

典型草原通量塔通量贡献区地上生物量和叶面积指数的时空变异*

王 猛^{1,2} 李贵才^{3**} 王军邦⁴

(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 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 国家卫星气象中心, 北京 100081; ⁴ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 引入循环采样方法,在生长季(7月初、7月末和8月末)测量了典型草原植被生物量和叶面积指数,并利用地统计方法分析了二者的空间分布格局.结果表明:在7月初、7月末和8月末3个时期,地上生物量递增,叶面积指数(LAI)先增大后减小,地上生物量和 LAI 均具有良好的空间自相关性,二者空间格局相似且具有相似的时间演变规律,由条带状逐渐变为斑块状.从7月初到8月末,地上生物量和 LAI 的块金值/基台值[$C_0/(C+C_0)$]显著降低,表明其空间自相关程度从中度自相关变为强相关;变程逐渐缩小,空间连续性变差;分维值逐渐降低,空间依赖性增强.地形和草地管理方式是影响草原植被生物量和叶面积指数空间分布格局的重要因素,导致水热因子空间差异,进而对牧草生长产生影响.

关键词 叶面积指数 生物量 循环取样 地统计 草原

文章编号 1001-9332(2011)03-0637-07 **中图分类号** S812 **文献标识码** A

Spatiotemporal variations of aboveground biomass and leaf area index of typical grassland in tower flux footprint. WANG Meng^{1,2}, LI Gui-cai³, WANG Jun-bang⁴ (¹State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China; ⁴Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(3): 637-643.

Abstract: By using cyclic sampling method, the aboveground biomass and leaf area index (LAI) of typical grassland in tower flux footprint were measured at three growth stages, *i. e.*, early July (July 2-7), late July (July 20-26), and late August (Aug. 25-30), with their spatial patterns analyzed by geostatistics. At the three stages, the aboveground biomass of the grassland kept rising, while the LAI decreased after an initial increase. Both the two variables had good spatial autocorrelation, with similar spatial pattern and temporal evolution trend, and changed from stripe to patch. From early July to late August, the $C_0/(C_0+C)$ of the aboveground biomass and LAI all decreased significantly, indicating that the spatial autocorrelation of the two variables changed from medium to high. The change ranges of the two variables gradually decreased, presenting the decrease of spatial continuity. The fractal dimension (D) also decreased gradually, suggesting the increase of spatial dependence. Topography and field management were the main factors affecting the spatial distribution of aboveground biomass and LAI, which induced the spatial variability of water and heat, and further, affected the grass growth.

Key words: LAI; biomass; cyclic sampling; geostatistics; grassland.

通量塔碳通量观测是获取陆气碳交换量的重要观测手段.通量塔一般选择设置具有均一下垫面的

代表性植被类型或生态系统类型,并常常假设同一植被类型的叶面积指数(leaf area index, LAI)和地上生物量等参数具有较小的空间异质性.通常认为,通量塔的通量贡献区(footprint)为1 km×1 km左右^[1],在此区域内植被参数的空间变异通常被忽

* 公益性行业科研专项(GYHY2007-6-9-3, GYHY200906036)和国家自然科学基金项目(40501048)资助.

** 通讯作者. E-mail: ligc@cma.gov.cn

2010-05-24 收稿, 2010-12-28 接受.

略.大尺度生态过程模拟研究中,上述假设常被引入^[2-3].但实际上,即便对于同一植被类型,通量贡献区范围内的植被参数也存在较大的空间变化,尤其在地形、土壤和水分等局地环境因子存在差异的条件下,这种情况经常存在.据此推断,通量贡献区的有效大小取决于下垫面类型的异质性程度,异质性越小,通量贡献区的有效范围越大.因此,有必要研究典型植被类型通量贡献区的叶面积指数和生物量等参数的空间异质性特征,以便掌握通量贡献区的植被参数变异特征,为更好地理解和使用通量观测数据提供依据,并为单点观测数据的尺度扩展提供理论基础.

叶面积指数是植被冠层结构的重要指标,是许多生态系统模型的重要输入参数^[4-5].生物量是计算草地净初级生产力的重要参数.如果不考虑叶面积指数和生物量的空间变异性,直接把它们作为非空间的参数输入到模型中,会降低模型的精确性和合理性^[6].因此,量化叶面积指数和生物量的时空变异可应用于植被生物物理参数的空间化和尺度扩展.

叶面积指数和生物量在不同的气候带之间有很大差异^[7],但有关通量贡献区尺度上生物量和叶面积指数空间异质性的研究尚不多. Burrows 等^[8]和 Williams 等^[9]分别在美国北部森林区和北极冻原分析了通量贡献区初级生产力和叶面积指数的空间异质性.李正泉等^[10]在北海高寒草地研究中引入循环采样法,利用一期观测数据分析了通量贡献区生物量和叶面积指数的空间特征. Berterretche 等^[11]利用循环采样、地统计方法和 Landsat ETM⁺ 卫星数据,研究了北方林 LAI 的空间变异特征.上述研究只关注了通量贡献区植被参数的空间特征,并未研究空间特征在不同生长阶段的演变.

为了研究典型草原生物量和 LAI 的空间格局及其时间演变特征,本文将循环取样法应用于典型草原,在生长季的中后期实施了 3 期观测.利用地统计方法,分析了地上生物量和叶面积指数 25 ~ 1000 m 尺度上的空间异质性,以研究通量贡献区尺度范围内地上生物量和 LAI 的空间变异规律,比较不同时期草原地上生物量和叶面积指数的空间特征及其形成机制.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林浩特市东北

24 km 处的锡林浩特国家气候观象台野外站 (44°08' N, 116°19' E), 海拔约 1000 m. 该地区为半干旱大陆性气候, 年均气温 2 °C, 冬季漫长、寒冷和干旱; 年均降水量 290 mm, 5-9 月降水占全年降水量的 80%. 土壤为栗钙土. 该地区是亚欧大陆的典型草原区, 植被以克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 和羊草 (*Leymus chinese*) 为主要建群种. 研究区的草地管理方式主要包括围封、刈割和放牧.

1.2 研究方法

1.2.1 采样 分别于 2008 年 7 月初 (7 月 2 日-7 日)、7 月末 (7 月 20 日-26 日) 和 8 月末 (8 月 25 日-30 日) 进行取样. 7-8 月是草原植被生长盛期, 8 月末草原生物量达到最大^[12]. 本研究采用循环取样, 分别对通量贡献区草地植被的叶面积指数和生物量进行实地取样. 与传统的采样方式相比, 在研究空间自相关时循环采样是一种更有效的采样方式. 在每一个循环长度上, 最优的采样位置是能以最少的取样数目, 提供足够数量、不同距离的数据对数. 循环采样在降低采样频率的条件下, 仍然能够在不同采样距离上保持采样密度, 从而避免了相同采样距离上的多余采样^[13].

本研究以涡度塔为中心, 沿东西和南北方向分别采用 5/21 和 4/13 的采样设计, 基本步长 25 m, 分别在 0、1、4、14、16 和 0、1、3、9 基本步长的倍数处设置采样点, 循环长度分别是 21 和 13 (图 1). 在通量贡献区 950 m × 550 m 的范围上, 设置 80 个采样点. 由于围栏和道路的影响, 实际共设置 78 个 25 m × 25 m 的取样样方. 包括放牧、刈割和围封 3 种不同草地管理方式 (图 1). 利用经纬仪和激光测距仪对样方精确定位, 在样方的四角设置木桩作为标志, 并用卫星导航仪记录经纬度信息. 每个样方的四角和中心设置 5 个 0.5 m × 0.5 m 的亚样方, 亚样方测定参数取平均值作为样方的测定值.

1.2.2 生物量和叶面积指数测量 采用收获法测量

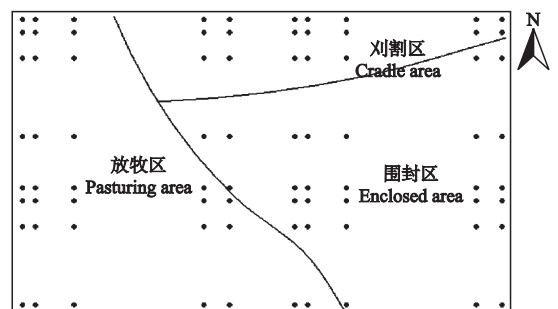


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites.

生物量,在 0.5 m×0.5 m 亚样方内,把植株分物种齐根剪下,70 ℃ 烘 72 h,称量,测定亚样方干生物量.每物种随机取 10 株进行扫描和称量来计算比叶面积(specific leaf area, SLA),采用扫描法测量叶面积,计算叶面积指数^[14].

1.2.3 空间自相关和半变异函数分析 通过计算样本均值、标准差、变异系数及正态显著性检验等来描述生物量和 LAI.利用空间自相关分析、半方差计算和等值线图等方法定量描述参数的空间统计特征.

采用空间自相关 Moran I 系数进行空间自相关分析^[15]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

式中: X_i 和 X_j 分别为变量 X 在相邻配对空间 i 和 j 上的取值; w_{ij} 为空间权重矩阵元素,表示空间变量在第 i 、 j 两点间的连接关系; n 为空间单元总数. I 值在 $-1 \sim 1$ ($I=0$ 代表空间不相关, $I>0$ 为正相关, $I<0$ 为负相关).

采用半变异函数定量描述变量空间格局,计算公式为^[16]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_{i+h})]^2$$

式中: $\gamma(h)$ 为空间相距为 h 的点对的半方差; $N(h)$ 为以 h 为间距的所有观测点的成对数目; $Z(X_i)$ 和 $Z(X_{i+h})$ 分别为点 X_i 和与 X_i 相距 h 的点的变量观测值. $\gamma(h)$ 是距离 h 的函数, $\gamma(h)$ 随 h 的变化曲线为半方差图,反映变量的空间变异结构.半变异函数有球状、指数、高斯和线性等类型.

模型中有 3 个重要参数:块金值(C_0)、基台值(C_0+C)和变程(A). C_0 为区域化变量的随机变异和小于采样尺度的变异; C 为拱高,代表空间自相关部分引起的空间变异; C_0+C 为区域化变量在空间上的总变异.块金值与基台值之比 $[C_0/(C_0+C)]$ 反映了

变量空间自相关程度的强弱.该值 $<25\%$,为强烈空间自相关;在 $25\% \sim 75\%$,为中度空间自相关; $>75\%$,则为弱空间自相关^[17]. A 为变程,当距离 $>A$ 时,区域化随机变量的空间自相关性消失.

通过循环采样,在不同方向及以 25 m 为步长的 25~950 m 尺度上,获取 78 个样方的生物量和叶面积指数测量值.利用 Kriging 插值得到生物量和叶面积指数空间分布图^[18].

2 结果与分析

2.1 生长季通量贡献区草地地上生物量和叶面积指数的变化

样方样本均值经过异常值处理,超出标准差 3 倍判别为异常值,异常值用该区间的最大值或最小值代替^[19].从表 1 可以看出,在生长季的 7 月初、7 月末和 8 月末 3 个时期,研究区 78 个样方的平均地上生物量在 68.36~127.50 g·m⁻²,LAI 在 0.68~0.90,均具有明显的时间变化.7 月初到 8 月末,地上生物量逐渐变大,8 月末达到最大.而 LAI 则先增大后减小,这是因为该时期生殖枝占总地上生物量的比例较大,叶片比例减小,因此 LAI 较 7 月略有减小.LAI 的时间变化动态与以往研究基本一致^[14].

地上生物量和 LAI 的变异系数分别在 25%~39% 和 24%~38%.从 7 月初到 8 月末,变异系数呈逐渐变小趋势,表明进入牧草生长茂盛期后,随着时间推移,研究区地上生物量和 LAI 样本值域分布更集中,差异性降低.经 K-S 检验,在 5% 的检验水平下,各个生长时期的地上生物量和 LAI 都符合正态分布.

2.2 地上生物量和 LAI 的空间自相关关系

由图 2 可以看出,3 个生长时期的地上生物量和 LAI 空间分布均呈现一定空间自相关结构.随着间隔距离增大,自相关函数由正相关逐渐向负相关变化.当 $|I|>0.3$ 时,变量显示出显著的空间自相

表 1 地上生物量和 LAI 的统计分析及其正态分布检验

Table 1 Descriptive statistics and K-S test of aboveground biomass and LAI ($n=78$)

项目 Item	采样时间 Sampling time	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	K-S 概率 K-S P value	分布类别 Distribution type
生物量 Biomass	07-02-07-07	16.50	147.72	68.36	26.27	39	0.54	0.55	0.87	N
(g·m ⁻²)	07-20-07-26	64.32	224.49	124.60	32.43	27	0.73	0.38	0.27	N
	08-25-08-30	66.24	223.82	127.50	31.38	25	0.85	0.75	0.29	N
LAI	07-02-07-07	0.17	1.47	0.68	0.26	38	0.46	0.46	0.89	N
	07-20-07-26	0.53	1.73	0.99	0.24	25	0.68	0.27	0.37	N
	08-25-08-30	0.49	1.56	0.90	0.21	24	0.85	0.84	0.41	N

N: 正态分布 Normal distribution.

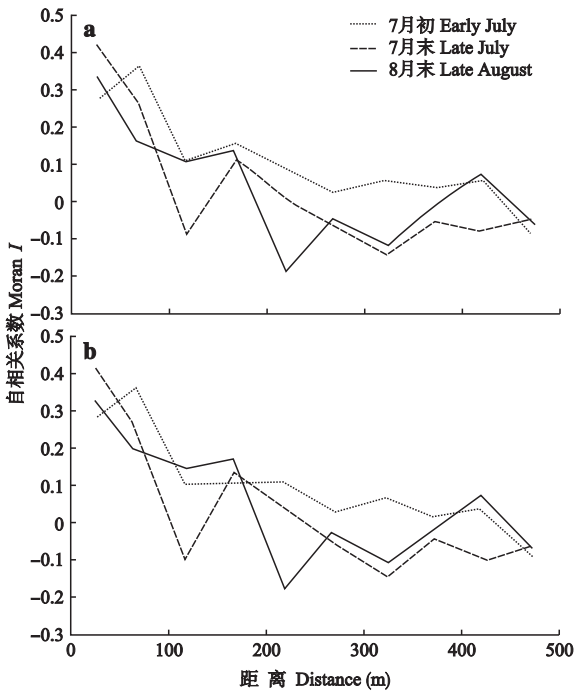


图2 研究区不同时期生物量(a)和LAI(b)的空间自相关系数

Fig. 2 Spatial coefficients of biomass (a) and LAI (b) at different stages.

关^[20],即在间隔距离<50 m时,3个时期地上生物量和LAI均呈显著空间自相关。

正空间自相关的距离反映了性质相似斑块的平均半径,负空间自相关的距离则反映了性质不同斑块间的平均距离^[21].7月初的地上生物量和LAI的自相关系数变化较小,且在距离<450 m时,空间自相关为正,表明在此空间范围内,二者的同质性较高.7月末和8月末,地上生物量和LAI的空间格局则表现出相对复杂的斑块分布.7月末地上生物量和LAI在距离<100 m时,空间自相关为正.8月末生物量和LAI则在距离<200 m时,空间自相关为正.7月末和8月末相似斑块尺度分别为100 m和200 m左右.7月末的斑块分布最复杂,表明这一时期地上生物量和LAI具有高度的空间异质性.这是

因为7月末正值牧草生长旺期,地形差异导致的水热差异对牧草生长的影响逐渐显现。

2.3 地上生物量和LAI的半变异函数分析

由表2可以看出,地上生物量和LAI的半变异函数的最优模型为球状模型和指数模型.各模型的决定系数(R^2)在0.350~0.815,能较好地反映地上生物量和LAI的空间结构特征.在同一生长期,地上生物量和LAI表现出相似的空间结构,但不同生长期的空间结构则变化较大(图3)。

在不同生长时期,地上生物量和LAI的半变异函数各参数变化趋势明显.随着植物生长,植被块金值和基台值的比值逐渐减小,说明植被格局的空间自相关性逐渐增强.7月末地上生物量和LAI的块金值/基台值分别为0.001和0.017,8月末地上生物量和LAI的块金值/基台值分别为0.001和

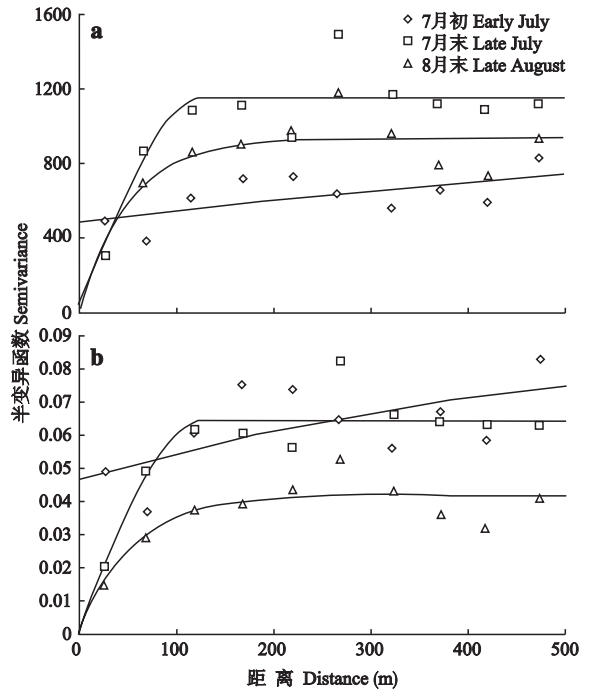


图3 不同时期地上生物量(a)和LAI(b)的半变异函数

Fig. 3 Semivariograms of biomass (a) and LAI (b) at different stages.

表2 不同时期地上生物量和LAI的半变异函数的模型类型及参数

Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters for aboveground biomass and LAI at different stages

项目 Item	采样时间 Sample time	模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/ 基台值 $C_0/(C+C_0)$	变程 A (m)	R^2	分维数 D
生物量 Biomass ($g \cdot m^{-2}$)	07-02-07-07	指数 Exponential	484.00	1124.20	0.431	962.00	0.360	1.920
	07-20-07-26	球状 Spherical	1.00	1147.00	0.001	128.00	0.792	1.809
	08-25-08-30	指数 Exponential	1.00	940.00	0.001	51.00	0.717	1.854
LAI	07-02-07-07	指数 Exponential	0.0469	0.09	0.499	558.00	0.350	1.917
	07-20-07-26	球状 Spherical	0.0011	0.06	0.017	126.00	0.815	1.832
	08-25-08-30	指数 Exponential	0.00011	0.04	0.002	55.00	0.719	1.848

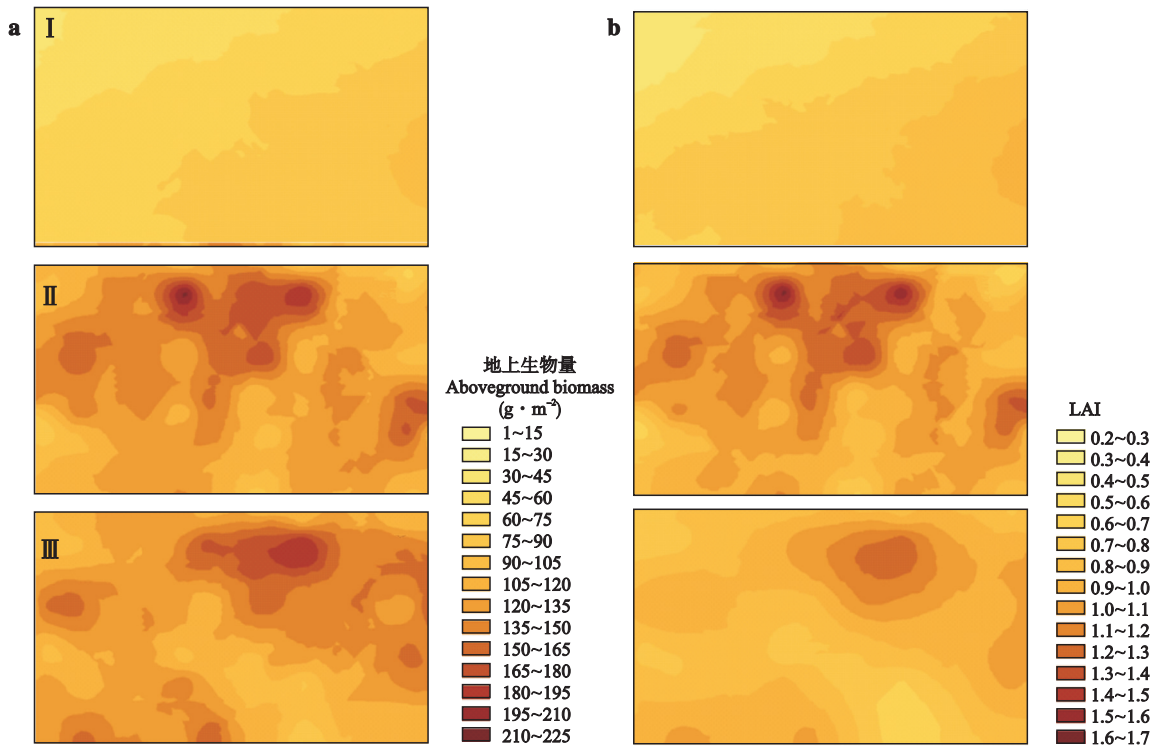


图4 不同时期草地地上生物量(a)和 LAI(b)的空间分布格局

Fig. 4 Spatial distributions of aboveground biomass (a) and LAI (b) of grassland at different stages.

I : 07-02-07-07; II : 07-20-07-26; III : 08-25-08-30.

0.002, 均 <0.25 , 呈强烈的空间自相关性。7月初地上生物量和 LAI 的块金值与基台值之比分别为 0.499 和 0.431, 为中等空间自相关。

分维值 $D=2$ 时, 变量在空间的变化被认为是同质的或随机的; D 值越小, 变量的空间依赖性越强; 当 $D=1$ 时, 变量在空间单调变化, 具有线性梯度变化的性质^[22]。从表 2 可以看出, 伴随着生长季, 生物量和 LAI 的 D 值都逐渐减小, 表明变量的空间依赖性逐渐增强, 斑块化程度增高。这一规律与空间自相关系数的结果一致。

2.4 地上生物量和 LAI 空间分布格局的时间演变规律

图 4 显示, 生物量和 LAI 具有相似的空间分布格局。7月初生物量和 LAI 空间格局呈条带状分布, 从西北到东南部逐渐增大; 7月末和 8月末的生物量和 LAI 的空间格局则呈明显的斑块状分布, 这与 7月末和 8月末的 Moran I 值波动较大而变程减小相吻合。

7月初块金值较大, 说明在取样尺度内, 某些因素决定空间变异。在采样样方尺度内 ($0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$), 裸地占比重很大。以 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的样方采样, 不能反映裸地对生物量和 LAI 空间异质性的

影响。伴随着生长季的推移, 生物量和 LAI 的变程逐渐变小, 其变化趋势明显, 生物量最大变程为最小变程的 18.9 倍, 各参数的空间格局同质性变弱, 斑块化程度增高。

3 讨 论

3.1 草地地上生物量和叶面积指数的空间分布格局及其影响因素

草原群落的空间格局受非生物因素和生物因素影响。在不同尺度上, 地形和放牧干扰等非生物因素通过影响土壤湿度和养分或啃食优势物种等, 间接或直接改变植物群落的空间格局^[23-24]。物种竞争和分布等生物因子则通过局地竞争和物种分布来影响群落空间格局^[25]。7月初, 生物量和 LAI 的变程较大, 空间连续性较好, 空间格局呈条带状分布, 梯度变化明显。受草地管理方式(放牧、刈割、围封)的影响, 从西北(放牧区)到东南(围封区), 地上生物量和 LAI 逐渐升高。围封区由于没有放牧和刈割等外来干扰的影响, 地上生物量和 LAI 较高。放牧和刈割区由于受到外部干扰, 地上生物量和 LAI 相对较小。7月末和 8月末空间格局的斑块化分布明显, 有明显的高值和低值斑块。

3.2 地上生物量和叶面积指数空间分布格局的时间变化

Moran I 指数越大,块金值/基台值越小,分维值(D)越小,则空间自相关程度越强^[26].在7-8月的牧草生长旺盛期,随着牧草生长,草地地上生物量和LAI的空间自相关程度逐渐增强.Moran I 指数波动逐渐变大,变程逐渐减小,空间自相关距离减小,空间格局逐渐由条带状分布变为斑块状分布.

7月初(生长茂盛期的早期),草地管理方式对较大空间尺度的牧草空间格局具有较强影响.因此,在围封区等干扰较轻的区域,地上生物量和叶面积指数较高;到了7月末和8月末,随着时间推移,牧草生长进入茂盛期.地形差异导致的水热差异对牧草生长的影响逐渐显现.地上生物量和LAI的空间自相关程度增加,空间格局斑块化明显、连续性变差.与7月初相比,在7月末和8月末,一年生非禾本杂类草在群落中占很大比重,植物群落生物多样性提高,植物群落也呈现斑块状分布;在土壤湿度较大的洼地,聚集着一年生植物,形成空间格局中的生物量和LAI高值斑块.本研究中,地形因素通过影响草地的限制性因子(水),进而影响草地植物群落生长和空间分异,群落组成的多样性影响到了地上生物量和LAI的空间异质性.这与Spadavecchia等^[27]在冰原区的研究结果类似,他们研究表明,地形在500 m×500 m的景观尺度上影响着植物功能群和LAI的空间分布.

本文在典型草原通量贡献区这一尺度上,定量刻画了草地生物量和叶面积指数空间分布格局和时间演变规律.这是结合地面观测数据进行准确测量和空间化生态模型参数的重要一步,同时为研究草原生物量和LAI的时空异质性对涡度观测值的影响提供参考.生物量和LAI时空异质性的形成机制还需要进一步研究.同时,在生态系统过程模型中需要考虑重要植被参数的时空异质性,从而提高模型在景观、区域乃至全球尺度的模拟精度.

参考文献

- [1] Turner DP, Ollinger S, Smith ML, *et al.* Scaling net primary production to a MODIS footprint in support of earth observing system product validation. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**: 1961-1979
- [2] Cohen WB, Justice CO. Validating MODIS terrestrial ecology products: Linking in situ and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**: 1-4
- [3] Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, *et al.* Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 666-684
- [4] Running S, Gower S. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 1991, **9**: 147-160
- [5] Running S, Baldocchi D, Gower S, *et al.* A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**: 108-127
- [6] Milne B, Cohen WB. Multiscale assessment of binary and continuous landcover variables for MODIS validation, mapping, and modeling applications. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**: 82-98
- [7] Runyon J, Waring RH, Goward SN, *et al.* Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect. *Ecological Applications*, 1994, **4**: 226-237
- [8] Burrows SN, Gower ST, Norman JM, *et al.* Spatial variability of aboveground net primary production for a forested landscape in northern Wisconsin. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**: 2007-2018
- [9] Williams M, Bell R, Spadavecchia L, *et al.* Upscaling leaf area index in an Arctic landscape through multiscale observations. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 1517-1530
- [10] Li Z-Q (李正泉), Yu G-R (于贵瑞), Zhao F-H (赵风华), *et al.* Spatial distribution measurement of leaf area index in flux contributing source of eddy covariance flux tower. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2007, **15**(6): 131-134 (in Chinese)
- [11] Berterretche M, Hudak AT, Cohen WB, *et al.* Comparison of regression and geostatistical methods for mapping Leaf Area Index (LAI) with Landsat ETM+ data over a boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **96**: 49-61
- [12] Zhou Z, Sun J, Huang J, *et al.* Land use affects the relationship between diversity and productivity at the local scale in a semi-arid steppe ecosystem. *Functional Ecology*, 2006, **20**: 753-762
- [13] Burrows SN, Gower ST, Clayton MK, *et al.* Application of geostatistics to characterize leaf area index (LAI) from flux tower to landscape scales using a cyclic sampling design. *Ecosystems*, 2002, **5**: 667-679
- [14] Wang YL, Zhou GS, Wang YH. Environment effects on net ecosystem CO₂ exchange at half-hour and month scales over *Stipa krylovii* steppe in northern china. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 714-722
- [15] Fortin MJ, Dale M. Spatial Analysis: A Guide for Ecol-

- ogists. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [16] Wang Z-Q (王政权). Geostatistics and Its Application in Ecology. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [17] Song T-Q (宋同清), Peng W-X (彭晚霞), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in Karst area. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2009, **20**(1): 98–104 (in Chinese)
- [18] Zhang R-D (张仁铎). Theory and Application of Spatial Variability. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)
- [19] Liu F-C (刘付程), Shi X-J (史学正), Yu D-S (于东升), *et al.* Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. *Geographical Research (地理研究)*, 2004, **23**(1): 63–70 (in Chinese)
- [20] Jung WK, Kitchen NR, Sudduth KA, *et al.* Spatial characteristics of claypan soil properties in an agricultural field. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**: 1387–1397
- [21] Zhang W (张 伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in Karst region in dry season. *Acta Pedologia Sinica (土壤学报)*, 2006, **43**(4): 554–562 (in Chinese)
- [22] Palmer MW. Fractal geometry: A tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetatio*, 1988, **75**: 91–102
- [23] Fisk MC, Schmidt SK, Seastedt TR. Topographic patterns of above and belowground production and nitrogen cycling in alpine tundra. *Ecology*, 1998, **79**: 2253–2266
- [24] Augustine DJ. Spatial heterogeneity in the herbaceous layer of a semiarid savanna ecosystem. *Plant Ecology*, 2003, **167**: 319–332
- [25] Frelich LE, Calcote RR, Davis MB, *et al.* Patch formation and maintenance in an old growth hemlock hardwood forest. *Ecology*, 1993, **74**: 513–527
- [26] Li H, Reynolds JF. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 1995, **73**: 280–284
- [27] Spadavecchia L, Williams M, Bell R, *et al.* Topographic controls on the leaf area index and plant functional type of a tundra ecosystem. *Journal of Ecology*, 2008, **96**: 1238–1251

作者简介 王 猛,男,1982年生,博士研究生.主要从事植被生态及遥感观测研究. E-mail: wangmengsdau@163.com

责任编辑 李凤琴
