

DOI: 10.5846/stxb201306201748

常学礼, 吕世海, 冯朝阳, 叶生星. 地形对草甸草原植被生产力分布格局的影响. 生态学报, 2015, 35(10): 3339-3348.

Chang X L, Lü S H, Feng Z Y, Ye S X. Impact of topography on the spatial distribution pattern of net primary productivity in a meadow. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3339-3348.

## 地形对草甸草原植被生产力分布格局的影响

常学礼<sup>1,\*</sup>, 吕世海<sup>2</sup>, 冯朝阳<sup>2</sup>, 叶生星<sup>2</sup>

1 鲁东大学地理与规划学院, 烟台 204625

2 中国环境科学研究院生态研究所, 北京 100875

**摘要:** 草原植被生产力在陆地生态系统碳平衡分析中扮演重要角色, 而地形作为影响植被生产力(NPP)分布格局的重要环境因子在已有的草原遥感监测研究中没有被充分重视。以 USGS 和 GLCF 共享 MODIS 和 DEM 数据为数据源, 选取呼伦贝尔辉河湿地保护区草甸草原核心区为研究对象, 在地面光谱生物量模型构建的基础上, 采用 ARCGIS 的空间分析功能对呼伦贝尔草甸草原 2000—2012 年的 NPP 分布格局进行了分析。研究表明, 地形对草甸草原植被生产力分布格局有显著的影响。在海拔高度、坡度和坡向等 3 个地形因子中, 海拔高度引起的 NPP 变化幅度最大, 坡度次之, 坡向最小。在总体特征上, 海拔高度每升高 10m, 生产力增加 4.78 g/m<sup>2</sup>; 坡度每增加 1° 生产力增加 -1.42 g/m<sup>2</sup>; N 坡向植被生产力水平最高(184.8 g/m<sup>2</sup>), 西南(SW)坡向最低(173.3 g/m<sup>2</sup>)。从不同地形因子的分布面积特点判断, 地形对草甸草原 NPP 的影响尺度介于土壤环境异质性和草场类型异质性之间。不同生产力水平年份对生产力分布格局的影响趋势一致, 但变化幅度不同, 在中等生产力水平年份 NPP 变幅最大。

**关键词:** 数值化高程; 地面光谱模型; 回归分析

## Impact of topography on the spatial distribution pattern of net primary productivity in a meadow

CHANG Xueli<sup>1,\*</sup>, LÜ Shihai<sup>2</sup>, FENG Zhaoyang<sup>2</sup>, YE Shengxing<sup>2</sup>

1 College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 204625, China

2 Institute of Ecology, Chinese Research Academy Environmental Science, Beijing 100875, China

**Abstract:** Net primary productivity (NPP) of grassland plays an important role in terrestrial ecosystems, and its spatial heterogeneous traits have significant influence upon regional carbon cycle, grazing capacity, soil erosion, and ecosystem safety assessment. How topography, one of significant environmental factors, affects grassland productivity is not well addressed in the remote sensing of grassland ecosystems. This paper selected a protected meadow of the National Natural Reserve of Huihe wetland, used USGS EOS-MODIS/Terra NDVI data and GLCF DEM data, and adopted spatial analysis function of ARCGIS to analyze the NPP distribution pattern from 2000 to 2012 in Hulunbuir meadow based on the ground spectrum biomass model, topographical controlling factors, and yearly precipitation classification. The results showed that the ground spectrum biomass model can be used to assess meadow productivity, and the most suitable model is  $y = 15.968e^{3.5434x}$  (Sig = 0.000) for predicting Hulunbuir meadow productivity in regional scale (where  $y$  and  $x$  represent productivity and NDVI, respectively). Simulated results confirmed that topography had a remarkable impact on meadow productivity distribution pattern. Consequently, among three topographical factors of altitude, slope and aspect, altitude gave rise to the most significant changes, the effect of the slope was intermediate, and the aspect played a minimal effect.

**基金项目:** 国家自然科学基金(41271193); 国家环境保护公益性行业科研专项(200909021)

**收稿日期:** 2013-06-20; **网络出版日期:** 2014-05-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlchang@126.com

Firstly, under the conditions of the slope of 0—2 degrees and aspect of NE, NPP increased 0.478 g/m<sup>2</sup> per meter rising of elevation in normal yearly precipitation level; 0.414 g/m<sup>2</sup> in lower yearly precipitation level; 0.482 g/m<sup>2</sup> in moderate yearly precipitation level; and 0.525 g/m<sup>2</sup> in higher yearly precipitation level, respectively. Secondly, under the conditions of altitude of 760—780 m and aspect of NE, the meadow productivity decreased 0.142 g/m<sup>2</sup> per degree increase of slope in the normal yearly precipitation level, and decreased 0.161 g/m<sup>2</sup> in the lower yearly precipitation level, 0.135 g/m<sup>2</sup> in the moderate yearly precipitation level, 0.133 g/m<sup>2</sup> in the higher yearly precipitation level, respectively. Thirdly, under the conditions of the altitude of 760—780 m and the slope of 0—2 degrees, the highest NPP (184.6 g/m<sup>2</sup>) occurred on the N aspect and the lowest NPP (173.3 g/m<sup>2</sup>) on the W aspect, respectively. The NPP was lower on the SW aspect in the lower yearly precipitation level and on the W aspect in the moderate yearly precipitation level. By contrast, lower NPP occupied on the SE aspect in the higher yearly precipitation level. According to NPP distribution area, the topographical factors had higher (lower) effect on NPP of the meadow than soil heterogeneity (grassland type) on spatial scale. The trend of this effect did not vary across years with various NPP but differed in effect degree, being higher in the years with intermediate NPP.

**Key Words:** DEM; ground spectrum biomass model; regression analysis

草原作为主要的陆地生态系统在全球碳库计算和生态系统功能研究中占有重要的位置<sup>[1-2]</sup>。在区域尺度,植被净初级生产力(NPP)作为草原植被的主要指标之一,在物质循环和能流流动及区域生态承载力评估等方面被广泛的应用<sup>[3-5]</sup>。在群落尺度,解释草原植被物种多样性、功能类群与生产力关系的研究也成为上个世纪末植被生态学的重要进展<sup>[6-7]</sup>。从草原植被 NPP 数据获取特点来看,基于传统的样方、样线、样带等调查方法被广泛采用,用取样的代表性强调植被特征的真实性和准确性<sup>[8]</sup>。最近十多年来,在大尺度区域植被 NPP 分布格局研究中,气候相关模型和基于遥感数据的地面光谱生物量反演模型成为 NPP 测定的重要补充,其中气候相关模型精度依赖于气象台站的空间位置与研究区内站点数量<sup>[4]</sup>。而基于遥感技术高光谱反演 NPP 的方法是在地面测定构建的归一化植被指数(NDVI)与 NPP 统计学模型支持下,实现不同时空尺度下 NPP 分布格局及区域生产力的估测<sup>[9-12]</sup>。该方法的预测结果能很好的反映 NPP 空间分布异质性,研究结果具有可重复性,其精度依赖于遥感数据的分辨率和高光谱模型的精度。

从已有的研究方法来看,由于遥感技术的限制,草原光谱生产力模型遥感数据源在 2000 年之前多采用 NOAA / AVHRR-NDVI 数据(分辨率在 2—8 km),植被 NPP 值在遥感栅格数据所覆盖地表范围内进行样方测定,然后通过 NDVI 和样方 NPP 构建的模型进行区域 NPP 估算<sup>[13-16]</sup>。这种方法由于不同研究者在取样时间、地点和样方数量存在差异,导致不同研究结果之间的 NPP 光谱模型可比性不高。同时,有关草原生产力格局的研究基本都忽视了地形对 NPP 分布格局的影响,只是通过对不同草场类型(如:典型草原、高山草原、高寒草原等)分别建模,来体现大尺度的地形差异<sup>[15]</sup>。事实上草原植被异质性主要是反映在群落尺度,而群落尺度异质性主要是由地形对水、热条件的重新分配导致土壤环境变化而决定<sup>[17-19]</sup>。因此,由于地形差异导致植被生产力格局的复杂性对这些研究成果提出了挑战。

2000 年以后,随着 MODIS 和 TM/ETM(分辨率分别为 250 m 和 30 m)推广应用,使草原光谱生产力模型研究结果的精度得到提高。但是有关地形对 NPP(或 NDVI)格局与动态的影响机制探讨仍被忽视<sup>[1, 20-22]</sup>。从导致草原植被 NPP 分布格局的变化机理研究来看,有关地形对植被分布格局的影响仍停留在定性描述或简单的地形分级<sup>[23]</sup>,而有关草原生产力格局与地形因子定量研究显地不够详细<sup>[23-24]</sup>。

因此,为了更好的理解地形因子对草原植被生产力格局的影响,本文将以坡度、坡向和海拔高度等地形因素对 NPP 的影响机制为目的,采用卫星遥感 NDVI 和 DEM 数据与地面测定 NDVI 和当年地上生物量数据相结合,以呼伦贝尔草原辉河国家湿地自然保护区内的草甸草原保护区为研究区,分析地形因素对 NPP 格局的影响机制,为大尺度的草原生产力估测以及区域生态承载力评估提供理论依据。

## 1 研究区与方法

### 1.1 研究区域概况

典型草原保护区位于辉河湿地国家级自然保护区东侧三道梁区域,地理位置为  $119^{\circ}10'—119^{\circ}30'$ ,  $48^{\circ}34'—48^{\circ}47'$ (图 1),总面积为  $265.12 \text{ km}^2$ 。该区气候属中温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季温润短促,年平均气温为  $-2.4—2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;无霜期为  $100—120 \text{ d}$ ;多年平均降水量为  $341.4 \text{ mm}$ ,70%左右的降水集中在 6—8 月份。该区处于大兴安岭西北坡山地向呼伦贝尔高平原的过渡地段,地势由东南向西北倾斜,海拔高度在  $680—860 \text{ m}$ 。从植被的组成特点来看,优势植物种为贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、地榆(*Radix Sanguisorbae*)、日阴菅(*Carex pediformis*)、黄花(*Hemerocallis citrina*)以及羊草(*Leymus chinensis*)等。地带性土壤类型为黑钙土和栗钙土,由于受区域内地貌、水文和地质的影响,发育有隐域性草甸沼泽土、盐化草甸土和风沙土等。该区的草场利用方式近百年来一直为当地牧民的打草场,当年地上生物量分布特点是在当年气候条件下地形影响结果的表现。

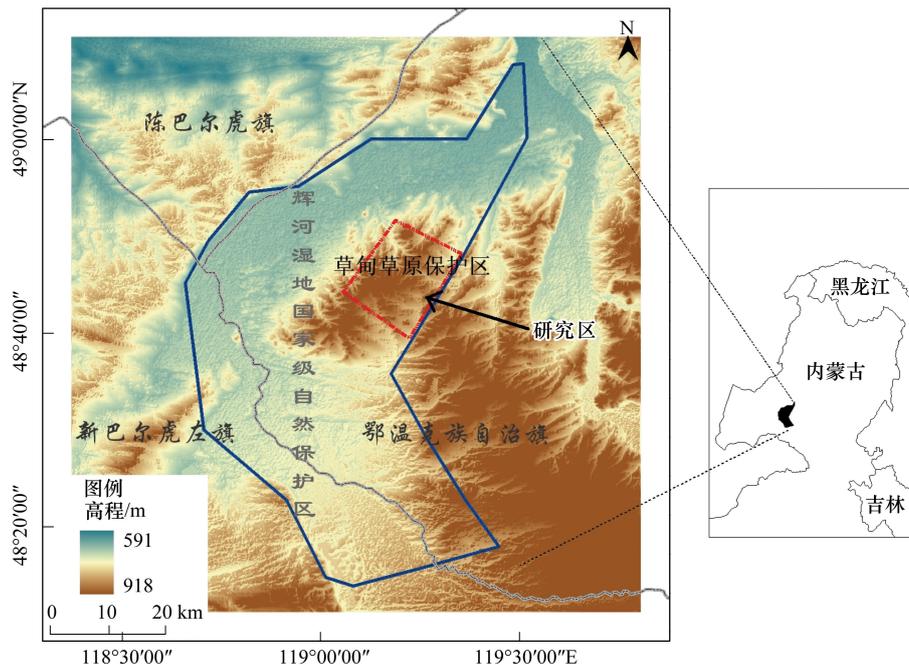


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

### 1.2 遥感数据时间选择

遥感数据采用 USGS(United States Geological Survey) 免费向全球用户提供的 MOD13Q1(TERRA)NDVI 16 d 合成数据(分辨率  $250 \text{ m}$ ),时间选择 2000 年到 2012 年 7 月 28 日(闰月年为 27 日)。

### 1.3 地面光谱生物量模型构建与区域植被生产力计算分级

#### 1.3.1 地面光谱生物量模型构建

使用美国 ASD 公司的 Fieldspec 3 光谱辐射仪进行植被光谱测定,测定时天气状况要满足晴朗无云,风力较小并稳定的时段,光谱测量时间在  $10:00—15:00$ 。每个  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  样方测定 5 组光谱数据,然后将样方内植物采集、烘干、称重。由于植被 NPP 包括地下生长量和被食草动物采食量,这部分在测定中几乎不能获得准确数值,所以本文的 NPP 采用当年地上生物量(ANPP)代替<sup>[6-7]</sup>。

把获取的地面光谱数据在 ViewSpec pro 软件中求取与 MODIS 卫星波段一致的红光波段( $0.62—0.67 \text{ }\mu\text{m}$ )和近红外波段( $0.841—0.876 \text{ }\mu\text{m}$ )的光谱反射率平均值。最后,根据计算每个样方对应的 5 组光谱

数据的 NDVI 平均值。NDVI 的计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (1)$$

式中,  $\rho_{NIR}$  和  $\rho_{Red}$  分别对应 MODIS 卫星数据的近红外和红光波段光谱反射率均值。

已有的研究表明, 实测的地面植物光谱特征与高空遥感的地面植物光谱特征存在内在的联系, 可以用实测的地面植物光谱特征代表高空遥感的地面植物光谱特征<sup>[12]</sup>。据此, 以地面光谱实测 NDVI 和对应的当年地上生物量构建呼伦贝尔草甸草原地面光谱生产力模型(图 2)。

### 1.3.2 研究区生产力计算分级

根据图 2 中公式, 利用 ARCGIS 栅格计算功能对 2000—2012 年研究区 NDVI 数据进行计算, 生成以 250 m×250 m 为单元的生产力分布格局图。最后, 在属性表中计算研究区逐年平均生产力。依据生产力变化特点(图 3), 把明显高于平均值的 2000、2002、2005、2009 和 2010 年定义为生产力水平较高年份; 明显低于平均水平的 2003、2006、2007 和 2012 年定义为生产力水平较低年份; 其余为生产力水平中等年份。

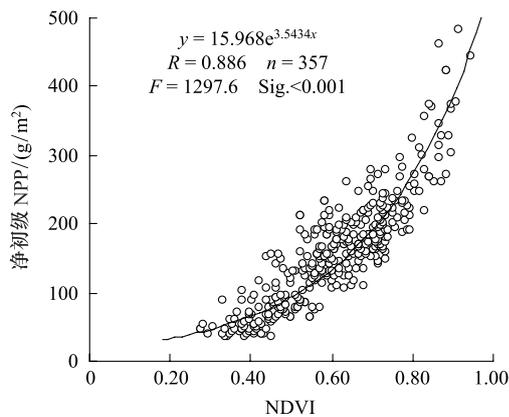


图 2 生产力 NPP 与 NDVI 指数拟合

Fig.2 Exponential regression between NDVI and NPP

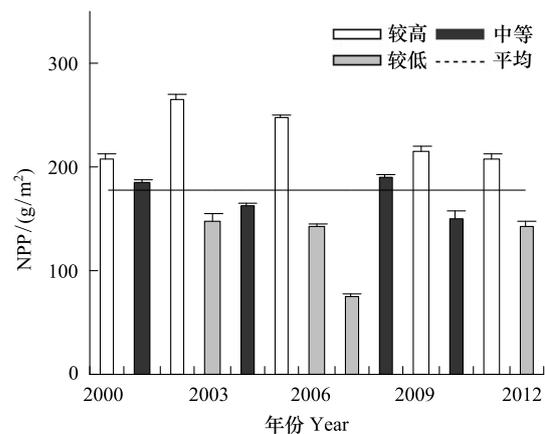


图 3 2000—2012 年草甸草原植被生产力动态

Fig.3 Dynamic of vegetation productivity of meadow grassland from 2000 to 2012

### 1.4 地形因子信息提取与不同控制条件生产力取样

海拔、坡度和坡向等 3 个因子的信息提取是依据美国马里兰大学 GLCF (Global Land Cover Facility) 中心提供的 30 m×30 m DEM 数据, 在 ARCGIS9.1 的 Spatial analyst 模块中完成。其中海拔以间隔 20 m、坡度以 2° 为划分尺度进行分析; 坡向从北偏西 22.5° 度开始每 45° 划分为一级, 其中从北偏西 22.5° 到来北偏东 22.5° 之间见定义为北方向, 依次顺时针类推。提取的空间属性见表 1。

表 1 不同地形因子的面积分布

Table 1 Area distribution of different topographical factors

海拔/m Elevation	面积/hm <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	坡度/(°) Slope	面积/hm <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	坡向 Aspect	面积/hm <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio
680	61.1	0.23	0	329.0	1.24	FLAT	1251.3	4.72
700	506.6	1.91	2	12800.6	48.28	N	2336.5	8.81
720	1352.3	5.10	4	9478.0	35.75	NE	4580.8	17.28
740	2947.8	11.12	6	2777.1	10.47	E	3450.7	13.02
760	5605.6	21.14	8	814.1	3.07	SE	3487.7	13.16
780	6348.6	23.95	10	229.4	0.87	S	3084.7	11.64
800	5466.5	20.62	12	63.1	0.24	SW	2908.5	10.97

续表

海拔/m Elevation	面积/hm <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	坡度/(°) Slope	面积/hm <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio	坡向 Aspect	面积/hm <sup>2</sup> Area	比例/% Ratio
820	2795.8	10.55	14	15.3	0.06	W	2392.7	9.03
840	1200.2	4.53	16	3.7	0.01	NW	3018.5	11.39
860	227.1	0.86	18	1.4	0.01			
合计 Total	26511.6	100	合计	26511.6	100	合计	26511.6	100.0

从海拔高度来看(表 1),在 760—780 m 之间分布面积最大,为 6348.6 hm<sup>2</sup>,占总面 23.95%;从坡度来看,在 0—2°之间布面积最大,为 12800.6 hm<sup>2</sup>,占总面 48.28%;从坡向来看,NE 方向分布面积最大,为 4580.8 hm<sup>2</sup>,占总面 17.28%。根据上述条件,在后文的分析中将以海拔高度 760—780 m、坡度在 0—2°之间以及坡向为 NE 方向为控制条件,最大可能保持分析因素梯度完整性(图 4)。

最后,根据图 4 中不同控制条件,在 ARCGIS 中对每一年生产力分布格局图(图 5)进行截取,用面积加权计算不同地形因子控制下逐年生产力水平。

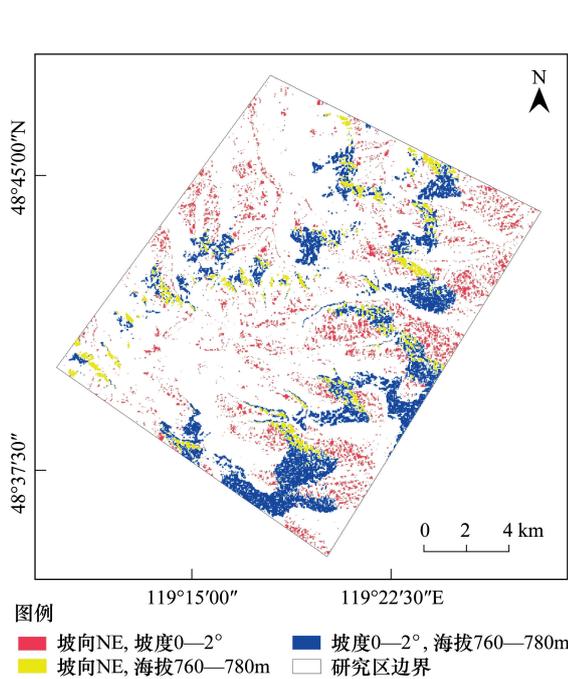


图 4 不同控制条件取样范围  
Fig.4 Sampling area of different restricted conditions

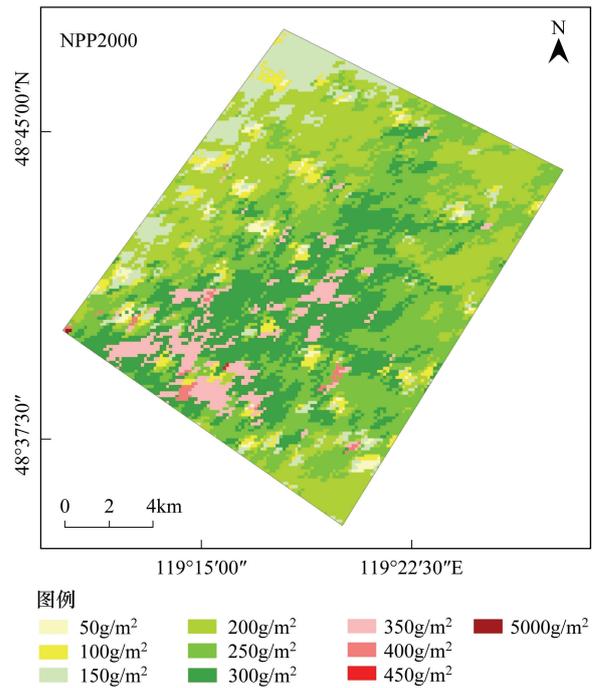


图 5 2000 年份生产力分布格局  
Fig.5 Maps of productivity distribution patterns in 2000

## 2 结果

### 2.1 海拔高度对草甸草原 NPP 分布格局的影响

在坡度为 0—2°和坡向为 NE 的条件下,无论是生产力总体特征还是不同生产力水平年份,共同特点是随海拔高度升高生产力水平增加,二者的关系都呈线性极显著相关(Sig<0.001,图 6)。其中,在较低、中等和较高生产力水平的梯度上(图 6),海拔高度与生产力的关系趋向更加密切(R<sup>2</sup>值增大)。从变化趋势来看,当海拔高度超过 820 m,不同生产力水平年份都呈停滞增加而轻微下降趋势。在坡度和坡向一致条件下,总体和较低水平年份,最大值出现在 800—820 m,分别为(214.7±53.9)和(159.9±41.5) g/m<sup>2</sup>;中等和较高水平年份,最大值分别出现在 820—840 m 和 840—860 m,分别为(206.6±15.5)和(268.0±21.9) g/m<sup>2</sup>。

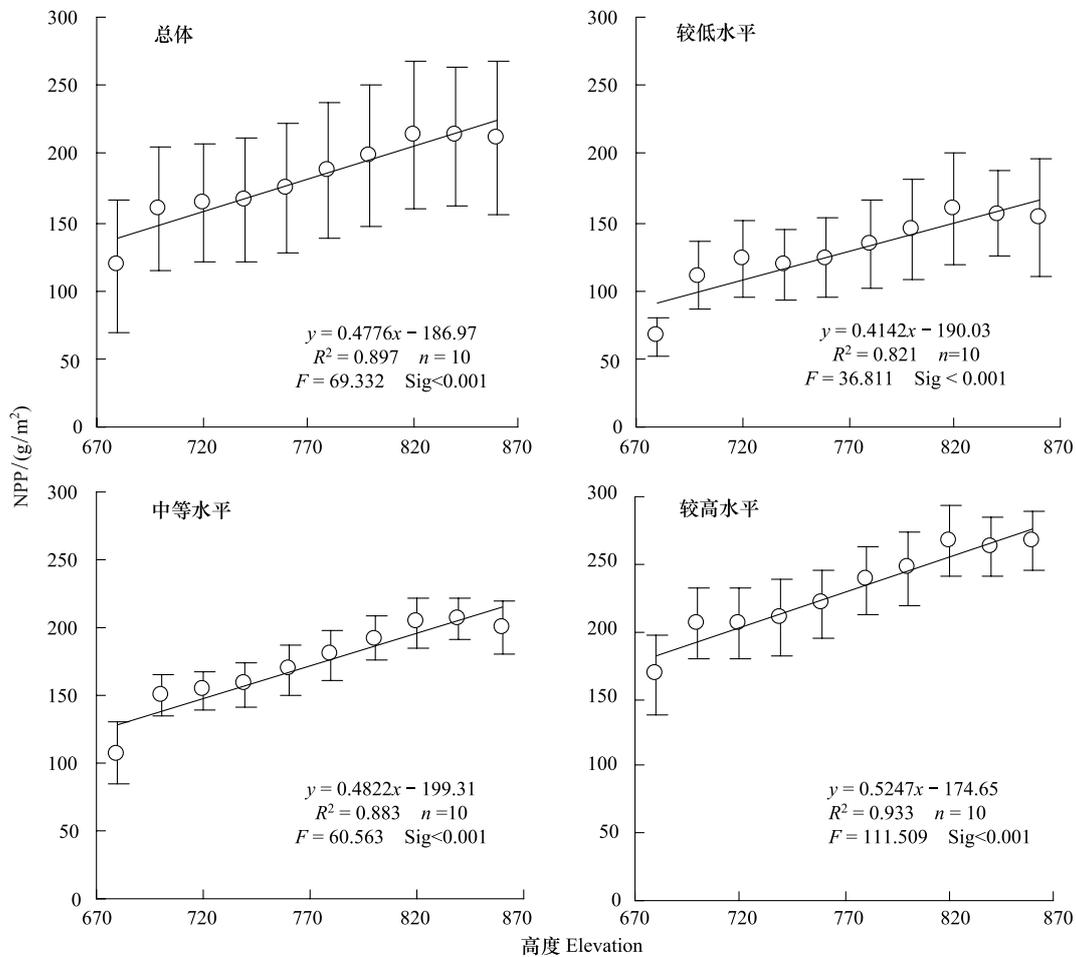


图6 地形高度与植被生产力的关系

Fig.6 Relationship between elevation and vegetation productivity

坡度: 0—2°; 坡向: NE

## 2.2 坡度对草甸草原 NPP 分布格局的影响

坡度与生产力的关系无论是总体还是不同水平年份,共同特点是随坡度增加生产力相应降低(图7)。二者的关系在总体和较低水平年份,线性相关达到了显著水平(Sig<0.01);在中等和较高年份,关系达到较显著水平(Sig<0.05)。从坡度与生产力关系密切程度来看(图7),在较低年份最高( $R^2 = 0.925$ ),较高年份次之( $R^2 = 0.819$ ),中等年份最低( $R^2 = 0.674$ )。在海拔高度和坡向一致的情况下,总体、较低和最高水平年份,最小值出现在坡度为10—12°区域,分别为( $174.4 \pm 52.9$ )、( $116.6 \pm 41.3$ )和( $222.9 \pm 24.7$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ ;中等水平年份最小值出现在8—10°区域,为( $164.9 \pm 13.0$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

## 2.3 坡向对草甸草原 NPP 分布格局的影响

坡向与生产力关系的共同特点是在N和NE两个方向生产力水平较高,在W、SW、S和SE方向生产力水平较低,而NW和SE居中(图8)。其中在总体水平上,生产力较高N和NE方向,平均为( $184.7 \pm 0.17$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ ;在生产力较低的W、SW、S和SE方向,平均为( $174.5 \pm 0.75$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ ;在生产力中等的NW和SE方向,平均为( $177.4 \pm 1.92$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

## 3 讨论

地形通过影响水热因子的重新分配,从而影响到植被组成、结构等空间分布格局的现象是具有普适性的自然法则。但是,在已有草原生产力动态和格局的研究中,对地形因素考虑却明显不足。在较小的空间尺度

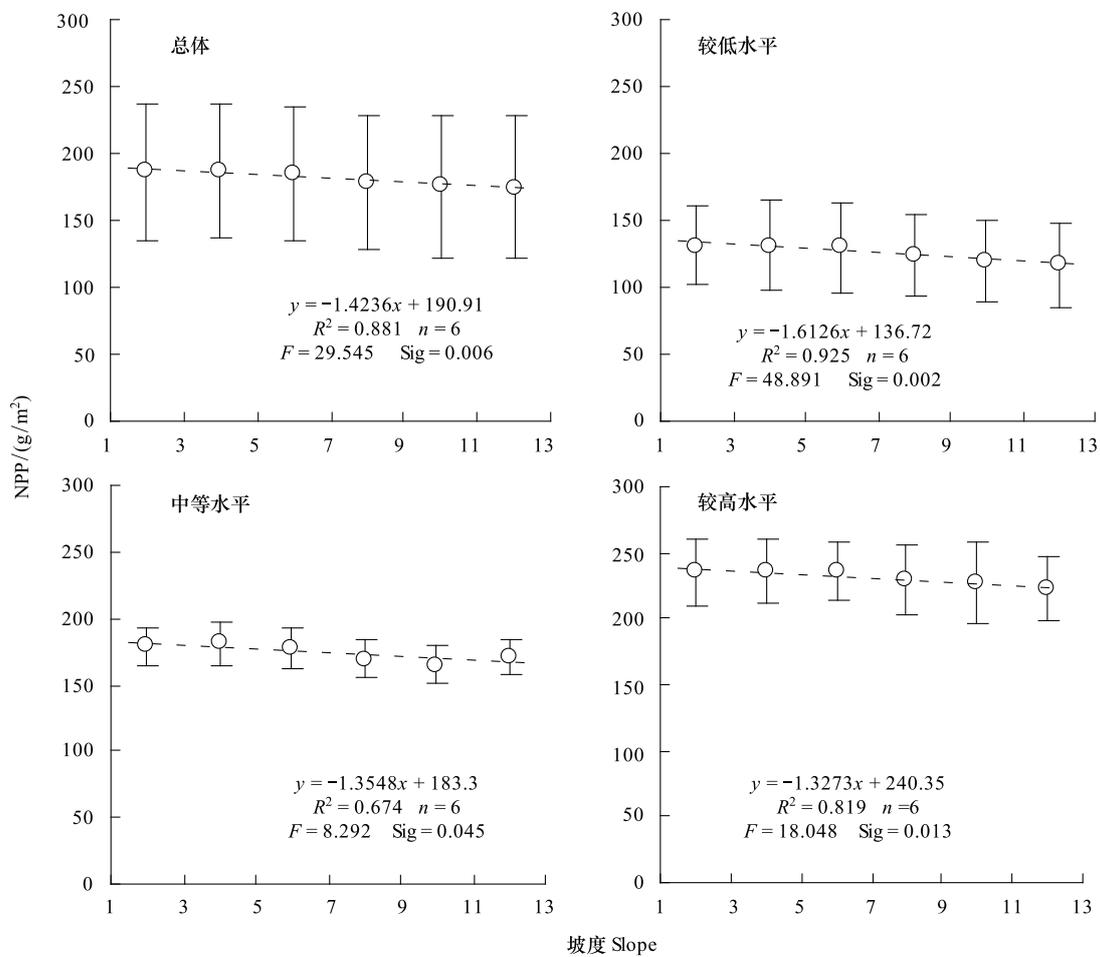


图7 地形坡度与植被生产力的关系

Fig.7 Relationship between slope and vegetation productivity

海拔: 760—780m; 坡向: NE

研究中,涉及到地形对生产力的影响主要集中在地形影响下的水热梯度、地形对植被群落特征与分布的影响<sup>[23-26]</sup>;在较大的空间尺度研究中,则主要强调地形对植被覆盖和地上生物量的影响<sup>[27-28]</sup>,或者是通过不同草场类型的划分对地形作而简单概括的表达<sup>[15-16]</sup>。

从海拔高度对生产力影响来看,13a的动态分析表明无论是在整体水平还是不同生产力年份梯度(图6),NPP随海拔高度升高而增加是普遍性的趋势。为进一步分析其相互关系,采用图6中4个回归模型对海拔高度与生产力的拟合计算结果,用标准差( $SEP = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y - y')^2/n}$ )和平均误差系数( $MEG =$

$(\sum_{i=1}^n |(y - y')/y|)/n$ )进行检验(式中, $y$ 是实测产草量, $y'$ 是模拟模型预测的产草量, $n$ 是样本数,在本文中为13)。结果表明,在总体、较低、中等和较高4类年分中,采用海拔高度与生产力构建的回归模型预测精度都在92%以上(表2)。这也意味着在总体水平上,海拔高度每升高10 m,生产力增加4.78 g/m<sup>2</sup>;在较低水平年份,海拔高度每升高10 m,生产力增加4.14 g/m<sup>2</sup>;在中等水平年份,海拔高度每升高10 m,生产力增加4.82 g/m<sup>2</sup>;在较高水平年份,海拔高度每升高10 m,生产力增加5.25 g/m<sup>2</sup>。

从坡度对生产力影响来看(图7),变化趋势与海拔高度相反,随坡度增加生产力水平下降,但是变化幅度(绝对值)明显低于海拔高度的影响。其中,整体水平最高与最低差值为12.3 g/m<sup>2</sup>;较低水平,为14.8 g/m<sup>2</sup>;中等水平,为15.8 g/m<sup>2</sup>;较高水平,为13.6 g/m<sup>2</sup>。远低于海拔高度梯度上生产力变化(整体、最低、中等和最

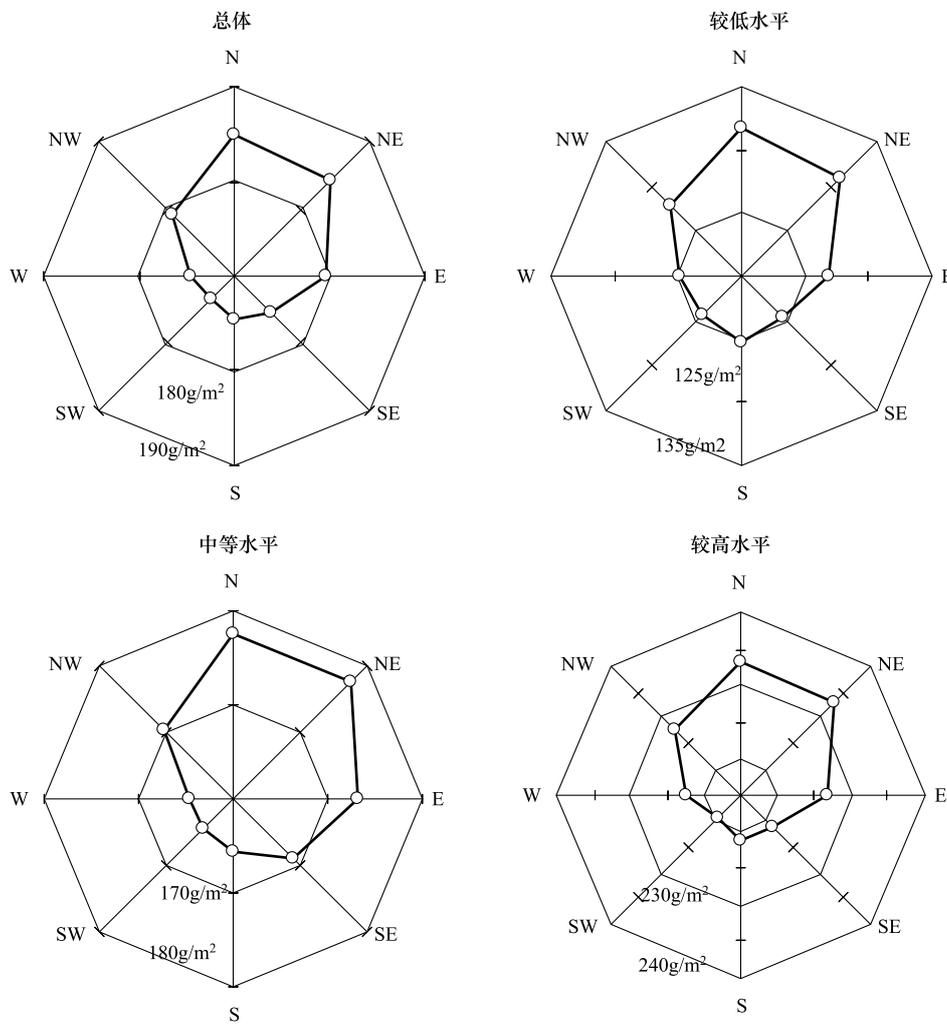


图 8 地形坡向与植被生产力的关系

Fig.8 Relationship between aspect and vegetation productivity

海拔: 760—780 m; 坡度: 0—2°; N、E、S、W 分别为北、东、南、西方向

表 2 海拔高度与生产力估算模型的误差分析

Table 2 Analysis on the Errors of the regression equations for elevation and NPP

生产水平 Productivity level	总体 Totality	较低 Lower	中等 Moderate	较高 Higher
模型 Model	$y = 0.4776x - 186.97$	$y = 0.4142x - 190.03$	$y = 0.4822x - 199.31$	$y = 0.5247x - 174.65$
样本数 Sample number	13	13	13	13
最大误差 Maximum error	0.168	0.370	0.202	0.086
最小误差 Minimum error	0.007	0.005	0.020	0.008
平均误差 Average error	0.044	0.080	0.050	0.031
标准差 Standard deviation	9.32	11.09	10.06	8.07
预测精度 Prediction accuracy	95.59%	92.00%	94.96%	96.94%

高分别为 96.7、93.0、99.6、99.3 g/m<sup>2</sup>), 说明坡度变化对生产力的影响要小于海拔高度。从表 3 可以看出, 在不同生产水平年份采用坡度与生产力构建的回归模型预测精度都在 93% 以上(中等年份除外)。这表明在总体水平上, 坡度每增加 1°, 生产力增加 -1.42g/m<sup>2</sup>; 在较低水平年份, 坡度每增加 1°, 生产力增加 -1.61g/m<sup>2</sup>; 在中等水平年份, 坡度每增加 1°, 生产力增加 -1.35g/m<sup>2</sup>; 在较高水平年份, 坡度每增加 1°, 生产力增加

-1.33g/m<sup>2</sup>。

表 3 坡度与生产力估算模型的误差分析

Table 3 Analysis on the Errors of the regression equations for aspect and NPP

生产力水平 Productivity level	总体 Totality	较低 Lower	中等 Moderate	较高 Higher
模型 Model	$y = -1.4236x + 190.91$	$y = -1.6126x + 136.72$	$y = -1.3548x + 183.3$	$y = -1.3273x + 240.35$
样本数 Sample number	13	13	13	13
最大误差 Maximum error	0.057	0.083	0.371	0.189
最小误差 Minimum error	0.010	0.011	0.062	0.006
平均误差 Average error	0.032	0.041	0.194	0.069
标准差 Standard deviation	1.772	1.593	3.22	2.132
预测精度 Prediction accuracy/%	96.83	95.90	80.59	93.07

从坡向对生产力影响来看,不同坡向之间存在差异(图 8)。从不同生产力水平年份的变化幅度来看,在总体上,生产力变化在 173.3 g/m<sup>2</sup>(SW)到 184.8 g/m<sup>2</sup>(N)之间,相差 11.5 g/m<sup>2</sup>;在较低水平,变化在 124.4 g/m<sup>2</sup>(SW)到 131.7 g/m<sup>2</sup>(N),相差 7.3 g/m<sup>2</sup>;在中等水平,变化在 164.5 g/m<sup>2</sup>(W)到 177.5 g/m<sup>2</sup>(N),相差 13.0 g/m<sup>2</sup>;在较高水平,变化在 222.1 g/m<sup>2</sup>(SE)到 233.2 g/m<sup>2</sup>(N),相差 12.1 g/m<sup>2</sup>。比较生产力变化幅度在海拔高度、坡度和坡向梯度上的特点可以看出,海拔高度导致生产力变化最大,坡度和坡向变化较小,坡度略高于坡向。同时,从不同生产力水平年份变化特点连看,在中等水平具有最大的变幅。说明在较高(或低)的生产力年份,草甸草原生产力分布是趋向均质化,表现为生产力变幅较低,而在中等生产力年份,生产力分布趋向异质化,表现为变幅较高。

综合海拔高度、坡度和坡向与生产力的关系,可以得出地形对生产力的分布格局有影响,特别是海拔高度影响显著,是草甸草原 NPP 空间分布异质性的主要原因之一。从研究区地形因子分布面积的特点来看(表 1),在海拔<680 m 级别,分布面积最小为 61.1 hm<sup>2</sup>,这一面积是在研究区范围限定的基础上出现地,考虑到实际状况(图 1)最小面积应该是 227.1 hm<sup>2</sup>(海拔高度>860 m)。据此可以推断,地形对草甸草原植被生产力影响空间尺度介于土壤环境异质性<sup>[17, 19]</sup>和草场类型异质性之间<sup>[15-16, 28]</sup>。此外,由于 GIS 技术完全支持地形因子分析,所以在区域初级生产力估测和生态承载力分析中,地形因素应该作为不可忽略的要素参与分析,而这一点在以往的研究中尚为系统的纳入<sup>[1, 9, 19]</sup>。

最后,从植被生产力测定和遥感数据匹配的角度来看,地面光谱生物量模型构建了植被纯物理特征与反射光谱的关系,使大量数据获取、测定时间集中和可重复性验证得到保障<sup>[12, 29]</sup>。可以有效地避免已有区域生产力分析中存在的地面样方测定时间与遥感数据获取时间不匹配、样方测定数据一致性难保障(测定人、取样位置和重复次数)以及不同研究结果之间可比性较低等问题<sup>[10, 13, 15-16]</sup>。

#### 4 结论

地形对草甸草原植被生产力分布格局有显著的影响。在海拔高度、坡度和坡向等 3 个因子中,海拔高度引起 NPP 变化幅度最大,坡度次之,坡向最小。在总体特征上,海拔高度每升高 10 m,生产力增加 4.78 g/m<sup>2</sup>;坡度每增加 1°生产力增加 -1.42 g/m<sup>2</sup>;N 坡向植被生产力水平最高(184.8 g/m<sup>2</sup>),SW 坡向最低(173.3 g/m<sup>2</sup>)。不同生产力水平年份对生产力分布格局的影响趋势一致,但变化幅度不同,在中等生产力水平年份 3 个地形因子的变幅都是最大。

#### 参考文献 (References):

- [1] Fang J, Piao S, Tang Z, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723-1723.  
 [2] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431

- (9): 181-184.
- [3] Li S G, Eugster W, Asanuma J, Kotani A, Davaa G, Oyumbaatar D, Sugita M. Response of gross ecosystem productivity, light use efficiency and water use efficiency of Mongolian steppe to seasonal variations in soil moisture. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G1): G01019- G01019, doi: 10.1029/2006JG000349.
- [4] 周广胜, 袁文平, 周莉, 郑元润. 东北地区陆地生态系统生产力及其人口承载力分析. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 65-72.
- [5] 张林波, 李文华, 刘孝富, 王维. 承载力理论的起源、发展与展望. *生态学报*, 2009, 29(2): 878-888.
- [6] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379(22): 718-720.
- [7] Tilman D, Reich P B, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 2001, 294(5543): 843-845.
- [8] 张新时, 周广胜, 高琼, 杨莫安, 倪健, 王权, 唐海萍. 全球变化研究中的中国东北森林——草原陆地样带 (NECT). *地学前缘*, 1997, 4(1/2): 145-151.
- [9] Brogaard S, Runnström M, Seaquist J W. Primary production of Inner Mongolia, China, between 1982 and 1999 estimated by a satellite data-driven light use efficiency model. *Global and Planetary Change*, 2005, 45(4): 313-332.
- [10] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 815-835.
- [11] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, Field C B, Tucker C J, Los S O. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-1998. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 722-735.
- [12] Gao J X, Chen Y M, Lü S H, Feng C Y, Chang X L, Ye S X, Liu J D. A ground spectral model for estimating biomass at the peak of the growing season in Hulunbeier Grassland, Inner Mongolia, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(13): 4029-4043.
- [13] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, Thawley M M, Small J. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 239-255.
- [14] 杜自强, 王建, 沈宇丹. 山丹县草地上生物量遥感估算模型. *遥感技术与应用*, 2006, 21(4): 338-343.
- [15] Xu B, Yang X C, Tao W G, Qin Z H, Liu H Q, Miao J M, Bi Y Y. MODIS - based remote sensing monitoring of grass production in China. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(17-18): 5313-5327.
- [16] Jin Y X, Xu B, Yang X C, Li J Y, Wang D L, Ma H L. Remote sensing dynamic estimation of grass production in Xilinguole, Inner Mongolia. *Scientia Sinica Vitae*, 2011, 41(12): 1185-1195.
- [17] 辛晓平, 高琼, 李镇清, 杨正宇. 松嫩平原碱化草地植物群落分布的空间和环境因素分析. *植物学报*, 1999, 41(7): 775-781.
- [18] 赵连春, 刘荣堂, 杨予海, 李燕军, 张晓庆, 孙小玲. 基于地形因子的草地遥感分类方法的研究. *草业科学*, 2006, 23(12): 26-30.
- [19] 陈宝瑞, 李海山, 朱玉霞, 李刚, 辛晓平, 张宏斌, 周磊. 呼伦贝尔草原植物群落空间格局及其环境解释. *生态学报*, 2010, 30(5): 1265-1271.
- [20] 王正兴, 刘闯, 赵冰茄, 刘爱军. 利用 Modis 增强型植被指数反演草地上生物量. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(2): 10-16.
- [21] 何勇, 董文杰, 郭晓寅, 丹利. 基于 MODIS 的中国陆地植被生长及其与气候的关系. *生态学报*, 2007, 27(12): 5086-5092.
- [22] 李伟, 张国明, 李兆君. 东亚地区陆地生态系统净第一性生产力时空格局. *生态学报*, 2008, 28(9): 4173-4183.
- [23] Hegazy A K, El-Demerdash M A, Hosni H A. Vegetation, species diversity and floristic relations along an altitudinal gradient in south-west Saudi Arabia. *Journal of Arid Environment*, 1998, 38(1): 3-13.
- [24] 王盛萍, 张志强, 张建军, 朱金兆, 郭军庭, 唐寅. 黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应. *生态学报*, 2010, 30(22): 6102-6112.
- [25] Hara M, Hirata K, Fujihara M, Oono K. Vegetation structure in relation to micro-landform in an evergreen broad-leaved forest on Amami Ohshima Island, South-West Japan. *Ecological Research*, 1996, 11(3): 325-337.
- [26] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 张丽霞, 张焱, 陈佐忠. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 667-673.
- [27] Cantón Y, Del Barrio G, Solé-Benet A, Lázaro-Catena R. Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain. *Catena*, 2004, 55(3): 341-365.
- [28] 崔夺, 李玉霖, 王新源, 赵学勇, 张铜会. 北方荒漠及荒漠化地区草地上生物量空间分布特征. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 868-872.
- [29] Montandon L M, Small E E. The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1835-1845.