

河北省天然草地生物量和碳密度空间分布格局

岑宇^{1,2} 王成栋^{1,2} 张震³ 任侠⁴ 刘美珍^{1,2*} 杨帆^{1,2}

¹中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; ⁴鄂尔多斯水土保持局, 内蒙古鄂尔多斯 017010

摘要 分析不同草地类型生物量与碳密度空间分布特征及其影响因素, 揭示草地植物碳库的变化规律, 对于了解我国草地生态系统碳汇具有重要意义。2011–2013年以河北省天然草地为研究对象, 调查了不同草地类型的地上活体生物量、凋落物生物量和根系生物量以及各组分的碳密度。结果表明: 温性草原、温性草甸、温性山地草甸、低地盐化草甸、暖性草丛和暖性灌丛6种草地类型的总生物量差异显著, 其中低地盐化草甸总生物量最高, 为2 770.2 g·m⁻², 而温性草原最低, 为747.6 g·m⁻², 前者约为后者的3.7倍; 地上活体生物量最大的是低地盐化草甸, 其次是暖性灌丛和温性山地草甸, 最小的是温性草原, 分别为285.0、235.1、203.1和110.6 g·m⁻²; 凋落物生物量也是低地盐化草甸最大, 其次是温性山地草甸和温性草甸, 分别为584.0、187.9和91.0 g·m⁻²。6种草地类型的根系生物量均大于地上生物量, 是地上生物量的1.9–4.3倍, 不同草地类型根冠比的平均值为3.1; 低地盐化草甸的根系生物量最高, 为1 901.3 g·m⁻², 温性草原的根系生物量最低, 只有低地盐化草甸的1/3。在各类草地生物量碳密度方面, 低地盐化草甸的地上活体碳密度、凋落物碳密度与根系碳密度均为最大, 分别为132.7、81.2和705.9 g C·m⁻²。草地地上生物量、凋落物生物量和根系生物量以及总生物量均随海拔的升高先减少而后增加($p < 0.05$); 草地生态系统总生物量和根系生物量随大于10 °C积温的增加先降低而后升高($p < 0.01$)。该研究中暖性灌丛多分布在石质山区, 土层很薄, 植物地上生物量和根系生物量都比土层较厚的草甸草原低。可见, 在较大区域比较不同草地类型生物量时, 应综合考虑气候、土壤、地理等因素。

关键词 地上活体生物量; 凋落物生物量; 根系生物量; 碳密度; 环境因子; 天然草地

岑宇, 王成栋, 张震, 任侠, 刘美珍, 杨帆 (2018). 河北省天然草地生物量和碳密度空间分布格局. 植物生态学报, 42, 265–276. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0300

Spatial distributions of biomass and carbon density in natural grasslands of Hebei, China

CEN Yu^{1,2}, WANG Cheng-Dong^{1,2}, ZHANG Zhen³, REN Xia⁴, LIU Mei-Zhen^{1,2*}, and YANG Fan^{1,2}

¹State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ²University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; and ⁴Ordos Soil and Water Conservation Bureau, Ordos, Nei Mongol 017010, China

Abstract

Aims Grassland is an important component of the global terrestrial ecosystem and plays a significant role in the global carbon cycle. Knowledge of the spatial distribution of biomass and carbon density and their constraining environmental factors in different types of grasslands is crucial for revealing the variations of grassland carbon pool and understanding the grassland ecosystem carbon sequestration in China. The objective of this study was to determine the spatial patterns of biomass and carbon density distribution in natural grasslands of Hebei Province, China.

Methods The aboveground biomass, root biomass, litter mass, and their carbon densities were investigated in 390 grassland plots from 78 sites representative of six different types of natural grasslands based on vegetation, soil and climate from 2011 to 2013. The grassland types include temperate steppe, temperate meadow, temperate mountain meadow, low-land saline meadow, warm-temperate tussock and warm-temperate shrub tussock.

Important findings There were significant differences ($p < 0.05$) in the total biomass among the six grassland types, with the highest value of 2 770.2 g·m⁻² in the low-land saline meadow and lowest value of 747.6 g·m⁻² in the temperate steppe. The low-land saline meadow also had the highest value in the aboveground biomass (285.0 g·m⁻²), followed by the warm-temperate shrub tussock (235.1 g·m⁻²) and the temperate mountain meadow

收稿日期Received: 2015-08-14 接受日期Accepted: 2016-02-19

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0505040302)和国家自然科学基金(41371056)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA0505040302) and the National Natural Science Foundation of China (41371056).

* 通信作者Corresponding author (liumzh@ibcas.ac.cn)

(203.1 g·m⁻²); the lowest value in aboveground biomass was found in the temperate steppe (110.6 g·m⁻²). The litter mass was largest in the lowland saline meadow (584.0 g·m⁻²), followed by the temperate mountain meadow (187.9 g·m⁻²) and the warm-temperate shrub tussock (91.0 g·m⁻²). The values of root biomass were 1.9–4.3 times greater than that of aboveground biomass across the six types of grasslands, resulting in average root:shoot ratio of 3.1. The root biomass was largest in the lowland saline meadow (1 901.3 g·m⁻²), and smallest in the temperate steppe with only 1/3 of that in the former. In terms of carbon density, lowland saline meadow also displayed the largest values among all the types of grasslands. The values of carbon density in the aboveground vegetation, litter and root were respectively 132.7, 81.2, and 705.9 g C·m⁻². In all grassland types, the biomass of aboveground vegetation and root, litter mass, and total biomass decreased initially and then increased with elevation ($p < 0.05$). With the increasing accumulative temperatures >10 °C, the root biomass and the total biomass decreased initially and then increased ($p < 0.01$). In this study, the warm-temperate shrub tussock mostly distributes in the rocky mountain area where the soil layer is very thin, leading to the lower biomass relatively to the temperate meadow. Therefore, climate, soil and geographical factors should be comprehensively considered when comparing the biomass among different grassland types in large area.

Key words aboveground biomass; litter mass; root biomass; carbon density; environmental factor; natural grassland

Cen Y, Wang CD, Zhang Z, Ren X, Liu MZ, Yang F (2018). Spatial distributions of biomass and carbon density in natural grasslands of Hebei, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 265–276. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0300

草地资源是陆生生态系统的重要组成部分, 在全球陆地碳循环中起着重要作用。世界上的草地约占全球陆地面积的20%, 主要分布在各大陆内部气候干燥、降水较少的地区(Scurlock & Hall, 1998)。在中国, 草地是我国陆地上面积最大的生态系统, 主要分布在干旱、半干旱的温带地区, 是欧亚中高纬度草地生态系统的重要组成部分(陈佐忠和汪诗平, 2000), 我国的草地面积约有 $4 \times 10^8 \text{ hm}^2$ (中华人民共和国农业部兽医司和全国畜牧兽医总站, 1996), 可利用面积达 $3.1 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。草地生态系统对畜牧业的发展、生物多样性的保护、水土保持以及生态平衡的维持有重要的作用和价值(谢高地等, 2001)。

河北省的草地资源处于温带欧亚草原与森林过渡地带, 天然草地植被类型多样, 植物资源丰富, 草地畜牧业生产在当地国民经济中占有重要的地位(河北省畜牧水产局, 1990; 河北省畜牧局, 1997)。在2000年之前, 我国对天然草地利用方式多采取粗放的自然放牧方式, 由于没有监管, 大多数草地呈现中度或重度利用、轻建设、无管理的状态, 使得大部分草地出现不同程度的退化(李博, 1997; 韩永伟和高吉喜, 2005; 闫玉春和唐海萍, 2008)。河北草地也面临过度开垦、超载放牧、草地资源破坏严重等生态问题, 再加上频繁的干旱、风蚀、水蚀等自然因素的影响, 导致草地发生了不同程度的退化、沙

化及盐碱化, 降低了河北省草地资源的生产力, 严重影响了河北省草地畜牧业的健康发展和生态环境保护(Ellis, 1992; 赵雪和张强, 1997; 张培栋和介小兵, 2007; 宋理明等, 2009; 徐敏云等, 2009, 2010)。

近年来, 相关的学者已经对我国草地生物量开展了大量的研究, 对于大尺度范围内草地生物量的研究, 学者多采用遥感的方法进行。如方精云等(1996)在实测与遥感相结合的基础上, 对我国北方温带荒漠草原、温带典型草原和温带草甸草原的地上生物量进行了估算; Ni (2004a)基于草地资源清查资料和遥感数据对我国北方以上3种草地类型的地上生物量进行了估算; Piao等(2007)也通过遥感方法估算了我国草地生物量的变化。对于我国草地碳密度与碳储量的分布与变化, 不同的学者也开展了相关研究, 如Ni (2001, 2002)利用草地资源调查数据研究了中国草地的碳密度分布与碳储量; Fan等(2008)研究了我国草地地上和地下生物量的碳蓄积; Ma等(2010)研究了1982–2006年我国北方草地碳蓄积量的变化; Fang等(2010)对中国草地生物量平均碳密度进行了估算。不同的学者虽然对我国的草地生物量与碳密度进行了大量的研究, 但是由于采用的研究方法、草地类型、数据来源等的不同导致估算的结果差异较大, 尤其是缺乏基于统一的草地生态系统调查规范所获得的大量实测数据对草地生物量与碳密度的估算。本研究采用统一的样地调查法

全面分析了河北省境内不同草地类型生物量空间分布特征和碳密度变化规律, 结合海拔梯度和气候因子, 阐明影响草地生物量和碳密度变化的地理和气候因素, 揭示河北省草地植物碳密度变化规律, 为我国草地生态系统碳汇/碳源的深入研究以及系统分析草地植被在气候变化中的生态意义提供基础科学数据, 同时对于合理优化河北草地利用方式、管理利用强度以及加强生态环境保护、提高草地固碳潜力、促进草地畜牧业的可持续发展具有十分重要的意义。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

河北省是我国华北地区的腹心地带, 地处 113.45° – 119.75° E, 36.85° – 42.62° N, 全省年平均气温在 4 – 13°C 之间, 1月最低温 -14 – -2°C , 7月最高温 20 – 27°C , 年降水量 300 – 800 mm , 燕山南麓和太行山东降雨较多, 张北高原降水一般不足 400 mm , 为季风性暖温带气候, 四季分明。河北省总面积 $187\,600\text{ km}^2$, 其中平原约占 $1/3$, 山区和高原约占 $2/3$ 。天然草地总面积 $4.74 \times 10^6\text{ hm}^2$, 占全国草地面积的 1.2% , 占全省土地面积的 35.7% 左右。河北省的草地大部分分布在北部与西北山地, 其中 80.3% 的草地分布在北部的承德、张家口和保定三市, 是坝上地区、北部山地以及太行山区发展畜牧业的基地(繆应庭, 1981)。植物群落的主要优势种有羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、龙牙草(*Agrimonia pilosa*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、河蒴蒾花(*Wikstroemia chamaedaphne*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)与大针茅(*Stipa grandis*)等。

1.2 取样方法

1.2.1 样地选择

在20世纪90年代全国草地类型图和2000年土地利用图基础上, 以中国南、北草地资源调查办公室的草地分类法为依据, 结合1979–1984年河北省草地资源调查结果, 以草地类型为基本单元, 选择具有代表性的区域作为样地, 于2011–2013年进行草地调查。本实验共涉及6种草地类型, 78个取样地(图1)。6种草地类型分别为温性草原、温性草甸、温性山地草甸、低地盐化草甸、暖性草丛和暖性灌草丛。

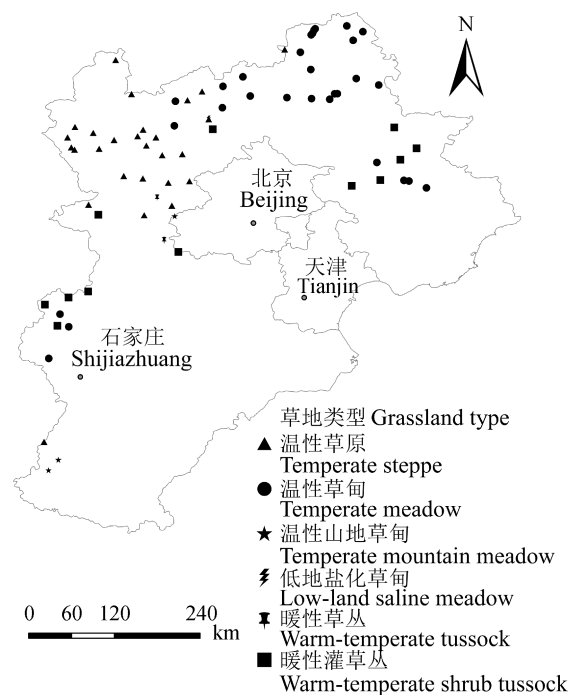


图1 实验中6种草地类型的取样地在河北省的分布情况。

Fig. 1 The distribution of sampling sites in the experiment in Hebei Province.

1.2.2 样方分布及取样原则

在设置的78个样地中, 每个样地选择一个 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的区域进行取样调查, 沿其对角线设置样线, 在样线上设置10个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的草本样方, 包括5个草本分种样方和5个草本不分种样方, 草本分种样方主要是确定不同草地类型的优势种, 草本不分种样方用于测定不同草地类型的地上活体、根系和凋落物生物量以及相应的碳含量。

1.2.3 生物量的测定

在不分种样方内, 地上活体生物量采用齐地面刈割法, 将样方内植物地面以上的所有绿色部分用剪刀齐地面剪下, 在 65°C 烘箱中烘干至恒质量, 称量, 得到地上活体生物量。凋落物生物量指的是凋落物现存量的生物量, 凋落物现存量是地面以上还没有发生明显分解的多年累积的植物死亡残体, 调查中小耙子进行收集采样, 带回实验室烘干至恒质量, 称量, 用干质量除以取样地表面积计算得到单位面积生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

根系生物量的测定采用土钻法分层取样, 根钻直径为 7 cm , 测定样方与地上部分测定的样方对应, 在5个样方中, 根系取样分为 0 – 5 、 5 – 10 、 10 – 20 、 20 – 30 、 30 – 50 、 50 – 70 和 70 – 100 cm , 共7层, 每层取5钻土壤样品, 将相同层次分别混合为一个样品, 从

各土层中钻取的土样经清水冲洗后拣出所有根系，置于65℃烘箱中烘至恒质量，称量。然后根据土钻面积和干质量换算为单位土地面积地下生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

1.2.4 碳含量测定及碳密度计算

将烘干的植物样品用球磨仪(MM400, Retsch, Haan, Germany)粉碎，用元素分析仪(VARIO EL III, Elementar, Langenfeld, Germany)测定植物样品中的总碳含量。然后根据公式计算植物地上活体、根系和凋落物生物量碳密度。植物体地上活体、根系和凋落物各部分碳密度测定估算公式为：

$$C_p = \alpha M$$

式中， C_p 为植物体碳密度($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$)； α 为生物量中总碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)； M 为地上活体部分(凋落物或根系)生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。本研究中碳含量和生物量均采用实测值。

1.3 数据处理

实验所测数据采用Excel处理后，用SPSS 14.0软件分析，用混合线性模型分析不同草地类型生物量和碳密度的差异，以及不同环境因素对生物量空间分布的影响，用最小差异法(LSD)进行多重比较，显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。用Excel绘制图表。

气象资料的获取：河北省1960–2010年各县市月平均气象数据(积温、降水量)由国家气象局提供，用于与草地生物量的回归关系分析。

2 结果

2.1 不同草地类型植物群落主要优势种

本研究区域的草地类型包括了温性草原、温性草甸、温性山地草甸、低地盐化草甸、暖性草丛和

暖性灌丛6种主要草地类型(表1)。温性草原主要分布在河北北部的张家口和承德市，植被群落主要优势种为羊草、冰草、百里香(*Thymus mongolicus*)、大针茅等。温性草甸也主要分布在河北北部的张家口和承德市，植被群落主要优势种为委陵菜、披针藁草(*Carex lancifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)等。温性山地草甸主要分布在张家口和承德市的山地，植被群落主要优势种为龙牙草、蓬子菜(*Galium verum*)、直穗披碱草(*Elymus gmelinii*)等。低地盐化草甸主要分布在张家口北部和秦皇岛市的沿海岸地带，由于海岸带盐化草甸面积较小，本次调查中未涉及海岸带盐化草地，植被群落主要优势种为叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、白花马蔺(*Iris lactea*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等。暖性草丛主要分布在河北保定市、承德市和秦皇岛市，植被群落主要优势种为阿拉伯黄背草(*Themeda triandra*)、矮蒿(*Artemisia lancea*)等。暖性灌丛主要分布在保定市和邢台市，植被群落主要优势种为胡枝子、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、金色狗尾草(*Setaria glauca*)、荆条等。

2.2 不同草地类型生物量

2.2.1 地上活体生物量

由于不同草地类型的分布地区以及土壤类型不同，河北省不同草地类型的地上活体生物量差异显著($p < 0.05$)。低地盐化草甸的平均地上活体生物量最大，为 $285.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，其次是暖性灌丛和温性山地草甸，分别为 235.1 和 $203.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，温性草原的地上活体生物量最低，为 $110.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，是低地盐化草甸的39% (图2)。但单个样地草地地上活体生物量最大值是温性山地草甸，为 $366.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表1 河北省不同草地类型的样地数和植物群落主要优势种
Table 1 Information on the number of plots and dominant species for different types of grasslands in Hebei Province

草地类型 Grassland type	样本数 Sample size	优势种 Dominant species
温性草原 Temperate steppe	30	冰草、羊草、百里香、大针茅 <i>Agropyron cristatum</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Thymus mongolicus</i> , <i>Stipa grandis</i>
温性草甸 Temperate meadow	13	委陵菜、披针藁草、地榆 <i>Potentilla chinensis</i> , <i>Carex lancifolia</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>
温性山地草甸 Temperate mountain meadow	9	龙牙草、蓬子菜、直穗披碱草 <i>Agrimonia pilosa</i> , <i>Galium verum</i> , <i>Elymus gmelinii</i>
低地盐化草甸 Low-land saline meadow	3	叉分蓼、白花马蔺、芨芨草 <i>Polygonum divaricatum</i> , <i>Iris lactea</i> , <i>Achnatherum splendens</i>
暖性草丛 Warm-temperate tussock	4	阿拉伯黄背草、矮蒿 <i>Themeda triandra</i> , <i>Artemisia lancea</i>
暖性灌丛 Warm-temperate shrub tussock	19	胡枝子、荆条、绣线菊、金色狗尾草 <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> , <i>Spiraea salicifolia</i> , <i>Setaria glauca</i>

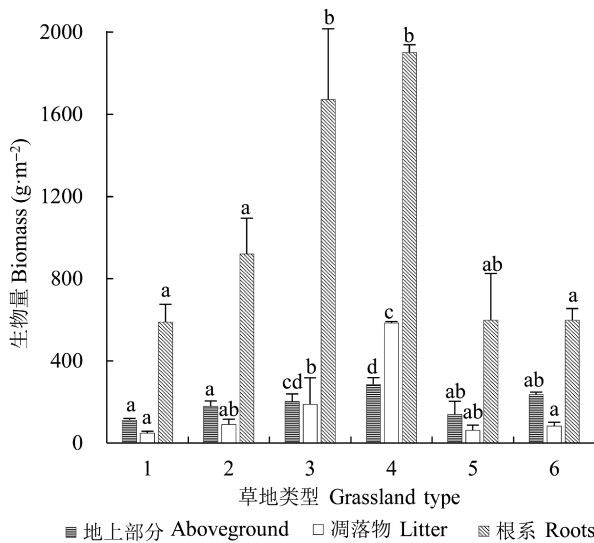


图2 不同草地类型地上活体生物量、凋落物生物量与根系生物量(平均值±标准偏差)。1, 温性草原; 2, 温性草甸; 3, 温性山地草甸; 4, 低地盐化草甸; 5, 暖性草丛; 6, 暖性灌草丛。不同的小写字母表示不同草地类型间的生物量差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 The aboveground biomass, litter mass and root biomass in different types of grasslands (mean \pm SD). 1, temperate steppe; 2, temperate meadow; 3, temperate mountain meadow; 4, low-land saline meadow; 5, warm-temperate tussock; 6, warm-temperate shrub tussock. Different lower-case letters indicate significant differences in biomass among different types of grasslands ($p < 0.05$).

2.2.2 凋落物生物量

凋落物生物量也是低地盐化草甸最大, 其次是温性山地草甸和温性草甸, 分别为584.0、187.9和91.0 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。温性草原的凋落物生物量最低, 为48.3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 低地盐化草甸的凋落物生物量约为温性草原的12倍多(图2)。

2.2.3 根系生物量

不同草地类型的根系生物量均大于地上生物量, 与地上生物量相似, 根系生物量最大值同样为低地盐化草甸, 达1 901.3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其次是温性山地草甸和温性草甸, 分别为1 671.8和920.1 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图2)。但单个样地的根系生物量最大值出现在温性山地草甸, 为2 712.7 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.3 不同草地类型生物量分配比例

河北省不同草地类型根系生物量与地上生物量各部分的分配比例不同, 其中地上生物量包括地上活体生物量与凋落物生物量两部分。不同草地类型的根系生物量均大于地上活体生物量与凋落物生物量之和, 根系生物量是地上生物量的1.9–4.3倍, 平均根冠比为3.1。6种不同草地类型中根系生物量在

总生物量中所占比例差异显著, 温性山地草甸的根系生物量分配比例最大, 达81.0%, 暖性灌草丛的分配比例最小, 为65.3%。温性山地草甸的地上活体生物量的分配比例是最小的, 为9.9%, 暖性灌草丛的分配比例最高, 达到了25.7%, 这与暖性灌草丛中具有生物量较大的灌木植物有关。对凋落物生物量而言, 分配比例最高的是低地盐化草甸, 达21.1% (图3)。

2.4 不同草地类型植被碳密度

2.4.1 地上活体碳密度

河北省不同草地类型地上活体碳密度差异显著($p < 0.05$) (图4), 最大值出现在低地盐化草甸, 温性草原地上活体植被碳密度的值最小。不同草地类型地上活体植被碳密度大小顺序为低地盐化草甸(132.7 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 暖性灌草丛(102.5 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 温性山地草甸(87.9 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 温性草甸(84.9 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 暖性草丛(60.0 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 温性草原(47.4 $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)。低地盐化草甸和暖性灌草丛的地上活体碳密度分别为温性草原的2.8倍和2.2倍, 可见草地植物群落的优势种不同, 导致草地生态系统植物地上活体碳密度值差异显著。

2.4.2 凋落物碳密度

低地盐化草甸和温性山地草甸的凋落物生物量最大, 凋落物的碳密度也最大, 两者差异不显著

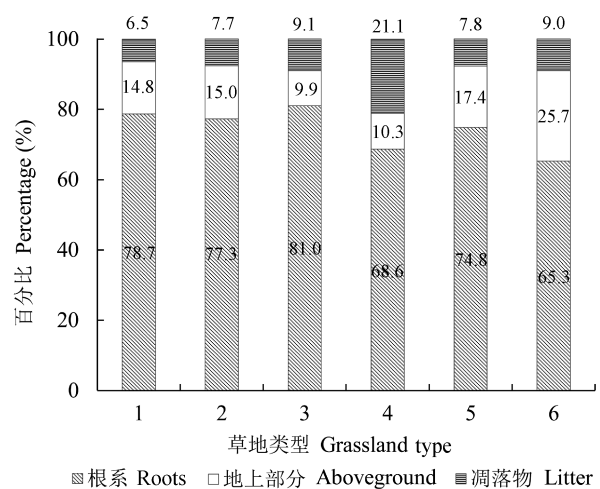


图3 不同草地类型地上活体生物量、凋落物生物量与根系生物量各部分分配比例。1, 温性草原; 2, 温性草甸; 3, 温性山地草甸; 4, 低地盐化草甸; 5, 暖性草丛; 6, 暖性灌草丛。

Fig. 3 Proportions of aboveground biomass, litter mass and root biomass in different types of grasslands. 1, temperate steppe; 2, temperate meadow; 3, temperate mountain meadow; 4, low-land saline meadow; 5, warm-temperate tussock; 6, warm-temperate shrub tussock.

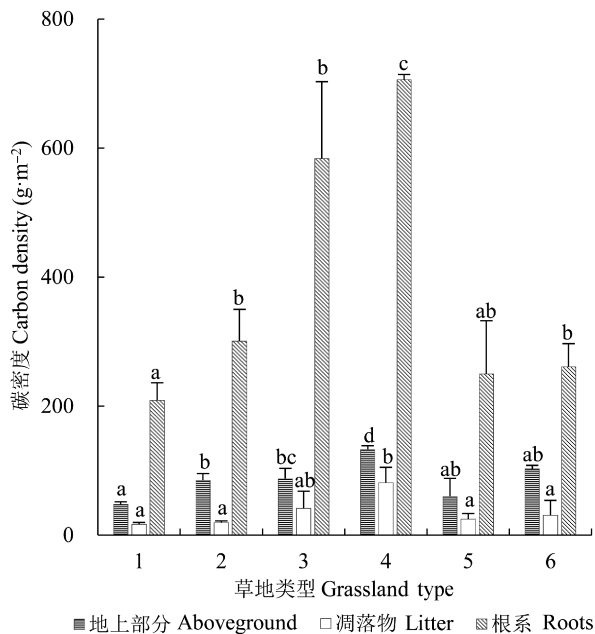


图4 不同草地类型地上活体碳密度、凋落物碳密度与根系碳密度(平均值±标准差)。1, 温性草原; 2, 温性草甸; 3, 温性山地草甸; 4, 低地盐化草甸; 5, 暖性草丛; 6, 暖性灌草丛。不同的小写字母表示不同草地类型的生物量之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Fig. 4 The aboveground carbon density, litter carbon density and root carbon density in different types of grasslands (mean \pm SD). 1, temperate steppe; 2, temperate meadow; 3, temperate mountain meadow; 4, low-land saline meadow; 5, warm-temperate tussock; 6, warm-temperate shrub tussock. Different lower-case letters indicate significant differences in carbon density among different types of grasslands ($p < 0.05$).

($p > 0.05$)(图4), 但低地盐化草甸与其他5种草地类型的凋落物碳密度差异显著($p < 0.05$), 其他5种草地类型的凋落物碳密度的差异性均不显著。6种草地类型凋落物平均碳密度大小顺序为低地盐化草甸 ($81.2 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 温性山地草甸 ($41.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 暖性灌草丛 ($30.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 暖性草丛 ($24.8 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 温性草甸 ($19.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) > 温性草原 ($16.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.4.3 根系碳密度

不同草地类型根系碳密度差异显著($p < 0.05$) (图4), 最大值出现在低地盐化草甸和温性山地草甸, 分别为705.9和583.6 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 其次是温性草甸与暖性灌草丛, 分别为300.9和261.1 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 根系碳密度值较小的是暖性草丛和温性草原, 分别是249.7和209.1 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者差异不显著。

2.5 不同草地类型植被碳密度分配比例

与草地生物量的分布格局相似, 植物体各部分碳密度在总碳密度中的分配比例不同。根系平均碳密度值远大于地上活体碳密度与凋落物碳密度, 分

别是地上活体碳密度与凋落物碳密度的2.5–6.7倍和8.5–15.5倍, 是地上部分总碳密度的2.0–4.5倍。根系碳密度在植物体中分配比例最高的是温性山地草甸, 达81.9%; 温性山地草甸的地上活体碳密度的分配比例是6种草地类型中最低的, 为12.3%。根系碳密度中分配比例最低的是暖性灌草丛, 为66.2%, 暖性灌草丛的地上活体碳密度的分配比例是6种草地类型中最高的, 为26.0%。凋落物碳密度中, 分配比例最高的是低地盐化草甸, 为8.9%; 分配比例最低的是温性草甸, 为4.8% (图5)。

2.6 生物量与环境因子的关系

2.6.1 生物量与海拔的关系

河北省草地生态系统植物总生物量和各部分生物量与海拔之间的回归关系分析结果表明, 根系生物量和植物总生物量与海拔之间的关系均达到了极显著水平($p < 0.01$)(图6), 且随海拔的变化趋势相似, 生物量随着海拔的升高先减少, 当海拔上升到一定高度时, 生物量减少到最低水平, 之后随着海拔的升高草地生物量又呈现出增加的变化趋势, 根系生物量和总生物量的最低点都出现在海拔750–800 m之间, 分别约为350和600 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。地上活体生物量和凋落物生物量与海拔之间的关系达到了显著水平($p < 0.05$), 随海拔升高先减少后增加左右, (图6), 地上活体生物量的最低值出现在海拔800 m

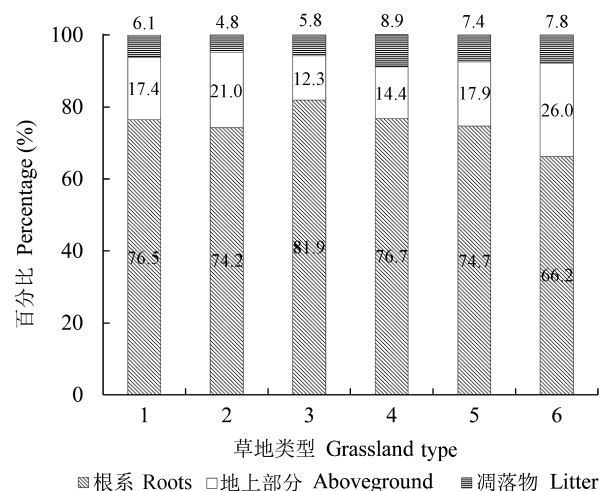


图5 不同草地类型地上活体、凋落物与根系各部分碳密度分配比例。1, 温性草原; 2, 温性草甸; 3, 温性山地草甸; 4, 低地盐化草甸; 5, 暖性草丛; 6, 暖性灌草丛。

Fig. 5 Proportions of aboveground carbon density, litter carbon density and root carbon density in different types of grasslands. 1, temperate steppe; 2, temperate meadow; 3, temperate mountain meadow; 4, low-land saline meadow; 5, warm-temperate tussock; 6, warm-temperate shrub tussock.

约为 $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;凋落物生物量的最低值出现在海拔 $1\,000 \text{ m}$ 左右, 约为 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.6.2 生物量与气候因子的关系

2.6.2.1 生物量与降水量的关系

地上活体生物量、根系生物量与总生物量都是随着年降水量的增加呈现出先增加后降低的变化趋势, 但回归关系均不显著($p > 0.05$);凋落物生物量随着年降水量的增加而增加, 但是回归关系也是不显著($p > 0.05$) (图7)。

2.6.2.2 生物量与积温的关系

在分析草地生物量与温度之间的关系中, 温度采用的是取样地区近50年以来日平均温度 10°C 以上的积温, 回归分析结果表明, 地上活体生物量、凋落物生物量、根系生物量和总生物量都是随着平均积温的增加呈现出先减少后增加的变化趋势, 但地上活体生物量和凋落物生物量与积温之间的回归关系不显著($p > 0.05$) (图8);根系生物量和总生物量与积温之间的关系达到了极显著水平($p < 0.01$)。

3 讨论

3.1 生物量与碳密度的空间分布

对于大尺度范围内草地生物量的估算, 学者多采用遥感的方法进行。基于我国第一次草地资源清查资料和遥感数据估算我国北方温带荒漠草原、温带典型草原和温带草甸草原的地上生物量分别为 45.6 、 89.0 和 $146.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (Ni, 2004a); 方精云等(1996)基于实测和遥感相结合的方法估算我国北方以上3种主要草地类型的地上生物量分别为 34.2 、 122.4 和 $135.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。导致两者估算结果不同的原因主要有两个方面, 一方面是由于不同的研究者采用的数据来源不同, 导致结果差异较大; 另一方面, 不同的学者对世界范围内的植被分类不同, 也可能引起较大的差异, 所以在比较不同草地类型植被生物量变化时需要采用统一的研究方法。本研究采用统一的草地生态系统调查规范, 获得了第一手的实测草地生物量与碳密度的数据, 所以对整个河北省草地生

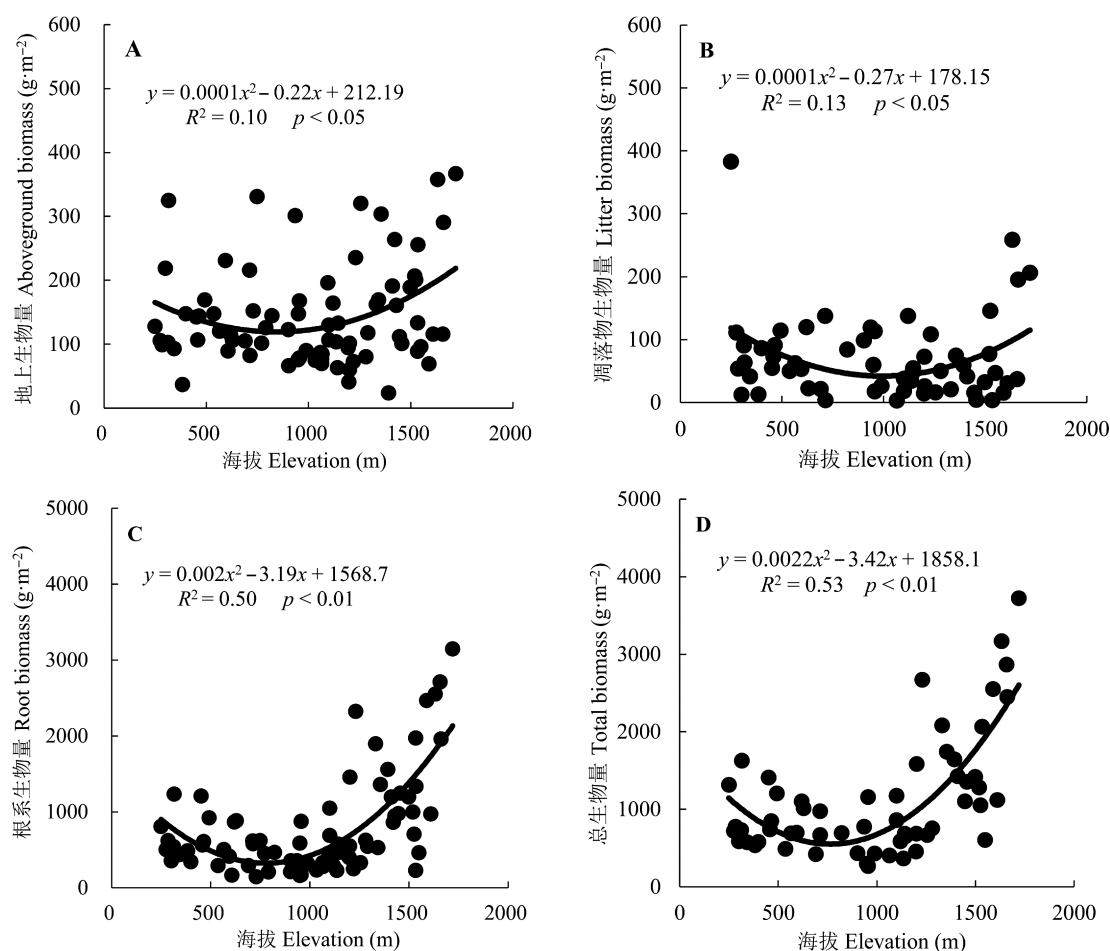


图6 草地生态系统地上生物量、凋落物生物量、根系生物量及总生物量与海拔之间的关系。

Fig. 6 Relationships of aboveground biomass, litter mass, root biomass, and total biomass with elevation in the grassland ecosystem.

DOI: 10.17521/cjpe.2015.0300

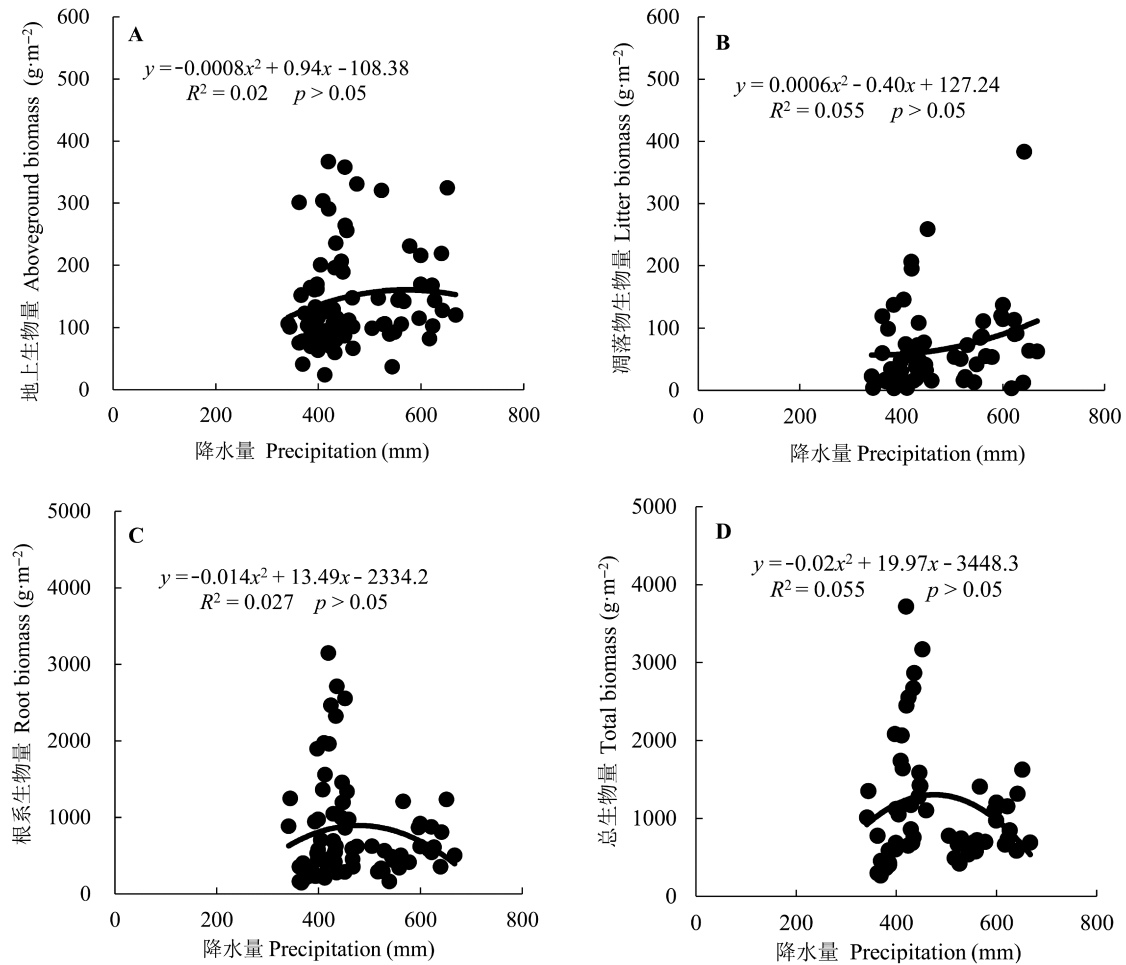


图7 草地生态系统地上生物量、凋落物生物量、根系生物量及总生物量与降水量之间的关系。降水量是取样地区的平均年降水量。

Fig. 7 Relationships of aboveground biomass, litter mass, root biomass, and total biomass with precipitation in the grassland ecosystem. Here the precipitation is the mean of the annual precipitation of all sampling sites.

态系统植被总生物量和碳密度的估算准确性很高。本研究得出河北省不同草地类型的地上生物量差异显著, 其中温带典型草原和温带草甸草原的地上生物量分别为 110.6 和 $178.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 高于遥感估算的结果。河北省6种不同草地类型植被总生物量介于 747.6 – $2770.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 其平均值为 $1414.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于20世纪80年代第一次草地普查数据全国相同草地类型的平均值 $1477.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (辛晓平等, 2009)。但是, 经过30年的草地利用, 不同草地类型植被生物量变化趋势不同, 在20世纪80年代的草地调查中, 全国温性草原、温性草甸草原和暖性草丛的平均生物量分别为 872.0 、 1579.0 和 $1643.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 均高于本研究的调查结果; 而温性山地草甸、低地盐化草甸的生物量分别为 1617.0 和 $1674.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 远低于本研究的 2062.8 和 $2770.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。不同草地类型的生物量变化趋势不同的主要原因有以下几个: 一,

经过30多年的草地利用, 河北省不同草地类型的物种组成发生了变化, 部分草地已经发生沙化、盐碱化, 导致草地生物量发生了变化; 二, 近30年间, 全球气候变化、降水分布等自然环境的改变, 形成了不同草地类型的小生物气候环境, 导致植物物种产生了与环境变化相适应的分布, 最终导致不同草地类型的生物量产生了不同的变化; 三, 人类对不同草地类型的利用强度和干扰程度不同, 以及不同草地类型对于人类活动承受能力的差异最终导致了生物量的差异。

在草地生态系统中, 地下生物量显著高于地上生物量, 本研究结果中温性典型草原和温性草甸草原的地下生物量分别为 588.7 和 $920.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 远低于Ni (2004b)通过遥感和根冠比估算的结果 1777.7 和 $2415.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Piao等(2007)根据文献得到的草原植物根冠比为 5.3 – 10.1 , 平均值为 7.7 ; Fan等(2008)报

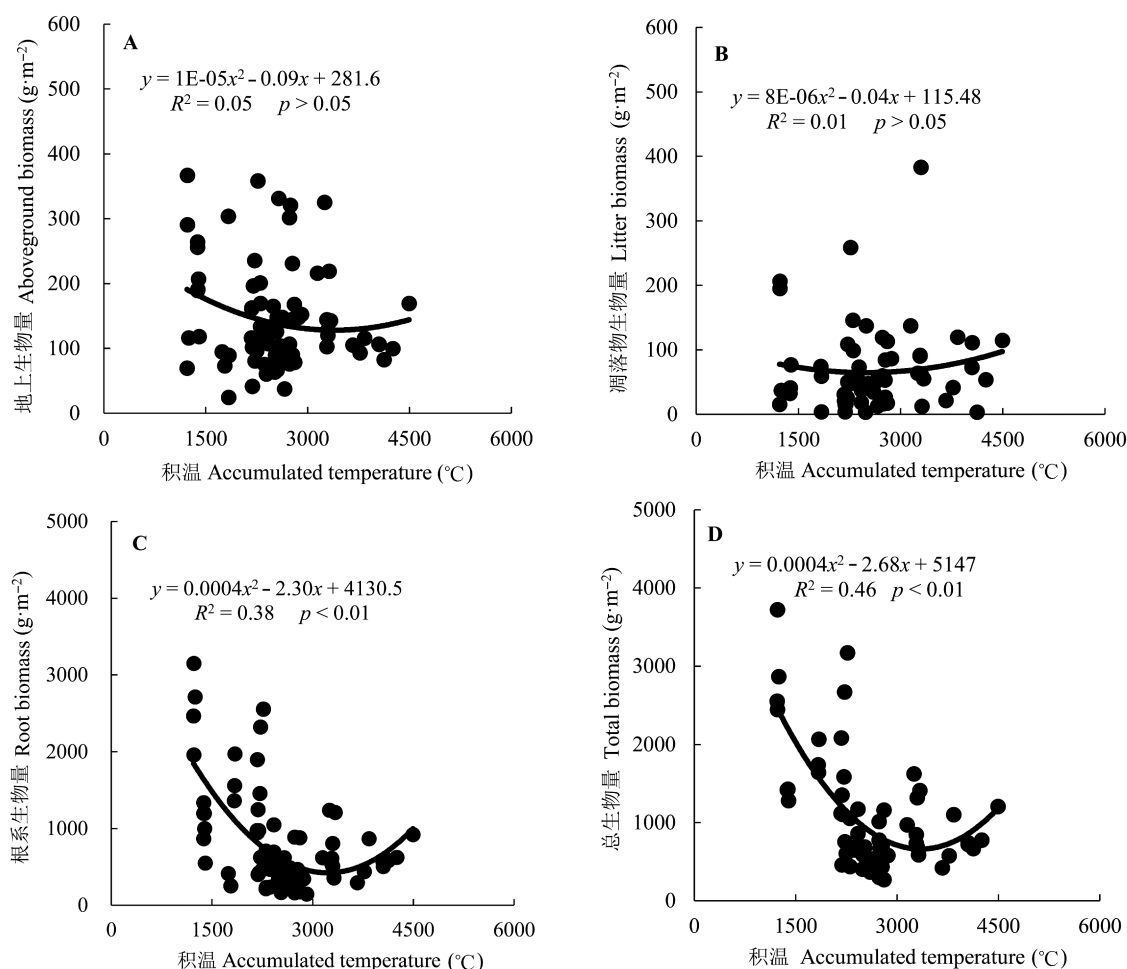


图8 草地生态系统地上生物量、凋落物生物量、根系生物量及总生物量与积温之间的关系。积温采用的是日平均温度大于10℃以上的积温。

Fig. 8 Relationships of aboveground biomass, litter mass, root biomass, and total biomass with accumulative temperature in the grassland ecosystem. The accumulative temperature is the mean of the accumulative temperatures > 10℃ of all sampling sites.

道中国北方草地的根冠比范围在2.5–52.3, 平均值为24.6; Yang等(2010)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, 为0.4–14.3, 中值为5.7; 而本研究结果表明河北省不同草地植被类型根冠比为1.9–4.3, 平均值为3.1, 低于以往的研究结果。出现这种较大变化的主要原因有两个: 一, 不同学者采用的数据来源不同, 常用的数据来源基于实测数据加上遥感估算, 而实地调查的结果经过尺度扩展放大到整个区域后, 必然造成误差增大, 导致遥感估测的数值通常偏高; 二, 本研究实地调查中地下生物量只考虑了活根的生物量, 而且地上生物量包括了半分解层和凋落物的生物量, 所以导致根冠比偏小。比较而言, 本研究通过实地调查采用的是收获法, 获得大量的第一手实测数据, 可信度更高。

河北省不同草地植被生物量碳密度差异显著, 为273.0–919.8 g C·m⁻², 平均值506.6 g C·m⁻², 高于中国草地生物量平均碳密度320.5 g C·m⁻² (Fang *et al.*, 2010)。其中低地盐化草甸的碳密度最高, 为919.8 g C·m⁻², 其次为温性山地草甸、温性草甸和暖性草草, 本研究中不同草地类型植被碳密度平均值的大小与全国和全球草地碳密度的分布规律基本一致(Ni, 2001; Lu & Sun, 2004)。青藏高原的研究表明具有灌木的草地植物地上部分碳密度最高(常天军等, 2007), 而本研究中暖性灌草丛是指矮小灌木郁闭度小于40%的草地植被群落, 因而灌木数量在草地中很少, 对暖性灌草丛地上生物量和碳密度影响较小。综合分析, 本区域影响不同草地类型植被生物量和碳密度差异的主要因素如下: 一是受不同植被类型中优势植物种类的控制, 低地盐化草甸植

物种丰富,而且生物量较大的藁草类和马蔺等占很大比例;二是低地盐化草甸中的委陵菜、藁草类植物对于草地利用中践踏的承受能力更强,加上围封禁牧更加有利于草甸草原植物群落中地榆、藁草类植物的生物量大幅度增加,从而导致生物量碳密度也增加;三是由于不同草地类型土壤质地的差异导致植物生物量差异显著,草甸类草原土壤有机质含量高,促进植物的生长,直接影响生物量和碳密度的增加。

3.2 影响草地生物量的环境因素

河北省不同草地类型的植物群落物种组成不同,这不仅是植物种对环境条件长期适应的结果,更是反映了草地的生物气候类型(杜国祯等, 2003)。草地生物量表示草地生态系统的植被生产力,所以研究草地生物量对于了解草地生态系统的结构与功能有重要的意义。诸多研究表明草地生物量主要受降水量与温度的影响(Xiao *et al.*, 1995; 马文红等, 2008; Fang *et al.*, 2010),同时也受到土壤、海拔、热量等气象因子的影响(白永飞等, 2002; 韩彬等, 2006)。本研究区域海拔梯度较大,变化范围为250–1 700 m,不同草地类型地上活体生物量、凋落物生物量、根系生物量以及总生物量与海拔之间的关系均达到显著水平($p < 0.05$),且变化趋势基本一致,都是随着海拔的升高先降低,当海拔上升到一定高度时,生物量降低到最低水平,之后随着海拔的升高草地生物量又呈现出增加的变化趋势。这种变化趋势主要是由于海拔的变化引起了温度、蒸发量及土壤等环境因子的改变,造成了不同草地类型生物量的差异,进而造成生物量碳密度的差异。本研究中草地生物量随着平均积温($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)的增加呈现出先减少后增加的变化趋势,根系生物量和总生物量与积温之间的关系达到了极显著水平($p < 0.01$),尽管地上活体生物量和凋落物生物量与积温之间的回归关系不显著($p > 0.05$)。已有研究发现气候是影响草地生物量的重要因素,尤其是地上生物量的空间变化主要受降水量控制,在对内蒙古草原的研究中发现,降水量是影响生物量分布差异的最主要的环境因素,地上、地下生物量随着年降水量的增加显著增加(马文红等, 2008);黄土高原的研究也表明草地生物量随着降水量增加而增加(邓蕾和上官周平, 2012)。但是本研究中河北省不同草地类型的地上活体生物量、根系生物量与总生物量随着

年降水量的增加而增加的变化趋势不显著($p > 0.05$)。综合分析,导致降水量对生物量影响不显著的原因可能有两点:第一,河北省属于草地与森林的过渡地带,从北部高原到南部山地的海拔变化较大,降水量变化幅度较小,为340–667 mm。降水量较大的区域,主要分布有暖性草丛和暖性灌丛,而草地生物量较大的低地盐化草甸、温性草甸草原和温性山地草甸大多分布在降水量为400–600 mm的地区。第二,本研究中降水量在500–667 mm的区域多为石质山区,土层很薄,地表30 cm以下基本为石砾,与土层较厚的草甸草原相比,植物根系生物量较小。可见,在山地草地中,积温和海拔对植物生物量积累具有显著影响。分析环境因子与草地生物量的关系,应该综合考虑气候、土壤、地理等因素。

致谢 感谢河北农业大学徐敏云、白志英在野外工作中给予的帮助。

参考文献

- Animal Husbandry and Fishery Bureau of Hebei Province (1990). *Grassland Resources in Hebei Province*. Science and Technology Press of Hebei Province, Shijiazhuang. [河北省畜牧水产局 (1990). 河北草地资源. 河北科学技术出版社, 石家庄.]
- Animal Husbandry Bureau of Hebei Province (1997). *Grassland Construction in Hebei*. Science and Technology Press of Hebei Province, Shijiazhuang. [河北省畜牧局 (1997). 河北草地建设. 河北科学技术出版社, 石家庄.]
- Bai YF, Zhang LX, Zhang Y, Chen ZZ (2002). Changes in plant functional composition along gradients of precipitation and temperature in the Xilin River basin, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 308–316. [白永飞, 张丽霞, 张炎, 陈佐忠 (2002). 内蒙古锡林河流域草原植物群落功能群植物组成沿水热梯度变化的样带研究. 植物生态学报, 26, 308–316.]
- Chang TJ, Wang JL, Li P, Cheng HH, Fang HL (2007). Carbon density and reserve of alpine grassland vegetation in northern Tibet. *Ecological Science*, 26, 437–442. [常天军, 王建林, 李鹏, 成海宏, 方华丽 (2007). 藏北高寒草地植被的碳密度与碳贮量. 生态科学, 26, 437–442.]
- Chen ZZ, Wang SP (2000). *Typical Grassland Ecosystem in China*. Science Press, Beijing. [陈佐忠, 汪诗平 (2000). 中国典型草原生态系统. 科学出版社, 北京.]
- Deng L, Shangguan ZP (2012). Distribution of natural grassland biomass and its relationship with influencing factors in Shaanxi. *Acta Prataculturae Sinica*, 20, 825–835. [邓蕾, 上官周平 (2012). 陕西省天然草地生物量空间分布格局及其影响因素. 草地学报, 20, 825–835.]
- Department of Animal Husbandry and Veterinary, the General

- Station of Animal Husbandry and Veterinary, the Ministry of Agriculture, China (1996). *Rangeland Resources of China*. China Science and Technology Press, Beijing. [中华人民共和国农业部兽医司, 全国畜牧兽医总站 (1996). 中国草地资源. 中国科学技术出版社, 北京.]
- Du GZ, Tan GL, Li ZZ, Liu ZH, Dong GS (2003). Relationship between species richness and productivity in an alpine meadow plant community. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 125–132. [杜国祯, 覃光莲, 李自珍, 刘正恒, 董高升 (2003). 高寒草甸植物群落中物种丰富度与生产力的关系研究. 植物生态学报, 27, 125–132.]
- Ellis J (1992). *Grasslands and Grassland Sciences in Northern China*. National Academy Press, Washington.
- Fan JW, Zhong HP, Warwick Harris, Yu GR, Wang SQ, Hu ZM, Yue YZ (2008). Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 86, 375–396.
- Fang JY, Liu GH, Xu SL (1996). Carbon pool of terrestrial ecosystem in China. In: Wang GC, Wen YP eds. *Greenhouse gas Concentration and Emission Monitoring and Related Processes*. China Environmental Science Press, Beijing. [方精云, 刘国华, 徐嵩龄 (1996). 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 中国环境科学出版社, 北京. 109–128.]
- Fang JY, Yang YH, Ma WH, Mohammad A, Shen HH (2010). Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China: Life Sciences*, 53, 757–765.
- Han B, Fan JW, Zhong HP (2006). Grassland biomass of communities along gradients of the Inner Mongolia grassland transect. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 553–562. [韩彬, 樊江文, 钟华平 (2006). 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, 30, 553–562.]
- Han YW, Gao JX (2005). Analysis of main ecological problems of grasslands and relevant countermeasures in China. *Research of Environmental Sciences*, 18(3), 60–62. [韩永伟, 高吉喜 (2005). 中国草地主要生态环境问题分析与防治对策. 环境科学研究, 18(3), 60–62.]
- Li B (1997). The rangeland degradation in north China and its preventive strategy. *Scientia Agricultura Sinica*, 30(6), 1–9. [李博 (1997). 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 30(6), 1–9.]
- Liao YT (1981). Grassland resources and utilization in Hebei. *Journal of Hebei Agricultural University*, 4(2), 1–11. [繆应庭 (1981). 河北草地资源与利用. 河北农业大学学报, 4(2), 1–11.]
- Lu CQ, Sun SC (2004). A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 692–703.
- Ma WH, Fang JY, Yang YH, Mohammad A (2010). Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982–2006. *Science China: Life Sciences*, 53, 841–850.
- Ma WH, Yang YH, He JS, Zeng H, Fang JY (2008). Relationship between biomass and environmental factors in temperate grassland in Inner Mongolia. *Scientia Sinica Vitae*, 38, 84–92. [马文红, 杨元合, 贺金生, 曾辉, 方精云 (2008). 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系. 中国科学: 生命科学, 38, 84–92.]
- Ni J (2001). Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Change*, 49, 339–358.
- Ni J (2002). Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 50, 205–218.
- Ni J (2004a). Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Climate Change*, 67, 237–246.
- Ni J (2004b). Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecology*, 174, 217–234.
- Piao SL, Fang JY, Zhou LM, Tan K, Tao S (2007). Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2002, DOI: 10.1029/2005GB002634.
- Scurlock JMO, Hall DO (1998). The global carbon sink: A grassland perspective. *Global Change Biology*, 4, 229–233.
- Song LM, Ma XH, Wei YL, Ma ZT, Ma FL, Wang JM (2009). Causes and countermeasures of degradation and desertification of natural meadow in Haibei District of Qinghai Province. *Pratacultural Science*, 26(7), 186–190. [宋理明, 马晓虹, 魏永林, 马忠泰, 马扶林, 王建民 (2009). 海北州天然草地退化沙化成因与对策. 草业科学, 26(7), 186–190.]
- Xiao X, Ojima DS, Parton WJ, Chen Z, Chen D (1995). Sensitivity of Inner Mongolia grasslands to climate change. *Journal of Biogeography*, 22, 643–648.
- Xie GD, Zhang YL, Lu CX, Zhen D, Cheng SK (2001). Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. *Journal of Natural Resources*, 16, 47–53. [谢高地, 张钊铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁 (2001). 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 16, 47–53.]
- Xin XP, Zhang BH, Li G, Zhang HB, Chen BR, Yang JX (2009). Variation in spatial pattern of grassland biomass in China from 1982 to 2003. *Journal of Natural Resources*, 24, 1582–1592. [辛晓平, 张保辉, 李刚, 张宏斌, 陈宝瑞, 杨桂霞 (2009). 1982–2003年中国草地生物量时空格局变化研究. 自然资源学报, 24, 1582–1592.]
- Xu MY, Li YQ, Xie F, Wang K, Yu HL, Jing FJ, Li LS, Li JX, Li XF (2010). Dynamic monitoring of grassland production in Hebei. *Acta Prataculturae Sinica*, 19(1), 211–218. [徐敏云, 李运起, 谢帆, 王堃, 于海浪, 景福军, 李连树, 李佳祥, 李雪枫 (2010). 河北省草地产量动态监测. 草业学报, 19(1), 211–218.]
- Xu MY, Li YQ, Wang K, Cao YF, Yu HL, Li XF, Li LS, Jing

- FJ, Li JX, Xie F (2009). Spatial distribution and dynamic characteristics of the grassland vegetation in Hebei. *Acta Prataculturae Sinica*, 18(6), 1–11. [徐敏云, 李运起, 王堃, 曹玉凤, 于海浪, 李雪枫, 李连树, 景福军, 李佳祥, 谢帆 (2009). 河北省草地资源分布及植被特征动态. 草业学报, 18(6), 1–11.]
- Yan YC, Tang HP (2008). Differentiation of related concepts of grassland degradation. *Acta Prataculturae Sinica*, 17(1), 93–99. [闫玉春, 唐海萍 (2008). 草地退化相关概念辨析. 草业学报, 17(1), 93–99.]
- Yang YH, Fang JY, Ma WH, Guo DL, Mohammat A (2010). Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 268–277.
- Zhang PD, Jie XB (2007). Current situation of grassland degradation and its mechanism in the upstream of Yellow River in Gansu. *Pratacultural Science*, 24(9), 1–4. [张培栋, 介小兵 (2007). 黄河上游甘肃段草地退化的现状及机理研究. 草业科学, 24(9), 1–4.]
- Zhao X, Zhang Q (1997). *Fragile Ecological Environment and Regulation of Bashang, Hebei*. China Environmental Science Press, Beijing. [赵雪, 张强 (1997). 河北坝上脆弱生态环境与整治. 中国环境科学出版社, 北京.]
- 责任编辑: 白永飞 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答