

# 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系

马文红<sup>\*</sup>, 杨元合, 贺金生, 曾辉, 方精云

① 北京大学城市与环境学院生态学系 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

② 北京大学深圳研究生院环境与城市学院, 深圳 518055

\* 联系人, E-mail: mawh@szpku.edu.cn

收稿日期: 2007-09-24; 接受日期: 2007-10-12

国家自然科学基金(批准号: 90211016, 40021101 和 30700090)资助项目

**摘要** 利用实际观测的 113 个地面数据, 估算了内蒙古温带草地地上、地下生物量的大小, 揭示了其空间分布和地下生物量的垂直分布规律, 并探讨了不同环境因素对地上、地下生物量的调控作用. 主要结果如下: (1) 3 种草地类型(荒漠草原、典型草原和草甸草原)的生物量存在显著差异; 其地上生物量分别为 56.6, 133.4 和 196.7 g/m<sup>2</sup>, 地下生物量分别为 301.0, 688.9 和 1385.2 g/m<sup>2</sup>; (2) 地上生物量和地下生物量均呈现自西南向东北增加的空间分布特征, 3 种草地具有相似的地下生物量垂直分布特征; 总体上, 温带草地表层(0~10 cm)地下生物量约占总地下生物量的一半; (3) 降水是导致内蒙古温带草地生物量空间变异的主要因子. 地下生物量的垂直分布与降水关系密切, 而受土壤质地和草地类型的影响较弱.

**关键词**  
温带草地  
地上生物量  
地下生物量  
空间分布  
垂直分布  
降水

草地是陆地上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着重要作用<sup>[1]</sup>, 尤其是其地下生物量是土壤有机碳库的重要来源<sup>[2,3]</sup>. 准确估算草地生物量大小, 揭示其地下与地上分配关系, 阐明它们与环境因子的关系对于评估其 CO<sub>2</sub> 源汇功能、预测草地生态系统与全球变化的动态关系以及草地资源的管理和合理利用具有重要意义<sup>[2~5]</sup>.

截止目前, 国内学者基于全球生物量数据库<sup>[6,7]</sup>、产草量<sup>[8,9]</sup>、遥感模型<sup>[10]</sup>以及样地调查数据<sup>[11,12]</sup>估算了我国草地生物量的大小, 并给出了其空间分布格局. 但以往的研究存在以下问题: (i) 研究方法和数据来源等方面的差异使估算结果存在很大差异. 如方精云等人<sup>[8]</sup>基于产草量数据估算的我国草地生物量为 1.02 Pg (1 Pg=10<sup>15</sup> g), 而 Ni<sup>[7]</sup>利用全球生物量数据库估算的数值达 3.06 Pg, 两者差异高达 3 倍. (ii) 以往的研究通常采用草地资源清查数据或者已经发表的生物量数据, 缺少采用统一调查方法获得的实

测数据, 尤其是缺少基于统一方法的地下生物量的实测数据, 使得人们对地下生物量的空间分布和垂直分布特征的认识仍不清楚. (iii) 我国温带草地上生物量受降水的影响较为显著<sup>[11,13]</sup>, 但地下生物量及其垂直分布格局对环境因子的响应机制仍不清楚<sup>[14]</sup>. 因此, 有必要进一步系统、深入地研究我国温带草地的生物量.

中国草地从东北平原经内蒙古高原、鄂尔多斯高原、黄土高原直达青藏高原的南缘, 绵延 4500 多公里, 南北跨越 23 个纬度, 是欧亚中高纬度草地生态系统的重要组成部分<sup>[15]</sup>. 其中天然草地总面积为 4.0×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>, 占国土面积的 40%<sup>[16]</sup>. 内蒙古草地是我国温带草地的主体, 其植被类型从东到西的变化, 实质上反映了水分梯度的变化<sup>[17]</sup>, 从而为研究温带草地的生物量格局及其控制因素提供了理想场所. 本文利用大范围的野外调查资料, 采用 GIS 空间数据处理技术和多元统计分析等手段, 试图揭示内蒙古

温带草地生物量的大小、空间分布和垂直分布规律及其与环境因子的关系。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于我国北部边陲, 地处  $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'E$ ,  $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'N$ . 研究区地形以高原为主, 由锡林郭勒高原、呼伦贝尔高原和鄂尔多斯高原等组成. 属于典型的温带大陆性季风气候: 温度呈现从西南向东北递减的趋势, 降水却呈现从西南向东北递增的趋势. 年均温为  $-5 \sim 9^{\circ}C$ , 年降水量为  $150 \sim 500 \text{ mm}^{[17]}$ . 研究区从东到西分布着草甸草原、典型草原和荒漠草原 3 种草地类型 (图 1); 相应地, 分布着黑钙土、栗钙土和棕钙土 3 种土壤类型<sup>[17]</sup>. 其中, 草甸草原集中分布在大兴安岭山麓的半湿润区, 以多年生早生、中旱生植物占优势, 主要优势植物有贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*)、线叶菊 (*Filifolium sibiricum*)、羊草 (*Leymus chinensis*); 典型草原主要由典型的旱生性多年生草本植物组成, 优势物种包括大针茅 (*S. grandis*)、克氏针茅 (*S. kryovii*)、羊草、本氏针茅 (*S. bungeana*)等; 而荒漠草原则主要由旱

生性更强的多年生矮小草本植物组成, 其主要优势种为小针茅 (*S. klemenzii*)、沙生针茅 (*S. glareosa*)、短花针茅 (*S. breviflora*)等<sup>[17]</sup>.

### 1.2 生物量调查

于 2002~2005 年在内蒙古高原共调查了 113 处样地 (图 1). 为了揭示气候、土壤等自然因素与温带草地生物量的关系, 尽量选择围栏封育或者远离公路受人类活动干扰较轻的草地群落. 每处样地设置 1 个大样方 ( $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ), 在大样方四角及中心部位各设置 1 个小样方 ( $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ). 调查每个小样方中出现的物种及其高度、盖度, 并记录样地经纬度、海拔以及土地利用程度等信息. 将 5 个小样方中的地上部分齐地面刈割, 除去黏附的土壤、砾石等杂物后全部带回实验室,  $65^{\circ}C$  条件下烘干至恒重.

此外, 在每处样地设置 3 个小样方, 用于测定地下生物量. 首先利用根钻 (直径=8 cm) 采集地下生物量 (每个样方取 3 钻, 每 10 cm 为 1 层, 取样深度视根系分布情况而定, 一般在 50~60 cm, 同层样品混合在一起), 然后将土样置于沙网 (0.5 mm) 中用水冲洗, 装入冰盒带回实验室, 并挑选其中的活体部分, 最后将其在  $65^{\circ}C$  条件下烘干至恒重. 其中, 2002 年采

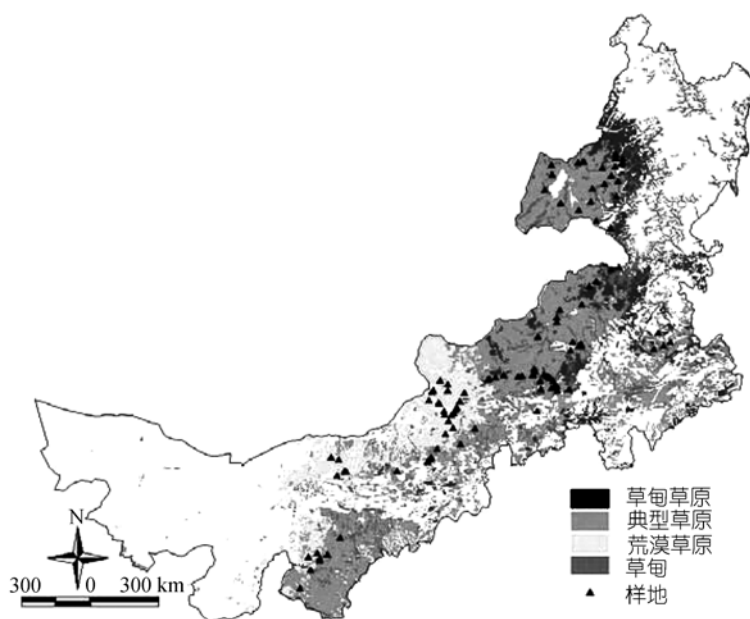


图 1 样地分布示意图

集的 16 个样地通过挖掘法测定地下生物量, 即首先在沿样地对角线的 3 个样方内分别挖 0.5 m×0.5 m×0.5 m 的土块, 然后将土块置于沙网 (0.5 mm) 中用水冲洗, 装入冰盒带回实验室, 并挑选其中的活体部分, 最后将其在 65℃ 条件下烘干至恒重。

### 1.3 数据处理

(1) 生物量及其空间分布: 对 5 个小样方的地上生物量求平均, 得到每处样地的地上生物量, 在此基础上得到 3 种草地 (荒漠草原、典型草原和草甸草原) 地上生物量的平均值和范围。对于地下生物量, 把 3 个样方的植物根系量换算成单位面积的地下生物量, 在此基础上取平均值, 得到每个样地的地下生物量。草地分布数据源自 1:100 万中国植被图<sup>[18]</sup>。按照 1:100 万中国植被图中的草地类型划分标准, 将野外调查的 113 个样地划分为 15 个草地亚类, 在此基础上给出了生物量的空间分布。根据 Kolmogorov-Smirnov 检验, 发现生物量 (地上、地下) 数据符合对数正态分布 ( $P>0.05$ )。因此, 首先对生物量数据做对数变换, 在此基础上进行统计分析。通过 ANOVA (Turkey-HSD 检验) 分析来比较不同草地类型生物量的差异; 利用 GLM (general linear model) 模型来分析不同环境因素对生物量空间分布和垂直分布的影响。上述分析均在统计软件 R 下完成<sup>[19]</sup>。

(2) 地下生物量的垂直分布: 为了定量表达地下生物量的垂直分布, 我们将土壤剖面划分为 5 层 (0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm), 并分别计算每层地下生物量所占的百分比。采用 0~10 cm 地下生物量占其总量 (0~50 cm) 的比例来反映地下生物量分布的集中程度, 若 0~10 cm 占的比例越高, 意味着地下生物量分布越浅, 反之越深<sup>[20]</sup>。需要指出的是,

在上述计算中排除了通过挖掘法取样的样地 (挖掘法没有分层测定地下生物量, 因此不能定量表示其垂直分布), 同时也排除了取样层数少于 5 层的样地。

(3) 气候和质地数据: 对全国 670 个标准气象台站 1970~1999 年间的月均温和月降水进行 Kriging 插值, 然后根据样地的经纬度从插值结果中提取样地的月均温和月降水数据, 30 年的平均值作为该地的温度和降水数据。在此基础上, 计算每处样地的年均温和年降水量。土壤质地数据源自 1:1400 万《中国土壤质地图》<sup>[21]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 生物量的大小

表 1 给出了内蒙古温带草地的生物量。从表中可以看出, 不同草地的生物量存在显著差异。草甸草原的生物量最大, 其地上生物量和地下生物量分别为 196.7 和 1385.2 g/m<sup>2</sup>; 荒漠草原的生物量最小, 其地上生物量和地下生物量分别为 56.6 和 301.0 g/m<sup>2</sup>; 典型草原的生物量居中, 其地上生物量和地下生物量分别为 133.4 和 688.9 g/m<sup>2</sup>。总体上, 内蒙古温带草地的地上生物量为 135.3 g/m<sup>2</sup>, 地下生物量为 775.2 g/m<sup>2</sup>。

### 2.2 生物量的分布

图 2 显示了内蒙古温带草地生物量的空间分布格局及其与温度和降水空间分布上的关系。从图中可以看出, 自西南向东北地上生物量和地下生物量均呈增加趋势。具体来讲, 研究区西部的地上生物量小于 100 g/m<sup>2</sup>, 中部处于 100~200 g/m<sup>2</sup> 之间, 而东部则高达 200 g/m<sup>2</sup> 以上; 研究区西部的地下生物量小于 500 g/m<sup>2</sup>, 中部处于 500~1000 g/m<sup>2</sup> 之间, 而东部则高达 1000 g/m<sup>2</sup> 以上。地上和地下生物量的空间分布

表 1 内蒙古温带草地生物量<sup>a)</sup>

草地类型	地上生物量/g · m <sup>-2</sup>			地下生物量/g · m <sup>-2</sup>		
	样本量	平均值	范围	样本量	平均值	范围
荒漠草原	40	56.6 <sup>a</sup>	9.5~175.1	37	301.0 <sup>a</sup>	77.2~749.0
典型草原	55	133.4 <sup>b</sup>	17.0~310.1	50	688.9 <sup>b</sup>	134.0~1615.7
草甸草原	18	196.7 <sup>c</sup>	68.3~358.4	14	1385.2 <sup>c</sup>	304.3~2727.7
合计	113	135.3	9.5~358.4	101	775.2	77.2~2727.7

a) 同列数据右上标字母相同示不同草地类型差异不显著 ( $P>0.05$ ), 字母不同示差异显著 ( $P<0.05$ )

特征与研究区水分自西南向东北递增的趋势一致(图 2(a), (c)), 而与温度则呈现相反格局(图 2(b), (d)).

图 3 给出了内蒙古温带草地地下生物量的垂直分布格局. 从图中可以看出, 温带草地表层 (0~10 cm) 地下生物量约占其总地下生物量的 50%, 3 种草地(荒漠草原、典型草原和草甸草原)地下生物量的垂直分布没有显著差异 ( $P>0.05$ ).

### 2.3 生物量与环境因子的关系

从 GLM 模型(表 2)和简单回归分析(图 4)可以看出, 在整个研究区内, 降水是生物量空间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的增加显著增加 ( $AGB=5.9182e^{0.0094*AP}(R^2=0.57, P<0.01)$ ;  $BGB=58.368e^{0.0075*AP}(R^2=0.45, P<0.01)$ ), 降水解释了

地上生物量 43.2%~56.6%、地下生物量 28.2%~44.7% 的空间变异; 但随着温度升高, 地上、地下生物量显著降低(图 4(b), (d)), 温度分别可以解释地上、地下生物量 13.4%和 17.2%的变异. 当控制温度和降水的影响后, 草地类型的差异和土壤质地的差异对地上生物量的作用较弱(表 2). 总体上, GLM 模型的解释率并不高, 仅能分别解释地上生物量和地下生物量变异的 57.5%和 51%. 地下生物量的垂直分布与降水关系密切, 但受土壤质地和草地类型的影响较弱.

## 3 讨论

### 3.1 生物量估算值的比较

温带草地是世界植被的重要组成部分, 主要分布在北美、南美、亚洲以及欧洲等地区<sup>[22]</sup>. 表 3 给出

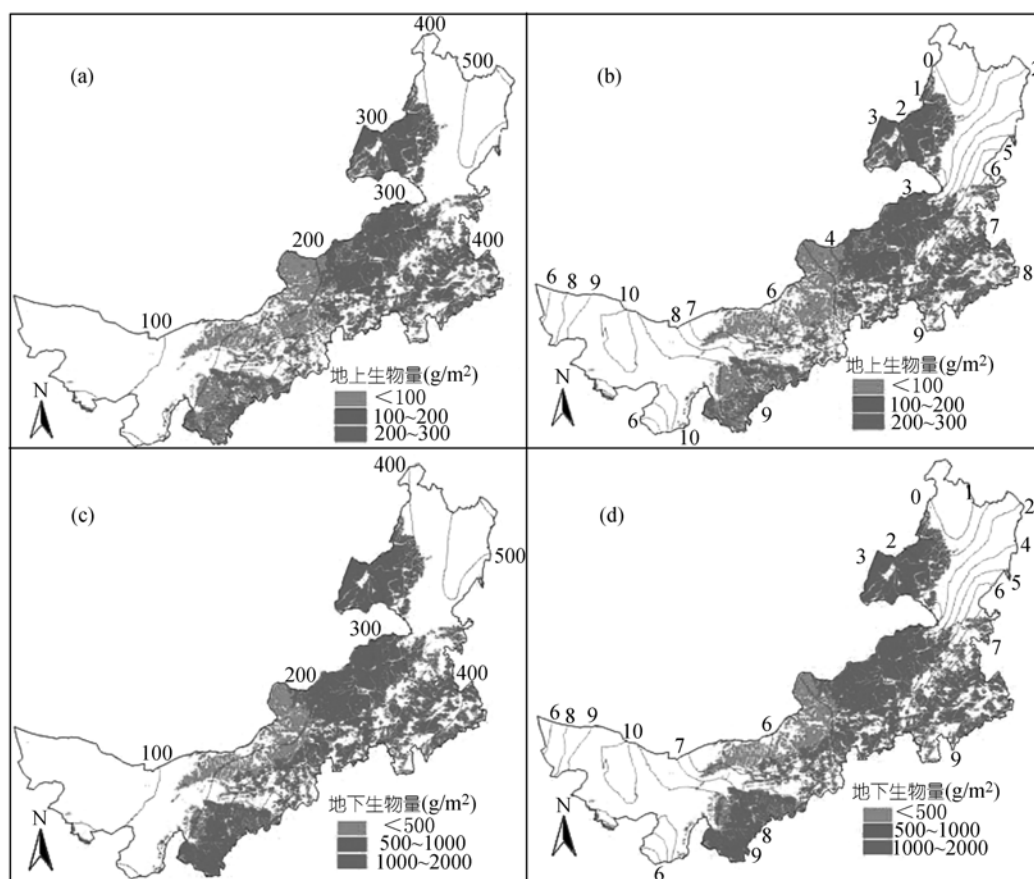


图 2 内蒙古温带草地生物量沿着等雨线 ((a), (c)) 和等温线((b), (d))的空间分布示意图

(a)和(b)示地上生物量; (c)和(d)示地下生物量

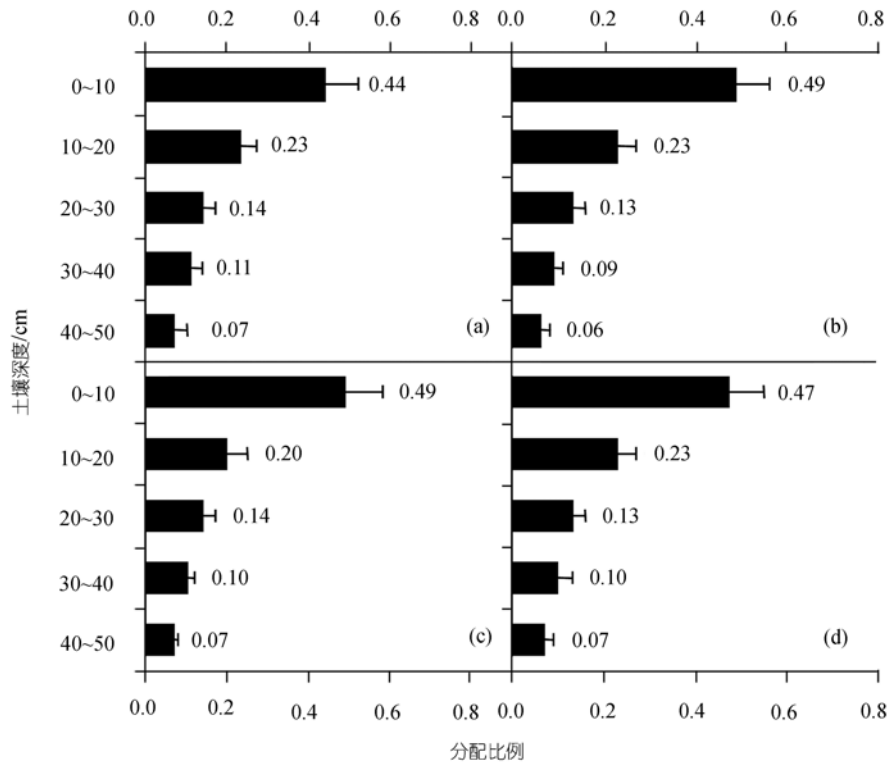


图3 内蒙古温带草地地下生物量的垂直分布  
(a) 荒漠草原; (b) 典型草原; (c) 草甸草原; (d) 全部数据

表2 不同环境因子对内蒙古温带草地生物量变异的解释率<sup>a)</sup>

变异来源	自由度	均方差	解释率/%	变异来源	自由度	均方差	解释率/%
地上生物量				地上生物量			
年均温	1	9.9	13.4**	年降水	1	42.0	56.6**
年降水	1	32.1	43.2**	年均温	1	0.0	0.0
草地类型	2	0.3	0.8	草地类型	2	0.3	0.8
土壤质地	1	0.0	0.0	土壤质地	1	0.0	0.0
残差	107	0.3	42.5	残差	107	0.3	42.5
地下生物量				地下生物量			
年均温	1	9.5	17.2**	年降水	1	24.8	44.7**
年降水	1	15.6	28.2**	年均温	1	0.4	0.7
草地类型	2	1.5	5.4**	草地类型	2	1.5	5.4**
土壤质地	1	0.1	0.3	土壤质地	1	0.1	0.3
残差	95	0.3	49.0	残差	95	0.3	49.0
垂直分布 <sup>b)</sup>				垂直分布 <sup>b)</sup>			
年均温	1	0.009	2.5	年降水	1	0.038	10.9*
年降水	1	0.030	8.4*	年均温	1	0.000	0.1
草地类型	2	0.002	1.0	草地类型	2	0.002	1.0
土壤质地	1	0.010	2.9	土壤质地	1	0.010	2.9
残差	54	0.006	85.2	残差	54	0.006	85.2

a) \*\*示  $P < 0.01$ , \*示  $P < 0.05$ , b) 示表层(0~10 cm)地下生物量占其总量(0~50 cm)的比例

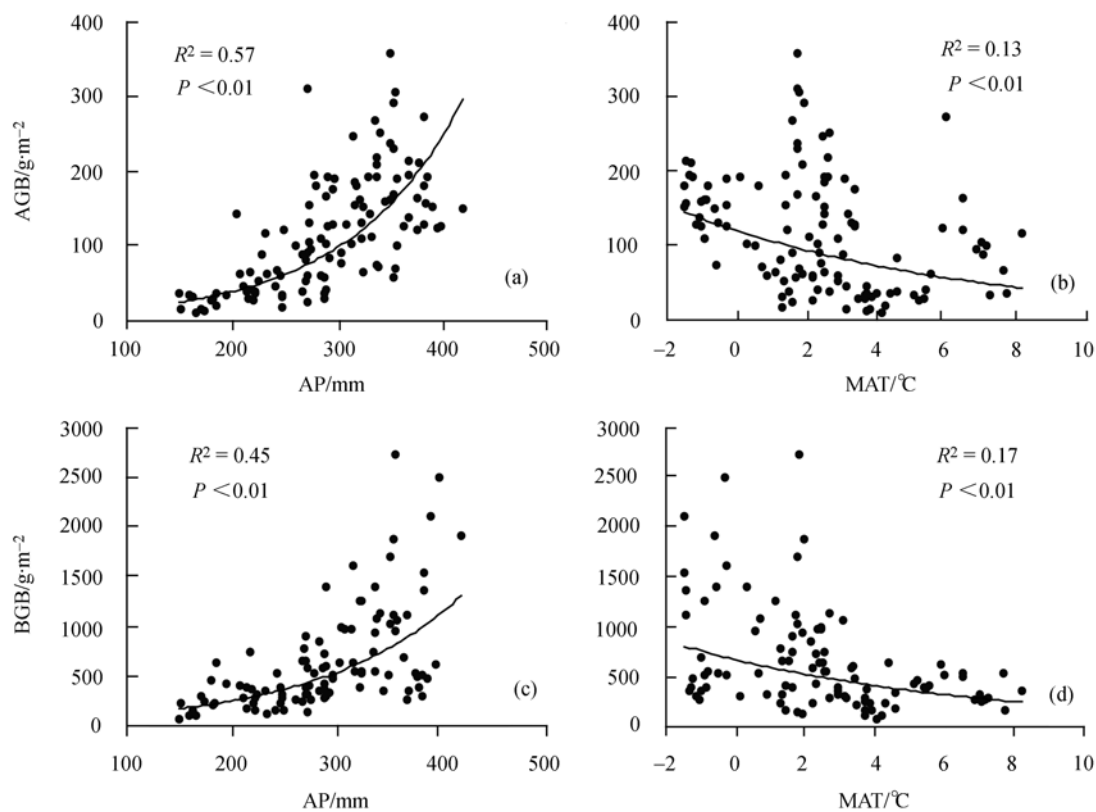


图 4 地上和地下生物量随年降水和年均温的指数函数关系

了内蒙古温带草地与全球其他地区温带草地的生物量比较。从表中可以看出，内蒙古温带草地生物量低于北美、欧洲以及全球水平，这不仅与我国北方干旱的气候有关（如表 3 所示，全球其他温带草地分布区的降水量高于内蒙古），还可能与研究区长期强烈的人为活动有关<sup>[15]</sup>。

近年来，国内学者用各种方法估算了我国温带草地的地上生产力，但不同的研究结果存在一定差异，如方精云等人<sup>[8]</sup>基于产草量估算的我国荒漠草原、典型草原和草甸草原的地上生物量分别为 34.2、

135.1 和 122.4 g/m<sup>2</sup>；Ni<sup>[9]</sup>基于草地清查资料估算的结果 3 种草原的地上生物量分别为 45.6, 89.0 和 146.5 g/m<sup>2</sup>；我们前期的工作<sup>[12]</sup>也报道了我国北方温带草地群落的地上生物量（荒漠草原 77.2 g/m<sup>2</sup>，典型草原 105.3 g/m<sup>2</sup>，草甸草原 113.0 g/m<sup>2</sup>）。与前人的研究相比，本研究估算的内蒙古温带草地生物量较高（荒漠草原 56.6 g/m<sup>2</sup>，典型草原 133.4 g/m<sup>2</sup> 和草甸草原 196.7 g/m<sup>2</sup>）。上述差异可能源自以下两方面：首先，不同的数据源可能导致一定差异；如马文红等人<sup>[12]</sup>基于 219 个样地数据分析了我国北方温带地区的地

表 3 内蒙古与其他地区温带草地生物量的比较

	地上生物量/g · m <sup>-2</sup>	地下生物量/g · m <sup>-2</sup>	年降水量/mm
欧洲 <sup>[23]</sup>	377.0	1903.8	629.0
北美 <sup>[23]</sup>	207.8	1469.6	488.0
全球 <sup>[2]</sup>	378.4	1400.0	550.0
内蒙古	135.3	775.2	310.2

上生物量和物种多样性的关系, 所用数据包括更多的草地群落, 还包括部分受人类活动中度或轻度干扰的样地, 而本文仅选用了在基于统一方法、同时测量了地上和地下生物量、且受人类活动干扰较小的数据; 其次, 研究范围不同, 以往的研究还包括中国其他地区的温带草地, 而本研究只涉及内蒙古温带草原地区, 因此, 不同研究估算的结果有一定差异。

荒漠草原、典型草原和草甸草原的地下生物量分别为 301.0, 688.9 和 1385.2  $\text{g/m}^2$ , 这与方精云等人<sup>[8]</sup>基于 R:S 比估算的结果 (荒漠草原 855.0  $\text{g/m}^2$ , 典型草原 553.9  $\text{g/m}^2$ , 草甸草原 643.8  $\text{g/m}^2$ ) 差异较大。尤其是荒漠草原, 方精云等人<sup>[8]</sup>估算的 855.0  $\text{g/m}^2$  远高于我们的 301.0  $\text{g/m}^2$ , 这与他们使用的 R:S 比过大 (荒漠草原: 25.0) 有关。另外, 我们的地下生物量远低于 Ni<sup>[11]</sup> 的估算结果 (荒漠草原 1038.8  $\text{g/m}^2$ , 典型草原 1777.7  $\text{g/m}^2$ , 草甸草原 2415.7  $\text{g/m}^2$ ), 甚至不到其估算值的一半。这可能是因为, 早期的根系研究大多没有区分活根和死根, 进而使得其估算结果偏大。

高质量的生物量数据集有助于模型的参数化, 也有助于不同模型之间的比较<sup>[1]</sup>。和前人的结果对比表明, 过去的研究可能高估了我国温带草地生物量, 尤其高估了地下生物量。将来的研究需要更多的地下生物量实测数据 (例如, 应包括青藏高原、新疆等地区的草地生物量数据), 以降低草地生物量估算中的不确定性, 并为模型研究提供可靠的参数。

### 3.2 生物量的垂直分布

根系是连接生态系统地上与地下过程的纽带<sup>[24]</sup>, 准确认识其垂直分布对于理解和预测生态系统功能具有重要意义<sup>[2]</sup>。内蒙古温带草地表层 (0~10 cm) 地下生物量占其总地下生物量的 47%, 这与 Jackson 等人<sup>[2]</sup>在全球尺度上得到的温带草地根系垂直分布基本一致 (0~10 cm 地下生物量占其总地下生物量的 44%), 也与 Schenk 等人<sup>[3]</sup>在全球尺度上得到的普列利 (Prairie) 草地根系垂直分布接近 ( $D_{50} = 7\text{cm}$ , 其中  $D_{50}$  为 50% 的地下生物量所对应的分布深度)。3 种草地 (荒漠草原、典型草原和草甸草原) 地下生物量的垂直分布没有显著差异, 这意味着草地类型对地下生物量的垂直分布影响不大。最近的研究表明, 3 种草地的 R:S 比也没有显著差异<sup>[25]</sup>。由此可见, 3 种草

地具有相似的生物量分配格局 (即相似的 R:S 比和相似的根系垂直分布)。Jackson 等人<sup>[2]</sup>利用已发表的 250 个地下生物量的研究结果, 对比了不同植被功能型的地下生物量的垂直分布格局。结果显示, 灌丛的地下生物量分布最深, 草地的地下生物量分布最浅, 而森林介于两者之间。Schenk 等人<sup>[3]</sup>基于文献中记录的 475 个剖面数据, 研究了全球不同植被类型的地下生物量的垂直分布特征。结果表明, 寒温带森林和暖温带森林的地下生物量的垂直分布特征相似。从上述研究可以做出推论, 不同植被功能型 (乔木、灌丛、草本) 的地下生物量的垂直分布特征存在差异, 但不同植被类型可能具有相似的地下生物量垂直分布格局。将来的研究需要进一步验证这个推论, 如在青藏高原高寒草地之间 (高寒草原、高寒草甸) 是否具有相似的根系垂直分布; 温性草地和高寒草地之间是否具有相似的根系垂直分布。

### 3.3 生物量的控制因子

气候是草地地上生物量的重要影响因素<sup>[4,13,26~28]</sup>。地上生物量的空间变化主要受降水控制, 这与北美<sup>[26]</sup>、南美<sup>[28]</sup>等地区得出的结论一致。最新的研究也显示, 降水是中国北方温带草地生态系统生产力 (地上生物量) 最主要的限制因子<sup>[11,29,30]</sup>, 但在本研究中, GLM 模型总体解释率不到 60%, 这意味着地上生物量还受其他因素的影响, 如养分可利用性<sup>[31,32]</sup>、放牧<sup>[15]</sup>等因素。

地下生物量占草地总生物量的 80% 以上, 是草地土壤碳库的最主要输入源, 在草地碳循环中起着关键作用<sup>[33,34]</sup>。Sala 等人<sup>[22]</sup>在美洲草地的研究显示, 年均温解释了地下生物量空间变异的 74%。而我们的研究却表明, 降水能够解释地下生物量 19.2%~34.5% 的空间变异, 温度可以解释地下生物量 1.6%~19.2% 的变异。3 种草地相似的 R:S 比<sup>[25]</sup>使得温带草地地上、地下生物量的空间分布格局基本一致 (图 2)。因此, 地下生物量与气候因子的关系可能与气候对地上生物量的直接影响有关。

气候、土壤和植被共同决定了地下生物量的垂直分布<sup>[5,35]</sup>。具体来讲, 水分状况的好坏能够影响地下生物量的垂直分布, 如干旱地区植被的地下生物量

分布较深, 而湿润地区植被的地下生物量分布较浅<sup>[5,35]</sup>; 土壤质地也能影响其垂直分布, 如沙质土壤中植被的地下生物量分布较深, 而壤质土壤中植被的地下生物量分布较浅<sup>[5,35]</sup>; 不同植被功能型 (乔木、灌丛、草本) 的地下生物量的垂直分布不同<sup>[2]</sup>. 内蒙古温带草地地下生物量的垂直分布和年降水量显著相关

(表 2), 这与 Schenk 等人<sup>[35]</sup>在全球尺度得出的结论一致; 但我们没有观察到土壤质地和草地类型对地下生物量垂直分布的影响, 这可能与研究区土壤质地和草地类型差异不够大有关. 因此, 将来的研究需要在更大的空间尺度上进行, 若包括高寒草甸、高寒草原等草地类型, 可能会观察到更有意义的结果.

致谢 北京大学任艳林、王志恒、林鑫以及内蒙古大学的刘钟龄先生、朱宗元、梁存柱以及赵利清老师共同参加了野外考察. 在此表示感谢!

## 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 Biol*, 2002, 8 (8): 736—753
- 2 Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389—411
- 3 Schenk H J, Jackson R B. The biogeography of roots. *Ecol Monogr*, 2002, 72 (3), 311—328
- 4 Jobbágy E G, Sala O E. Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian steppe. *Ecol Appl*, 2000, 10 (2): 541—549
- 5 Garnett M H, Ineson P, Stevenson A C, et al. Terrestrial organic carbon storage in a British moorland. *Global Change Biol*, 2001, 7 (4): 375—388
- 6 Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different resolutions and their responses to climate change. *Clim Change*, 2001, 49 (3): 339—358
- 7 Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *J Arid Environ*, 2002, 50 (2): 205—218
- 8 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞, 编著. 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
- 9 Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Clim Change*, 2004a, 67 (2-3): 237—246
- 10 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
- 11 Ni J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecol*, 2004, 174 (2): 217—234
- 12 马文红, 方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系. *生物多样性*, 2006, 14(1): 21—28.
- 13 Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(9): 181—184
- 14 胡中民, 樊江文, 钟华平, 等. 中国草地地下生物量研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1095—1101
- 15 陈佐忠, 汪诗平等编著. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000
- 16 廖国藩, 贾幼陵. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996
- 17 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985
- 18 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001
- 19 R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2005, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- 20 Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Appl*, 2000, 10 (2): 423—436
- 21 邓时琴. 中国土壤质地图. 见: 中国科学院南京土壤研究所编, 中国土壤地图集. 北京: 地图出版社, 1986
- 22 Sala O E, Lauenroth W K, Burke I C. Carbon budgets of temperate grasslands and the effect of global change. In: Breyer A I, Hall O E, Melillo J M, et al, eds. *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. New York: John Wiley & Sons Ltd,



1996

- 23 Coupland R T. Grassland ecosystems of the world: Analysis of grasslands and their uses. New York: Cambridge University Press, 1979
- 24 Trumbore S E, Grandinski J B. The secret lives of roots. *Science*, 2003, 302 (5649): 1344—1345
- 25 马文红, 方精云. 内蒙古温带草地根茎比及其影响因素. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2006, 42 (6): 774—778
- 26 Sala O E, Parton W J, Joyce L A, et al. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1988, 69 (1): 40—45
- 27 Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of north American shortgrass steppe. *Ecol Appl*, 1992, 2 (4): 397—403
- 28 Jobbágy E G, Sala O E, Paruelo J M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: A remote sensing approach. *Ecology*, 2002, 83 (2): 307—319
- 29 Fang J Y, Piao S L, Zhou L M, et al. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L21411, doi: 10.1029/2005 GL024231
- 30 Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: evidence from the Eurasian steppe. *J Appl Ecol*, 2007, 44 (5): 1023—1034
- 31 Burke I C, Lauenroth W K, Parton W J. Regional and temporal variation in the primary production and nitrogen mineralization in grasslands. *Ecology*, 1997, 78 (5): 1130—1340
- 32 Baer S G, Blair S L, Collins S L, et al. Soil resources regulate productivity and diversity in newly established tallgrass prairie. *Ecology*, 2003, 84 (3): 724—735
- 33 Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biol*, 2006, 11 (1): 84—96
- 34 Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biol*, 1998, 4 (2): 229—233
- 35 Schenk H J, Jackson R B. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma*, 2005, 126 (1-2): 129—140