

中国草地植被生物量及其空间分布格局

朴世龙¹ 方精云¹ 贺金生¹ 肖玉²

(1 北京大学环境学院生态学系, 北京 100871) (2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 草地生态系统是陆地生态系统分布最广的生态系统类型之一, 它在全球变化中的作用越来越受到重视。利用中国草地资源清查资料, 并结合同期的遥感影像, 建立了基于最新修正的归一化植被指数 (*NDVI*) 的我国草地植被生物量估测模型, 并利用该模型研究了我国草地植被生物量及其空间分布特征。结果表明: 草地植被地上生物量与当年最大 *NDVI* 值具有很好的相关关系, 两者可以用幂函数很好地拟合 ($R^2=0.71$, $p<0.001$)。我国草地植被总地上生物量为 146.16 TgC (1 Tg = 10^{12} g), 主要集中在北方干旱、半干旱地区和青藏高原; 总地下生物量为 898.60 TgC, 是地上生物量的 6.15 倍; 而总生物量是 1 044.76 TgC, 占世界草地植被的 2.1%~3.7%, 其平均密度约等于 $315.24 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于世界平均水平。我国草地植被单位面积地上生物量水平分布趋势为: 东南地区高, 西北地区低, 与水热条件的分布趋势一致; 从垂直分布看, 在海拔 1 350 m 和 3 750 m 处分别出现了波谷和波峰, 与我国特有的三级阶梯地势有着密切的关系。此外, 我国草地植被生物量为森林的 1/4 左右, 显著大于世界平均水平, 说明我国草地在碳平衡中的贡献相对较大。

关键词 草地 空间分布 *NDVI* 生物量 碳储量

SPATIAL DISTRIBUTION OF GRASSLAND BIOMASS IN CHINA

PIAO Shi-Long¹ FANG Jing-Yun¹ HE Jin-Sheng¹ and XIAO Yu²

(1 Department of Ecology, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Estimating carbon storage in terrestrial ecosystems has been a central focus of research over the past two decades because of its importance to terrestrial carbon cycles and ecosystem processes. As one of the most widespread ecosystem types, China's grasslands play an important role in global change research. The grasslands in China, which are distributed primarily throughout the temperate regions and on the Tibetan Plateau, were classified into 17 community types. In the present study, a statistical model was established to estimate grassland biomass and its geographical distribution in China based on a grassland inventory data set and remote sensing data (Normalized Difference Vegetation Index) using GIS and RS techniques. We found that there was a significant correlation between aboveground biomass density and the maximum annual *NDVI* when expressed as a power function ($R^2=0.71$, $p<0.001$). The aboveground biomass was estimated to be 146.16 TgC (1 Tg = 10^{12} g) and belowground biomass was estimated as 898.60 TgC (6.15 times of the above biomass) for a total biomass of 1 044.76 TgC. This value accounts for about 2.1%–3.7% of the world's grassland biomass. The grassland biomass is distributed primarily in the arid and semiarid regions of Northern China and the Qinghai-Xizang Plateau. The average biomass density of China's grasslands was $315.24 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, smaller than the world average. The aboveground biomass density decreases from southeastern China toward the north-west corresponding with changes in precipitation and temperature. Furthermore, aboveground biomass density reached the lowest levels at 1 350 m elevation and peak levels at 3 750 m above sea level which most likely is related to China's three-step topographical background. The ratio of total biomass of grassland to forest biomass in China is 1/4, much higher than that of the world, suggesting a greater contribution of grasslands to China's carbon pool.

Key words Grassland, Spatial distribution, *NDVI*, Biomass, Carbon storage

陆地植被通过光合作用将大气中的 CO_2 以碳水化合物形式固定在陆地生态系统中。陆地生态系统

碳库存量不仅是生态系统碳循环的主要组成要素之一, 而且是估算地球支持能力 (Carrying capacity) 的一

个重要指标,因此研究陆地生态系统碳库存量有助于了解全球碳平衡和评价陆地生态系统的可持续发展(方精云等,1996)。草地生态系统是陆地生态系统中最重要、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的作用(Scurlock & Hall, 1998; Scurlock *et al.*, 2002)。但目前有关陆地生态系统碳库存量及其动态变化的研究大多数侧重于森林植被方面的工作,而草地植被的研究却相当薄弱(Hall *et al.*, 1995)。

我国拥有极为丰富的草地资源,分布自东北平原,越过大兴安岭,经辽阔的内蒙古高原,而后经鄂尔多斯高原、黄土高原,直达青藏高原南缘,绵延约4 500 km,南北跨越23个纬度(陈佐忠等,2002)。草地不仅是我国分布面积最广的生态系统类型之一,而且对发展畜牧业、维持生物多样性、保持水土和维护生态系统平衡方面有着重大的作用(谢高地等,2001)。为此,正确地估算我国草地植被生物量,对合理开发草地资源以及研究我国陆地生态系统的碳循环具有重要意义。

国内自20世纪90年代中期开始,一些学者相继开展了我国草地植被生物量的研究(方精云等,1996;王绍强等,1999;Ni, 2002)。但由于所采用的研究方法和资料来源的不同,得出的结果之间存在较大差异。这表明我国草地植被生物量的估算存在较大的不确定性,需要作进一步的研究。另一方面,草地资源常规调查周期较长,如从1979年开始的全国草地普查,持续近10年。因此只根据草地资源数据很难实时评估全球变化对我国草地生态系统的影响,有必要建立适合于国家尺度上的关于草地生物量的模型。尽管前人已经进行了相关研究,但大多数模型只适合于某一种草地类型或某一特定区域(徐希孺等,1985;黄敬峰等,2000;王兮之等,2001),缺乏有关适于国家尺度的模型研究。

本文利用我国草地资源清查资料,并结合同期的遥感影像,建立了基于遥感数据的我国草地植被生物量估测模型,同时利用模型研究了我国草地植被生物量的空间分布特征,旨在为我国草地生态系统功能的动态变化研究提供有效的手段。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源和预处理

我国从1979年开始分3个阶段开展了全国草地资源的统一调查,其中1981~1988年为草地资源的调查阶段,调查范围覆盖了全国2 000多个县(中

华人民共和国农业部畜牧兽医司等,1996)。这次全国范围的调查为进一步开展我国草地生态系统的研究提供了良好的基础。本文地上生物量的基础数据主要来源于基于这次全国草地资源调查编写的《中国草地资源数据》(中华人民共和国农业部畜牧兽医司等,1994)。

近20年来,随着对地观测系统技术的不断成熟,有关利用遥感数据进行植被活动监测的研究日益增多。其中,时间分辨率高、价格低廉的NOAA/AVHRR数据在全球及区域大尺度植被活动研究中显示出其它数据所无法替代的作用(Defries & Townshend, 1994)。由于根据NOAA/AVHRR红外与近红外通道计算产生的归一化植被指数(NDVI)能够较准确地反映植被的覆盖程度等植被信息,因此常常被用于估算植被的生物量或植被净第一性生产力(Potter *et al.*, 1993; Field *et al.*, 1995; Myneni *et al.*, 2001)。

本研究中所利用的NDVI数据是GIMMS(Global Inventory Monitoring and Modeling Studies)研究组对1981年7月到1988年12月间的NOAA/AVHRR数据加工处理后提供的,时间分辨率为15 d,图像的空间分辨率为8 km×8 km(Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001)。由于该NDVI数据集进一步消除了火山爆发、太阳高度角、传感器灵敏度随时间变化等影响,从而较其它NDVI数据集更好地保证了数据质量,因此在全球及区域大尺度植被活动变化研究中广泛使用(Myneni *et al.*, 2001; Tucker *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001)。由于该数据集中年平均NDVI在0.1到1之间的地区为植被覆盖的地区,因此,本研究中只考虑了年平均NDVI大于0.1的地区(Zhou *et al.*, 2001; Myneni *et al.*, 2001)。

本文行政区划根据1:400万中国县级区划图,地形图采用1:100万地形图,草地类型图结合中国科学院自然资源综合考察委员会1:400万草地资源图。为了使这些图与遥感影像叠加(Overlay),我们分别把上述图以及遥感影像转换成分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,投影方式为经纬网投影的栅格图像。

1.2 地上生物量估算方法

从区域或大尺度水平上估算陆地生态系统生物量主要有3种方法:一是通过大规模的实地调查,取得实测数据,建立生物量或相关变量的数据库,并估算区域生物量(Fang *et al.*, 1998; 2001);二是从已有的样地数据或文献中获取不同植被的平均单位面积生物量,并与对应的面积相乘估算生物量(Ni,

2002);三是利用已有的实地调查资料,建立环境因子(温度、降水等)或遥感参数为自变量、生物量为因变量的回归模型,在此基础上推算生物量(Myneni *et al.*, 2001)。本研究中的地上生物量估算方法属于第三种范畴。

《中国草地资源数据》中记载了各省(不包括台湾)的每一草地类型平均产草量(风干重, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。草地的地上部分的生物量(干物质含量)等于产草量中减去风干草中的含水量。因此,在本文中风干草含水百分比取 15%(方精云等, 1996)。此外,为了更有效地与前人的研究做比较,在本文中生物量单位均以碳(gC)的形式表示。通常,植物生物量(单位为 g)转换为碳(gC)按照方精云等(1996)采用的 0.45。

产草量数据是一年中产草量最高时期野外测得的(提前或推后所测产量以年产草量动态系数进行校正)(中华人民共和国农业部畜牧兽医司等, 1994),因此,我们先计算每一空间位置上每一年中最大 NDVI(设定为 $NDVI_{\max}$, 公式(1)),得出 1981~1988 年间的每年的 $NDVI_{\max}$ 图,并与 1:400 万中国县级区划图以及 1:400 万草地资源图(划分 17 个类型,表 1)叠加,求算每一省份对应草地类型的平均 $NDVI_{\max}$ 。

为了了解 1981~1988 年间地上生物量年际变异,我们计算了 17 个草地类型平均 $NDVI_{\max}$ 在这期

间的变异系数。结果显示,温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类的变异系数在 7%~9%之间,而其它大部分植被类型的都小于 5%(除高寒草甸草原类 5.8%)。可以看出,这期间草地地上生物量的年际变异不大。因此,我们利用每一省份对应草地类型 1981~1988 年间平均 $NDVI_{\max}$ 和生物量,建立了 $NDVI_{\max}$ 为自变量、地上生物量为因变量的回归模型。模型的空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

$$NDVI_{\max}(x, t) = \text{MAX}(NDVI(x, t, i)) \quad (1)$$

式中, x 表示空间位置, t 表示年份, i 表示 t 年中 1 月 1 日起第 i 个 15 d, 其范围在 1 到 24 之间。

1.3 地下生物量估算方法

草地植被的地下生物量是根据地下与地上部分生物量的比例系数估算的。通常,草地的地下与地上部分生物量的比例系数随着草地类型、年龄、生境、气候和人为放牧影响而发生变化。但由于这方面信息的获取有限,因此,本文主要是根据公开发表的文献,不同植被类型采用了不同的地下与地上部分生物量的比例系数(表 1)。需要指出的是,由于有关低地草甸类、山地草甸类和沼泽类 3 种草地类型的相关资料缺乏,因此它们的比例系数是根据西藏和青海的这些植被类型同期的单位面积产草量(中华人民共和国农业部畜牧兽医司等, 1994)和单位面积生物量(李文华等, 1998)换算而得到的。

表 1 不同草地类型的地下与地上部分生物量比例系数
Table 1 The ratio of belowground to aboveground biomass for different grassland types

草地类型 Grassland type	比例 Ratio	文献来源 References
温性草甸草原类 Temperate meadow-steppe	5.26	方精云等(1996)
温性草原类 Temperate steppe	4.25	方精云等(1996); 李文华等(1998)
温性荒漠草原类 Temperate desert-steppe	7.89	李文华等(1998)
高寒草甸草原类 High-cold meadow steppe	7.91	李文华等(1998)
高寒草原类 High-cold steppe	4.25	方精云等(1996); 李文华等(1998)
高寒荒漠草原类 High-cold desert steppe	7.89	李文华等(1998)
温性草原化荒漠类 Temperate steppe-desert	7.89	李文华等(1998)
温性荒漠类 Temperate desert	7.89	李文华等(1998)
高寒荒漠类 High-cold desert	7.89	李文华等(1998)
热性草丛类 Tropical herbosa	4.42	李文华等(1998)
热性灌草丛类 Tropical shrub herbosa	4.42	李文华等(1998)
暖性草丛类 Warm-temperate herbosa	4.42	李文华等(1998)
暖性灌草丛类 Warm-temperate shrub herbosa	4.42	李文华等(1998)
低地草甸类 Lowland meadow	6.31	中华人民共和国农业部畜牧兽医司等(1994); 李文华等(1998)
山地草甸类 Temperate montane meadow	6.23	中华人民共和国农业部畜牧兽医司等(1994); 李文华等(1998)
高寒草甸类 Alpine meadow	7.92	李文华等(1998)
沼泽类 Marsh	15.68	中华人民共和国农业部畜牧兽医司等(1994); 李文华等(1998)

2 结果与讨论

2.1 地上生物量估测模型的建立

我国各省(除台湾)的每一种草地类型单位面积地上生物量与所对应的平均 $NDVI_{max}$ 之间的关系显示(图 1), 单位面积地上生物量的对数值与 $NDVI_{max}$ 的对数值呈显著正线性相关 ($R^2=0.71$, $p<0.001$)。这表明随着一年内的最大 $NDVI$ 值增加, 当年的地上生物量也以幂函数的形式增加(公式(2))。

$$Y=179.71 \times NDVI_{max}^{1.6228} \quad (2)$$

式中, Y 表示单位面积地上生物量。

2.2 地上生物量及空间分布

2.2.1 草地植被地上生物量

根据本文建立的模型, 求算了各个省以及全国草地植被总地上生物量(表 2)。计算结果表明, 我国草地植被总地上生物量为 146.16 TgC。本研究中所采用的我国草地总面积为 $331.41 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 35.0%。因此, 我国草地植被单位面积地上生物量的平均值约等于 $44.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.2.2 地上生物量密度的地理分布

从表 2 中可以看出, 我国草地主要分布在北方干旱、半干旱地区和青藏高原。以草地面积大小而论, 西藏、内蒙古、新疆居第一、第二和第三, 分别占我国草地面积的 25.0%、21.1% 和 12.4%; 而以草地地上部分总生物量的大小而论, 内蒙古、西藏、青海居第一、第二和第三, 分别为全国的 20.1%、

表 2 我国各省区的草地面积、地上生物量、地下生物量以及总生物量
Table 2 The grassland area, aboveground, belowground and total biomass in each province of China

地区 Region	面积 Area ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	地上生物量 Aboveground biomass (TgC)	地下生物量 Belowground biomass (TgC)	总生物量 Total biomass (TgC)
北京 Beijing	0.21	0.16	0.82	0.98
天津 Tianjin	0.07	0.05	0.25	0.30
河北 Hebei	3.77	2.52	12.11	14.63
山西 Shanxi	3.58	2.13	9.84	11.97
内蒙古 NeiMongol	70.06	29.31	159.21	188.52
辽宁 Liaoning	1.39	0.97	5.16	6.13
吉林 Jilin	3.69	2.38	14.41	16.79
黑龙江 Heilongjiang	7.78	6.19	39.68	45.87
上海 Shanghai	0.06	0.03	0.21	0.25
江苏 Jiangsu	0.31	0.17	0.83	1.00
浙江 Zhejiang	0.44	0.31	1.39	1.70
安徽 Anhui	1.08	0.69	3.03	3.72
福建 Fujian	0.74	0.52	2.31	2.83
江西 Jiangxi	1.85	1.17	5.19	6.35
山东 Shandong	1.35	0.81	3.95	4.76
河南 Henan	1.80	1.14	5.07	6.20
湖北 Hubei	2.51	1.78	8.18	9.96
湖南 Hunan	2.74	1.81	8.00	9.82
广东 Guangdong	1.11	0.70	3.09	3.80
广西 Guangxi	3.06	2.03	8.94	10.97
海南 Hainan	0.46	0.32	1.44	1.76
四川和重庆 Sichuan and Chongqing	23.53	17.85	123.27	141.12
贵州 Guizhou	2.15	1.47	6.54	8.01
云南 Yunnan	7.43	5.18	24.75	29.92
西藏 Xizang	83.00	22.85	157.35	180.20
陕西 Shaanxi	2.71	1.17	5.41	6.58
甘肃 Gansu	15.64	6.68	43.21	49.89
青海 Qinghai	41.09	20.69	147.47	168.15
宁夏 Ningxia	3.19	0.69	4.27	4.96
新疆 Xinjiang	44.52	14.35	92.91	107.27
台湾 Taiwan	0.07	0.05	0.31	0.36
合计 Total	331.41	146.16	814.76	960.92

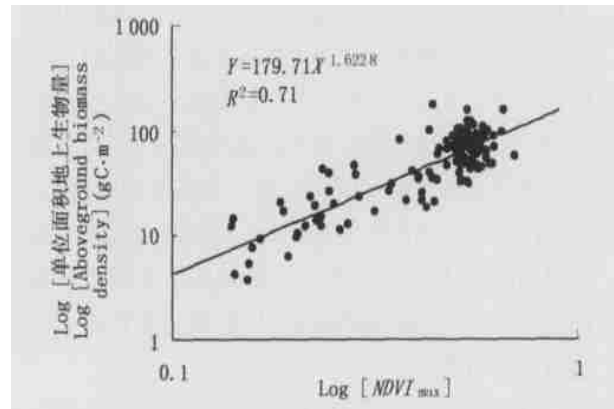


图1 草地单位面积地上生物量与年内最大 NDVI(NDVI_{max})之间关系
 Fig. 1 The relationship between aboveground biomass density and the maximum NDVI(NDVI_{max}) of grassland

15.6%和 14.2%。31 个地区中,黑龙江是草地地上生物量密度最高的地区,而宁夏最低。尽管新疆草地面积占全国 12.4%,但由于该地区主要分布着温性荒漠类和温性草原化荒漠类,因此其地上总生物量不到全国的 10%。

我国草地分布地域广阔,自然条件复杂多样,因此单位面积地上生物量的空间分布高度异质。从图 2 中可以看出,我国草地单位面积地上生物量的范围为 5~130 gC·m⁻²。总体分布是,东南地区高,西北地区低。这与水热条件、土壤以及草地类型的分布有关。

从区域分布看,江南广大地区,受太平洋东南季风的影响,湿润多雨,草地类型以暖性草丛类、暖性

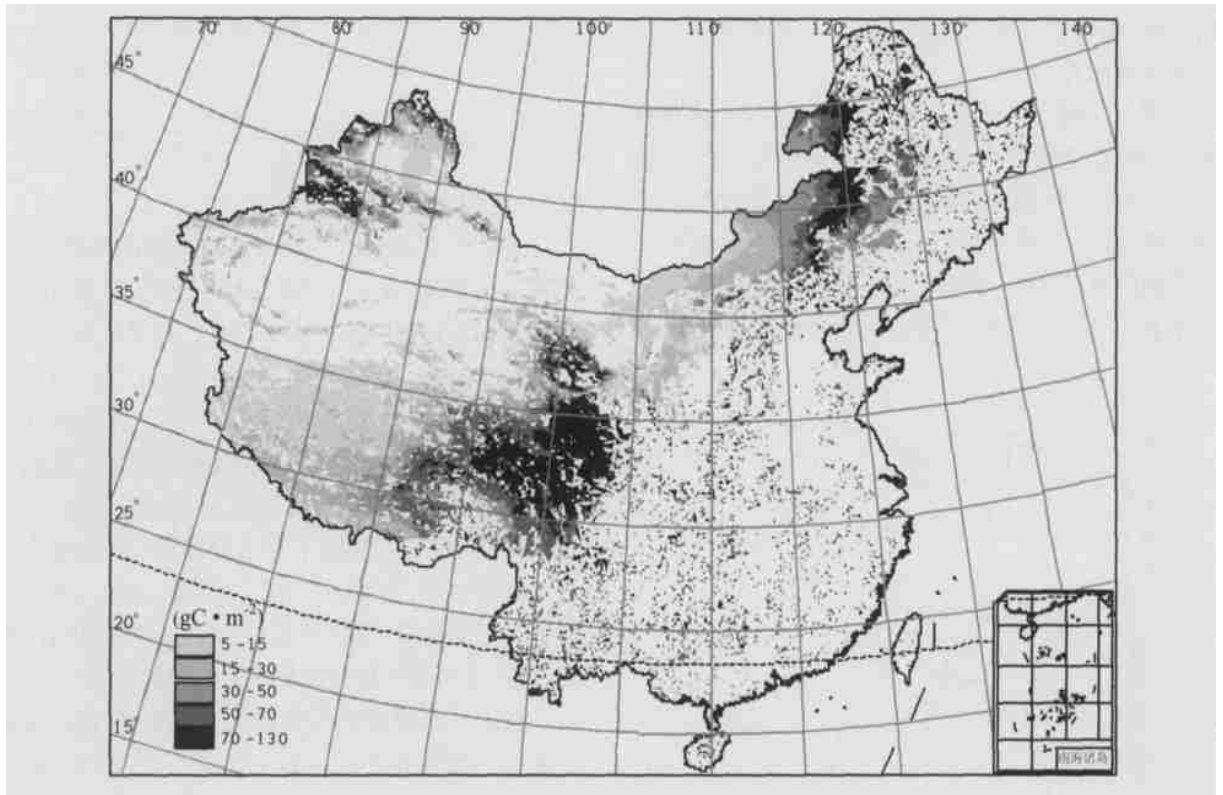


图 2 我国草地地上生物量空间分布图
 Fig. 2 Distribution of aboveground biomass density of the grassland in China

灌草丛类、热性草丛类、热性灌草丛类为主,因此该地区草地单位面积地上生物量在 60 gC·m⁻²以上;青海省东南部、川西高原、甘南高原地区,受来自孟加拉湾西南季风的影响,降水丰沛,且太阳辐射充足,土壤肥沃,因此该地区草地单位面积地上生物量比同纬度地区要高,最大值为 130 gC·m⁻²;新疆北部的伊犁地区及阿尔泰山地区山地虽然处于温带干旱区,但是,因受大西洋气流影响,气候表现得比较湿润,显著高于周围地区;而西北其它干旱地区受强大

陆性气候控制,降水稀少,相应地小,低于 15 gC·m⁻²,其中,准噶尔盆地的腹地、西藏西北地区以及内蒙古高原的西部为我国草地单位面积地上生物量最小的区域;东北地区大于 70 gC·m⁻²以上,这不仅与该地区湿润的气候类型有关,而且还与该地区土壤类型有关,该地区主要分布着含有较高有机质的黑土。

2.2.3 地上生物量与大地形的关系

我国地势西部高而东南低,形成了一个以青藏

高原向东逐级降低的阶梯状斜面,可以划分为三个梯级(中国自然地理编辑委员会, 1985)。为进一步探讨草地上生物量随海拔的分布,我们计算了每隔 100 m 海拔范围内平均草地单位面积地上生物量,并绘制了其变化趋势(图 3A)。图 3A 显示,草地上生物量的变化趋势与我国特有的三级阶梯地势有着密切的关系。海拔 1 350 m 和 3 750 m 处分别出现了波谷和波峰,分别与第二和第三阶梯的界线(1 000 m)以及第一和第二阶梯界线(4 000 m)基本一致。海拔 1 350 m 以下地段(基本上属于第三阶梯),随着海拔的升高,单位面积地上生物量下降;在海拔 1 350 m 到 2 050 m 以及 2 950 m 到 3 750 m 之间(属于第二阶梯),随着海拔的升高反而上升;而在海拔高于 3 750 m 地段(属于第一阶梯),随着海拔的升高,则快速下降。这一趋势与水热条件随海拔的变化规律有关。

图 3B 和图 3C 分别显示我国草地地区年降水量和年平均温度随海拔的变化。从中可以看出,海拔低于 1 350 m 的地区,年降水量和平均温度均呈下降趋势;海拔 1 350~2 050 m 范围内降水和温度均呈增加趋势;2 950~3 750 m 之间温度呈下降趋势,降水略有增加;而在高于 3 750 m 地区随着海拔的

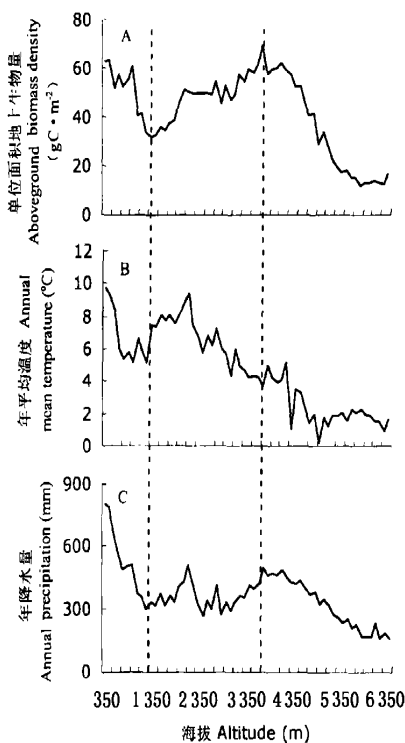


图 3 我国草地单位面积地上生物量(A)、年平均温度(B)以及年降水量(C)与海拔的关系

Fig. 3 Changes in aboveground biomass density (A), annual mean temperature (B) and annual precipitation (C) with altitude for the grassland in China

升高温度和降水均呈下降趋势。太行山、武陵山等第二和第三阶梯的分界线上的一系列山脉阻碍东部湿润气流的西进,使第二阶梯上的大部分地区属于干旱、半干旱气候类型,因此降水的增加可能将有助于该地区草地的生长(表 3);由于青藏高原的隆起,印度洋和太平洋的气流被阻,第一阶梯大部分地区干旱寒冷,温度和降水量的下降可能均不利于草地的生长(表 3),因此随海拔的升高,单位面积地上生物量呈减小趋势。

表 3 不同海拔范围草地单位面积地上生物量与温度($R_{\text{bio}t}$)、降水($R_{\text{bio}p}$)之间的关系

Table 3 Correlation coefficients between aboveground biomass density and annual mean temperature ($R_{\text{bio}t}$), and annual precipitation ($R_{\text{bio}p}$) at different altitude for grassland

	<1 350 m	1 350~3 750 m	>3 750 m
$R_{\text{bio}t}$	0.505	-0.653***	0.681***
$R_{\text{bio}p}$	0.863**	0.489*	0.978***

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ *** : $p < 0.001$

2.3 地下生物量及总生物量

在估算草地地上生物量及其分布的基础上,根据地下生物量与地上生物量的比例关系(表 1),得出了我国草地地下部分的生物量。我国草地地下总生物量为 898.60 TgC,生物量密度为 271.14 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$,是地上生物量密度的 6.15 倍。从空间分布看,我国草地地下生物量和生物量密度存在着相当大的区域差异。西部地区的地下总生物量高,生物量密度低;而东部的地下总生物量低,生物量密度高。各省区中,内蒙古自治区、西藏自治区、青海省的地下总生物量居第一、第二和第三;而四川省、黑龙江省、台湾省的单位面积地下生物量居前三位。

我国草地植被总生物量为 1 044.76 TgC,而单位面积生物量等于 315.24 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。根据 Olson 等(1983)和 Prentice 等(1993)估算,全球草地总面积分别为 $4\ 160 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $5\ 155 \times 10^4 \text{ km}^2$,总生物量分别为 27.9 PgC 和 50.4 PgC。按照这一估算值,我国草地植被生物量占世界草地植被的 2.1%~3.7%,而草地面积占世界草地面积的 6.4%~8.0%。可以看出,我国草地植被平均单位面积生物量低于世界平均水平。这与占 60%以上面积的草地分布在我国北方干旱地区和青藏高原有关。我国草地植被总生物量和单位面积生物量的空间分布与草地地下部分的相似。

方精云等(1996)和 Ni(2002)利用不同的方法估算了我国草地总生物量。方精云等(1996)根据文献

中报道的草地清查资料以及地下和地上部分比例系数估算了我国草地总生物量约为 $1\ 019\ \text{TgC}$, 与本研究中估测值相似。由于方精云等(1996)采用的我国草地面积($430.7 \times 10^4\ \text{km}^2$)显著大于本研究中的草地面积, 因此估算的单位面积生物量小于本研究中得出的结果。Ni(2002)根据不同草地类型的全球平均单位面积生物量, 利用草地清查资料的不同类型草地面积($298.97 \times 10^4\ \text{km}^2$), 得出我国草地总生物量为 $3.06\ \text{PgC}$, 接近本研究的 3 倍。可以认为, 研究方法以及所采用的草地面积差异是导致草地植被生物量估算相差较大的原因。

据 Fang 等(1998;2001)报道, 20 世纪 80 年代我国森林的总生物量为 $4.45\ \text{PgC}$, 其密度为 $4\ 353\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。据此估算, 我国草地植被生物量为森林的 1/4 左右, 显著大于世界平均水平的草地和森林生物量比值 4.6% (Whittaker & Lickens, 1973), 说明我国草地在碳平衡中的贡献相对较大(方精云等, 1996)。

3 结 论

草地生态系统是陆地植被中最重要、分布最广的生态系统类型之一, 因而, 草地在全球变化中的作用受到越来越多的重视。本文利用我国草地资源清查资料, 并结合同期的遥感影像, 建立了基于遥感数据的我国草地植被生物量估测模型, 同时探讨了我国草地植被生物量的空间分布特征。主要结论如下: 1) *NDVI* 与草地生物量之间具有很好的相关关系($R^2=0.71$, $p<0.001$), 随着一年内最大 *NDVI* 值增加, 该地区当年草地植被单位面积地上生物量以幂函数的形式增加。2) 我国草地植被总地上生物量为 $146.16\ \text{TgC}$, 主要集中在北方干旱、半干旱地区和青藏高原。在 31 个省份中, 内蒙古自治区草地植被地上生物量最大。3) 我国草地植被平均单位面积地上生物量为 $44.1\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 水平分布趋势是东南地区高, 西北地区低。这与水热条件的分布趋势一致。从垂直分布看, 其变化趋势与我国特有的三级阶梯地势有着密切的关系, 在海拔 $1\ 350\ \text{m}$ 和 $3\ 750\ \text{m}$ 处分别出现了波谷和波峰。4) 我国草地植被总地下生物量为 $898.60\ \text{TgC}$, 是地上生物量的 6.15 倍, 说明草地植被地下蕴藏着相对较大的碳。5) 我国草地植被总生物量为 $1\ 044.76\ \text{TgC}$, 占世界草地植被的 $2.1\% \sim 3.7\%$; 而单位面积生物量约等于 $315.24\ \text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于世界平均水平。我国草地植被生物量为森林的 1/4 左右, 显著大于世界平均水平, 说明我国草地在碳平衡中的贡献相对较大。

参 考 文 献

- Chen, Z. Z. (陈佐忠) & S. P. Wang (汪诗平). 2002. Typical steppe ecosystems of China. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Defries, R. S. & J. R. G. Townshend. 1994. *NDVI*-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 3567~3586.
- Department of Animal Husbandry and Veterinary (中华人民共和国农业部畜牧兽医司), Institute of Grassland of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (中国农业科学院草原研究所) & Commission for Integrated Survey of Natural Resources of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院自然资源综合考察委员会). 1994. Data on grassland resources of China. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press. (in Chinese)
- Department of Animal Husbandry and Veterinary (中华人民共和国农业部畜牧兽医司) & General Station of Animal Husbandry and Veterinary of Ministry of Agriculture of China (全国畜牧兽医总站). 1996. Rangeland resources of China. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press. (in Chinese)
- Editorial Committee of Chinese Physical Geography of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院中国自然地理编辑委员会). 1985. Chinese physical geography (Pandect). Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Fang, J. Y., A. P. Chen, C. H. Peng, S. Q. Zhao & L. J. Ci. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**: 2320~2322.
- Fang, J. Y. (方精云), G. H. Liu (刘国华) & S. L. Xu (徐嵩龄). 1996. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China. In: Wang, G. C. (王庚辰) & Y. P. Wen (温玉璞) eds. The measurement of greenhouse gas and their release and related processes. Beijing: China Environmental Science Press. 391~397. (in Chinese)
- Fang, J. Y., G. G. Wang & G. U. Liu. 1998. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, **8**: 1084~1091.
- Field, C. B., J. T. Randerson & C. M. Malmstrom. 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing Environment*, **51**: 74~88.
- Hall, D. O., D. S. Ojima, W. J. Parton & J. M. O. Scurlock. 1995. Response of temperate and tropical grasslands to CO_2 and climate change. *Journal of Biogeography*, **22**: 537~547.
- Huang, J. F. (黄敬峰), X. Z. Wang (王秀珍), C. X. Cai (蔡承侠) & X. B. Hu (胡新博). 2000. Natural grassland production monitoring using NOAA/AVHRR data in the Northern part of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Transactions of the CSAE (农业工程学报)*, **16**: 123~127. (in Chinese)
- Li, W. H. (李文华), Q. J. Wang (王启基), T. X. Luo (罗天祥), J. Luo (罗辑), X. Z. Zhang (张宪洲) & Z. H. Lin (临忠辉). 1998. Biomass and productivity of ecosystems in Qinghai-Xizang Plateau. In: Li, W. H. (李文华) & X. M. Zhou (周兴民) eds. Ecosystems of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and approach for their sustainable management. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. 270. (in Chinese)
- Myneni, R. B., J. Dong, C. J. Tucker, R. K. Kaufmann, P.

- E. Kauppi, J. Liski, L. Zhou, V. Alexeyev & M. K. Hughes. 2001. A large carbon sink in the woody biomass of northern forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **98**: 14784~14789.
- Ni, J. 2002. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, **50**: 205~218.
- Olson, J. S., J. A. Watts & L. J. Allison. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
- Potter, C. S., J. T. Randerson, C. B. Field, P. A. Matson, H. A. Mooney & S. A. Klooster. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycle*, **7**: 811~841.
- Prentice, I. C., M. T. Sykes, M. Lautenschlager, S. P. Harrison, O. Demissenko & P. J. Bartlein. 1993. Modeling global vegetation patterns and terrestrial carbon storage at the last glacial maximum. *Global Ecology and Biogeography Letters*, **3**: 67~76.
- Scurlock, J. M. O. & D. O. Hall. 1998. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, **4**: 229~233.
- Scurlock, J. M. O., K. Johnson & R. J. Olson. 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, **8**: 736~753.
- Tucker, C. J., D. A. Slayback, J. E. Pinzon, O. L. Sietse, R. B. Myneni & G. T. Malinda. 2001. Higher northern latitude *NDVI* and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, **45**: 184~190.
- Wang, S. Q. (王绍强), C. H. Zhou (周成虎) & C. W. Luo (罗承文). 1999. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. *Progress in Geography* (地理科学进展), **18**: 238~244. (in Chinese with English abstract)
- Wang, X. Z. (王兮之), G. Z. Du (杜国桢), T. G. Liang (梁天刚), R. L. Dai (戴若兰) & G. Wang (王刚). 2001. The establishment of grassland productive assessment model and the determination of precipitation resource distribution pattern of Gannan Tibetan autonomous prefecture based on RS and GIS. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), **10**: 95~102. (in Chinese with English abstract)
- Whittaker, R. H. & G. E. Lickens. 1973. Carbon in the biota. In: Woodwell, G. M. ed. *Carbon and the biosphere*. Virginia: Springfield. 281~302.
- Xie, G. D. (谢高地), Y. L. Zhang (张懿铨), C. X. Lu (鲁春霞), D. Zheng (郑度) & S. K. Cheng (成升魁). 2001. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), **16**: 47~53. (in Chinese with English abstract)
- Xu, X. R. (徐希孺), L. F. Jin (金丽芳), C. G. Dian (贲常恭), S. S. Zhou (周嗣松) & M. Zhang (张猛). 1985. The principle and method for measurement of grass output of Inner-Mongolian grassland using NOAA-CCT. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **40**: 331~346. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, L. M., C. J. Tucker, R. K. Kaufmann, D. Slayback, N. V. Shabanov & R. B. Myneni. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, **106**: 20069~20083.

责任编辑: 刘世荣 责任编辑: 周玉荣 刘丽娟