年中国北方草地土壤有机碳库的动态变化. 174 个邻近样地水平和草地样带尺度上的比较均显示, 中国北方草地土壤有机碳库在过去 20 年间未发生显著变化(图 3). 该结果与 Yang 等人<sup>[14]</sup>基于观测数据与卫星遥感信息相结合的方法所得到的青藏高原高寒草地土壤有机碳库没有显著变化的结果相吻合. 上述研究之间出现显著差异可能主要源于所使用的研究方法不同所致. 不同研究人员采用了多种方法, 或者基于样点估算的外推<sup>[19]</sup>, 或者使用统计模型<sup>[6]</sup>, 或者使用生物地球化学模型<sup>[41]</sup>, 或者使用基于两次调查数据并结合适当的尺度扩展方法<sup>[7,14]</sup>. 为了克服目前草地土壤碳库动态变化估算中的显著差异, 基于大量野外站点的长期、连续观测的

验证是必需的.

### 3 草地碳库的影响因素

#### 3.1 生物量碳库的影响因素

影响中国草地生物量碳库的主要因素包括两大类: 自然因素(如气候、土壤和植被类型)和人为因素(如放牧和围栏等).

中国草地生物量的空间变异主要受降水量的影响<sup>[20,48-50]</sup>, 但也与温度、土壤质地及土壤养分可利用性等因素有关<sup>[20,34]</sup>. 安尼瓦尔·买买提等人<sup>[20]</sup>在新疆地区的研究表明, 草原地上生物量主要受降水控制, 而草甸地上生物量则与温度相关. 除受气候影响外, 草原地上生物量还与土壤含水率、土壤总氮含量正相关, 而草甸地上生物量与土壤含水率、土壤总氮含量均不相关. 同样, Ma 等人<sup>[48]</sup>在内蒙古温带草地的研

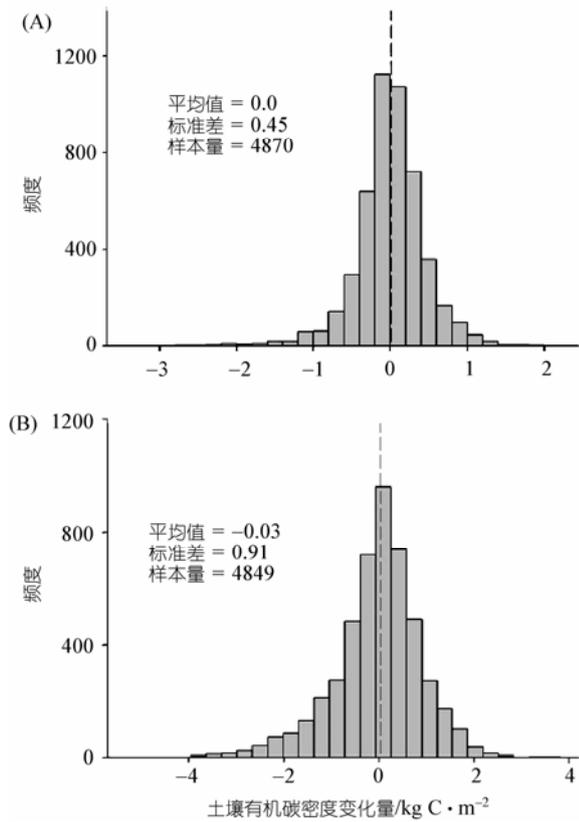


图 2 近 20 年青藏高原高寒草地土壤有机碳密度变化<sup>[14]</sup>

(A) 高寒草原; (B) 高寒草甸. 虚线为均值

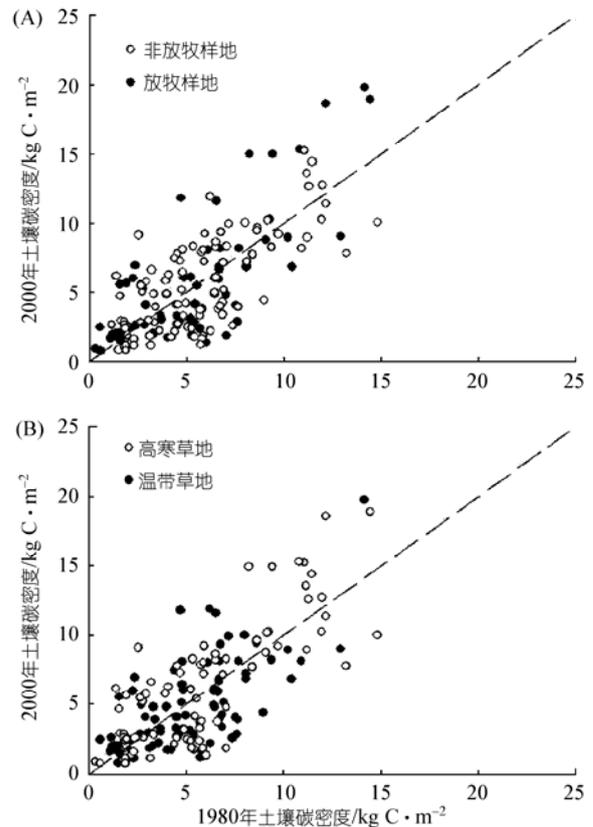


图 3 基于 174 组配对点, 比较近 20 年中国北方草地土壤有机碳密度变化<sup>[7]</sup>

(A) 放牧样地与非放牧样地对比; (B) 高寒草地与温带草地对比

究也证实了降水对于草地生物量空间变异的控制作用。有趣的是,即使是对于分布在高海拔地区的高寒草地,降水也是其生物量空间变异的重要调控因子<sup>[34]</sup>。尽管温度的作用相对较弱,但在一定程度上影响某些草地群落的生物量<sup>[50,51]</sup>。Yang 等人<sup>[28]</sup>对青藏高原高寒草地的研究显示,尽管总体上生物量与温度无关,但在较干旱地区(生长季降水量低于 200 mm),地上生物量与温度负相关,而在较湿润地区(生长季降水量超过 200 mm)则与温度呈微弱的正相关。这说明,在极端干旱地区温度的增加将导致水分的蒸发损失,从而不利于高寒草地植被的生长;而在较湿润地区,温度的增加则会加速高寒草地的植被生长<sup>[28]</sup>。

定位观测结果也显示,降水是导致中国温带草地地上生物量动态变化的主要驱动因子<sup>[10,11,52-58]</sup>。降水格局的变化(降水量的年际变化,降水的季节分配及降水频率的变化)会对草地地上生物量产生强烈影响<sup>[34,52-54,59]</sup>。Bai 等人<sup>[52]</sup>对内蒙古 21 个草地定位站的长期生物量监测数据的分析表明,温带草地地上生产力随着年降水量的增加而增加,但其年间变异随着年降水量的增加而降低,这意味着随着水分供应的增加,草地地上生产力趋于更加稳定。Yang 等人<sup>[53]</sup>基于全球范围内 118 个草地生态系统定位观测站的观测资料,分析了地上生产力的相对变化与降水量的相对变化及地上生产力的变异与降水变异之间的关系。结果表明,地上生产力的变化范围随着年降水量变化幅度的增加呈显著增加趋势,草地地上生产力的变异与降水量变异显著正相关,这意味着草地降水格局的改变将导致草地生态系统生产力的年际波动<sup>[53]</sup>。

另一方面,基于遥感观测的结果也同样支持气候对于生物量动态变化的显著作用<sup>[18,25,60,61]</sup>。Piao 等人<sup>[18]</sup>基于 1982~1999 年的遥感数据分析表明,中国草地生物量在过去 20 年呈显著增加趋势,而同期显著升高的温度可能是其增加的可能原因之一。温度对草地生物量的影响可能主要通过延长生长季来实现。然而, Ma 等人<sup>[25]</sup>基于更长时间序列的分析显示,中国北方草地生物量的年际波动整体上主要受 1~7 月降水量年际波动的影响,而与温度的关系较弱。并且,不同草地类型的生物量-气候关系存在一定差异:干旱的荒漠草原和典型草原生物量的波动与降水关系密切,而偏湿润的草地生态系统,其生物量变化则

与降水的关系较弱<sup>[25,59]</sup>。

除气候等自然因素外,放牧和围栏封育等人类活动也是导致草地生物量时空变异的重要因素<sup>[62-64]</sup>。多数研究表明,过度放牧会导致中国草地生物量碳库降低<sup>[65]</sup>。在内蒙古温带草原的放牧实验结果显示,随着放牧强度的增加,草地地上和地下生物量均呈下降趋势,过度放牧导致草地地下生物量降低 30%~50%<sup>[64,66,67]</sup>。董全民等人<sup>[68,69]</sup>在青藏高原高寒草甸的放牧实验显示了相似的结果。但也有研究表明,合理利用、适度放牧将增加草地碳固定能力<sup>[70]</sup>。另一方面,围栏封育是目前中国普遍采用的草地植被恢复措施,近年来有关围栏封育措施对草地生物量恢复的研究受到中国学者的广泛关注。左万庆等人<sup>[71]</sup>在内蒙古温带草地进行的 5 年围栏封育实验发现,围封后草地地下生物量比自由放牧的对照区提高约 60%。桑永燕等人<sup>[72]</sup>在青藏高原的禁牧实验显示,禁牧 3 年后不同退化程度的草地地上生物量提高 7%~19%,地下生物量提高 4%~10%。此外, Wu 等人<sup>[73]</sup>在青藏高原高草草甸的放牧和围封实验结果也表明,围封可以显著增加草地地上生物量,而放牧样地的生物量随着时间变化表现为微弱的降低趋势。

### 3.2 土壤碳库的影响因素

草地土壤碳库的空间变异主要与气候、土壤质地等因素密切相关<sup>[7,8,15,39,44,45]</sup>。Yang 等人<sup>[8]</sup>认为,青藏高原高寒草地土壤有机碳密度主要受降水和土壤质地控制:土壤有机碳密度随着年降水量和土壤黏粒含量的增加呈显著增加趋势,而与土壤砂粒含量显著负相关;温度对土壤有机碳的影响较弱。这些因素可以解释高寒草地土壤有机碳密度空间变异的 72.1%(图 4)。但在全国尺度,中国温带草地土壤有机碳密度的空间分布与温度之间呈显著的负相关关系<sup>[7]</sup>,这与 Yang 等人<sup>[8]</sup>在高寒草地中观察的土壤有机碳密度随年均温的增加呈微弱上升趋势的结果不同。此外,研究还发现,温带草地与高寒草地土壤有机碳密度均与表层 30 cm 土壤含水率呈显著正相关关系:随着土壤含水率的增加,土壤有机碳密度呈显著增加趋势;但当土壤含水率超过 30%后,土壤有机碳密度基本保持稳定<sup>[7]</sup>。类似地,陈庆美等人<sup>[39]</sup>也报道内蒙古温带草地土壤有机碳密度随着降水量的增加呈显著增加趋势。王淑平等人<sup>[15]</sup>在东北样带的研究也支持气候因素对于草地土壤有机碳密度的控制

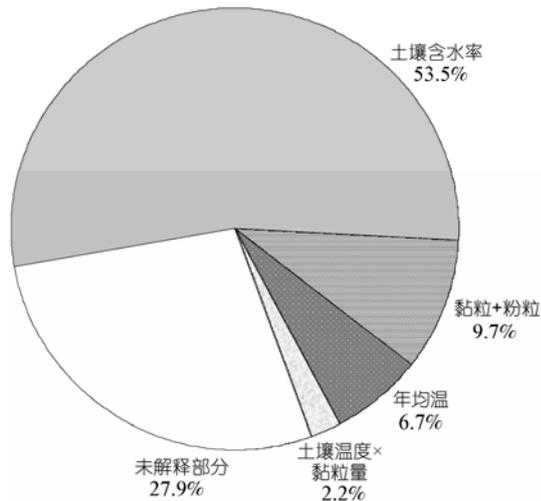


图4 不同自然因素对青藏高寒草地土壤有机碳库空间分布的影响<sup>[8]</sup>

自然因素解释 72.1%的空间变异, 其中土壤湿度解释 53.5%, 土壤质地(黏粒和粉粒)解释 9.7%, 温度解释 6.7%, 土壤湿度与质地的交互作用解释 2.2%; 未解释的部分为 27.9%

作用。此外, Piao 等人<sup>[6]</sup>的研究显示, 年均温、年降水量及归一化植被指数共能解释中国草地土壤有机碳密度空间变异的 53%。

草地土壤碳库的时间动态可能与全球变化, 尤其是温度上升有关。温度上升对土壤碳库动态变化的影响可能取决于其对草地植被生长和土壤微生物分解作用之间的权衡<sup>[74]</sup>。一方面, 全球变暖可能加速植物生长, 从而增加对土壤的碳输入量<sup>[75]</sup>; 另一方面, 全球变暖会刺激微生物分解, 从而增加土壤向大气的碳输出量<sup>[76]</sup>。然而, 目前很少有研究定量评估温度变化对中国草地土壤碳库变化的影响, 尚不清楚全球变暖究竟会如何影响中国草地的土壤碳动态。

除了自然因素, 放牧和围封等人为因素也会导致草地土壤有机碳库的动态变化。最近的 meta-analysis 显示, 过度放牧导致的中国草地土壤有机碳损失量最大( $0.23 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 其次是重牧( $0.15 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、轻牧( $0.05 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )和中牧( $0.05 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[77]</sup>。另一方面, 补播、围封和禁牧等 3 种管理措施能够增加草地的土壤碳库, 其对应的速率分别为  $0.01$ ,  $0.05$  和  $0.02 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[77]</sup>。此外, 土地利用变化(如草地转变为农田等)也会造成土壤有机碳库的变化<sup>[78,79]</sup>, 但目前缺乏对国家尺度土地利用变化如何影响草地土壤有机碳库的定量评估。

## 4 主要结论与展望

通过综述当前中国草地碳库研究的最新进展, 阐述了中国北方草地生态系统碳库及其动态变化, 并分析了自然因素和人类活动对中国草地生态系统碳动态的影响。不同估算得到的中国草地生物量碳密度存在较大差异, 在  $294.0 \sim 348.1 \text{ g C/m}^2$ , 平均值为  $320.5 \text{ g C/m}^2$ 。同样, 不同估算得到的中国草地土壤有机碳密度也存在很大差异, 可能的估算值为  $8.5 \text{ kg C/m}^2$ 。如果采用目前使用最广泛的草地面积 ( $331.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), 那么中国草地生态系统碳库大小为  $29.1 \text{ Pg C}$ , 其中 96.6% 的碳储存于土壤中。文献报道的近 20 年中国草地生态系统生物量和土壤有机碳库的变化方向和变化量均存在很大差异。按照最新估计, 中国草地生物量和土壤碳库在过去 20 年没有发生显著变化, 即中国草地生态系统是一个中性的碳汇。中国草地生物量的时空变异与降水量的变化关系密切; 类似地, 中国草地土壤碳库的空间变异也主要受与降水量密切相关的土壤含水率的影响, 但土壤质地也是导致土壤有机碳密度空间变异的重要因素。此外, 放牧和围封等人类活动也会显著影响草地生物量和土壤碳库的动态变化。

尽管中国在草地生态系统碳库研究方面已经取得了一些重要进展, 但仍有待加强。例如, 在地下生物量估算中, 通常所采用的根茎比在个体水平和群落水平之间差异巨大, 需要通过小尺度实验来进一步阐明其机理。首先, 目前草地土壤有机碳库的动态变化研究主要集中在表层, 尚不清楚下层土壤碳库是否或者如何变化; 其次, 过去几十年中, 中国北方地区显著变暖, 同时土地利用格局也发生了显著变化, 但缺乏国家尺度对于温度和土地利用变化如何影响草地土壤碳库动态的定量评价。此外, 目前关于草地土壤碳库及其动态变化的研究主要集中在有机碳库方面, 对土壤无机碳库及其动态变化的了解远远不够。近几十年来, 由于人类活动加剧所导致的氮沉降已经使得一部分地区土壤出现酸化, 而土壤酸化可能会导致土壤无机碳释放, 但是目前尚不清楚过去几十年来中国草地土壤无机碳库的动态变化。最后, 需要在目前大量观测数据的基础上, 基于数据-模型融合(data fusion)技术, 客观地获取陆地生态系统模型中的相关参数, 以模拟和预测中国草地生态系统对于未来全球气候变化的响应。

## 参考文献

- 1 Scurlock J M, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biol*, 2002, 8: 736—753
- 2 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000
- 3 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 中国草地资源. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1996
- 4 Kang L, Han X G, Zhang Z B, et al. Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement. *Phil Trans Roy Soc B-Biol Sci (Series B)*, 2007, 362: 997—1008
- 5 Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000. *Sci China Ser D*, 2007, 50: 1341—1350
- 6 Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The Carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009—1013
- 7 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, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02123.x
- 8 Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biol*, 2008, 14: 1592—1599
- 9 王启基, 王文颖, 邓自发. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配. *植物生态学报*, 1998, 22: 222—230
- 10 Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431: 181—184
- 11 Ma W H, Liu Z L, Wang Z H, et al. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. *J Plant Res*, 2010, doi: 10.1007/s10265-009-0302-0
- 12 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究. *科学通报*, 2006, 51: 63—69
- 13 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. *Climatic Change*, 2008, 86: 375—396
- 14 Yang Y H, Fang J Y, Smith P, et al. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. *Global Change Biol*, 2009, 15: 2723—2729
- 15 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带 (NECT) 土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2002, 26: 513—517
- 16 田玉强, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, 33: 443—449
- 17 Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *J Arid Environ*, 2002, 50: 205—218
- 18 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochem Cy*, 2007, 21: GB2002, doi: 10.1029/2005GB002634
- 19 Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biol*, 2007, 13: 1989—2007
- 20 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. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, 42: 521—526
- 21 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 王庚辰, 温玉璞, 编. 北京: 中国环境科学出版社, 1996
- 22 马文红, 韩梅, 林鑫, 等. 内蒙古温带草地植被的碳储量. *干旱区资源与环境*, 2006, 20: 192—195
- 23 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. *植物生态学报*, 2004, 28: 491—498
- 24 王建林, 常天军, 李鹏, 等. 西藏草地生态系统植被碳储量及其空间分布格局. *生态学报*, 2009, 29: 931—938
- 25 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. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 632—641
- 26 Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Change*, 2001, 49: 339—358
- 27 Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Climatic Change*, 2004, 67: 237—246
- 28 Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, et al. Aboveground biomass in Tibetan grasslands. *J Arid Environ*, 2009, 73: 91—95
- 29 Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. *Sci China Ser D*, 2004, 47: 49—57
- 30 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. *地理科学进展*, 1999, 18: 238—244
- 31 Olson R J, Watts J A, Allison L J. Carbon in live vegetation of major world ecosystem. NBII meta data Cleueinghouse report. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1983
- 32 Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecol Biogeogr*, 2010, 19: 268—277

- 33 王亮, 牛克昌, 杨元合, 等. 中国草地生物量地上-地下分配格局: 基于个体水平的研究. 中国科学: 生命科学, 2010, 40: 642—649
- 34 Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, et al. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands. *J Veg Sci*, 2009, 20: 177—184
- 35 色音巴图, 贾峰. 中国北方草地生物量时空分异的定位监测研究. 中国草地, 2003, 25: 9—14
- 36 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近20年来中国植被活动在增强. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2003, 33: 554—565
- 37 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biol*, 2006, 12: 672—685
- 38 Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance. *J Environ Sci*, 1996, 8: 249—254
- 39 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: 699—704
- 40 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. 冰川冻土, 2002, 24: 693—700
- 41 Zhang Y Q, Tang Y H, Jiang J, et al. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Sci China Ser D*, 2007, 50: 113—120
- 42 Yang Y H, Ma W H, Mohammad A, et al. Storage, patterns and controls of soil nitrogen in China. *Pedosphere*, 2007, 17: 776—785
- 43 Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84: 131—141
- 44 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: 35—43
- 45 Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochem Cy*, 2003, 17: GB1048, doi: 10.1029/2001GB001844
- 46 王绍强, 朱松丽. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55: 533—544
- 47 Wynn J G, Bird M I, Vellen L, et al. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls. *Global Biogeochem Cy*, 2006, 20: GB1007, doi: 10.1029/2005GB002576
- 48 马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2008, 38: 84—92
- 49 Xiao X M. Sensitivity of Inner Mongolia grasslands to climate change. *J Biogeogr*, 1995, 22: 643—648
- 50 韩彬, 樊江文, 钟华平. 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, 2006, 30: 553—562
- 51 辜智慧, 陈晋, 史培军, 等. 锡林郭勒草原 1983—1999 年 NDVI 逐旬变化量与气象因子的相关分析. 植物生态学报, 2005, 29: 753—765
- 52 Bai Y F, Wu J G, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau. *Ecology*, 2008, 89: 2140—2153
- 53 Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L23710, doi: 10.1029/2008GL035408
- 54 白永飞. 降水量季节分配对克氏针茅草原群落初级生产力的影响. 植物生态学报, 1999, 23: 155—160
- 55 白永飞, 许志信. 降水量的季节分配对羊草草原群落地上部生物量影响的数学模型. 草业学报, 1997, 6: 1—6
- 56 蔡学彩, 李镇清, 陈佐忠, 等. 内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系. 生态学报, 2005, 25: 1657—1662
- 57 韩国栋. 降水量和气温对小针茅(*Stipa klemenzii* Roshev.)草原植物群落初级生产力的影响. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2002, 33: 83—88
- 58 王玉辉, 周广胜. 内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应. 生态学报, 2004, 24: 1140—1145
- 59 Fang J Y, Piao S L, Zhou L M, et al. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L21411, doi: 10.1029/2005GL024231
- 60 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 N<sub>dvi</sub> 变化的气候因子驱动分析. 植物生态学报, 2001, 25: 716—720
- 61 Piao S, Mohammad A, Fang J Y, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environ Chang*, 2006, 16: 340—348
- 62 李金花, 李镇清. 不同放牧强度下冷蒿、星毛委陵菜的形态可塑性及生物量分配格局. 植物生态学报, 2002, 26: 435—440
- 63 王国杰, 汪诗平, 郝彦宾, 等. 水分梯度上放牧对内蒙古主要草原群落功能群多样性与生产力关系的影响. 生态学报, 2005, 25: 1649—1656
- 64 王艳芬, 汪诗平. 不同放牧率对内蒙古典型草原地下生物量的影响. 草地学报, 1999, 7: 198—203
- 65 樊江文, 钟华平, 梁飏, 等. 草地生态系统碳储量及其影响因素. 中国草地, 2003, 25: 51—58
- 66 韩国栋, 卫智军. 不同放牧强度植物地下生物量及贮藏养分的研究. 牧草与饲料, 1990, 2: 16—19
- 67 锡林图雅, 徐柱, 郑阳. 不同放牧率对内蒙古克氏针茅草原地下生物量及地上净初级生产量的影响. 中国草地学报, 2009, 31: 26—29
- 68 董全民, 李青云, 马玉寿, 等. 牦牛放牧率对小嵩草高寒草甸地上、地下生物量的影响初析. 四川草原, 2: 20—27
- 69 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 牦牛放牧率与小嵩草高寒草甸暖季草地地上、地下生物量相关分析. 草业科学, 2005, 22: 65—71

- 70 汪诗平, 王艳芬, 李永宏, 等. 不同放牧率对草原牧草再生性能的和地上净初级生产力的影响. 草地学报, 1998, 6: 275—281
- 71 左万庆, 王玉辉, 王风玉, 等. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究. 草业学报, 2009, 18: 12—19
- 72 桑永燕, 宁洪才, 屈海林. 禁牧封育 3 年后退化草地生物量测定. 青海草业, 2006, 15: 7—9
- 73 Wu G L, Du G Z, Liu Z H. Effect of fencing and grazing on a *Kobresia*-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. Plant Soil, 2009, 319: 115—126
- 74 Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 2006, 440: 165—173
- 75 Fang J Y, Piao S, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. Front Ecol Environ, 2003, 1: 293—297
- 76 Feng X J, Simpson A J, Wislson K P, et al. Increased cuticular carbon sequestration and lignin oxidation in response to soil warming. Nat Geosci, 2008, 1: 836—839
- 77 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 管理措施对中国草地土壤有机碳的影响. 草业科学, 2009, 26: 9—15
- 78 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. Biogeochemistry, 2007, 82: 127—138
- 79 李凌浩. 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, 1998, 22: 300—302