

浑善达克沙地稀树疏林草地植被生物量及净初级生产力

李刚¹, 李永康², 刘美珍², 蒋高明²

1. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100

2. 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

摘要 森林和草原等陆地生态系统在全球碳循环中扮演非常重要的角色, 而发育在半干旱地区沙地上的疏林草地植被在这方面的作用还不清楚。本文对内蒙古浑善达克沙地榆树 (*Ulmus pumila* L.) 疏林草地的生物量、生产力 (NPP) 以及降水利用效率 (RUE) 区分不同生境, 即固定沙地、半固定沙地、流动沙地、丘间低地、柳灌丛和低湿地进行了研究; 分析和比较了植被碳库及 NPP 的分配情况。结果表明, 疏林草地的平均生物量 ($21.30\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 与 NPP ($11.06\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 分别比典型草原地带的平均值高 90% 和 59%, RUE 近于后者的 2 倍, 沙地水平上的地下与地上生物量之比为 2.9, 说明大量的植被碳贮藏于地下, 沙地中乔木对生物量和 NPP 的贡献不大, 分别为 10% 和 1.3%, 但对于维持疏林草地的完整性具有重要功能。浑善达克沙地的疏林草地生态系统与地带性的典型温带草原不同, 应属于一类温带萨王那生态系统类型, 合理的管理和恢复措施将有助于其在畜牧业和碳固持方面生态系统服务功能的实现。

关键词 生物量; 净初级生产力; 降水利用效率; 沙地; 榆树

中图分类号 Q948.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.25.004

Vegetation Biomass and Net Primary Production of Sparse Forest Grassland in Hunshandake Sandland

LI Gang¹, LI Yonggeng², LIU Meizhen², JIANG Gaoming²

1. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China

2. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract Terrestrial ecosystems are playing important roles in the global carbon cycling. However, the information is still limited with regard to the semiarid sandland, comparing with the thorough studies on forest and grassland. The biomass carbon storage, Net Primary Production (NPP), and Rain Use Efficiency (RUE) of Hunshandake Sandland, a semiarid sandy region in Inner Mongolia covered with vegetation of Siberian elm (*Ulmus pumila* L.) sparse forest grassland, were estimated. Six main habitats, i.e. fixed dunes, semi-fixed dunes, shifting dunes, lowland, willow scrub, and wetland, were compared with each other to analyze the patterns of carbon storage and NPP distribution. The average biomass ($21.30\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and NPP ($11.06\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) of the sparse forest grassland are 90% and 59% higher than the mean level for the surrounding temperate grassland, respectively. Governed by the same climate, the RUE for sparse forest grassland ecosystem is almost twice than that for surrounding grassland. The ratio of below to above ground biomass is 2.9 in the sandland, the fact indicates that most of the vegetation carbon are stored in a below ground pool. Although trees are functionally critical for maintaining the integrity of sparse forest grassland, they only account for 10% and 1.3% of the biomass and NPP, respectively. The sparse forest grassland in Hunshandake Sandland should be recognized as a temperate savanna ecosystem which is distinctively different from typical temperate grassland in the same region indicated by the higher NPP and vegetation carbon storage. Well designed management and restoration efforts could potentially realize ecosystem services in both forage production and carbon sequestration.

Keywords biomass; net primary production; rain use efficiency; sandland; *Ulmus pumila* L.

收稿日期: 2011-08-03; 修回日期: 2011-08-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2007CB106804); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX2-XB2-01); 国家自然科学基金创新群体项目 (30521002)

作者简介: 李刚, 讲师, 研究方向为植被生态学和生态系统生态学, 电子信箱: ligang0320@nwsuaf.edu.cn



0 引言

全球气候变化对生态系统结构和功能等诸多方面造成的影响,已经引起科学家和民众的广泛关注。人类社会如何应用已有的知识体系积极应对或缓解全球变化造成的影响成为全人类面临的共同挑战。陆地生态系统作为生物地球化学循环的重要环节之一,具有调节大气 CO₂ 浓度的生态系统功能^[1-3]。尽管其调节机理并不完全为人类所尽知,作用程度也存在争论,但不可否认人们正在通过主动有效的陆地生态系统管理,使之成为可能的碳汇,从而达到降低大气 CO₂ 浓度的目的,而且这种方式已经成为清洁发展机制 (Clean Development Mechanism) 中的重要组成部分^[4]。值得注意的是,目前对森林和草地等主要陆地生态系统的碳循环过程研究比较深入^[4],而对于结构相对复杂,异质性较高的沙地生态系统缺乏足够的了解。这一方面可能是由于沙地生态系统通常位于干旱或半干旱地区,习惯上认为要么与周边的草地生态系统功能类似,要么就直接将它们当作荒漠生态系统对待,另一方面可能是由于沙地生态系统属于隐域生态系统,其结构和功能在区域上的意义没有引起足够的重视。

中国内蒙古自治区的浑善达克沙地就属于这样的一类隐域生态系统,它位于典型温带草地生态系统区域内,地表主要由沙土覆盖,陆地景观与典型草地或荒漠生态系统存在明显差别。受区域气候因子和隐域的沙质土壤条件的综合作用,疏林草地通常是其主要植被类型^[5-6]。由于浑善达克沙地距离北京的直线距离仅约 180km,通常被认为是近十几年来频繁侵扰首都的沙尘暴的主要沙源地,其土地退化与植被恢复尤其引起政府和民间机构的高度重视。然而,决策者和一些研究者常常将沙地与草地或者荒漠相混淆,有限和含混的认识显然不利于沙地生态系统的合理开发与保护。

中国的沙地生态系统正普遍遭受着严重的土地退化。浑善达克沙地的流动沙地在 20 世纪 50 年代仅占 2%,70 年代中期上升到 9.7%,21 世纪初则达到 15.9%^[7-8]。因此有必要尽快对此类生态系统进行细致和充分的研究,包括探明其植被生物量和净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 等一些基本特征。这些研究将有助于对沙地生态系统形成科学的认识,从而实现有效的保护和恢复。

本研究拟区分不同生境对浑善达克沙地的植被生物量和净初级生产力进行研究,并分析其不同生境、生活型以及植物器官中的分配,通过与世界不同植被类型对比,确定沙地生态系统的地位。从生物量和生产力这一侧面丰富人们对沙地生态系统结构和功能的认识,为确立稀树疏林草原在植被分类系统中的地位提供部分佐证。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

浑善达克沙地 (41°56'—44°22'N, 112°22'—117°57'E, 海拔 1100—1300m) 位于内蒙古高原东部,面积约 40800km²^[9],

属温带半干旱气候,年均温 0.5—3.5℃,年均降水量 250—400mm,年均蒸散 2000—2700mm。超过 50% 的年降水集中在 6—8 月,这也是月均温度最高的时期。主风向为偏西风,风速 3.5—5.5m·s⁻¹。土壤类型为栗钙风沙土。沙地由 6 种主要生境构成:固定沙地、半固定沙地、流动沙地、丘间低地、柳灌丛和湿地。绝对优势乔木种为沙地榆 (*Ulmus pumila* L.),呈斑块状分布在草地基质上,同时分布有灌木和半灌木,构成类似热带萨王那的景观。研究地点位于浑善达克沙地中部 2668hm² 保护地内 (42°53'—42°58'N, 116°01'—116°08'E)。

首先调查两条 5km 长,100m 宽的南北向 (基本垂直于沙梁方向) 样带,记录每 100m 区段的生境类型、植被类型以及胸径大于 5cm 的乔木的胸高直径 (D_{BH})、高度 (H)、冠径 (D_C)。除 *Malus baccata* (L.) Barkh., *Betula fruticosa* Pall. 和 *Padus racemosa* (Lam.) Gilib. 等外,绝大部分乔木为沙地榆。由于其他树种在乔木密度中所占比例低于 5%,为方便起见,在生物量和 NPP 计算中均做沙地榆处理。

1.2 榆树生物量估算

根据样带调查获得的榆树测树学指标,在固定沙地选取 10 株发育良好涵盖各径级的标准木,测得其 D_{BH} , H 和 D_C ,并分开称量树干、枝和叶的鲜重。活粗根 (直径 $d \geq 5\text{mm}$) 和小根 ($2\text{mm} < d < 5\text{mm}$) 被仔细挖出收集,清洗后称鲜重。对每一部分取样,于 85℃ 烘干至恒重,各部分的干重即可按比例求得。样株的生物量用来拟合异速生长关系模型:

$$\ln M = \ln a + b \ln D_{BH} \quad (1)$$

其中, M 为各部分生物量 (kg), D_{BH} 为胸径 (cm), a , b 为系数。拟合的各部分生物量异速生长关系模型均极显著 (表 1)。树干、枝、叶、粗根和细根的生物量即由每木胸径通过异速生长关系求得。由于出现在其他生境的榆树所占比例很小,出于经济考虑,在计算其他生境榆树生物量时仍采用固定沙地的异速生长关系模型。

表 1 榆树各部分的异速生长关系

Table 1 Regression coefficients in the equations for different biomass components

组分	$b \pm \text{S.E.}$	$\ln a \pm \text{S.E.}$	R^2_{adj}	SEE	CF
茎	2.588±0.129	-4.221±0.405	0.978***	0.183	1.017
枝	2.320±0.096	-3.456±0.299	0.985***	0.135	1.009
叶	1.760±0.119	-3.532±0.374	0.960***	0.169	1.014
粗根	2.861±0.131	-4.152±0.410	0.981***	0.185	1.017
小根	2.662±0.294	-7.154±0.921	0.900***	0.416	1.090

注: S.E. 为标准误差, R^2_{adj} 为调整的复判定系数, SEE 为标准估计误差, CF 为校正因子, *** 为 $P < 0.001$ 。

Notes: S.E. stands for standard error; R^2_{adj} stands for adjusted multiple coefficient of determination; SEE stands for standard error of estimate; CF stands for correction factor; *** stands for $P < 0.001$.



由于收集样株的全部细根($d \leq 2\text{mm}$)存在困难,且榆树的分布很稀疏,因此异速生长关系法和根钻法(soil core method)均不适用。这里采用细根和小根的比例推算林分水平细根量。用内径 8cm 的根钻以 10 棵样株为中心在互相垂直的 4 个方向上分别于距离主干 1/4, 1/2, 3/4, 和 1 倍冠径处取土芯至 1m, 每 10cm 分段。区分活/死根, 拣出全部细根和小根, 85°C 烘干称重。

1.3 柳灌丛生物量测定

浑善达克沙地是典型的坨甸相间分布格局, 大小不等的丘间低地镶嵌在沙丘之间。在丘间低地和沙丘系统的过渡地带, 地下水位较高(1—1.5m)处常有小红柳灌丛分布。在小红柳灌丛里设置 5m×5m 灌木样方 3 对。在当地生长季开始以前的 4 月份对其中 3 个灌木样方进行皆伐, 以获得最低灌木生物量。其中地下部分挖掘到 1m 深, 尽量收集全部灌木根系并用水清除根系表面泥土。地上和地下部分分别称总鲜重, 并各自从中取少量样品在 85°C 的烘箱中烘干至恒重, 然后按比例求得地上和地下生物量。同年 8 月末用同样方法收获另外 3 个样方灌木层的地上和地下部分, 求得最大生物量。

1.4 草本层生物量测定

在生物量最大月份(8 月)于固定、半固定、流动沙地上各随机选取 5 个 4m² 剪草样方, 在丘间低地、柳灌丛和湿地随机选取 5 个 1m² 剪草样方, 剪取地上部分, 地下部分用内径 8cm 根钻每 10cm 深分段取至 50cm 深处, 每样方内 3 个重复。柳灌丛和湿地未做分层处理。各部分 85°C 烘干至恒重称量。

1.5 榆树 NPP 的测定

树干、枝和粗根的 NPP 通过各自 5a 内(2000—2005 年)的生物量年均增加量求得:

$$NPP = \Delta M_i = (M_{2005,i} - M_{2000,i}) / 5 \quad (2)$$

其中, i 表示树干、枝或粗根, M_{2005} 和 M_{2000} 为各部分 2005 和 2000 年生物量。 M_{2000} 用 2000 年 D_{BH} 通过异速生长关系计算。 $D_{BH,2000}$ 用树木生长轮增量测得。选取 15 株正常生长榆树, 涵盖各径级, 在胸高处于 4 个方向用生长锥垂直钻取树芯。建立 5a 胸径增量($D_{BH,1}$, mm)和 2005 年 D_{BH} (cm)间的回归方程:

$$\begin{aligned} D_{BH,1} &= 4.0267 \ln D_{BH,2005} - 0.9948 \\ R^2_{adj} &= 0.3721 \quad P < 0.01 \quad n = 15 \end{aligned} \quad (3)$$

这样 $D_{BH,2005}$ 和 $D_{BH,1}$ 的差值即 $D_{BH,2000}$ 。

叶的 NPP 约等于其生物量。小根和细根的 NPP 用各自

的生物量与周转率求得^[10]。周转率用内生长土芯法确定^[11]。选取 10 株涵盖不同径级的榆树, 在距离主干 1/4, 1/2, 3/4 和 1 冠径处, 于 4 个方向上用内径 8cm 的根钻取土至 1m 深。用尼龙网衬于钻孔内, 将拣出全部根系后的原土壤放回, 次年同期取出, 再拣出全部根系。周转率的计算方法为 1 年内根系生长量比根系最大生物量^[12]。

乔木凋落物用 15 只随机置于 50m×50m 固定沙地样地内的 1m×1m 凋落物收集器逐月收集(2005 年 4—8 月)。叶、小枝和其他残体被分开。其他 4 种生境的乔木凋落物用各自相对于固定沙地的乔木密度按比例求得。由于实验期间未发生草食性昆虫的爆发, 草食作用未给予考虑。

1.6 柳灌丛 NPP 的测定

小红柳灌丛的地上和地下净初级生产力的计算采用各自最大生物量(B_{max})减最小生物量(B_{min})法计算。

1.7 草本层 NPP 的测定

固定、半固定和流动沙地的地上 NPP 和地下 NPP 即近似等于各自的地上或地下生物量。对于丘间低地、柳灌丛和湿地地上 NPP 可近似等于地上生物量, 而地下部分以多年生根茎为主, NPP 用最大生物量(B_{max})与最小生物量(B_{min})差值法求得。生长季开始前的 4 月, 在 3 个生境中各选 5 个 1m² 样方, 每个样方内用根钻在 3 个点上取样至 50cm 深, 拣选清洗出草本植物根系为最小地下生物量。

1.8 数据分析

在拟合异速生长关系时为了消除因变量的异方差性(heteroscedasticity)对原始数据进行了对数转换。在将预测值转换回算术结果时, 预测值乘以校正因子(Correction Factors, CF)^[13], 以消除由于对数转换带来的系统偏差。线性回归、曲线估计、模型的显著性检验以及方差分析均在 SPSS V 12.0 上完成。

对于用碳含量表示的生物量或 NPP, 通过乘以系数 2.2 转换成干物质生物量或 NPP^[14]。降水利用效率为地上部分生产力(ANPP, kg·hm⁻²·a⁻¹)与年均降水量(mm)的比值^[15]。

2 结果

2.1 植被

样带调查表明, 低地、固定沙地、半固定沙地是浑善达克沙地的主要生境类型, 低地常位于沙地之间(表 2)。所调查样

表 2 浑善达克沙地稀树疏林草地各生境的基本情况

Table 2 Attributes of the six habitats in elm sparse forest grassland of Hunshandake Sandland

生境	代表植物	盖度/%	面积比例/%	榆树数目	树密度/hm ⁻²
固定沙地	榆+小叶锦鸡儿	>40	30	706	24
半固定沙地	褐沙蒿	15—40	14	58	4
流动沙地	沙蓬+沙芥+虫实+沙鞭	<15	4	10	3
丘间低地	羊草+赖草	>60	45	62	1
湿地	芦苇	>85	1	0	0
柳灌丛	小红柳	>70	6	0	0



带内共计出现乔木 836 株。84%的乔木分布在固定沙地,这里的乔木密度也最高,而其他生境乔木稀少。浑善达克沙地的平均乔木密度为 8 株/hm²,61%的乔木胸径在 10—25cm 之间。

2.2 生物量

结合各生境的生物量和各生境的面积比例可知浑善达克沙地植被平均生物量为 21.30Mg·hm⁻²。地下部分与地上部分的比例为 2.9; 平均生物量的 10%来自于乔木层;65%来自

于低地。

6 类生境中,湿地生物量最高(66.8Mg·hm⁻²),流动沙地最低(1.01Mg·hm⁻²)。各生境中地下与地上部分的比例以丘间低地为最高,流动沙地最低(表 3)。在以根茎类禾草为优势种的湿地和低地地下生物量约为地上部分的 4.5 倍。低地生物量主要来自草本层,而在流动和固定沙地超过 50%的生物量来自乔木层。

表 3 浑善达克沙地稀树疏林草地各生境中各部分的生物量(单位:Mg·hm⁻²)

Table 3 Biomass by compartments for every habitat of Hunshandake Sandland (unit: Mg·hm⁻²)

组分	固定沙地	半固定沙地	流动沙地	丘间低地	湿地	柳灌丛	沙地平均
地上部分							
乔木生物量	2.48	0.44	0.27	0.14	—	—	0.88
灌木生物量	—	—	—	—	—	15.79	0.95
草本层生物量	2.28	1.17	0.26	5.22	13.12	4.53	3.61
地下部分							
乔木生物量	3.56	0.61	0.39	0.21	—	—	1.26
灌木生物量	—	—	—	—	—	8.8	0.53
草本层生物量	3.46	0.89	0.09	25.3	53.68	16.4	14.07
地下/地上生物量	1.47	0.93	0.91	4.76	4.09	1.24	2.92
乔/灌/草生物量分配	51/—/49	34/—/66	65/—/35	1/—/99	—/—/100	—/54/46	10/7/83
总生物量	11.78 (16.59)	3.11 (2.04)	1.01 (0.19)	30.87 (65.22)	66.8 (3.14)	45.52 (12.82)	21.30

注:括号中的数字表示各生境生物量在总生物量中的百分数。

Note: Numbers in parentheses show the percentile contribution of each habitat biomass to the total biomass.

就乔木生物量而言,除湿地和柳灌丛外,各生境中以固定沙地的乔木生物量为最高(6.04Mg·hm⁻²),丘间低地最低(0.35Mg·hm⁻²)。乔木的根冠比平均为 1.4。榆树小根中活根比例明显高于细根(图 1)。根系密度在约 55cm 深处为最高,细根活生物量在 45cm 以上高于小根,而在 45cm 以下则低于小根(图 2)。

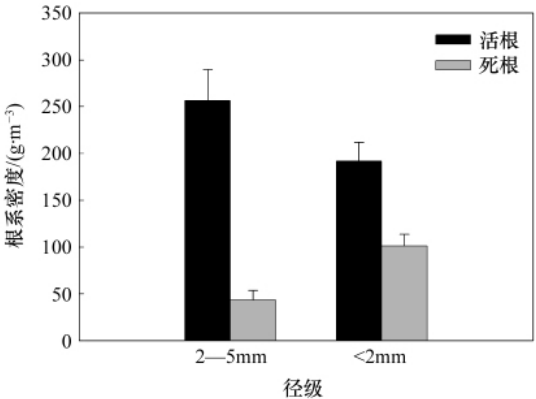


图 1 浑善达克沙地榆树小根(2mm<d≤5mm)和细根(d≤2mm)密度比例(n=10)

Fig. 1 Small (2mm<d≤5mm) and fine tree root (d≤2mm) mass densities in the soil above 1m depth near the tree stem bases (n=10)

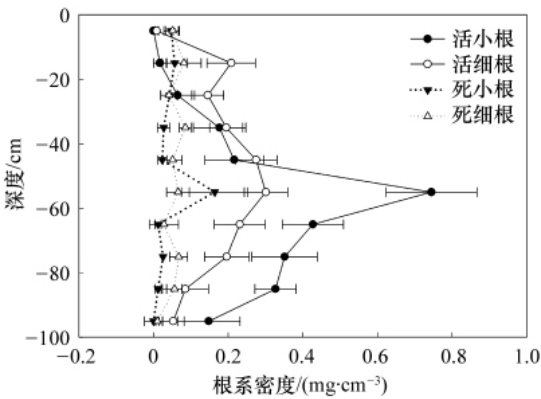


图 2 浑善达克沙地 1m 内榆树小根和细根的垂直分布(n=10)

Fig. 2 Distributions of the small and fine roots in the depth of 1m (n=10)

草本层的生物量以湿地最高(66.8Mg·hm⁻²),流动沙地最低(0.35Mg·hm⁻²)。地下与地上生物量比值平均为 3.9。地下生物量的主体分布在 30cm 以上。

2.3 NPP

榆树疏林生态系统平均净初级生产力为 11.06Mg·hm⁻²·a⁻¹。从构成上看,其中的 64%来自地下部分。乔木贡献量甚微,而以草本植物贡献为主。丘间低地的比重最大,而流动沙地最低,湿地生产力虽高,但受面积所限,在平均 NPP 中比重不大(表 4)。



表 4 浑善达克沙地稀树疏林草地各生境中各部分的 NPP (单位: $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 4 NPP based on the compartments for every habitat of Hunshandake Sandland (unit: $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

组分	固定沙地	半固定沙地	流动沙地	丘间低地	湿地	柳灌丛	沙地平均
地上部分	乔木 NPP	0.25	0.04	0.02	0.01	—	0.09
	灌木 NPP	—	—	—	—	5.66	0.34
	草本层 NPP	2.28	1.17	0.26	5.22	13.12	4.53
地下部分	乔木 NPP	0.17	0.03	0.03	<0.01	—	0.06
	灌木 NPP	—	—	—	—	2.89	0.17
	草本层 NPP	3.46	0.89	0.09	10.8	20.37	9.5
地下/地上 NPP		1.43	0.76	0.43	2.07	1.55	1.22
乔/灌/草 NPP 分配		7/—/93	3/—/97	13/—/87	1/—/99	—/—/100	—/38/62
总 NPP		6.16(16.7)	2.13(2.7)	0.4(0.1)	16.03(65.2)	33.49(3.0)	22.58(12.2)
							11.06

注:括号中的数字表示各生境 NPP 在总 NPP 中的百分数。
Note: Numbers in parentheses show the percentile contribution of each habitat NPP to the total NPP.

各生境中湿地 NPP 最高,流动沙地最低。其中固定沙地、丘间低地、湿地以及柳灌丛的地下部分都大于地上部分。流动沙地上乔木 NPP 贡献最大,但总体看 NPP 在各生境都以草本植物贡献为主。

就乔木 NPP 而言,除湿地和柳灌丛外,固定沙地最高 ($0.42\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),丘间低地最低 ($0.01\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。乔木 NPP 中地上部分的贡献占 64%。乔木小根和细根的周转率分别为 0.15 ± 0.03 和 0.24 ± 0.03 ($n=10$)。

就草本层 NPP 而言,湿地最高 ($33.49\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)而贡献不大(3.2%),其次为丘间低地 ($16.02\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)但贡献最大(69%),流动沙地的最低 ($0.35\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

2.4 降水利用效率

降水利用效率 (Rain Use Efficiency, RUE) 定义为地上 NPP($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和年均降水量(mm)之比^[15]。来自离实验区最近的正蓝旗气象站的气象数据表明,1960—1999 年,年均降水量为 370.23mm,则浑善达克沙地稀树疏林草地生态系统的 RUE 为 10.9。各生境的降水利用效率和地上 NPP 的变化趋势一致。

3 讨论

作为一类隐域生态系统,浑善达克沙地榆树疏林草地有其自身的结构和功能特点,然而长期以来缺乏对它的科学认识,在研究中常不恰当地将其归并于草原或沙漠来处理。大尺度的植被区系研究中,由于其相对较小的空间尺度,常常导致其被忽视^[16]。榆树疏林草地的生境构成以丘间低地和固定沙地、半固定沙地为主体,其他类型生境分布其间,乔木树种稀疏分布,形成类似于热带萨王那的疏林草地景观。榆树分布以固定沙地上为多,可能是由于固定沙地的植被盖度可以有效阻止榆树幼苗被完全沙埋,而且微环境适合于种子萌

发。在没有过度放牧并且先锋植物已经定居的情况下,榆树也有机会在流动沙地上出现。稀疏分布的榆树有利于在沙地中形成沃岛,促进草本植物的生长。榆树庞大的根系还可以有效固定沙丘,防止沙丘活化^[17]。

与几个温带草地生物量估计值相比较,浑善达克沙地稀树疏林草地的平均生物量比温带草地的平均生物量高 90% ($P<0.01$)(表 5)。生物量较高的原因可能在于,浑善达克地区的土壤基质环境不同于周围典型草原。受相似的气候条件控制,沙地不可能比草地获得更多的降水量,但是隐域的沙地土壤比起典型草原的栗钙土可为植被提供较好的水分条件。由于沙质土壤的持水能力小,少量降水便能渗透深层,蒸发作用使表层 10cm 左右沙土很容易干燥,但是沙质土壤颗粒间的较大孔隙又阻断了土壤水分经由毛细管作用向上的运输,从而

表 5 浑善达克沙地稀树疏林草地生物量和 NPP 与中国和世界草地情况比较
Table 5 Biomass and NPP of Hunshandake grassland sparse forest in comparison with that of China and global grassland ecosystems from different sources

生物量/($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 数据来源		净初级生产力 NPP/($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 数据来源	
21.30	本研究	11.06	本研究
5.26*	[37]	7.66*	[39]
6.94*	[23]	6.05*	[40]
16.00	[25]	6	[25]
16.2	[14]	7.8	[14]
15.4	[26]	6.6	[26]
7.5	[38]	7.5	[38]

注:* 为中国草原数据。
Note: * stands for the values of mean biomass or NPP of grasslands in China.

使进一步的蒸发难以发生,较浅深度即存在湿沙层^[18-19]。这为先鋒植物定居提供了有利条件。然而,周围典型草原的栗钙土壤在 30cm 左右深度广泛存在钙积层,土壤的保水性能被不良的水分入渗率所削弱,大部分的降水不能顺利深入土壤深层,在干燥多风的气候条件下大部分水分被蒸发了,而没有保存在土壤中发挥长效作用^[16,20-21]。此外,浑善达克地区的年最大降水月份和最高气温月份都出现在 7—8 月,这种雨热同期性对植物生长相当有利,植物可以在较短时期迅速积累生物质。总之,浑善达克沙地良好的水热条件使较高的生物量生产成为可能。因此,从生物量的角度来看,简单地将疏林草地当作草原来处理是不合适的。

榆树疏林草地不同生境的生物量差别较大,在平均生物量中的作用还取决于各自的面积权重。尽管湿地和柳灌丛的生物量很高,但是由于它们面积比例很小(共 7%),其在整个稀树疏林草地生态系统中的贡献并不大。而丘间低地占到沙地的 45%,其本身生物量又较高,可起到弥补沙丘系统生境生物量过低的作用,在整个沙地碳存储中举足轻重。浑善达克沙地丘间低地和湿地的地下与地上生物量比值较高符合草地植被根系研究结果^[22-23],由于丘间低地的面积比例也较大,因此很大程度上也决定了整个沙地大部分的植被碳被分配并储存在地下部分。

在生活型构成方面,浑善达克沙地的平均生物量主要由草本层贡献,乔木和灌丛的贡献有限。特别是在面积较大的丘间低地,榆树的贡献很小,性质上接近于草甸。虽然乔木在固定与流动沙地的生物量构成中比例较大,但在整个沙地的平均生物量中的贡献却比预期的小得多。这主要是因为面积比例最大的丘间低地中榆树的密度甚低。这表明浑善达克沙地依然带有明显的草原地域性特征。在沙地恢复的工作中要尊重自然规律,侧重草地的恢复,而不是乔木的大量栽种。但不可否认的是,在沙地草地生态系统中稀疏分布的榆树通过其广泛分布的根系在固化沙丘和防止沙丘表层活化上起到重要作用。一旦没有榆树的保护作用,固定沙丘在过度放牧后很容易活化,在冬春季的强风蚀作用下易使沙丘移动^[17]。反之,榆树的良好生长也需要草本层的保护,过度放牧后草本层的缺失使榆树根系因风蚀裸露,常致榆树死亡。

本研究也发现,与生长在湿润气候条件下的森林地上生物量占主体不同,生长在浑善达克沙地的榆树把大部分的生物量分配在地下,用以形成较浅而广泛分布的根系。沙丘生境的地下水埋藏深度要比丘间低地深,通常超过 2m。因此对生长在沙地上的榆树来说地下水并非总能获得,而这种浅而广布的根系形式显然有利于植物在地下水不可获得的时候充分利用降水和浅层的地表水。这种地下生物量的分配格局对生活在干旱与半干旱环境中的植物通过构建庞大根系获取水分具有普遍而重要的意义^[24]。而且,大部分生物量分配在根系也使得榆树成为沙区的一种很好的固沙植物。

浑善达克沙地稀树疏林草地的平均 NPP 比表 5 所列的

6 个国内外对草地生态系统研究的平均值高 59%。事实上,该稀树疏林草地的 NPP 与各主要生物群系的平均 NPP 相比已处在萨王那的水平上^[4,25-26],而且它们也确实在结构上具有相似性,都是树草共生的体系,所不同的是萨王那一般分布于热带地区,而浑善达克处在温带半干旱区。另外从浑善达克沙地的整体情况来看,仍然是草地性质为主导,乔木的密度仅为 8.36 株/hm²,尽管疏林集中分布的固定沙丘郁闭度有时可达 30%,但按照 Scholes 和 Hall 的观点,萨王那的平均乔木盖度要超过 10%^[27]。

对于陆地生态系统,水分的可获得性是限制 NPP 的主要因素之一,水分可以影响分解、氮素矿化、营养获取等和植物生长密切相关的诸多过程^[28]。目前已经有一些对世界各主要生态系统 NPP 和年降水量之间关系的整合研究^[28-32],给出了 NPP 或者地上 NPP 同年降水量间的大致图形关系,但由于信息来源有限,涵盖全球陆地各植被类型的 NPP 与降水量数学关系模型还很难准确构建。这里利用 Whittaker 和 Likens 的模型^[30]

$$y=3000(1-e^{-0.000664x}) \quad (4)$$

其中 y 为 NPP(g·m⁻²·a⁻¹), x 为年均降水量(mm)。该模型涵盖了全球从苔原到热带雨林的各主要生物群系,而且在被普遍引用和修订^[33]。应用该关系式,浑善达克地区的年均降水量(370.23mm)对应的 NPP 应该为 6.54Mg·hm⁻²·a⁻¹,实际测得的结果要明显高于此值。说明同样降水条件下,浑善达克沙地稀树疏林草地不同于该气候区下的地带性植被,而能够生产出更多干物质。

RUE 即表示生产同样多的干物质需利用降水多少的情况。浑善达克沙地的该指标反映出沙地的高降水利用特征。周围典型温带草原的情况是 19 年平均地上 NPP 为 1.77 Mg·hm⁻²·a⁻¹,年平均降水量 347mm^[21],则 RUE 为 5.1,仅略高于浑善达克沙地稀树疏林草地 RUE 的一半。与世界上 77 个干旱和半干旱地区的 RUE 研究结果相比^[34],浑善达克沙地稀树疏林草地的 RUE 比前者高 1.5 倍。这再次充分表明,在浑善达克沙地同样的降水条件下可以生产更多生物质。浑善达克沙地较高水分利用效率的原因除了和物种自身的生理生态特征有关外^[35],可能还和上述该地区特殊的隐域性沙质土壤的保水性有关。对有限降水加以有效利用也是乔木得以在草原地带分布的原因之一,尽管数量有限,生长缓慢,却足以使沙地景观有别于草原或者荒漠。

浑善达克沙地稀树疏林草地生态系统中 63% 的 NPP 分配在地下部分。由于缺少养分和土壤微生物,沙质土壤是个相对稳定的碳库^[36]。榆树的 NPP 在各个生境中都很低。其原因在于,这里的榆树本身生长缓慢,这从对它们的年轮的观察就能发现;但更主要是由于榆树在各生境的密度不高。榆树疏林草地的 NPP 主要来自其草本层,这表明草本植物是浑善达克沙地的碳固定的主体,而乔木层在景观构成上则是不可缺少的。

4 结论

通过对浑善达克沙地植被结构、生物量和净初级生产力的研究可以认为,发育在隐域沙质土壤上的榆树疏林草地具有其自身的结构和功能特征,与其周边的地带性植被,如典型草原和荒漠有着明显的区别。可以将其视为一类特殊的温带萨王那植被。人类活动容易造成疏林草地的植被破坏,而适当的保护和管理措施则有利于其自然恢复。丘间低地适合于中等强度的放牧,而在沙丘系统中应尽量控制放牧。疏林草地同时也具有较高的碳储存潜力,沙地植被的大面积恢复在一定程度上将起到碳汇的作用。

致谢 牛书丽、彭羽、高雷鸣等在实验设计和野外工作方面亦有贡献。

参考文献 (References)

- [1] Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 189-202.
- [2] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [3] Teng F, Zhang X L. Clean development mechanism practice in China: Current status and possibilities for future regime [J]. *Energy*, 2010, 35 (11): 4328-4335.
- [4] Roy J, Saugier B. Terrestrial primary productivity: Definitions and milestones [M]//Roy J, Saugier B, Mooney H A, eds. *Terrestrial Global Productivity*. San Diego: Academic Press, 2001: 1-6.
- [5] Yang X, Zhang K, Jia B, *et al.* Desertification assessment in China: An overview[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(2): 517-531.
- [6] 于顺利, 陈宏伟. 内蒙古高原温带稀树草原生态系统特征与成因[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(4): 549-554.
Yu Shunli, Chen Hongwei. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (4): 549-554.
- [7] 陈静生, 郭畜民. 内蒙古自治区小腾格里沙地自然景观 [J]. *地理学报*, 1960, 26(1): 23-34.
Chen Jingsheng, Guo Xumin. *Acta Geographica Sinica*, 1960, 26(1): 23-34.
- [8] 内蒙古气象局. 浑善达克沙地气候生态环境监测专报[R]. 2004.
Inner Mongolia Meteorological Administration. Special monitoring report on the climatic and ecological environments in Hunshandake Sandland [R]. 2004.
- [9] 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地地区土地荒漠化初步研究 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 99-103.
Liu Shulin, Wang Tao. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2004, 18 (5): 99-103.
- [10] Aber J D, Melillo J M, Nadelhoffer K J, *et al.* Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability: A comparison of two methods[J]. *Oecologia*, 1985, 66(3): 317-321.
- [11] Janssens I A, Sampson D A, Curiel-Yuste J, *et al.* The carbon cost of fine root turnover in a scots pine forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1-3): 231-240.
- [12] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems[J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [13] Sprugel D G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations [J]. *Ecology*, 1983, 64(1): 209-210.

- [14] Ajtay G L, Ketner P, Duvigneaud P. Terrestrial primary production and phytomass [M]//Bolin B, Degens E T, Kempe S, *et al.*, eds. *The Global Carbon Cycle*. Chichester: John Wiley & Sons, 1979: 129-181.
- [15] Le Houérou H N. Rain use efficiency: A unifying concept in arid-land ecology[J]. *Journal of Arid Environments*, 1984, 7(3): 213-247.
- [16] Walter H. Vegetation of the earth and ecological systems of the geo-biosphere[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1979.
- [17] 内蒙古森林编辑委员会. 内蒙古森林 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
Inner Mongolia Forest Editorial Board. Inner Mongolia forest [M]. Beijing: China Forestry Press, 1989.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil of China [M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [19] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Inner Mongolia and Ningxia Research Team of Chinese Academy of Sciences. Vegetation of Inner Mongolia [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [20] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, *et al.* Primary production of the central grassland region of the United States [J]. *Ecology*, 1988, 69(1): 40-45.
- [21] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Chen Zuozhong, Wang Shiping. Typical grassland ecosystem of China [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [22] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, *et al.* A global analysis of root distribution for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [23] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 491-498.
Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, *et al.* *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(4): 491-498.
- [24] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems[J]. *Journal of Ecology*, 2002, 90(3): 480-494.
- [25] Whittaker R H, Likens G E. The biosphere and man [M]//Lieth H, Whittaker R H, eds. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1975: 305-328.
- [26] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. The accounting of biological sinks and sources under the kyoto protocol—A step forwards or backwards for global environmental protection[M]. Bremerhaven, Germany: WBGU, 1998.
- [27] Scholes R J, Hall D O. The carbon budget of tropical savannas, woodlands and grassland [M]. //Breyer A I, Hall D O, Melillo J M, *et al.*, eds. *Global Change: Effects on Coniferous and Grasslands*, SCOPE. Vol 56. Chichester: Wiley, 1996: 69-100.
- [28] Gower S T. Productivity of terrestrial ecosystems [M]//Mooney H A, Canadell J G, eds. *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Vol 2. Chichester: John Wiley & Sons, 2002: 516-521.
- [29] Rosenzweig M L. Net primary productivity of terrestrial communities: prediction from climatological data [J]. *The American Naturalist*, 1968, 102(923): 67-74.
- [30] Whittaker R H, Likens G E. The primary production of the Biosphere [J]. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 299-369.
- [31] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production[J]. *Science*, 2001, 219(5503): 481-

- 484.
- [32] Loustau D, Bruce H, Drake B G. Water, nitrogen, rising atmospheric CO₂, and terrestrial productivity [M]//Roy J, Saugier B, Mooney H A, eds. Terrestrial Global Productivity. San Diego: Academic Press, 2001: 123-167.
- [33] Schuur E A G. Productivity and global climate revisited: The sensitivity of tropical forest growth to precipitation[J]. *Ecology*, 2003, 84(5): 1165-1170.
- [34] Le Houérou H N, Bingham R L, Skerbek W. Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands [J]. *Journal of Arid Environments*, 1988, 15(1): 1-18.
- [35] Liu M Z, Jiang G M, Li Y G, *et al.* Leaf osmotic potentials of 104 plant species in relation to habitats and plant functional types in Hunshandak Sandland, Inner Mongolia, China[J]. *Trees*, 2003, 17(6): 554-560.
- [36] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44B(2): 81-99.
- [37] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳库 [M]//王如松, 方精云, 高林, 等. 现代生态学的热点问题研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 251-277.
- Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon pools in terrestrial ecosystems in China [M]//Wang Rusong, Fang Jingyun, Gao Lin, *et al.*, eds. Hot Spots in Modern Ecology. Beijing: China Science and Technology Press, 1996: 251-277.
- [38] Saugier B, Roy J, Mooney H A. Estimations of global terrestrial productivity: Converging toward a single number[M]//Roy J, Saugier B, Mooney H A, eds. Terrestrial Global Productivity. San Diego: Academic Press, 2001: 543-557.
- [39] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372-380.
- Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, *et al.* *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 372-380.
- [40] He Y, Dan L, Dong W, *et al.* The terrestrial NPP simulations in China since last glacial maximum [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(18): 2074-2079.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“第八届轧辊学术交流会”征文

中国金属学会主办的“第八届轧辊学术交流会”将于 2011 年 11 月 1 日在北京召开。

征文范围:综合研讨分析轧辊行业发展现状;各类轧机轧辊市场分析与预测;现代化轧机用辊的材质选择和注意事项;轧辊制造技术发展走势分析;技术方面:轧辊新材料、新工艺、新技术、新产品的研发成果;轧辊加工、检测、修复等方面的新技术;管理方面,如轧辊在使用、维护、管理以及质量跟踪等方面的技术和经验。

论文截止日期:2011 年 9 月 30 日。

电 话:010-62185961。

电子信箱:zhagangxh@vip.163.com。

大会网站:http://www.csm.org.cn/news/show_news.aspx?newsId=5388。



《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以 2100 字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁,投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。