中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系

马文红^{①②}, 方精云^{①*}, 杨元合^①, 安尼瓦尔·买买提^③

① 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;

② 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021;

③ 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

* 联系人, E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

收稿日期: 2010-04-08; 接受日期: 2010-05-02

摘要 草地生态系统在全球碳循环中扮演重要角色. 中国草地约占中国陆地面积的 1/3, 但对其碳库大小、动态及其与气候变化的关系缺乏系统研究. 基于 341 个样地调查的地上、地下生物量资料和 1982~2006 年的卫星遥感数据, 利用地上生物量与遥感数据之间及地上生物量与地下生物量之间的关系, 估算了中国北方草地生物量碳库及其空间分布, 分析了过去 25 年生物量碳密度和碳库的时间动态及其与气候变化的关系. 结果显示: (1) 中国北方草地生物量碳库为 557.5 Tg C, 地上、地下生物量密度分别为 39.5 和 244.6 g C/m², 地下部分占总生物量碳库的 86%; (2) 1982~2006 年间中国草地生物量碳库呈微弱增加趋势, 平均年增量为 0.2 Tg C, 但自 20 世纪 80 年代末, 草地生物量并未呈现显著的变化趋势; (3) 草地生物量的年际波动主要受 1~7 月降水的影响, 而与温度关系较弱. 不同草地类型之间生物量-气候关系存在一定差异, 较为干旱的荒漠草原和典型草原的生物量波动与降水关系密切; 高寒草甸的生物量则与 1~7 月均温显著正相关, 而与降水的关系较弱. 结果表明, 不同草地生态系统对未来气候变化的响应可能存在差异.

关键词

温带草地
寒草地
地上生物量
地下生物量
碳库
均一化植被指数(NDVI)

生物量是生态系统碳库的重要组成部分, 也是土壤有机碳库最主要的输入来源^[1], 从而使得生物量的大小和动态成为碳循环研究的重要内容^[2~5]. 草地是全球分布最广的生态系统类型之一, 在全球碳循环和气候调节中起重要作用^[6]. 天然草地的净初级生产力(net primary productivity, NPP)约占总陆地植被生产力的 20%, 年碳汇约为 0.5 Pg C^[7]. 因此, 准确估算草地生物量的时空变化有助于准确评估其 CO₂ 源汇功能^[8,9]; 准确揭示草地生物量波动与气候因素的关系

系还对草地资源管理和合理利用、预测未来气候变化对草地生态系统的影响具有重要意义^[10]. 然而, 目前对于草地生物量大小及其变化的估算以及对于草地生物量动态与环境因素关系的认识仍存在争议^[11,12].

草地面积约占中国陆地面积的 1/3^[13], 其中位于干旱、半干旱地区的温带草地是欧亚草原的重要组成部分^[14]; 而高寒草地则主要分布在对全球变化敏感的青藏高原. 尽管草地生物量碳库在区域碳收支中起重要作用, 但由于地面观测数据的限制以及生物

英文版见: 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. *Sci China Life Sci*, 2010, 53: 841–850, doi: 10.1007/s11427-010-4020-6

量数据的空间异质性, 导致对中国北方草地生物量碳库的变化及其对气候变化的反馈作用的认识还相对薄弱. 因此, 准确评估中国草地生物量的时空变化对于理解其在区域碳循环中的作用具有重要意义.

截至目前, 中国学者已经基于全球生物量数据库^[15,16]、草地资源清查资料^[17]、野外调查资料^[18,19]以及草地资源数据与遥感数据相结合^[11]等方法评价了中国草地的生物量碳库. 但由于受观测资料、研究方法等方面的限制, 人们对生物量的估算还存在较大的不确定性. 例如, 由于缺少采用统一的调查方法获得的地面实测数据, 尤其是地下生物量的实测数据^[20,21], 使得人们对地下生物量的估算很不准确; 而且, 过去的估算使用的草地清查资料年代较早(主要集中在 20 世纪 60~80 年代). 此外, 对生物量年际变化及其与气候变化的关系也缺乏研究. 因此, 有必要基于近期的实地调查数据, 并结合长时间序列的遥感数据来评估中国草地生态系统碳库及其动态变化.

利用 2001~2005 年在中国北方草地调查的 341 处样地, 计 1705 个样方的生物量资料, 结合 1982~2006 年的遥感数据, 建立了地上生物量与均一化植被指数(NDVI)之间的关系以及地下生物量与地上生物量之间的关系, 试图阐明: (1) 中国北方草地(包括温带草地和高寒草地)生物量碳库及其空间分布格

局; (2) 1982~2006 年间中国北方草地地上和地下生物量的动态变化; (3) 草地生物量动态变化与气候因子的关系.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究集中在中国北方温带和高寒草地生态系统, 包括青海、西藏、内蒙古、新疆、甘肃和宁夏 6 个省市地区. 根据 1:100 万中国植被图^[22], 研究区主要包括 6 种草地类型: 草甸草原、典型草原、荒漠草原、山地草甸、高寒草甸和高寒草原(图 1).

1.2 生物量调查

于 2001~2005 年在上述 6 个省区共调查了 341 处样地(图 1). 在每处样地(10 m×10 m)设置 5 个样方(1 m×1 m). 每个样方中的地上部分齐地面刈割, 除去黏附的土壤、砾石等杂物后全部带回实验室, 65℃烘干至恒重, 获得地上生物量(aboveground biomass, AGB). 在其中沿对角线分布的 3 个样方内通过挖掘法(每个样方内挖取面积为 0.5 m×0.5 m 的土块, 没有分层)或者根钻法(根钻直径=8 cm, 每个样方取 3 钻, 即每个样地共 9 钻, 每 10 cm 为 1 层, 共取 5~6 层)调查地下

图 1 研究区和样地分布图

生物量. 取样深度视根系的分布情况而定, 取到无根系分布为止, 然后将土块置于沙网(0.5 mm)中用水冲洗, 再根据颜色、韧性等特征区分死根和活根^[23]. 样品在 65℃ 烘干至恒重, 获得地下生物量 (below-ground biomass, BGB). 将生物量按照常数 0.45 统一换算成 g C.

1.3 NDVI和气候数据

NDVI 数据为 GIMMS(global inventory monitoring and modeling studies)研究组提供的 1982~2006 年的每月 NDVI 数据. 时间分辨率为 15 天, 空间分辨率为 8 km×8 km^[24,25]. 每月的 NDVI 数据通过最大值合成法获得^[26], 在月 NDVI 基础上计算生长季(5~9 月)平均 NDVI. 最后, 将其转换为 0.1°×0.1°的栅格图像. 在植被覆盖率低的地区, NDVI 值受下垫面影响较大, 因此只考虑 NDVI 平均值大于或等于 0.1 的像元^[27].

气候数据为国家气象局提供的 1982~2006 年 833 个气象站的温度和降水资料. 考虑到生物量的滞后效应^[28,29], 本研究计算了 1~7 月的平均温度和降水数据. 首先, 对所有气象站点的 25 年平均气候数据进行普通克里格插值^[30], 然后将通过插值获得的图像进行投影变换, 转换为空间分辨率为 0.1°×0.1°、投影方式为经纬网投影的栅格图像. 最后, 将插值的气候栅格图像与根据 1:100 万中国植被图^[21]得到的中国北方草地分布图叠加, 得到 6 种草地类型和整个区域 1982~2006 年的季节气候数据(1~7 月均温和降水).

1.4 生物量的遥感估算

首先, 按照 1:1000000 中国植被图和野外记录的优势种信息将调查的 341 处样地划分为 60 个群落类型. 然后, 建立 60 个群落的地上生物量与其所对应年份(2001~2005 年)生长季(5~9 月)平均 NDVI 之间的关系(公式②, 图 2(A)), 再根据各像元的 NDVI 数值(1982~2006 生长季的平均值)推算其地上生物量, 并绘制中国北方草地地上生物量的空间分布图.

其次, 建立实测的地下生物量与地上生物量的相关生长关系(公式②, 图 2(B)), 然后由各像元的地上生物量推算地下生物量, 并绘制中国北方草地地下生物量的空间分布图.

再次, 将 1:1000000 中国植被图与生物量的空间

图2 地上生物量与 NDVI 的关系及地下生物量与地上生物量的关系

(A) 60 个群落类型所对应的样地平均地上生物量与对应的群落平均生长季 NDVI 值; (B) 341 处样地的地上与地下生物量

分布图叠加, 得到 6 种主要草地类型(荒漠草原、典型草原、草甸草原、高寒草原、高寒草甸和山地草甸)的地上、地下生物量.

最后, 分别计算 5 个时段(1982~1986, 1987~1991, 1992~1996, 1997~2001 和 2002~2006 年)的地上和地下生物量(生长季平均值), 同时分析 1982~2006 年地上生物量的年变化.

$$AGB = 26.38e^{(3.8725 \times NDVI)} (r^2 = 0.70, P < 0.01), \quad ①$$

$$BGB = 16.604 \times AGB^{0.7451} (r^2 = 0.57, P < 0.01). \quad ②$$

1.5 统计方法

为了分析气候变化对中国北方草地生物量时间变化的影响, 用最小二乘法回归检验了中国北方草地及 6 种草地类型 1982~2006 年的地上生物量与对应的气候因子(1~7 月温度和降水)之间的相关关系. 同时, 为了避免温度本身随时间增加的趋势可能引起的生物量增加趋势, 用去趋势方法^[25]分析了温度变量和生物量的关系. 同时分析了中国北方草地生物量距平(biomass anomaly index, BAI)与 1~7 月温度距

平(temperature anomaly index, TAI)和降水距平(rain anomaly index, RAI)的关系. 这里, 定义生物量距平(BAI)为 1982~2006 年间各年的地上生物量与 25 年累计平均地上生物量之间的差值.

2 主要结果

2.1 地上和地下生物量的空间分布

图 3 显示了中国北方草地地上、地下生物量的频度分布和空间分布特征. 可见, 实际测量的样方水平的生物量空间变异很大, 地上生物量为 $4.2\sim 203.4\text{ g C m}^{-2}$, 平均值为 49.0 g C m^{-2} ; 地下生物量为 $20.1\sim 1253.1\text{ g C m}^{-2}$, 平均值为 271.5 g C m^{-2} (图 3(A)和(B)). 通过遥感估算的生物量的空间分布也显示, 生物量碳密度存在较大的区域差异(图 3(C)和(D)): 在内蒙古西南部、青藏高原西部及新疆南部生物量碳密度较低, 地上和地下生物量分别低于 25 和 150 g C m^{-2} ; 而在内蒙古东北部、青藏高原东部及新疆北部山地则具有较高的生物量碳密度, 地上和地下生物量分别高于 50 和 300 g C m^{-2} .

2.2 生物量的年际变化

表 1 给出了 1982~2006 年不同时期中国北方草地的生物量碳密度和碳库. 2002~2006 年总生物量碳库为 557.5 Tg C (地上为 77.4 Tg C , 地下为 480.1 Tg C); 高寒草原和高寒草甸面积约占中国北方草地面积的 70%, 因此, 青藏高原高寒草地的生物量碳库占中国北方草地总生物量碳库的 58%; 典型草原的生物量碳库为 135.0 Tg C , 约占总碳库的 24.2%(面积占 19.6%).

中国北方草地碳库由 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 , 地上和地下生物量碳库分别增加了 4.8 和 21.1 Tg C ; 单位面积的地上和地下生物量碳密度分别增加了 6.6%($37.0\sim 39.5\text{ g C m}^{-2}$)和 4.6%($233.8\sim 244.6\text{ g C m}^{-2}$). 20 世纪 80 年代后期(1987~1991 年)生物量碳库增加最显著, 与 20 世纪 80 年代初相比, 增加了 22.1 Tg C ; 但从 20 世纪 80 年代后期开始, 生物量变化较小. 从表 1 还可看出, 不同草地类型的生物量变化略有差异, 典型草原和高寒草甸的生物量碳库由研究初期到末期分别增加了 9.0 和 12.2 Tg C , 而

图 3 基于实测的地上生物量(A)和地下生物量(B)的频度分布及基于遥感估算的地上生物量(C)和地下生物量(D)的空间分布

山地草甸的生物量碳库研究初期与末期几乎不变(分别为 14.9 和 14.7 Tg C).

图 4 显示过去 25 年中国北方草地地上生物量的变化趋势. 从区域分布看, 内蒙古中部和青藏高原东部地区的草地生物量呈增加趋势, 而西藏北部、内蒙古东北部和新疆北部地区的生物量呈降低的趋势. 统计结果显示, 在过去 25 年里, 75.8%的草地区域的生物量没有显著变化, 20.5%的草地生物量显著增加, 仅 3.7%的草地区域的生物量显著降低(图 4(A)).

时间序列分析结果显示, 25 年来, 中国北方草地的地上生物量呈增加趋势($r^2=0.17$, $P=0.042$, $n=25$)(图 4(B)), 总地上碳库(总面积为 196.3 km²)从 1982 年的 72.4 Tg C 增加到 2006 年的 78.2 Tg C, 年增加量约为 0.2 Tg C. 但需注意的是, 生物量的增加主要是发生在 1982~1987 年间; 之后(1988~2006 年), 生物量并未呈现显著地变化趋势($r^2=0.02$, $P=0.593$, $n=19$). 在

不同的草地类型中, 荒漠草原、典型草原、草甸草原和山地草甸的地上生物量未呈现显著地变化趋势(图 5(A)~(D)); 而高寒草甸的生物量则显著增加($r^2=0.36$, $P=0.002$, 图 5(F)).

2.3 生物量与气候变量的关系

为更好地理解生物量动态变化与气候变化的关系, 分析了平均地上生物量随 1~7 月温度和降水波动的关系(图 6, 表 2). 结果显示, 在过去 25 年里, 研究区 1~7 月平均温度显著增加($r^2=0.75$, $P<0.01$), 但降水并没有显著变化($r^2=0.02$, $P>0.05$), 干旱年份和湿润年份交替出现(图 6(B)); 基于生物量和气候距平分析的结果显示, 1982~2006 年间研究区平均地上生物量的变化方向与降水的变化趋势基本一致(图 6(B))(1989, 1994 年例外), 在干旱的年份生物量普遍较低, 当降水增加, 生物量随之增加.

表 1 1982~2006 年中国北方草地生物量碳密度和碳库变化

草地类型	面积/ 10 ⁴ km ²	地上生物量密度/g C·m ⁻²					地上生物量碳库/Tg C				
		1982~ 1986	1987~ 1991	1992~ 1996	1997~ 2001	2002~ 2006	1982~ 1986	1987~ 1991	1992~ 1996	1997~ 2001	2002~ 2006
荒漠草原	18.31	25.2	26.3	27.2	26.7	26.4	4.6	4.8	5.0	4.9	4.8
典型草原	38.52	46.1	49.8	50.7	48.8	50.4	17.8	19.2	19.5	18.8	19.4
草甸草原	7.64	93.6	100.7	101.2	98.7	97.6	7.2	7.7	7.7	7.5	7.5
山地草甸	2.29	111.6	123.2	122.6	119.6	110.6	2.6	2.8	2.8	2.7	2.5
高寒草原	70.81	20.1	20.7	20.8	21.4	20.6	14.2	14.7	14.7	15.1	14.6
高寒草甸	58.73	44.8	46.9	47.3	48.5	48.7	26.3	27.5	27.8	28.5	28.6
平均/总	196.30	37.0	39.1	39.5	39.5	39.5	72.7	76.7	77.5	77.6	77.4
草地类型	面积/ 10 ⁴ km ²	地下生物量密度/g C·m ⁻²					地下生物量碳库/Tg C				
		1982~ 1986	1987~ 1991	1992~ 1996	1997~ 2001	2002~ 2006	1982~ 1986	1987~ 1991	1992~ 1996	1997~ 2001	2002~ 2006
荒漠草原	18.31	180.2	185.3	187.6	187.6	185.9	33.0	33.9	34.4	34.4	34.0
典型草原	38.52	281.0	297.0	297.0	293.3	300.2	108.2	114.4	114.4	113.0	115.6
草甸草原	7.64	479.2	506.3	500.7	498.4	495.9	36.6	38.7	38.3	38.1	37.9
山地草甸	2.29	538.3	581.0	568.8	568.1	530.1	12.3	13.3	13.0	13.0	12.1
高寒草原	70.81	153.4	156.7	155.1	160.3	155.7	108.6	111.0	109.9	113.5	110.3
高寒草甸	58.73	272.7	282.0	279.4	289.1	289.6	160.2	165.6	164.1	169.8	170.1
平均/总	196.30	233.8	243.0	241.5	245.4	244.6	458.9	476.9	474.0	481.7	480.1
草地类型	面积/ 10 ⁴ km ²	总生物量密度/g C·m ⁻²					总生物量碳库/Tg C				
		1982~ 1986	1987~ 1991	1992~ 1996	1997~ 2001	2002~ 2006	1982~ 1986	1987~ 1991	1992~ 1996	1997~ 2001	2002~ 2006
荒漠草原	18.31	205.4	211.6	214.8	214.4	212.3	37.6	38.7	39.3	39.3	38.9
典型草原	38.52	327.2	346.8	347.7	342.1	350.6	126.0	133.6	133.9	131.8	135.0
草甸草原	7.64	572.8	607.0	601.9	597.1	593.5	43.8	46.4	46.0	45.6	45.3
山地草甸	2.29	650.0	704.2	691.4	687.7	640.7	14.9	16.1	15.8	15.7	14.7
高寒草原	70.81	173.5	177.5	175.9	181.7	176.4	122.8	125.7	124.6	128.6	124.9
高寒草甸	58.73	317.5	328.9	326.7	337.6	338.3	186.5	193.2	191.9	198.2	198.7
平均/总	196.30	270.8	282.0	280.9	284.9	284.0	531.6	553.7	551.5	559.3	557.5

图 4

(A) 1982~2006 年地上生物量变化趋势的空间分布. Sign. Decrease: 显著减少; Decrease: 减少但不显著; Increase: 增加但不显著; Sign increase: 显著增加; (B) 地上生物量变化的时间序列, 虚线: 1988~2006 年; 实线: 1982~2006 年

通过对气候因子与地上生物量之间的最小二乘法回归分析, 发现中国北方草地地上生物量的年际波动与 1~7 月降水 ($r^2=0.22$, $P=0.016$) 和平均温度 ($r^2=0.24$, $P=0.012$) 有关 (表 2). 但需指出的是, 最小二乘法要求时间序列数据的随机性, 而 NDVI 和温度本身具有一定的时间变化趋势^[25]. 为避免温度本身随时间增加的趋势可能引起生物量呈增加趋势, 用去趋势法^[25]分析了温度和生物量的关系 (表 2). 发现, 地上生物量与温度的相关性减弱 ($r^2=0.10$, $P=0.145$). 这意味着, 虽然温度的变化影响生物量的动态变化, 但温度升高的趋势导致生物量的增加趋势更加明显.

不同草地类型的生物量对气候变化的响应存在差异. 对于较干旱的草地生态系统 (如典型草原和荒漠草原), 地上生物量与 1~7 月的降水显著相关 ($P<0.05$); 而其他较湿润草地的生物量变化与降水

的年际变化关系不显著 ($P>0.05$). 尽管 25 年间各草地生态系统的温度都显著升高, 但仅除高寒草甸的地上生物量与 1~7 月均温显著相关 ($r^2=0.31$, $P=0.004$) 外, 其他几种草地的生物量与温度都不相关 (表 2); 同样, 经过去趋势分析后, 高寒草甸的地上生物量与 1~7 月平均温度的相关性也减弱 ($r^2=0.04$, $P=0.319$). 这表明, 高寒草甸的生物量碳库显著增加的趋势也受温度自身升高的趋势影响.

3 讨论

3.1 生物量估算

遥感数据被广泛应用于大尺度植被活动的研究^[5,31,32], 尤其是对于草地生态系统^[33]. 与基于样方生物量的平均值方法^[15,16,18,19]相比, 遥感估算能够提供详细的生物量的空间分布状况, 克服生物量的空间异质性带来的影响, 从而提高生物量估算的精度^[34]. 本研究基于统一方法, 获取了大量实测的地上、地下生物量数据, 建立了群落水平的实测地上生物量与 NDVI 数据之间的关系, 在此基础上估算了中国北方草地的生物量碳库. 这不仅可以降低由于遥感数据和地面实测生物量数据之间由于空间尺度不匹配所引起的不确定性^[3], 而且大量的实测生物量数据与遥感数据相结合使得本研究估算的中国北方草地生物量碳库可能更为准确.

地下生物量的准确估算是区域生物量碳库估算的关键问题. 在草地生态系统中, 地下生物量分配比例显著高于地上生物量^[35,36]. 实测数据显示, 地下生物量约占总生物量的 85%, 因此, 对地下生物量的准确预算是模型预测及合理评价草地生态系统在区域碳收支中的作用的關鍵^[7]. 然而, 由于采样方法的限制, 地下生物量数据十分缺乏. 经常用于估算草地地下生物量的根冠比存在很大的不确定性^[11,35]. 例如, Mokany 等人^[35]对全球各类生态系统的根冠比数据进行分析后发现, 786 个根冠比中约有 62% 的数据存在问题, 排除这些不可靠的数据后估算的草地地下生物量显著增加. 尽管最近的研究表明, 某些草地类型其个体水平的地上生物量要高于地下生物量^[37], 但群落水平的根冠比数据还十分缺乏, 因此, 需要更多的区域尺度上的调查数据以获取更准确的根冠比数据, 或者建立地下生物量与地上生物量的相关关系^[36,38]. 本研究基于统一的采样方法获得的地上、地下生物量

图5 1982~2006年间不同草地类型地上生物量的变化

(A) 荒漠草原; (B) 典型草原; (C) 草甸草原; (D) 山地草甸; (E) 高寒草原; (F) 高寒草甸

图6 中国北方草地平均地上生物量变化与1~7月温度变化(A)和降水变化(B)的关系

BAI: 生物量距平; TAI: 温度距平; RAI: 降水距平

实测数据显示, 地上生物量和地下生物量之间具有较好的相关生长关系; 基于二者之间的关系及地上生物量与 NDVI 之间的关系估算生物量碳库, 在一定程度上降低了草地生物量估算的不确定性。

3.2 与以往估算结果的比较

本研究估算的北方草地的生物量碳库(557.5 Tg C)比前人估算的结果偏低(表 3)。一方面可能是由于数据来源不同导致了不同的估算结果。例如, 方精云等人^[17]使用的中国北方草地面积中, 包含了荒漠稀疏植被, 面积约为本研究的 2 倍以上(430.7 km²), 因此尽管与本研究估算的平均碳密度较为接近(236.8 vs. 284.0 g C/m²), 但其生物量总碳库显著高于本研究的估算值。Ni^[15,16]利用全球植被的平均碳密度^[39]估算的中国北方草地生物量碳库为 1.93~2.66 Pg, 平均碳密度为 1020~1208 g C/m², 约是本研究估算结果的 4 倍。由于世界各地植被分类系统不统一, 以此为基础对中国草地碳库的估算可能引起较大误差^[18]。另一

方面, 地下生物量数据的不足可能为生物量碳库的估算带来较大误差. 例如, Fan 等人^[18]利用文献数据和实测生物量数据, 估算的中国草地碳库为 2.4 Pg C(平均生物量密度为 1287 g C/m²), 远大于本研究的估算, 特别是他们估算的地下生物量是本研究的 4 倍(1209.7 vs. 244.6 g C/m²).

3.3 生物量的变化及其控制因素

1982~1999 年, NDVI 数据被广泛用于分析各类生态系统的植被生产力变化. 以往多数研究表明, 北半球中高纬度地区植被生产力显著增加, 成为显著的碳汇^[4,5,11]. Piao 等人^[11]利用 1982~1999 年的遥感数据和草地资源清查数据, 分析了中国草地生物量碳库的变化, 结果显示地上生物量在过去近 20 年显著增加, 增加速率为 1.01 Tg C/a. 然而, 本研究基于更长时间序列的分析结果显示, 中国北方草地生物量的增加趋势微弱, 尤其是从 1980 年代后期开始, 生物量没有明显的变化趋势. 生物量变化的空间格局

也显示, 研究区大部分地区没有明显增加或降低的趋势. 该结果与内蒙古温带草地^[40]和青藏高原高寒草地的长期定位观测结果^[41]一致, 即在过去的 20 多年尽管温度显著升高, 但中国北方草地的地上生物量并没有显著增加.

草地生物量的年际变化主要受气候变化特别是降水的影响^[42~48]. 本研究中, 中国北方草地上生物量的年际变化主要受 1~7 月降水年际变化的影响. 这与 Bai 等人^[29]在内蒙古温带草地 24 年(1980~2003 年)的长期观测结果一致. 在北美和南美温带草地的相关研究也发现, 降水的年际变化是导致生物量年际变化的关键因素^[26,49]. 草地生态系统降水量较低、年际变化较大, 降水的年际变化通过影响土壤水分供应而引起草地生物量的变化^[50].

前人研究认为, 北半球中高纬度植被生产力或生物量显著增加主要受气候变暖驱动^[5,51]. 尽管本研究也发现, 过去 25 年里中国北方大部分地区温度显著升高. 并且最小二乘法回归分析表明, 生物量与

表 2 不同草地类型 1982~2006 年地上生物量、1~7 月平均温度和 1~7 月降水的变化趋势及地上生物量与 1~7 月平均温度、1~7 月降水的一般线性回归方程和去趋势回归方程^{a)}

草地类型	1~7 月平均温度		1~7 月降水		$y=a+bx+e$		$y=a+b_1x+b_2t+e$
	斜率	r^2	斜率	r^2	r^2_T	r^2_P	r^2_{DT}
荒漠草原	0.09	0.63**	0.36	0.02	0.01	0.69**	0.01
典型草原	0.07	0.49**	-0.21	0.00	0.04	0.51**	0.00
草甸草原	0.06	0.31**	-1.09	0.04	0.03	0.15	0.01
山地草甸	0.05	0.20**	1.41	0.15	0.01	0.07	0.00
高寒草原	0.07	0.60**	0.70	0.09	0.11	0.05	0.01
高寒草甸	0.07	0.55**	0.24	0.01	0.31**	0.00	0.04
中国北方草地	0.07	0.75**	0.26	0.02	0.24*	0.22*	0.10

a) 显著性检验**: $P<0.05$; *: $P<0.01$. T: 1982~2006 年各像素 1~7 月均温平均值; P: 1982~2006 年各像素 1~7 月降水平均值; DT: 去趋势温度; Y: 1982~2006 年各像素地上生物量平均值; $y=a+bx+e$: 最小二乘法回归方程; $y=a+b_1x+b_2t+e$: 去趋势回归方程

表 3 不同研究估算的中国北方草地生物量密度及生物量碳库^{a)}

研究者	面积/10 ⁴ km ²	生物量密度/g C·m ⁻²			生物量碳库/Tg C			数据来源
		地上	地下	总生物量	地上	地下	总生物量	
方精云等人(1996)	430.7	NA	NA	236.8	NA	NA	1020	[17] †
Ni(2001)	220.1	NA	NA	1208.5	NA	NA	2660	[15] ‡
Ni(2002)	189.2	NA	NA	1020.0	NA	NA	1930	[16] *
Piao 等人(2007)	227.8	41.5	306.6	348.1	94.6	698.4	793	[11] §
Fan 等人(2008)	189.2	77.3	1209.7	1287.0	146.3	2288.7	2435	[18] §
Ma 等人(2010)	196.3	39.5	244.6	284.0	77.4	480.1	558	本研究

a) NA: 没有相关数据提供; †: 包括草甸草原、典型草原、荒漠草原、高寒草原、草丛、荒漠地区的灌丛草地; ‡: 包括干旱的灌丛/草原、温带稀树草原、温带荒漠草原、高寒草原、高寒草甸; *: 包括温带草甸草原、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; §: 包括温带草甸草原、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

1~7 月平均温度具有统计意义的相关, 但温度和生物量在时间序列上同步增加的趋势在一定程度上增加了二者之间的相关性。去趋势回归分析表明, 去除这两个变量同步增加的趋势后, 二者之间的相关性减弱。这意味着, 气候变暖可能没有显著促进中国北方草地生物量碳库的增加。

4 结语

基于野外实测的生物量数据和卫星遥感信息,

分析了 1982~2006 年间中国北方草地生物量碳库大小、动态变化及其与气候因子的关系。结果表明, 中国北方草地生物量碳库为 557.5 Tg C, 高寒草地所占比例为 58%。在过去 25 年里, 中国北方草地生物量增加趋势微弱, 从 20 世纪 80 年代后期基本上没有显著的变化趋势。生物量-气候关系的分析结果表明, 草地生物量的年际变化主要受降水年际波动的影响, 但生物量-气候关系在不同草地类型之间存在差异。上述结果意味着不同草地生态系统对未来气候变化的响应可能存在差异。

致谢 感谢北京大学青藏高原野外考察队成员(2001~2004 年)、内蒙古考察队成员(2002~2005 年)及新疆考察队成员(2004 年)。

参考文献

- 1 Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Ann Rev Ecol Syst*, 1977, 8: 51—81
- 2 Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biol*, 1998, 4: 185—198
- 3 Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, et al. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biol*, 2005, 11: 666—684
- 4 Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386: 698—702
- 5 Schimel D S, Emanuel W, Rizzo B, et al. Continental scale variability in ecosystem processes: models, data, and the role of disturbance. *Ecol Monogr*, 1997, 67: 251—271
- 6 Hall D O, Scurlock J M O. Climate change and productivity of natural grasslands. *Ann Bot-London*, 1991, 67: 49—55
- 7 Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biol*, 1998, 4: 229—233
- 8 Sala O E, Lauenroth W K, Burke I. Carbon budgets of temperate grasslands and the effects of global change. In: Breymeyer A I, Hall D O, Melillo J M, eds. *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. London: John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 9 Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biol*, 2002, 8: 736—753
- 10 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: 13—22
- 11 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: 1—10
- 12 Jones M B, Donnelly A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. *New Phytol*, 2004, 164: 423—439
- 13 中华人民共和国农业部畜牧兽医司、全国畜牧兽医总站主编. 中国草地资源. 北京: 科学出版社, 1996
- 14 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
- 15 Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Clim Change*, 2001, 49: 339—358
- 16 Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *J Arid Environ*, 2002, 50: 205—218
- 17 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 王庚辰, 温玉璞, 主编. 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, 1996. 109—128
- 18 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. *Clim Change*, 2008, 86: 375—396

- 19 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
- 20 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
- 21 Titlyanova A A, Romanova I P, Kosykh N P, et al. Pattern and process in above-ground and below-ground components of grassland ecosystems. *J Veg Sci*, 1999, 10: 307—320
- 22 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001
- 23 Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant Soil*, 1996, 187: 159—219
- 24 Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation Index and growing season trends from 1982 to 1999. *Int J Biometeorol*, 2001, 45: 184—190
- 25 Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J Geophys Res*, 2001, 106: 20069—20083
- 26 Holben B N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 1417—1434
- 27 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
- 28 Lauenroth W K, Sala O E. Long-Term forage production of North-American shortgrass steppe. *Ecol Appl*, 1992, 2: 397—403
- 29 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
- 30 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *J Geophys Res*, 2003, 108, doi: 10.1029/2002JD002848
- 31 Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54: 547—560
- 32 Turker C J, Sellers P J. Satellite remote sensing of primary production. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 1395—1416
- 33 Jobbàgy E G, Sala O E, Paruelo J M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: A remote sensing approach. *Ecology*, 2002, 83: 307—319
- 34 Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, et al. Aboveground biomass in Tibetan grasslands. *J Arid Environ*, 2009, 73: 91—95
- 35 Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biol*, 2006, 11: 1—13
- 36 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
- 37 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
- 38 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
- 39 Olson R J, Watts J A, Allison L J. Carbon in live vegetation of major world ecosystem, ed. Oak Ridge: Laboratory O R N, 1983. 50—51
- 40 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*, doi: 10.1007/s10265-009-0302-0
- 41 周华坤, 周立, 刘伟, 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
- 42 Fang J Y, Piao S L, Zhou L, et al. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L21411, doi: 10.1029/2005GL024231
- 43 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, doi: 10.1029/2008GL035408
- 44 方精云、杨元合、马文红, 等. 中国草地生物量和土壤有机碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 2010, 40: 566—576
- 45 Briggs J M, Knapp A K. Interannual variability in primary production in tallgrass prairie-climate, soil-moisture, topographic position, and fire as determinants of aboveground biomass. *Am J Bot*, 1995, 82: 1024—1030
- 46 Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, et al. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293: U1—U2
- 47 Knapp A K, Fay P A, Blair J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. *Science*, 2002, 298: 2202—2205
- 48 Sala O E, Lauenroth W K, Burke I. Carbon budgets of temperate grasslands and the effects of global change. In: Breymeyer A I, Hall D O, Melillo J M, eds. *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. London: John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 49 McCulley R L, Burke I C, Nelson J A, et al. Regional patterns in carbon cycling across the Great Plains of North America. *Ecosystems*, 2005, 8: 106—121
- 50 Lauenroth W K, Sala O E. Long-Term forage production of North-American shortgrass steppe. *Ecol Appl*, 1992, 2: 397—403
- 51 Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *Int J Biometeorol*, 2001, 45: 184—190