

青藏高原草地生态系统生物量碳库研究进展

高 添¹, 徐 斌¹, 杨秀春^{1,2}, 金云翔¹, 马海龙¹, 李金亚¹, 于海达¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081;

2. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 石河子 832000)

摘 要: 准确认识青藏高原草地生物量碳库及其变化规律对研究区域碳循环与合理利用草地资源具有重要意义。通过综述相关文献, 将青藏高原草地生物量碳库的研究方法与结果概括如下: ①当前草地生物量碳库的估算方法主要有4种: 文献记录法、实地调查法、遥感—植被指数法和过程模型法等, 而估算方法、采样标准与地下生物量估算是导致结果差异的主要因素; ②文献结果显示, 青藏高原草地生物量的平均碳密度为 223 g/m², 碳库为 277 TgC(1Tg=10¹²g); ③采用遥感的估算结果表明, 近20年来青藏高原草地地上生物量碳库呈增加的趋势, 总体处于碳汇状态; ④影响青藏高原草地地上生物量的主要因子是降水量, 温度对生物量的影响还存在不确定性, 人为干扰也是影响草地生物量的重要因素。目前青藏高原草地生物量碳库的研究仍存在着一些问题, 应从基础观测数据、遥感模型算法与碳—氮—水耦合过程模拟等方面开展更为深入的研究。

关 键 词: 青藏高原; 高寒草地; 生物量碳库; 碳汇; 气候变化

1 引言

植被生物量是地表碳循环的重要组成部分, 是土壤碳库的主要输入源^[1-2]。在草地生态系统中, 草地生物量是最为活跃的碳库, 代表初级生产力的基本水平, 决定草场的载畜能力^[3-4]。精确地评估草地生物量碳库及其变化规律有助于认识草地生态系统在全球变化中的作用, 同时对于合理利用草地资源具有重要意义^[5-7]。

青藏高原平均海拔4000 m以上, 高原区水热条件独特, 地理环境复杂, 受人类影响相对较弱, 是生态学研究理想区域^[8-9]。据报道, 青藏高原的升温速度显著高于北半球平均水平, 且冬季升温速度更快^[10-11]。因此, 在全球变化背景下, 高寒区草地生物量及其动态变化成为当前研究的热点^[12-15]。众多学者应用不同方法对该区域的草地碳库及生产力进行了估算, 有力地推进了人们对高寒草地碳库与该区域碳循环的认知水平, 但由于资料来源与方法等差别, 结果仍存在较大差异。

草地生物量碳库的估算具有很强的不确定

性。本文试图在前人研究的基础上, 较系统地整理汇总青藏高原草地生物量碳库的估算方法与结果, 分析其动态变化与影响因子, 探讨目前该研究存在的问题及不确定性, 展望研究的可能趋势与方向。

2 青藏高原草地生物量碳库估值

2.1 草地生物量碳库的估算结果与方法

自20世纪末以来, 很多学者对青藏高原草地生物量碳库进行了估算, 其估值范围为324~1868 TgC, 相差约5倍, 而平均碳密度估值为250~1644 g/m², 相差约6倍, 结果差异很大(表1)。当前的估算方法可大致分为4种: 文献记录法、实地调查法、遥感—植被指数法与过程模型法。

2.1.1 文献记录法

利用文献中记录的不同草地类型碳密度或历史样方数据推算大尺度的生物量碳库。Ni^[16]将Olson等^[17]建立的不同生态系统类型与中国草地类型建立对应关系, 以赋予其碳密度值。这种方法忽略了青藏高原草地与世界草地的差异, 估值可能会产

收稿日期: 2012-05; 修订日期: 2012-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701055); 国家高技术研究发展专项(863)(2006AA10Z242, 2008AA121805); 农业部草原资源状况遥感监测以及草原资源与生态监测项目。

作者简介: 高添(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为草地生态遥感。E-mail: gaotianwuyi@163.com

通讯作者: 徐斌(1957-), 男, 研究员, 研究方向为草地遥感监测。E-mail: xubin@mail.caas.net.cn

表 1 不同研究得出的青藏高原草地生物量碳密度及碳库

Tab.1 Biomass carbon stock in grasslands of Qinghai-Tibetan Plateau

面积/ 10 ⁴ km ²	地上生物量		地下生物量		总生物量		是否 实测	主要方法	参考文献
	碳库/ TgC	碳密度/ (gC/m ²)	碳库/ TgC	碳密度/ (gC/m ²)	碳库/ TgC	碳密度/ (gC/m ²)			
146.0 ^b		(121.9)			1060	829	否	文献记录	Ni ^[16]
113.6 ^b	26.1	31.9			(177)	(217)	否	文献记录	Ni ^[18]
102.2 ^c		26.8			(186)	(182)	否	文献记录	罗天祥等 ^[19]
113.6 ^c	75.7	66.6	1792.3	1577.5	1868	1644	是	实地调查	Fan 等 ^[20]
138.8 ^f	37.0	26.7	198.1	142.7	235	169	是	实地调查	Yang 等 ^[21]
138.8 ^e	52.6	37.9	430.2	310.1	482	348	否	NDVI数据	Piao 等 ^[23]
124.1 ^e	43.5	35.1	304.8	245.6	348	281	否	NDVI数据	朴世龙等 ^[24]
122.8 ^e	24.0	19.5			(163)	(133)	是	NDVI数据	徐斌等 ^[26]
129.5 ^e	43.2	33.4	280.4	216.5	324	250	是	NDVI数据	马文红等 ^[27]
203.0 ^e		(115.8)				788	否	OBM模型	Peng 等 ^[32]
110.7 ^b	66.5	60.1	1168.5	1165.5	1235	1116	否	DNDC模型	张峰 ^[33]
— ^d		(41.5)				280	否	AVIM2模型	黄玫等 ^[34]
140.0 ^e		(42.1)			400	286	是	ORCHIDEE模型	Tan 等 ^[35]
112.8 ^e	34.9	30.1	185.8	164.7	220	195	是	EVI数据	杨元合 ^[36]
82.1 ^f	22.6	27.6	166.8	203.2	189	231	是	文献记录	王建林等 ^[37]

注:生物量碳=生物量×0.45;风干草含水量按15%折算;用括号标记的值为利用根冠比的折算值,折算系数为5.8^[21]。

a. 高寒植被,包括主要的高寒草地类型;b. 高寒草甸类、高寒草原类、高寒草甸草原类、高寒荒漠草原类、高寒荒漠类;c. 青海省与西藏自治区(除灌木);d. 高寒草甸(文献中未记录相关面积);e. 高寒草甸类、高寒草原类;f. 西藏自治区。

生较大误差^[5]。Ni对青藏高原草地的碳密度估值(1210 Tg, 829 g/m²)远高于文献报道的均值(589 Tg, 463 g/m²);而Ni利用国家草地资源调查资料的产草量数据估算的高原区草地地上生物量碳库为26.1 Tg,密度为31.9 g/m²^[18];罗天翔等通过历史记录的草地资源统计资料估算青藏高原草地生物量碳库为186 Tg^[19],密度为182 g/m²,二者估值较低。

2.1.2 实地调查法

通过大规模的野外调查获得生物量数据,进而推算区域生物量碳库。与文献记录法不同,该方法通过实地测量获取草地生物量碳密度。Fan等利用实测数据与部分文献记录的样方数据估算青藏高原草地生物量碳库与碳密度分别为1868 Tg、1644 g/m²,远高于同类研究^[20]。Yang等通过实测样方估算的碳库与碳密度分别为235 Tg、169 g/m²^[21],估值相对较低。

2.1.3 遥感—植被指数法

通过建立地面样方与遥感植被指数的统计关系推算区域的植被生物量。该方法弥补了实地调查采样的不足,二者结合建立的统计模型在一定程

度上解决了从采样点到区域面的尺度转换问题,提高了估算精度^[5, 22-23]。近年来,基于植被指数估算草地生物量的研究较多。朴世龙等^[24]、Fang等^[25]与Piao等^[23]采用了NOAA-NDVI时序数据、国家草地清查数据并结合根冠比的方法估算了中国草地生物量碳库;徐斌等^[26]、马文红等^[27]分别基于实测数据与NDVI数据估算了中国草地地上生物量。总体来看,该方法估算的青藏高原草地地上碳密度为19.5~37.9 g/m²,其中,徐斌等的估值最小(19.5 g/m²),Piao等的估值最大(37.9 g/m²),朴世龙等与马文红等的估算结果均在35 g/m²左右。

2.1.4 过程模型法

通过地球生物化学过程来模拟植被生长分布情况^[28]。相对于统计模型,过程模型具有普适性与可预测性的特点^[29],缺点是模型复杂,涉及参数多,大尺度数据获取困难^[30]。机理模型估算植被生产力的研究很多,而用于估算植被生物量碳库的研究相对较少^[31]。Peng等^[32]基于OBM模型与张峰^[33]基于DNDC模型估算的青藏高原草地地上生物量碳密度分别为115.8 g/m²、60.1 g/m²;黄玫等^[34]基于

AVIM2模型与Tan等^[35]基于ORCHIDEE模型估算的碳密度分别为280 g/m²、286 g/m²,与遥感—植被指数的估值相近。

2.2 估值差异的原因

影响估值的因素很多,其中估算方法(包括研究采用的基础数据)、采样方法和地下生物量的估算是导致结果差异的主要因素^[5]。

2.2.1 估算方法

以上4种估算方法的原理、采用的基础数据与研究过程均有所不同,这必然导致结果的差异。为了更直观地比较不同方法的估算结果,图1汇总了4种方法估算的研究区草地地上生物量的碳密度。4种方法中,文献记录法的估值差异最大(26.8~122 g/m²),而遥感—植被指数的估值差距最小(19.5~37.9 g/m²)。从均值来看,过程模型估值最大(72.6 g/m²),遥感—植被指数的估值最小(31.2 g/m²)。

文献记录与实地调查的方法均假设同一类型单元的碳密度是均一的,没有考虑到空间变异性。Ni利用世界平均碳密度的估算值最大^[16],而通过草地清查数据或历史记录产草量数据估算的碳密度与实地调查的估值相近,范围在26.7~31.9 g/m²(除Fan等^[20]),这与植被指数的估值较为接近,可见详实可靠的地面观测数据是准确估算草地生物量的基础。过程模型的估值差异较大,且估值偏高,原因可能有3点:①模型自身的估算精度与适用性问题;②较少考虑高寒草地利用的特点;③驱动模型所需的数据繁多,准确地获取这些数据较为困难。由此可见,过程模型应更多地考虑高寒区草地资源与利用方式的特点,在大量地面观测数据与多因子野外控制实验的基础上,更准确地模拟高寒草地生

态系统的碳—氮—水耦合循环过程。

从理论方法与估算结果来看,植被指数结合地面实地调查的方法可更加准确地反映了青藏高原草地碳库的真实情况,方法较为成熟,估值相互验证。但是,由于高寒区草原植被具有很强的时空异质性,且地面观测数据少;此外,以往的研究多利用简单的采样点到象元的尺度转换算法与单一的回归模型,估算精度难以保证。鉴于此,该方法应更关注以下3个方面:①获取更广空间范围与更长时间序列的地面观测数据为遥感估算提供数据支撑;②研究更优的算法以降低尺度转换过程中的不确定性;③针对高寒区不同的草地类型或下垫面分别建模,适当降低观测尺度,明晰地上生物量与遥感参数关系,进而更准确地反演草地植被状况。

2.2.2 采样方法

生物量收获法是草地调查普遍采用的方法,但实际操作却存在差异。采样方法主要从两个方面影响估算结果:①样地位置,即草地是否经过人类利用^[37];②样方采集对象,即采集植物的组分(是否包括立枯物与凋落物)。如杨元合仅采集植物的活体部分得到的高寒草地与高寒草甸的样方均值分别为24 gC/m²、50 gC/m²^[36];而Fan等在围封地采集的植被样方包括立枯物与凋落物,对应草地类型的样方均值分别为31 gC/m²、103 gC/m²^[20]。由此可见,不同采样标准的结果差异很大,明确与统一草地地上生物量的采集方法是当前亟需解决的问题。

2.2.3 地下生物量估算

通过根冠比估算地下生物量是目前常见的方法^[20,23-24,27, 8-39]。地下生物量获取困难,且采集存在很大的不确定性(包括地下生物量采集的深度与活体生物量的区分)。Mokany等对全球各类植被的根冠比数据进行了研究,结果显示786个根冠比中约有62%的数据存在问题^[40]。相关研究得出的比值相差很大,如Piao等根据文献记录得到的根冠比值为5.3~10.1^[23],Fan等通过实地样方与文献记录样方得出的根冠比值为2.41~52.28^[20]。表2列出了两种高寒草地类型的根冠比,高寒草原与高寒草甸的估值并没有明显规律。

学者们提出其他理论以期能更加准确地估算地下生物量。Brouwer的“功能平衡”理论^[41]与Niklas等提出的地上地下生物量等速增长假说^[42]均得到了支持^[21,27,43-48]。此外,根系生态学——根系形态、结构、功能、寿命与周转等问题的研究正逐渐被

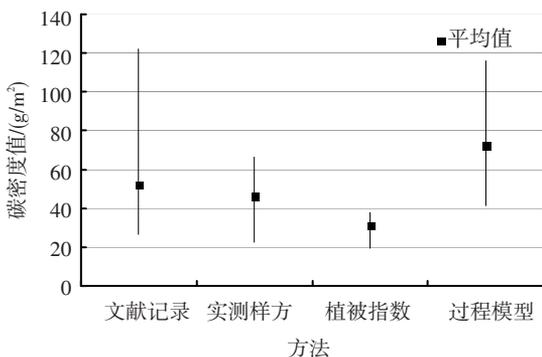


图1 4种方法估算的青藏高原草地地上生物量的碳密度值
Fig.1 Four methods for estimation of Qinghai-Tibetan Plateau's grasslands aboveground biomass C density

注:基于12篇文献统计结果[17,18,22,23,25-29,32,34,36]。

表2 高寒草原与高寒草甸的根冠比

Tab.2 Ratios of belowground to aboveground biomass for alpine steppe and alpine meadow

根冠比值		计算 方法	数据 获取	文献
高寒草原	高寒草甸			
40.12	52.28	均值	实测	Fan 等 ^[20]
5.2	6.8	中值	实测	Yang 等 ^[21]
9.43	7.92		文献	Piao 等 ^[23]

人们所重视,但这些研究多关注木本植物^[49]。全球变化背景下,高原冻土的碳源汇问题被关注,但目前尚不清楚草地根系在其中扮演的角色。Wu 等研究了矮嵩草根系的结构、生物量与周转机制^[50],Ma 等研究了高寒草甸植物个体随海拔变化的根茎分配特征^[51],这些研究增进了对高寒草地根系的认识,但受限于高寒植物生理机制的知识与大时空尺度植被调查,很多关键问题尚存在争论,这是高寒草地生态系统碳库研究面临的一个挑战。

综合考虑当前研究的估算结果(除过程模型法及部分偏大的估值),青藏高原草地生物量碳密度的估值应该在 133~348 g/m²,均值为 223 g/m²,按此估算,青藏高原草地生物量总碳库约为 277 TgC。

3 草地生态系统生物量碳库的时空变化与影响因子

3.1 时空变化

青藏高原是气候变化的敏感区,气候波动对高寒植被的影响及其响应机制是当前研究的热点问题。近半个世纪以来,青藏高原气温呈增加趋势,但降水变化并不显著^[52-54]。Piao 等研究表明,1982-1999年,青藏高原草地上生物量呈增加趋势,年均增长 0.062 TgC^[23];徐兴奎等的研究也得到了相似的结论^[55]。杨元合等基于 NDVI 的研究表明,春季高原区植被生物量增加明显,而夏季增长相对较弱^[56]。一些研究也得到了不同的结论。如马文红等利用更长时间序列的 NDVI 与实测样方分析了青藏高原草地生物量,结果显示,1982-2006年间高寒草甸地上生物量呈增加趋势,而其他高寒草地类型增幅微弱^[27]。毛飞等同样利用 NDVI 数据研究了藏北地区 1982-2000年间草地的动态变化,结果表明该地区植被变化不明显,局部地区植被活动减弱^[57]。青藏高原长期定位监测的结果显示,高

寒草甸的活动处于较为稳定的水平^[58],并不支持遥感研究的观测结果^[23,27,54,56]。观测的尺度效应可能是导致遥感观测与定位监测结果差异的重要原因之一,遥感观测应能更真实地反映大空间尺度植被的生长情况。基于遥感的最新研究结果表明,近 20 年来,青藏高原草地生物量总体上呈增加趋势,处于碳汇状态。其中高寒草甸草原增加显著,其他草地类型增幅较小,局部地区有所下降。

青藏高原地形的差异与复杂的气候条件导致了草原植被空间分布的异质性。总体来说,青藏高原生物量从东南向西北呈现下降趋势,生物量的空间格局与降水量的地理分布基本一致^[23,59]。

3.2 影响因子

草地生物量碳库的影响因素可大体分为自然因素与人为因素两部分。

3.2.1 自然因素

降水量是草地生物量一个主要影响因子。即使在高原地区,降水量仍然对草地生物量起着重要的控制作用^[27,55,60-62]。周睿等针对增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)与降水量的研究发现,降水量是青藏高原植被空间分布与年际波动的主要因素,高寒草原和高寒荒漠草原受降水量的影响程度要大于高寒草甸草原^[62];杨元合的研究表明,高寒草原夏季 NDVI 与春季降水量关系密切,并验证了降水对高寒草原植被影响滞后性^[56];马文红等的研究发现,北方草地生物量的年际波动主要受 1-7 月的降水量影响,这表明年际降水量格局是生物量波动的重要驱动因子^[27]。

温度对高寒草地生物量的影响尚存在争议。据研究报道,高寒草地生物量总体的增长趋势很可能与同期上升的温度密切相关^[23,56,63-66]。梁四海等研究发现高寒植被对气温的变化非常敏感^[63];杨元合等研究表明高原区春季 NDVI 的显著增加是春季增温所致^[56]。一般认为,温度的升高会从两方面提高植被的生产力:① 加快土壤中氮素的矿化作用进而提高其对植物的有效性^[67];② 延长了植物的生长季^[68]。小尺度的控制实验在一定程度上验证了以上假设^[69-70],但仍存在争议。如 Jonasson 等的控制实验显示,增温处理下的土壤氮素含量在 5 年内没有显著变化^[71];Yu 等基于遥感影像的分析认为,剧烈的冬季增温延长了高寒草原植被的冬季休眠时间,进而推迟了春季的返青时间,可能会降低青藏高原草地的生物量^[44];马文红等利用遥感影像

与实测样方分析了高寒草地生物量与温度的关系,发现其相关性较弱^[27]。小尺度的温度控制实验对于阐明机理至关重要,但上升到区域尺度时,其适用性仍有待深入研究。

水热因子与土壤等环境因素的综合影响可以更好地解释高寒草地生物量的动态变化。一些研究将降雨量划分若干区间,发现当降雨量相对恒定时,生物量与温度之间呈显著负相关^[72-74]。此外,土壤质地也会通过降雨量对生物量产生影响^[75],该规律在青藏高原也得到了验证^[76]。植物生长的影响因素多而复杂,对多因子的综合考虑可以提高对高寒植被变化机理的认识。此外,气候变化是非均质的,可能表现为季节性升温或集中降水^[77]。因此,未来研究应侧重于更小时间尺度的气候变化与高寒草地的响应机制。当前研究多关注草地生长季的变化规律,近30年来青藏高原春冬季趋于暖湿化^[78],而这种季节性水热变化如何影响青藏高原草地生物量碳库与其固碳能力,亟待更深入的研究。

除上述气候因素外,太阳辐射、地形条件及草原鼠害等因素对青藏高原草地生物量碳库也具有明显影响。

3.2.2 人为因素

人为活动是影响草地生物量的重要因素^[61,79]。过度放牧会导致草地生物量碳库降低^[80],适度放牧则增加草地植被的固碳能力^[81]。开垦是影响草地碳库的重要人类活动,烧荒使草地地上生物量碳快速释放到大气中,并加快了土壤呼吸的速度,而农作物的收获又降低了生物量碳库向土壤碳库的输入^[82]。人类活动也包含积极的方面,如草原生态保护政策的推行、草地围封、禁牧等。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 目前估算草地生物量碳库主要有4种方法,分别为文献记录、实地调查、遥感—植被指数与过程模型。对估算结果的分析显示,遥感—植被指数并结合实测数据估算生物量碳库的精度较高。

(2) 草地生物量碳库估值的差异主要来源于估算方法、采样标准与地下生物量估算等3个方面。

(3) 以目前的估值来看,青藏高原草地生物量碳密度的估值范围为133~348 g/m²,平均生物量碳密度为223 g/m²,按此估算,青藏高原草地生物量碳

库为277 TgC。

(4) 近20年来,青藏高原草地地上生物量碳库总体呈增加的趋势,处于碳汇状态。其中高寒草甸草原增加显著,其他草地类型增幅较小,部分地区有所下降。

(5) 高寒草地的地上生物量主要受降雨量的影响,而温度对生物量的影响还存在不确定性。人为干扰也是影响高寒草地生物量的重要因素。

4.2 展望

(1) 明确统一的草地生物量划分界限与采样方法,获取更广空间范围与更长时间序列的地面观测数据以提供数据支撑。

(2) 遥感—植被指数虽然是当前较为可靠的方法,但仍有很大的提升空间,更优的尺度转换算法和针对性的估算模型是其发展的重要方向。

(3) 地下生物量的估算不确定性较强,这需要从采样方法、根系认识及生理分配机制等方面开展更多的研究。

(4) 通过更小时间尺度的气象因子与多因子综合分析是认识高寒草地生物量碳库变化机制的重要手段。

(5) 过程模型应在大量观测数据与多因子野外控制实验的基础上,更准确地反演高寒草地生态系统的碳—氮—水耦合循环过程,模拟与预测青藏高原草地生物量碳库对气候变化与土地利用变化的响应。

参考文献

- [1] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [2] 王军邦, 黄玫, 林小惠. 青藏高原草地生态系统碳收支研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 123-128.
- [3] Soussana J F, Loiseau P, Vuichard N, et al. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 219-230.
- [4] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [5] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: C辑*, 2010, 40(7): 566-576.
- [6] Feng Q, Cheng G D, Mikami M. The carbon cycle of sandy lands in China and its global significance. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 535-549.
- [7] Luo Y Q. Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. *Annual Review of Ecology, Evolution, and sys-*

- tematics, 2007, 38(1): 683-712.
- [8] 郑度, 李炳元. 青藏高原地理环境研究进展. 地理研究, 1999, 19(4): 295-302.
- [9] 张镱铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [10] 牛涛, 刘洪利, 宋燕, 等. 青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代变化特征研究. 应用气象学报, 2005, 16(6): 763-771.
- [11] 赵昕奕, 张惠远, 万军. 青藏高原气候变化对气候带的影响. 地理科学, 2002, 22(2): 190-195.
- [12] 王根绪, 胡宏昌, 王一博, 等. 青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应. 冰川冻土, 2007, 29(5): 671-679.
- [13] 郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. 地学前缘, 2002, 9(1): 95-102.
- [14] 田玉强, 高琼, 张智才, 等. 青藏高原高寒草地植物光合与土壤呼吸研究进展. 生态环境学报, 2009, 18(2): 711-721.
- [15] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(4): 633-636.
- [16] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [17] Olson J S, Watts J A, Allison L J. Carbon In Live Vegetation of Major World Ecosystems. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1983: 50-51.
- [18] Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Climatic Change*, 2004, 67(2): 237-246.
- [19] 罗天祥, 李文华, 冷允法, 等. 青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布. 地理研究, 1998, 17(4): 337-344.
- [20] 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. *Climatic Change*, 2008, 86(3): 375-396.
- [21] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(2): 268-277.
- [22] 杨秀春, 徐斌, 朱晓华, 等. 北方农牧交错带草原产草量遥感监测模型. 地理研究, 2007, 26(2): 213-221.
- [23] 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 Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): GB2002, doi: 10.1029/2005GB002634.
- [24] 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(4): 491-498.
- [25] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China: Series D*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [26] 徐斌, 杨秀春, 陶伟国, 等. 中国草原产草量遥感监测. 生态学报, 2007, 27(2): 405-413.
- [27] 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: C辑*, 2010, 40(7): 632-641.
- [28] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(1): 49-57.
- [29] Peng C H. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: A global perspective on modeling vegetation dynamics. *Ecology Modelling*, 2000, 135(1): 33-54.
- [30] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
- [31] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 369-378.
- [32] Peng C H, Apps M J. Contribution of China to the global carbon cycle since the last glacial maximum. *Tullus*, 1997, 49(4): 393-408.
- [33] 张峰. 中国草原碳库储量及温室气体排放量估算[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [34] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. *生态学报*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [35] Tan K, Ciais P, Piao S L, et al. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24, GB1013, doi10.1029/2009GB003530.
- [36] 杨元合. 青藏高原高寒草地生态系统碳氮储量[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [37] 王建林, 常天军, 李鹏, 等. 西藏草地生态系统植被碳贮量及其空间分布格局. *生态学报*, 2009, 29(2): 931-938.
- [38] 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. 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.
- [39] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统植被碳密度分布规律及其与气候因子的关系. *植物资源与环境学报*, 2010, 19(1): 1-7.
- [40] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 84-96.
- [41] Brouwer R. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1962, 10(361):399-408.
- [42] Niklas K J. A phyletic perspective on the allometry of plant biomass-partitioning patterns and functionally equivalent organ-categories. *New Phytologist*, 2006, 171(1): 27-40.
- [43] Fang J Y, Chen A X, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [44] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warm-

- ing result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [45] Wang R Z, Gao Q, Chen Q S. Effects of climatic change on biomass and biomass allocation in *Leymus chinensis* (Poaceae) along the North-east China Transect(NECT). *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(4): 653-665.
- [46] Wang R Z, Earle A R, Zu Y G, et al. Demography of reproductive and biomass allocation of grassland and dune *Leymus chinensis* on the Songnen Plain, north-eastern China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49(2): 289-299.
- [47] 张娜, 梁一民. 黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究. *草业学报*, 2002, 11(2): 72-78.
- [48] 马文红, 方精云. 内蒙古温带草原的根冠比及其影响因素. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 774-778.
- [49] 王政权, 郭大立. 根系生态学. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1213-1216.
- [50] Wu Y B, Wu J, Deng Y C, et al. Comprehensive assessments of root biomass and production in a *Kobresia humilis* meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2011, 338(1-2): 497-510.
- [51] Ma W L, Shi P L, Li W H, et al. Changes in individual plant traits and biomass allocation in alpine meadow with elevation variation on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(9): 1142-1151.
- [52] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近30年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1): 3-11.
- [53] 马晓波, 李栋梁. 青藏高原近代气温变化趋势及突变分析. *高原气象*, 2003, 22(5): 507-512.
- [54] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. *大气科学*, 2008, 32(4): 794-805.
- [55] 徐奎奎, 陈红, Levy J K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析. *科学通报*, 2008, 53(4): 456-462.
- [56] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- [57] 毛飞, 侯英雨, 唐世浩, 等. 基于近20年遥感数据的藏北草地分类及其动态变化. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1745-1750.
- [58] 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(1): 63-69.
- [59] Luo T X, Li W H, Zhu H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 2002, 12(4): 980-997.
- [60] Fang J Y, Piao S, Tang Z Y, Peng C H, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723.
- [61] 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(6): 51-58.
- [62] 周睿, 杨元合, 方精云. 青藏高原植被活动对降水变化的响应. *北京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(6): 771-775.
- [63] 梁四海, 陈江, 金晓媚, 等. 近21年青藏高原植被覆盖变化规律. *地球科学进展*, 2007, 22(1): 33-40.
- [64] 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*, 2003, 33(6): 554-567.
- [65] 朴世龙, 方精云. 1982-1999年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 373-380.
- [66] Zhou D W, Fan G Z, Huang R H, et al. Interannual variability of the normalized difference vegetation index on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(3): 474-484.
- [67] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [68] White M A, Running S W, Thornton P E. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42(3): 139-145.
- [69] Dunne J A, Harte J, Taylor K J. Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods. *Ecological Monographs*, 2003, 73(1): 69-86.
- [70] Price M V, Waser N M. Effects of experimental warming on plant reproductive phenology in a subalpine meadow. *Ecology*, 1998, 79(4): 1261-1271.
- [71] Jonasson S, Michelsen A, Schmidt I K, et al. Responses in microbes and plants to changed temperature, nutrient, and light regimes in the arctic. *Ecology*, 1999, 80(6): 1828-1843.
- [72] Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C. Effects of temperature and soil texture on ANPP in the U.S. Great Plains. *Ecology*, 1997, 78(8): 2628-2631.
- [73] Burke I C, Lauenroth W K, Parton W J. Regional and temporal variation in net primary production and nitrogen mineralization in grasslands. *Ecology*, 1997, 78(5): 1330-1340.
- [74] Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C, et al. Ecological responses of dominant grasses along two climatic gradients in the Great Plains of the United States. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7(6): 777-788.
- [75] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, Lauenroth W K. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1988, 69(1): 40-45.
- [76] Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, et al. Aboveground biomass in Tibetan grasslands. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(1): 91-95.
- [77] Craine J M, Nippert J B, Elmore A J, et al. Timing of

climate variability and grassland productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(9): 3401-3405.

- [78] 于海英, 许建初. 气候变化对青藏高原植被影响研究综述. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 747-754.
- [79] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 我国草地生态系统碳循环研究进展. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 342-352.

[80] 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(3): 198-203.

- [81] Ojima D S, Dirks B O M, Glenn E P, et al. Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world. *Water, Air & Soil Pollution*, 1993, 70(1): 95-109.
- [82] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳蓄积的研究进展. *草业科学*, 2005, 22(1): 4-11.

Review of Researches on Biomass Carbon Stock in Grassland Ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau

GAO Tian¹, XU Bin¹, YANG Xiuchun^{1,2}, JIN Yunxiang¹, MA Hailong¹, LI Jinya¹, YU Haida¹

- (1. Key Laboratory of Agri-informatics of the Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China;
2. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihhotze 832000, China)

Abstract: It is critical to know Qinghai-Tibetan Plateau's grassland biomass carbon(C) stock and its dynamics in order to study the regional C cycle and sustainable use of grassland resources. After reviewing the publications, the authors present a summary of methods and results in the studies of biomass C stock in grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau. (1) Four methods are mainly used in this field: searching in literature and documents, field measurement, remote sensing of vegetation/vegetation indices, and process modeling. In the practice, methods of estimation, quality standards for sample collection, and underground biomass estimation are the most important factors impacting the results. (2) According to the published literature, biomass C density of Qinghai-Tibetan Plateau's grasslands is approximately 223g/m², and can be translated to a total grassland biomass C stock of 277 Tg C (1Tg=10¹²g). (3) The estimation results based on remote sensing indicate that the biomass C stock of Qinghai-Tibetan Plateau's grasslands increased over the past 20 years, suggesting that alpine grasslands might have functioned as a biomass C sink. (4) The above ground biomass C stock of Qinghai-Tibetan Plateau's grasslands is strongly affected by precipitations, while the role of temperature is unclear. In addition, human activities are considered to be a crucial factor affecting grassland biomass C stock as well. Problems remain in the studies of biomass C stock in grassland ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau; more thorough investigations are needed in the fields such as data acquirement in the basic field measurements, optimization of algorithms for remotely-sensed vegetation indices, and process modeling of carbon- nitrogen- water coupling cycle in the alpine ecosystem.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; alpine grasslands; biomass C stock; C sink; climatic change

本文引用格式:

高添, 徐斌, 杨秀春, 等. 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*, 2012, 31(12): 1724-1731.