

刘廷玺,赵心毓,段利民,等.锡林河流域草原生态系统地上生物量时空分布特征及其影响因子.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):604-618. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220145.

Liu Tingxi,Zhao Xinyu,Duan Limin,et al. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Aboveground Biomass in Typical Grassland Ecosystem in Xilin River Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2):604-618. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220145.

# 锡林河流域草原生态系统地上生物量时空分布特征及其影响因子

刘廷玺<sup>1,2</sup>,赵心毓<sup>1</sup>,段利民<sup>1,2</sup>,王怡璇<sup>1,2</sup>,黎明扬<sup>1</sup>,李媛康<sup>1</sup>

1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018

2.内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室,呼和浩特 010018

**摘要:**为系统地量化环境因子之间的协同关系及其对生物量时空格局的调控,以锡林河流域为研究区域,测量了2020年5月—9月典型草原生态系统地上生物量以及气象因子(包括降水量和气温)、地形因子(包括高程)、土壤因子(包括土壤含水量、干密度、有机碳质量分数、全氮质量分数和pH)等三大类共8个环境因子,并通过地理探测器方法定量分析了地上生物量与各环境因子之间的关系。结果表明:1)时间维度上,研究区地上生物量在生长季初期稳定增长,在水热条件最好的7月,植被地上生物量增长最为迅速,在9月3日地上生物量达到峰值,此时流域上、下游地上生物量分别为209.12、147.19 g/m<sup>2</sup>;空间维度上,上游地上生物量显著高于下游(显著性水平 $p < 0.05$ ),地上生物量空间分布格局呈现从东南向西北整体减小的趋势。2)整个生长季中,气象因子(降水量和气温)是地上生物量空间格局的关键驱动因子,其对地上生物量分布格局的解释率在60.0%以上;生长季末期,除气象因子外,土壤pH也成为影响研究区地上生物量分布格局的主要驱动因子。3)生长季各阶段,各环境因子对地上生物量的交互作用均呈现出非线性增强和双因子增强关系。生长季初期,降水量和土壤干密度之间交互作用的影响力最大;生长旺期及末期,随着土壤含水量达到较高水平,土壤干密度与其他环境因子(降水量、气温、pH)的交互作用对流域植被地上生物量影响显著。

**关键词:**锡林河流域;草原;地上生物量;环境因子;地理探测器

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220145

中图分类号:P339

文献标志码:A

收稿日期:2022-05-13

作者简介:刘廷玺(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事寒旱区生态水文方面的研究,E-mail:txliu1966@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51939006,51909122,52269005);内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0071,2021GG0072);内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室建设项目(2020PT0001);教育部创新团队发展计划项目(IRT\_17R60);科技部重点领域创新团队项目(2015RA4013);内蒙古自治区科技领军人才团队项目(2022LJRC0007)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51939006, 51909122, 52269005), the Science and Technology Project of Inner Mongolia (2021GG0071, 2021GG0072), the Construction Project of Water Resources Protection and Utilization Key Laboratory of Inner Mongolia (2020PT0001), the Project of Ministry of Education Innovative Research Team (IRT\_17R60), the Project of Innovation Team in Priority Areas Accredited by the Ministry of Science and Technology (2015RA4013) and the Project of Science and Technology Leading Talent Team of Inner Mongolia Autonomous Region (2022LRC0007)

# Distribution Characteristics and Influencing Factors of Aboveground Biomass in Typical Grassland Ecosystem in Xilin River Basin

Liu Tingxi<sup>1,2</sup>, Zhao Xinyu<sup>1</sup>, Duan Limin<sup>1,2</sup>, Wang Yixuan<sup>1,2</sup>, Li Mingyang<sup>1</sup>, Li Yuankang<sup>1</sup>

1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. Inner Mongolia Water Resource Protection and Utilization Key Laboratory, Hohhot 010018, China

**Abstract:** In order to systematically quantify the synergistic relationship between environmental factors and their regulation of spatial and temporal patterns of biomass, taking the Xilin River basin as the study area, this study measured the aboveground biomass (AGB), soil water content, soil density, organic carbon mass fraction, total nitrogen mass fraction, soil pH and other environmental factors of the typical grassland ecosystem from May to September 2020. The relationship between AGB and driving factors were analyzed by using the geographic detector method. The results show that: 1) Watershed-level AGB increases stably at the beginning stage of the growing season, displays the highest increase rate in July, and reaches the maximum on September 3rd. AGB in the upstream and downstream is 209.12 and 147.19 g/m<sup>2</sup>, respectively. AGB in the upstream of the watershed is significantly higher than that in the downstream (significance level  $p < 0.05$ ), and the overall spatial pattern of AGB shows a decreasing trend from the southeast to the northwest in the watershed. 2) During the entire vegetation growing season, meteorological factors (precipitation and air temperature) are key factors driving the changes in AGB, with an explanation rate of more than 60.0% in the regression model. At the end of the growing season, in addition to meteorological factors, soil pH also significantly influences the dynamics of AGB in time and space. 3) At each stage of the growing season, the interaction between environmental factors shows nonlinear enhancement and double-factor enhancement. At the beginning of the growing season, the interaction between precipitation and dry density of soil shows the most influential. When soil water content reaches a relatively high level, the interaction of soil dry density with other environmental factors (precipitation, air temperature, pH) exerts a significant impact on the AGB in the peak and late stages of the growing season vegetation growth in the basin.

**Key words:** Xilin River basin; grassland; aboveground biomass; environmental factors; geographic detectors

## 0 引言

草地作为重要的自然资源,具有多种生态系统服务功能<sup>[1]</sup>。其不仅在调节气候、维持和提升土壤肥力、保持生物多样性等方面具有重要功能,而且在经济效益和社会效益方面发挥了重要作用。地上生物量是认识生态系统功能的基础<sup>[2-3]</sup>,不仅是反映草地植物生产力特征的关键指标,也是揭示生态系统群落结构和功能的重要指标。地上生物量的变化受植物类型和环境因子共同作用<sup>[4]</sup>,其大小及空间分布受降水、气温、地形、海拔、土壤理化性质和人类活

动等因素的综合影响<sup>[5-9]</sup>。区域尺度上生物量形成与环境因子的关系及其作用机制也是生态学研究的重要问题。

草地植被的生长动态是植物对环境因子综合响应的直接表现形式<sup>[10]</sup>。近年来,国内外学者针对降水、海拔、光照、水热条件和土壤理化性质<sup>[11-13]</sup>等环境因子,以及森林<sup>[14]</sup>、草原<sup>[11,15-16]</sup>、沙地灌木<sup>[12,17]</sup>等不同植被类型进行了大量研究,结果表明,地上生物量与降水之间存在正相关关系<sup>[18-20]</sup>。就内蒙古典型草原而言,降水及气温共同决定了地上生物量的空间分布特征,年降水量的经向分布决定地上生物

量分布的空间分异特征,而水热条件的共同作用则进一步影响了地上生物量分布的纬向分异规律<sup>[21]</sup>。栗文瀚等<sup>[22]</sup>发现,随着海拔升高,高寒草地植物群落生产力先增加后降低。傅致远等<sup>[23]</sup>利用多元统计典范对应排序分析(CCA)法对内蒙古东部典型半干旱草原进行研究,发现植被生物量变化受土壤水分、总磷、有机质及总氮的综合影响,其中土壤水分的影响权重较大。但是,现有研究很少涉及到环境因子间的协同效应,无法量化环境因子之间的协同关系及其对生物量时空格局的调控。

本文运用相关分析、地理探测器中分异及因子探测、交互作用探测、生态探测等方法系统研究了环境因子对草地地上生物量的影响,量化了环境因子独立作用及因子间交互作用对地上生物量的解释率,即某环境因子在多大程度上解释了地上生物量的空间分异,旨在为草地生态系统的有效管理、草原畜牧业的可持续发展、草地资源的合理开发和管理

等方面提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

锡林河流域位于中国内蒙古自治区东南部锡林郭勒盟境内(43°24'N—44°39'N,115°25'E—117°15'E)(图1)。锡林河流域总面积 10 542 km<sup>2</sup>,锡林河全长 268.1 km,平均海拔 988.5 m。以库尼苏曼河为界,分界以上为锡林河上游,流域经过丘陵地带,河道异常弯曲,间或有沼泽地;分界以下为流域中下游,河水折向北流,形成河间盆地,最后注入白音淖尔湖<sup>[24]</sup>。流域地属温带半干旱大陆性季风气候,降水少,蒸发量多,日温差大。区域多年平均降水量为 278.9 mm,年均蒸发量为 1 900 mm,年平均气温为 2.8 ℃。2020 年流域上、下游的降水量分别为 247.3、214.8 mm,且均集中在 5—9 月。空气温度及空气相对湿度均表现为上游大于下游(图2),二者

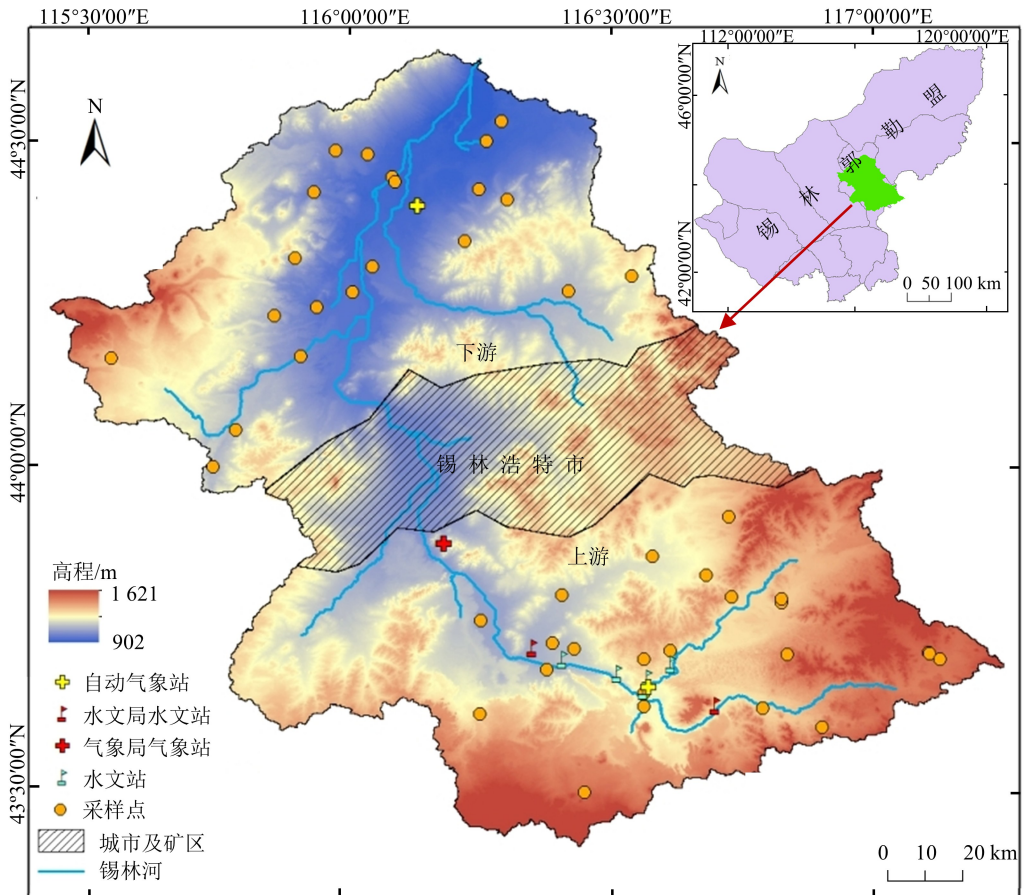


图 1 锡林河流域生态调查采样点分布  
Fig.1 Sampling points in the Xilin River basin

均能够代表研究区多年平均值。流域地表覆盖以草地为主,约占流域总面积的 89%,其次是湿地、沙地和城市用地。锡林河上游地区海拔较高,气候半湿润,以草甸草原为主,土壤类型以石灰性砂性土和黏化栗钙土为主,下游土壤类型则以筒育栗钙土为主(图 3)。

### 1.2 研究方法

已有研究<sup>[25-26]</sup>表明,气象和地形是地上生物量的主要环境影响因子,而土壤理化性质同样影响地上生物量,但其贡献率较小。考虑锡林河流域特性和探测因子选取的系统与科学性,本文从气象、地形、土壤方面选取了降水量、气温、高程、土壤含水量、干密度、有机碳质量分数、全氮质量分数、pH 等 8 个可获取及可量化的因子作为环境因子。各环境因子的测试方法见表 1,空间分布见图 4。

#### 1.2.1 样方布设及土样采集

2020 年 4 月对研究区进行实地踏勘,沿锡林河

流域纵向梯度(上、下游)依次布设 45 个采样点(图 1),采样点涵盖锡林河流域内的主要植被和土壤类型,且在各海拔梯度内分布均匀。野外调查采样于 2020 年 5 月 23 日、6 月 8 日(生长季初期),6 月 24 日、7 月 10 日、7 月 26 日(生长季旺期)和 8 月 11 日、9 月 3 日(生长季末期)进行,每次调查用时 3 d。调查样方为 1 m×1 m,记录样方内植被组成、样方经纬度、海拔、植物名称等信息。将样方内草样齐地刈割取鲜重后,装入纸袋带回实验室,以备测定地上生物量。

植被调查的同时进行土壤样品采集。于每个植被调查样地开挖一个土壤剖面,清除土壤表面枯落物等杂物,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀采集 0~10,10~20,20~40,40~60,60~80 cm 等深度间隔的土样,每个样地同一深度取 3 个重复。土壤样品带回实验室,用于测定土壤含水量及干密度。此外,在对应位置取

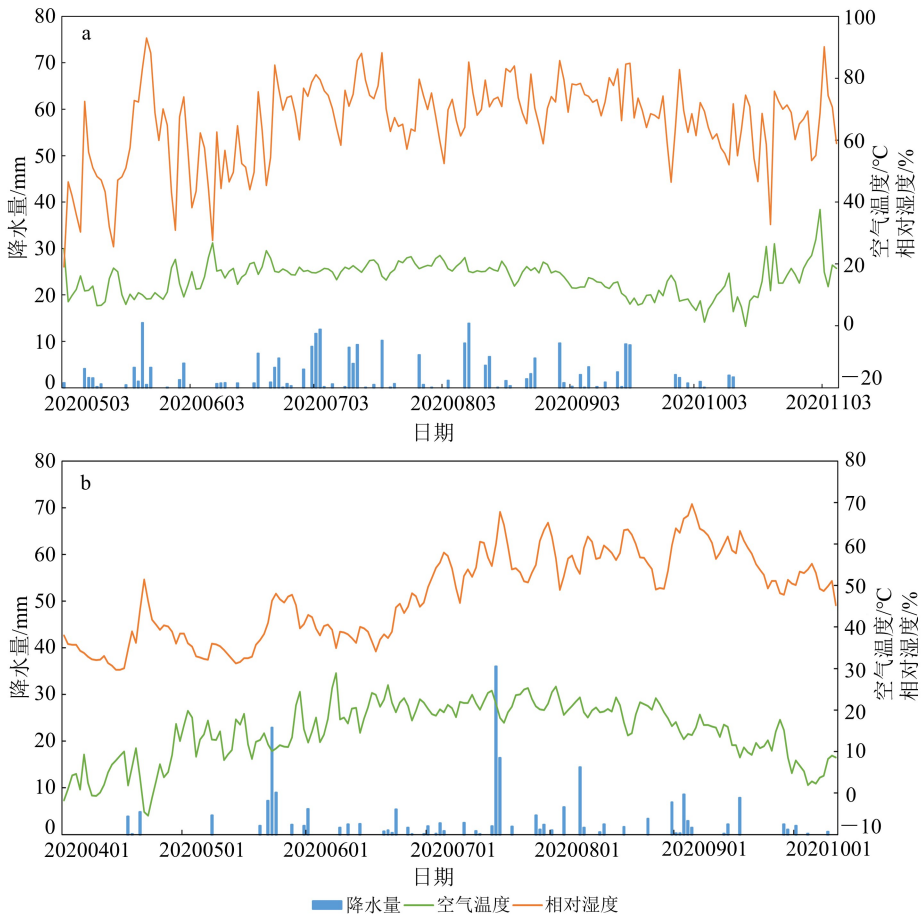


图 2 锡林河流域 2020 年上(a)、下(b)游自动气象站降水量、空气温度、相对湿度日变化过程

Fig.2 Daily variation of precipitation, air temperature and relative humidity in upstream (a) and downstream (b) automatic weather stations in Xilin River basin in 2020

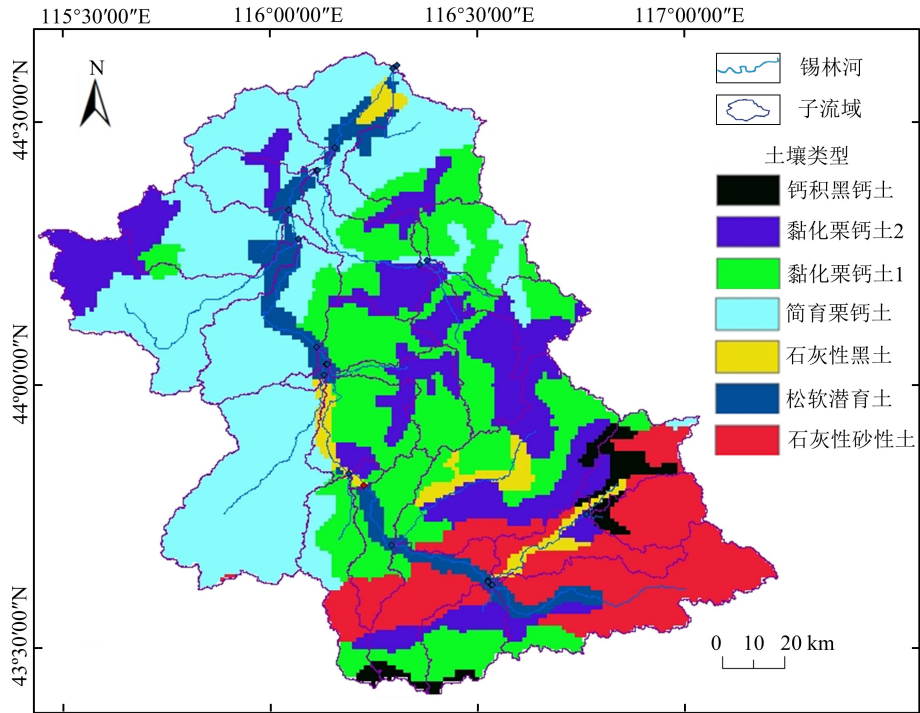


图 3 锡林河流域土壤类型分布图

Fig.3 Distribution of soil types in Xilin River basin

表 1 环境因子分类及测试方法

Table1 Classification and testing methods of environmental factors

分类	环境因子	测试方法
气象	降水量	自动气象站测量
	气温	自动气象站测量
地形	高程	数字高程数据(DEM)
土壤	土壤含水量	烘干法
	干密度	烘干法
	有机碳质量分数	重铬酸钾外加热法
	全氮质量分数	凯氏定氮法
	pH	便携式 pH 计

混合均匀的原状土装入自封袋,带回实验室用于土壤理化性质测定。

### 1.2.2 地上生物量及土壤理化性质测定

测定地上生物量时,先将粘附在草样上的土壤等杂质除去,然后将其处于 80 °C 条件下烘干至恒温并称取干质量(精度 0.01 g),最后分别计算上、下游地上生物量的平均值。

土壤含水量用烘干法测得。每次测试先用 0.01 g 精度的电子天平称取所采集土壤样品的湿质量  $m_1$ ,

并在 105 °C 条件下烘干至恒定质量,再称取干质量  $m_2$ 。土壤含水量  $\theta_w$  计算公式为

$$\theta_w = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100\% \quad (1)$$

将环刀土样在 106 °C 条件下烘干至恒定质量,测定土壤干质量,土壤干质量与环刀容积的比值为土壤干密度;土壤有机碳质量分数采用重铬酸钾外加热法测定;全氮质量分数采用凯氏定氮法测定;土壤 pH 用瑞士梅特勒-托利多仪便携式 pH 计测定。

### 1.2.3 气象数据获取

气象数据包括地面净辐射量、地面 2 m 气温、相对湿度、降水量、风速、风向等,由内蒙古农业大学在研究区内布设的 2 个 Campbell 自动气象站(美国)测得,位置见图 1。数据采集频率为 1 次/30 min。本研究选择降水量和气温作为环境因子。

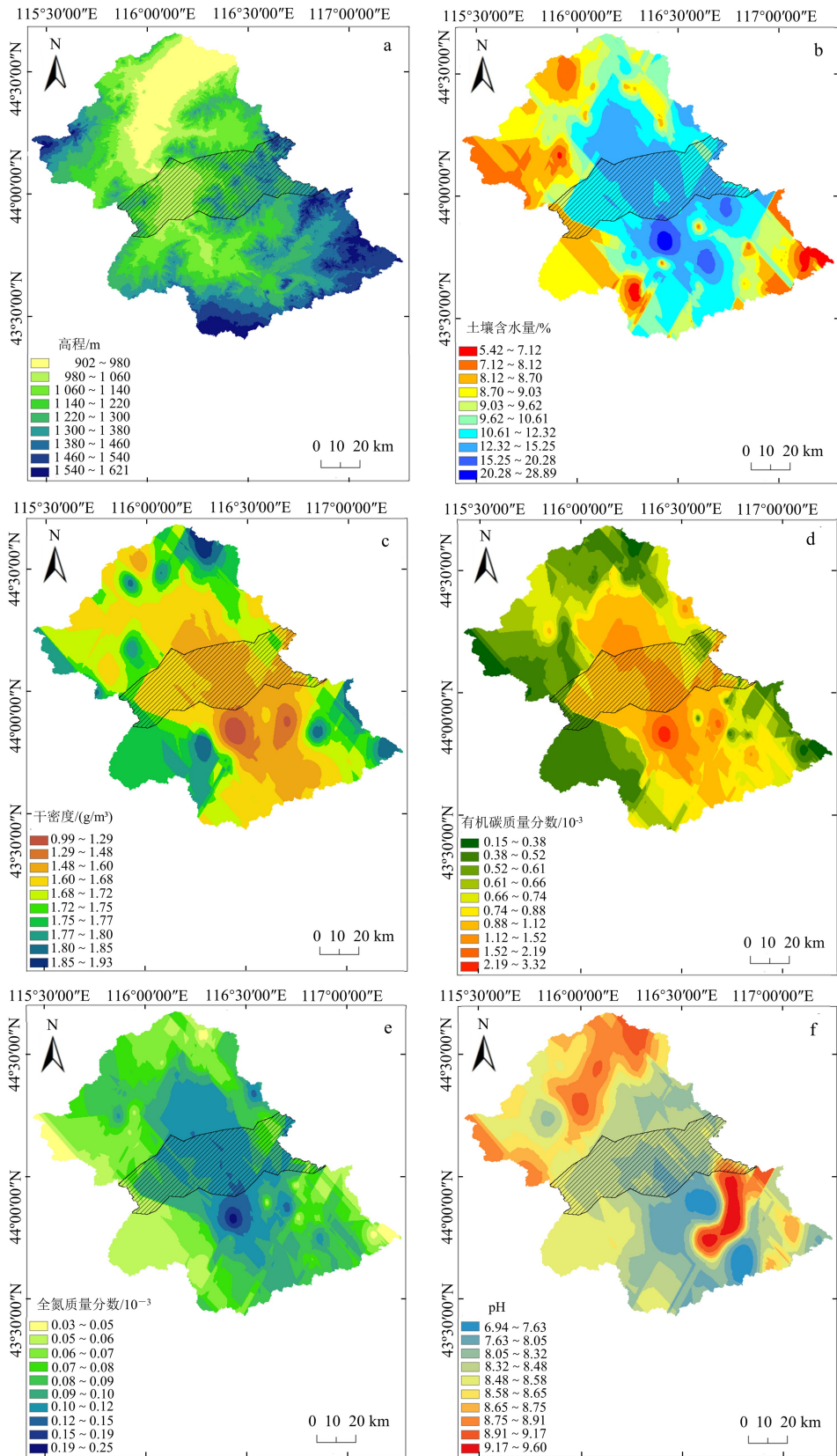
### 1.2.4 地形数据获取

本研究地形数据采用的是数字高程数据(DEM),源自于地理空间数据云 GDEMDEM 30M 分辨率数字高程数据(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m × 30 m。

## 1.3 数据处理与分析

### 1.3.1 单因素方差分析

联合单因素方差分析(one way ANOVA)和最



由于降水量和气温数据由流域内两个自动气象站获得,分布到各采样点数值差异不明显,因此图 4 未绘制降水和气温的空间分布图。

图 4 环境因子空间分布

Fig.4 Spatial distribution of environmental factors

小显著差法(LSD)对比流域上、下游地上生物量间差异是否具有显著性(显著性水平  $p < 0.05$ )。地上生物量数据处理分析及图表制作利用 Excel2016、SPSS25.0 及 ArcGIS10.2 软件完成。

### 1.3.2 指标数据提取及离散化处理

针对本文选择的 8 个环境因子,首先利用 ArcGIS10.2 提取其空间属性值,并用自然断点法<sup>[27]</sup>进行离散化处理,然后代入地理探测器软件,探测各因子对内陆河流域生长期地上生物量分布及变化的影响。

### 1.3.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等<sup>[28]</sup>提出的一种新的空间统计方法,其基本思想是:假设研究区分为若干子区域,若子区域的方差之和小于区域总方差,则存在空间分异性;若两变量的空间分布趋于一致,则两者存在统计关联性。其主要用于分析空间分异性,以及揭示其背后驱动力。地理探测器由 4 部分组成,分别是分异及因子探测、交互作用探测、生态探测与风险探测,本文应用了前 3 个。

1) 分异及因子探测。探测属性  $Y$  的空间分异性,以及探测因子  $X$  多大程度上解释了  $Y$  的空间分异,其分异程度通过环境因子对地上生物量分布格局的解释率( $q$ )体现,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{E_{ss}}{E_T}; \quad (2)$$

$$E_{ss} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, E_T = N \sigma^2. \quad (3)$$

式中:  $L$  为属性  $Y$  或因子  $X$  的分层数目,即分类或分区数目;  $N_h$  为第  $h$  个分层的单元数;  $\sigma_h^2$  为第  $h$  个分层  $Y$  值的方差;  $N$  为全区的单元数;  $\sigma^2$  为全区  $Y$  值的方差;  $E_{ss}$  为层内方差和;  $E_T$  为全区总方差。  $q$  的值为  $[0, 1]$ ,  $Y$  (地上生物量)的空间分异性越明显,  $q$  值越大;若分层是由因子  $X$  生成的,则  $X$  对  $Y$  具有越强的解释率,  $q$  值越大。

2) 交互作用探测。识别各因子之间交互作用的大小,分别计算各单因子  $q$  值与交互作用  $q$  值  $[q(X_1 \cap X_2)]$  ( $X_1$  和  $X_2$  代表两种不同因子),若  $\{q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]\}$ , 则交互类型为双因子增强;若  $\{q(X_1 \cap X_2) > [q(X_1) + (X_2)]\}$ , 则交互类型为非线性增强。

3) 生态探测。用  $F$  统计方法比较因子  $X_1$ 、 $X_2$  对属性  $Y$  空间分布的影响是否有显著差异,计算公

式为:

$$F = \frac{N_{X_1} (N_{X_2} - 1) E_{ss, X_1}}{N_{X_2} (N_{X_1} - 1) E_{ss, X_2}};$$

$$E_{ss, X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2;$$

$$E_{ss, X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2. \quad (4)$$

式中:  $F$  为统计分数;  $N_{X_1}$  及  $N_{X_2}$  分别表示两个因子  $X_1$  和  $X_2$  的样本量;  $E_{ss, X_1}$  和  $E_{ss, X_2}$  分别为由  $X_1$  和  $X_2$  形成的层内方差和;  $L_1$  和  $L_2$  分别为变量  $X_1$  和  $X_2$  和分层数目。

## 2 结果与分析

### 2.1 地上生物量动态变化及空间分布特征

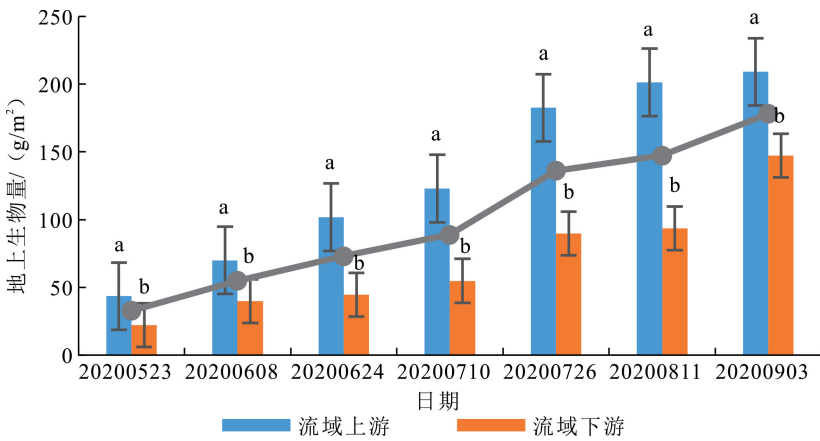
锡林河流域的植被地上生物量的生长和积累随气温的升高、降水增多而增加(图 5)。2020 年 5 月 23 日,流域上、下游地上生物量分别为 43.45、22.14  $\text{g}/\text{m}^2$ ;随着温度升高,降雨增多,植被地上生物量呈逐渐累积的过程;在水热条件最好的 7 月,植被地上生物量增长最为迅速(表 2),流域上、下游地上生物量的累计速率分别可达 3.73、2.19  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;地上生物量在 9 月 3 日达到峰值,此时上、下游地上生物量分别为 209.12、147.19  $\text{g}/\text{m}^2$ 。在植被生长季,上游地上生物量显著高于下游。

锡林河流域地上生物量空间分布具有明显的区域特征。水平方向上,随经度增加,地上生物量逐渐增多,并趋近于二次函数,其中最小地上生物量分布于  $115.9^\circ\text{E}$ — $116.1^\circ\text{E}$ (图 6a),而随纬度增加,地上生物量逐渐减少(图 6b);海拔梯度上,地上生物量随海拔升高而呈现增加的趋势(图 6c)。整体而言,流域地上生物量呈自东南向西北逐渐减少的趋势(图 7)。

### 2.2 探测因子影响力

整个植被生长季中,气象因子(降水量和气温)对地上生物量变化的影响最为显著,远高于地形及土壤因子(表 3)。其中:降水量和气温的  $q$  值均在 60.0%以上,高程的  $q$  值则在 22.0%以上;各土壤因子中,土壤含水量、全氮质量分数及 pH 在生长季不同阶段  $q$  值变化明显,即土壤因子对地上生物量的解释率存在明显的时间动态。

生长季初期(5 月 23 日—6 月 8 日),各因子  $q$  值排序从大到小为气温、降水量、高程、干密度、土壤含水量=有机碳质量分数、全氮质量分数、pH。气象因子  $q$  值均较大,降水量、气温分别达到 65.1%和



不同字母表示同一时间各区域地上生物量在 0.05 水平下差异显著(LSD test)。

图 5 锡林河流域生长季地上生物量的动态变化

Fig.5 Dynamic changes of aboveground biomass in the growing season in Xilin River basin

表 2 各阶段地上生物量平均累计速率

Table 2 Average accumulation rate of aboveground biomass at each stage g/(m² · d)

日期	上游	下游	流域
20200523—20200608	1.66	1.11	1.38
20200608—20200624	1.98	0.29	1.14
20200624—20200710	1.32	0.64	0.98
20200710—20200726	3.73	2.19	2.96
20200726—20200811	1.17	0.23	0.70
20200811—20200903	0.32	1.94	1.34

66.6%,*q* 值均在 65.0% 以上;其次为地形因子,高程的 *q* 值为 30.7%;土壤含水量、土壤干密度及有机碳质量分数 *q* 值分别为 27.6%、28.2%及 27.6%(表 3)。

生长季旺期(6 月 24 日—7 月 26 日),各因子 *q* 值从大到小为降水量=气温、pH、土壤含水量、全氮质量分数、有机碳质量分数、高程、干密度。气象因子 *q* 值均较大,降水量、气温均为 61.9%,均在 60.0% 以上;pH、土壤含水量及全氮质量分数 *q* 值分别为 59.3%、54.0%和 46.7%,在 46.0% 以上;高程的 *q* 值为 31.3%(表 3)。

生长季末期(8 月 11 日—9 月 3 日),各因子 *q* 值排序从大到小为 pH、降水量=气温、土壤含水量、有机碳质量分数、高程、全氮质量分数、干密度。气象因子 *q* 值仍均较大,降水量、气温均为 66.0%;土壤因子中的土壤含水量及 pH 的 *q* 值分别为 45.9%和 67.5%;地形因子高程的 *q* 值较小,仅为

22.1%(表 3)。

### 2.3 生长季环境因子交互探测结果

各因子之间的交互作用比各因子的 *q* 值都要高(图 8),表明各因子之间的交互作用是相互增强或非线性增强的,没有独立或减弱关系。

在生长季初期,双因子之间的交互作用对植被地上生物量解释率最高的 4 组为降水量 ∩ 土壤干密度(100.0%) > 气温 ∩ 土壤干密度(96.9%) > 降水量 ∩ 土壤含水量(95.0%) > 气温 ∩ 土壤含水量(91.9%)(图 8a)。表明双因子的交互作用中,降水量和土壤干密度因子的交互作用最为显著,其次为气温和降水量与土壤因子的交互作用。

生长季旺期,双因子之间的交互作用对植被地上生物量解释率最高的 4 组为降水量 ∩ 土壤干密度(89.0%) = 气温 ∩ 土壤干密度(89.0%) > 降水量 ∩ 有机碳质量分数(88.4%) = 气温 ∩ 有机碳质量分数(88.4%)(图 8b)。表明因子之间交互作用中,土壤干密度与降水量及气温之间交互作用最大,这与单因子分析的气象因子作用大于土壤因子作用的结果有所不同。

生长季末期,双因子之间的交互作用对植被地上生物量解释率最高的 4 组为土壤含水量 ∩ 土壤干密度(100.0%) > 降水量 ∩ 土壤干密度(94.3%) > 土壤干密度 ∩ pH(93.0%) = 气温 ∩ 土壤干密度(93.0%)(图 8c)。表明双因子之间的交互作用中,土壤干密度与土壤含水量及降水量的交互作用较大。

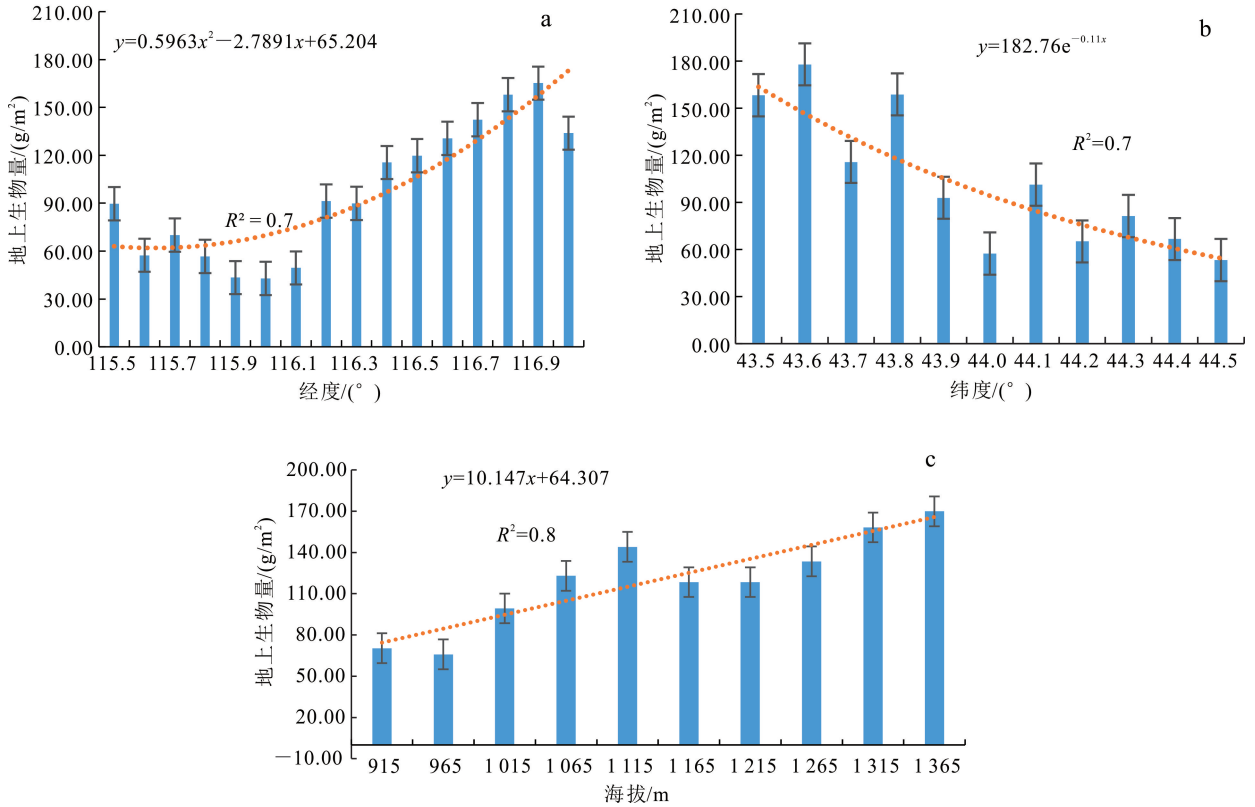


图 6 锡林河流域地上生物量与经度(a)、纬度(b)、海拔高度(c)的关系

Fig.6 Relationship between aboveground biomass and longitude (a), latitude (b), altitude (c) in Xilin River basin

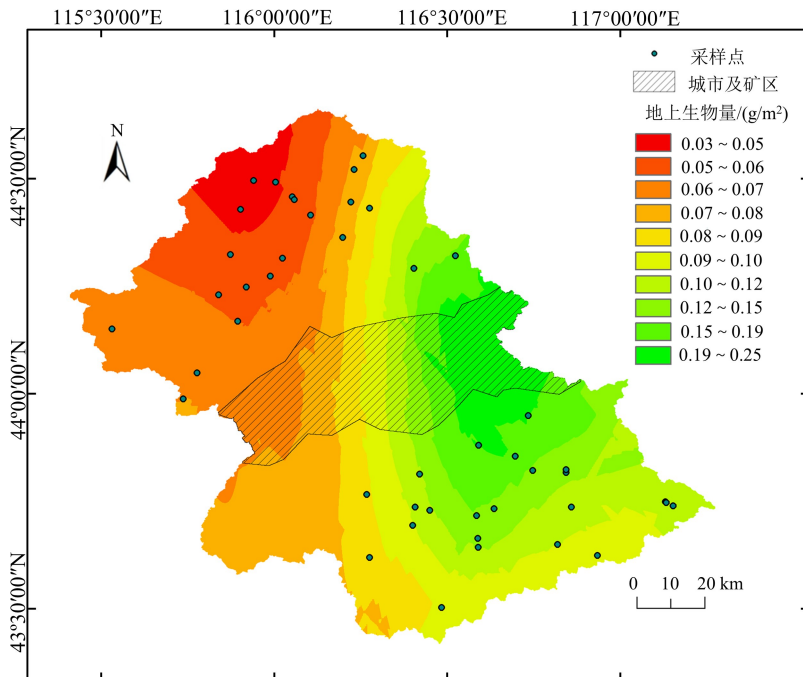


图 7 锡林河流域地上生物量空间分布图

Fig.7 Dynamic changes of aboveground biomass in the growing season in Xilin River basin

表3 锡林河流域生长季各阶段地上生物量主要影响因子对地上生物量分布格局的解释率

Table 3 Interpretation rate of aboveground biomass distribution pattern by main influencing factors at each stage of growing season in Xilin River basin

分类	环境因子	%		
		生长季初期	生长季旺期	生长季末期
气象	降水量	65.1	61.9	66.0
	气温	66.6	61.9	66.0
地形	高程	30.7	31.3	22.1
	土壤含水量	27.6	54.0	45.9
土壤	干密度	28.2	20.0	8.2
	有机碳质量分数	27.6	36.4	29.4
	全氮质量分数	13.6	46.7	11.0
	pH	13.1	59.3	67.5

## 2.4 生长季环境因子显著性探测结果

生长季初期、旺期、末期环境因子的差异性统计结果(图9)表明,调控地上生物量的机制存在着差异,例如:在植物生长季初期(图9a),降水量、气温与高程和各土壤因子之间均存在显著差异,高程与土壤全氮质量分数和pH也有显著差异,而土壤因子相互间无显著差异。这进一步验证了降水量和气温比其他因子的解释率强。而生长季旺期和末期,土壤因子间有显著差异的组合较多,其中:在生长季旺期(图9b),除降水量与气温,土壤含水量与降水量、气温、全氮质量分数、pH,高程与干密度、有机碳质量分数、pH与降水量、气温,以及全氮质量分数与有机碳质量分数的组合外,其余土壤因子间均有显著性差异;在生长季末期(图9c),降水与气温,高程与干密度、有机碳质量分数、全氮质量分数,干密度与全氮质量分数,pH与降水、气温的组合无显著差异。

## 3 讨论

锡林河是典型的内陆河流域,温度、降水和土壤水热条件对其生物量有显著的调控作用<sup>[29-30]</sup>。环境因子对地上生物量的影响在生长季不同阶段有所差异(表3)。

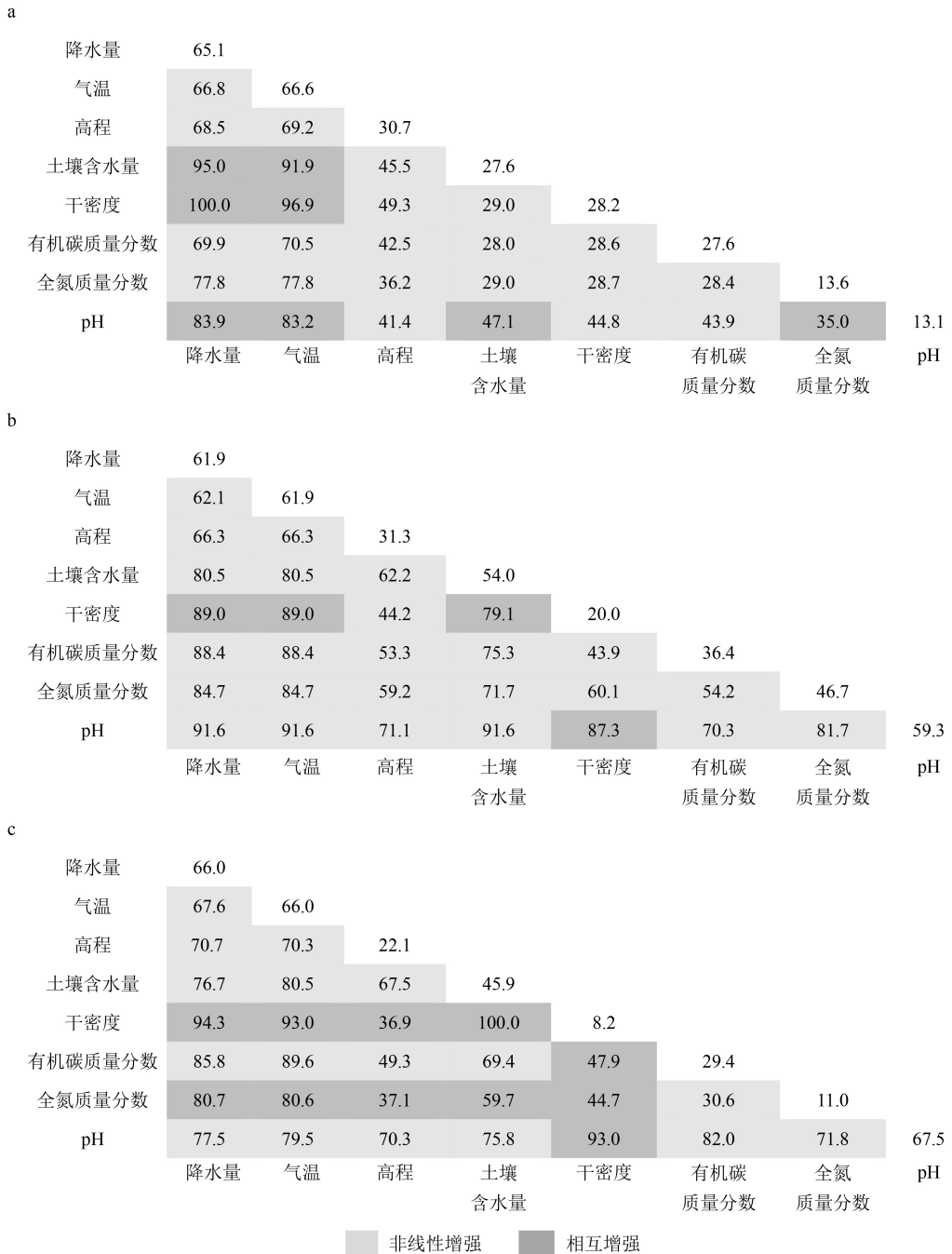
生长季初期,气温和降水量是影响地上生物量的主导因子,分别能解释地上生物量变化的66.6%和65.1%。随降水增多和气温升高,植物光合作用速率和呼吸作用不断加强,水热条件协同加速植被

生长。到了4月,研究流域上游的降水为植被初期生物量的累积提供了较好的环境条件,同时为生长季旺期生物量的累积提供了基础<sup>[25]</sup>。与本研究成果不同,陈效速等<sup>[21]</sup>发现草地生态系统地上生物量与多年平均温度呈负相关关系,并推测较高的气温增加了土壤蒸发,进而降低了土壤水分并限制植被生长。本文发现的水热协同作用促进植被生长也说明,研究流域中,降水有效补给土壤含水量且满足生物量累积的需求,因此土壤含水量对生物量变化的影响小于气温和降水量(表3)。此外,研究区土壤含水量也与其区域内植被对干旱环境的适应或植被主要利用采样深度之外的土壤含水量有关<sup>[31]</sup>。

在生长季旺期,气温和降水量虽仍是植被生长的主要限制因子,但由于降水量尚未达到全年峰值,高温导致土壤蒸发的加剧,使得植被可利用水量降低,抑制植被生长。因而,该阶段气温和降水量对地上生物量的解释率均降低为61.9%(表3)。此时经过降水补给,土壤含水量保持在较高水平,为植物生长提供了较为稳定的水源,成为影响地上生物量的关键因子,其对地上生物量的解释率增大到54.0%(表3)。黄德青等<sup>[32]</sup>在祁连山北坡的研究中也发现,地上生物量和土壤含水量呈正相关关系。然而,在黄土丘陵区,张娜等<sup>[33]</sup>发现地上生物量和与各层土壤含水量都呈负相关,这可能与干旱地区植被用水策略及其对地上-地下生物量的分配有关<sup>[34]</sup>。

在生长季末期,降水量逐渐增大,植被生长所需水分充沛,此时较高的气温有利于植被的生长,气温和降水量对地上生物量的解释率均增长为66.0%(表3)。该结果与席小康等<sup>[26]</sup>、翟羽娟等<sup>[35]</sup>和白永飞等<sup>[15]</sup>在研究流域附近得出的结果相一致。

草地地上生物量的空间分布格局主要受水热条件共同制约<sup>[21]</sup>。席小康等<sup>[26]</sup>的研究指出,高程与4—7月降水量对地上生物量累积的调控主要通过4—7月平均气温的间接作用而实现。因此,锡林河流域东南—西北向水分逐渐减少、海拔逐渐降低、热量逐渐增加的环境梯度总体上决定了该流域地上生物量由东南向西北逐渐减少的空间分布格局(图7)。此外,由于植被生长的同时受到如气候、土壤以及人类活动等因素影响<sup>[36]</sup>,在草地生态系统,降水量是影响生物量累积的关键环境因子。在本文研究期内,流域上游地上生物量显著高于下游,这与张俊怡等<sup>[25]</sup>的结果一致,可归因于流域上游降水量更为充沛,且土壤的持水性更好<sup>[25]</sup>。



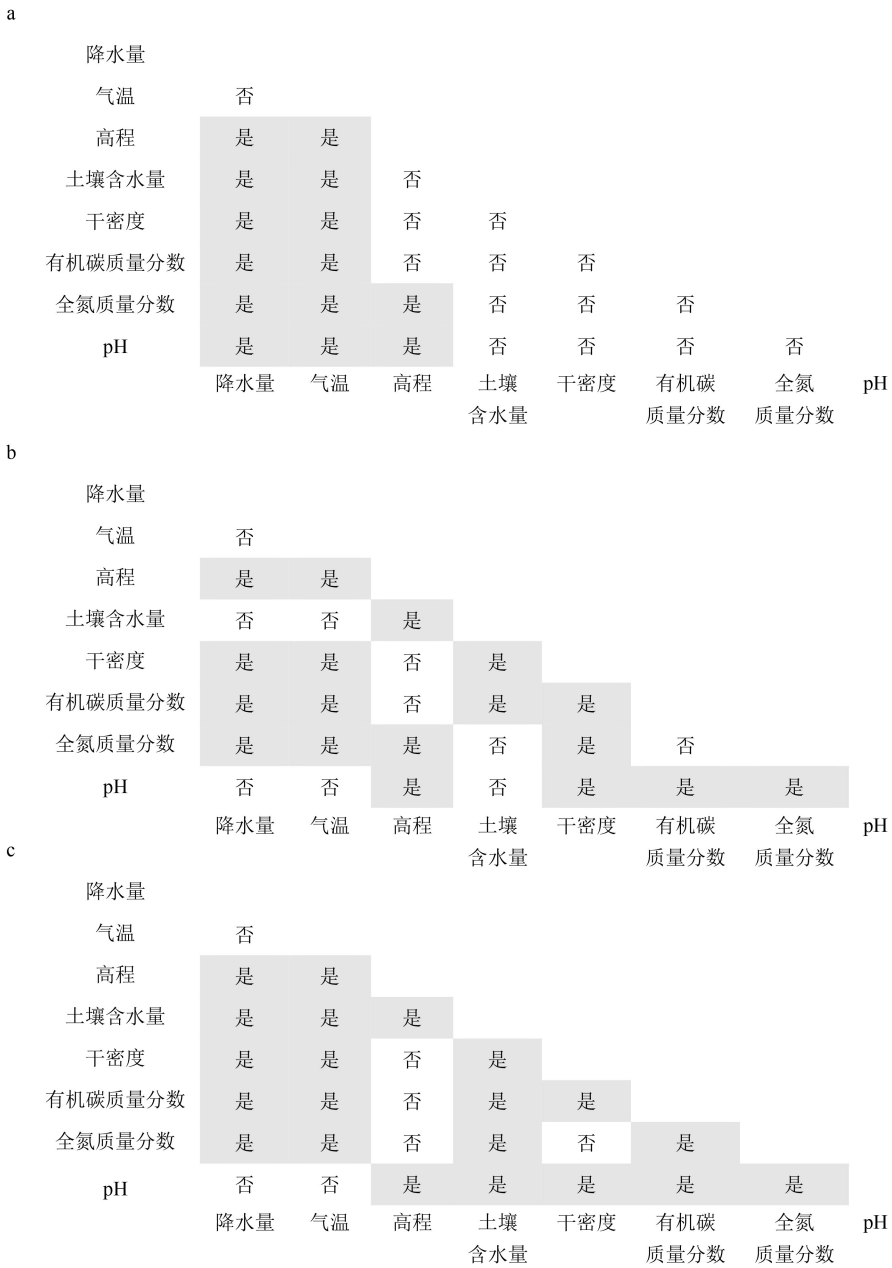
底部空白代表单因子  $q$  值。 $q$  值单位为 %。

图 8 研究区生长季初期(a)、旺期(b)、末期(c)各环境因子交互探测结果

Fig.8 Environmental factors interaction detector at the beginning (a), middle (b), and end (c) stages of the growing season in the study area

高程与多种环境因素具有耦合关系,其变化往往会影响到气温、降水量及热量等再分配,从而改变地上生物量的分布格局<sup>[37]</sup>。本文交互探测结果(图 8)表明,生长季初期,降水量和干密度的交互作用最为显著,解释率接近 100.0%,但探测因子影响结果显

示,高程仅能解释地上生物量的 30.7%;这表明降水量和高程的协同作用对植被生长有更为显著的影响。因此,在本研究流域降水是决定地上生物量沿海拔分布格局的关键因素;也有研究<sup>[38]</sup>认为,在其他区域温度是地上生物量海拔格局的成因。



“是”和“否”分别代表是否有显著性差异。

图 9 生长季初期(a)、旺期(b)、末期(c)环境因子的统计显著性

Fig.9 Statistical significance of environmental factors at the beginning (a), middle (b) and end (c) stages of the growing season

此外,生长季旺期,降水量与土壤干密度的交互作用解释率为 89.0%,生长季末期,土壤含水量与土壤干密度的交互作用解释率为 100.0%(图 8b、c),说明该阶段降水量、土壤干密度和土壤含水量是植被生长的主要影响因素。土壤干密度对土壤的物理性质如土壤含水量、持水率、通气性、矿物营养元素运移等有决定性影响,进而影响植被的生长发育,而土壤含水量和干密度又有着共同关联的土壤因

素——土壤质地和结构状况;因此,土壤含水量和干密度协同影响流域地上生物量分布格局的时空动态。

### 4 结论

1) 锡林河流域 5—9 月的地上生物量呈现累积性增长,其中 7 月的变化最为显著,上、下游生物量在 9 月达到最大值分别为 209.12、147.19 g/m<sup>2</sup>,且

调查期间上游地上生物量显著高于下游。空间格局主要表现为垂直地带性分布规律,整体上呈现从东南向西北递减的趋势。

2)在整个生长季,气象因子对地上生物量变化的影响最为显著且远高于地形及土壤因子,降水量及气温的解释率均在60.0%以上,地形因子解释率在22.0%以上。而土壤因子中土壤含水量、全氮质量分数及pH在生长季不同阶段对地上生物量的解释率变化显著。

3)各因子的交互作用大于单因子的作用。在植被生长季各阶段,因子之间的交互作用均呈现出非线性增强和双因子增强关系。生长季初期,降水量和干密度之间交互作用的影响最大,其次为气温和降水量与土壤因子的交互作用;而在植被生长旺期及末期,土壤干密度与其他环境因子的交互作用对流域上生物量影响显著。

#### 参考文献(References):

- [1] 李想,于红博,刘月璇,等.锡林郭勒不同草原类型群落生物量及多样性研究[J].草地学报,2022,30(1):196-204.  
Li Xiang, Yu Hongbo, Liu Yuexuan, et al. Study on Community Biomass and Diversity of Different Grassland Types in Xilingol[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(1): 196-204.
- [2] 徐满厚,李晓丽.基于物种多样性与生物量关系的草地群落稳定性对全球变暖的响应研究进展[J].西北植物学报,2021,41(2):348-358.  
Xu Manhou, Li Xiaoli. Review of Response of Grassland Community Stability to Global Warming Based on Correlation Between Species Biodiversity and Biomass[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(2):348-358.
- [3] Tilman D. Biodiversity: Population Versus Ecosystem Stability[J]. Ecology, 1996, 77(2): 350-363.
- [4] 王玉辉,周广胜.内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应[J].生态学报,2004,24(6):1140-1145.  
Wang Yuhui, Zhou Guangsheng. Responses of Temporal Dynamics of Aboveground Net Primary Productivity of *Leymus Chinensis* Community to Precipitation Fluctuation in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1140-1145.
- [5] 马文红,杨元合,贺金生,等.内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J].中国科学:C辑:生命科学,2008,38(1):84-92.  
Ma Wenhong, Yang Yuanhe, He Jinsheng, et al.

- Biomass of Temperate Grassland in Inner Mongolia and Its Relationship with Environmental Factors[J]. Scientia Sinica; Series C: Vitae, 2008, 38(1):84-92.
- [6] 胡云锋,巴图娜存,毕力格吉夫,等.乌兰巴托—锡林浩特样带草地植被特征与水热因子的关系[J].生态学报,2015,35(10):3258-3266.  
Hu Yunfeng, Batu Nacun, Bili Gejifu, et al. The Relationship Between Vegetation Characteristics and Hydro-Thermic Factors Along the Ulanbattar-Xilinhot Grassland Transect of the Mongolian Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10):3258-3266.
- [7] 杨晨晨,陈宽,周延林,等.放牧对锡林郭勒草甸草原群落特征及生产力的影响[J].中国草地学报,2021,43(5):58-66.  
Yang Chenchen, Chen Kuan, Zhou Yanlin, et al. Effects of Grazing on Community Characteristics and Productivity of Xilingol Meadow Steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(5):58-66.
- [8] 屈莹波,赵媛媛,丁国栋,等.气候变化和人类活动对锡林郭勒草原植被覆盖度的影响[J].干旱区研究,2021,38(3):802-811.  
Qu Yingbo, Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, et al. Effects of Climate and Human Activities on Vegetation Cover Changes in Xilingol Steppe [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3):802-811.
- [9] 杜忠毓,安慧,王波,等.养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响[J].草地学报,2020,28(4):1100-1110.  
Du Zhongyu, An Hui, Wang Bo, et al. Effects of Nutrient Addition and Precipitation Manipulation on Plant Species Diversity and Biomass of in a Desert Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4):1100-1110.
- [10] 张军,刘菊红,曹娜,等.内蒙古典型草原羊草生长季内的地上生物量动态对降水的时滞响应[J].草地学报,2020,28(6):1719-1725.  
Zhang Jun, Liu Juhong, Cao Na, et al. Time-Lag Response of Aboveground Biomass Dynamic of *Leymus Chinensis* in the Growing Season on Precipitation in Inner Mongolian Typical Grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6):1719-1725.
- [11] 杨元合,饶胜,胡会峰,等.青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系[J].生物多样性,2004,12(1):200-205.  
Yang Yuanhe, Rao Sheng, Hu Huifeng, et al. Plant Species Richness of Alpine Grasslands in Relation to Environmental Factors and Biomass on the Tibetan Plateau[J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1):200-205.

- [12] 左小安,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性[J].草业学报,2009,18(4):9-16.  
Zuo Xiaohan, Zhao Halin, Zhao Xueyong, et al. Species Diversity of Degraded Vegetation in Different Age Restorations in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 18(4):9-16.
- [13] 王长庭,龙瑞军,王启基,等.高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究[J].生态学杂志,2005,24(5):483-487.  
Wang Changting, Long Ruijun, Wang Qiji, et al. Relationship Between Species Diversity and Productivity in Four Types of Alpine Meadow Plant Communities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5):483-487.
- [14] 安树青,王峥峰,朱学雷,等.土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响[J].武汉植物学研究,1997,15(2):143-150.  
An Shuqing, Wang Zhengfeng, Zhu Xuelei, et al. Effects of Soil Factors on Species Diversity in Secondary Forest Communities [J]. Plant Science Journal, 1997, 15(2):143-150.
- [15] 白永飞,李凌浩,王其兵,等.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[J].植物生态学报,2000,24(6):667-673.  
Bai Yongfei, Li Linghao, Wang Qibing, et al. Changes in Plant Species Diversity and Productivity Along Gradients of Precipitation and Elevation in the Xilin River Basin, Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(6):667-673.
- [16] 黎明.青海湖北岸山地干草原植物群落多样性分析[J].草业科学,2010,27(1):20-24.  
Li Ming. Analysis on Plant Community Diversity of Mountainous Steppe on Northern Bank of Qinghai Lake[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(1):20-24.
- [17] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J].环境科学,2007,28(5):945-951.  
Zuo Xiaohan, Zhao Xueyong, Zhao Halin, et al. Changes of Species Diversity and Productivity in Relation to Soil Properties in Sandy Grassland in Horqin Sand Land[J]. Environmental Science, 2007, 28(5):945-951.
- [18] Bai Y F, Pan Q M, Wu J G, et al. Primary Production and Rain Use Efficiency Across a Precipitation Gradient on the Mongolia Plateau[J]. Ecology,2008,89(8):2140-2153.
- [19] Jiang Y B, Tao J, Huang Y Q, et al. The Spatial Pattern of Grassland Aboveground Biomass on Xizang Plateau and Its Climatic Controls[J]. Journal of Plant Ecology, 2015, 8(1): 30-40.
- [20] Guo Q, Hu Z M, Li S G, et al. Spatial Variations in Aboveground Net Primary Productivity Along a Climate Gradient in Eurasian Temperate Grassland: Effects of Mean Annual Precipitation and Its Seasonal Distribution[J]. Global Change Biology, 2012, 18(12): 3624-3631.
- [21] 陈效速,郑婷.内蒙古典型草原地上生物量的空间格局及其气候成因分析[J].地理科学,2008,28(3):369-374.  
Chen Xiaoqi, Zheng Ting. Spatial Patterns of Aboveground Biomass and Its Climatic Attributions in Typical Steppe of Inner Mongolia [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(3):369-374.
- [22] 栗文瀚,干珠扎布,曹旭娟,等.海拔梯度对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响[J].草业学报,2017,26(9):200-207.  
Li Wenhan, Ganjurjav H, Cao Xujuan, et al. Effects of Altitude on Plant Productivity and Species Diversity in Alpine Meadows of Northern Tibet[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(9):200-207.
- [23] 傅致远,姜宏,王国强,等.半干旱草原区土壤性质对植物群落结构的影响[J].生态学杂志,2018,37(3):823-830.  
Fu Zhiyuan, Jiang Hong, Wang Guoqiang, et al. Effects of Soil Properties on Plant Community Structure in a Semi-Arid Grassland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(3):823-830.
- [24] 张璐,朱仲元,张圣微,等.半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J].农业工程学报,2020,36(13):124-132.  
Zhang Lu, Zhu Zhongyuan, Zhang Shengwei, et al. Analysis of Soil Moisture Variation and Its Influencing Factors in Semi-Arid Steppe Watershed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(13):124-132.
- [25] 张俊怡,刘廷玺,罗艳云,等.半干旱草原型流域植被地上生物量时空分布特征及其影响因子[J].生态学杂志,2020,39(2):364-375.  
Zhang Junyi, Liu Tingxi, Luo Yanyun, et al. Temporal and Spatial Distribution of Aboveground Biomass of Vegetation and Quantitative Analysis of Impact Factors in Semi-Arid Grassland Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2):364-375.
- [26] 席小康,朱仲元,郝祥云,等.锡林河流域草原生物量对环境因子的响应[J].生态环境学报,2017,26(6):949-955.  
Xi Xiaokang, Zhu Zhongyuan, Hao Xiangyun, et al.

- Response of Grassland Biomass to Environmental Factors in Xilin River Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(6):949-955.
- [27] 刘彦随,李进涛.中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J].*地理学报*,2017,72(1):161-173.
- Liu Yansui, Li Jintao. Geographic Detection and Optimizing Decision of the Differentiation Mechanism of Rural Poverty in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):161-173.
- [28] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and Prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [29] Sala J O E. Controls of Grass and Shrub Aboveground Production in the Patagonian Steppe [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):541-549.
- [30] 乐荣武,张娜,王晶杰,等.2000—2019年内蒙古草地上生物量的时空变化特征[J].*中国科学院大学学报*,2022,39(1):21-33.
- Yue Rongwu, Zhang Na, Wang Jingjie, et al. Spatiotemporal Variation of Grassland Aboveground Biomass in Inner Mongolia from 2000 to 2019 [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 39(1):21-33.
- [31] 李晋波,姚楠,赵英,等.不同放牧条件下锡林郭勒典型草原土壤水分分布特征及降水入渗估算[J].*植物生态学报*,2018,42(10):1033-1042.
- Li Jinbo, Yao Nan, Zhao Ying, et al. Characteristics of Soil Water Distribution and Evaluation of Recharge Rate Under Different Grazing History in the Xilin Gol Steppe [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(10):1033-1042.
- [32] 黄德青,于兰,张耀生,等.祁连山北坡天然草地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究[J].*草业学报*,2011,20(3):20-27.
- Huang Deqing, Yu Lan, Zhang Yaosheng, et al. Above-Ground Biomass and Its Relationship to Soil Moisture of Natural Grassland in the Northern Slopes of the Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3):20-27.
- [33] 张娜,梁一民.黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究[J].*草业学报*,2002,11(2):72-78.
- Zhang Na, Liang Yimin. Studies on the Belo-Ground/Above-Ground Biomass Ratio of Natural Grassland in Loess Hilly Region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(2):72-78.
- [34] 杨贵羽,罗远培,李保国,等.不同土壤水分处理对冬小麦根冠生长的影响[J].*干旱地区农业研究*,2003,21(3):104-109.
- Yang Guiyu, Luo Yuanpei, Li Baoguo, et al. Effect of Different Soil Water Conditions on Growth of Root and Shoot of Winter Wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3):104-109.
- [35] 翟羽娟,张艳红,姜琦刚,等.吉林省西部农牧交错区“三生空间”时空演变[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2022,52(3):1016-1026.
- Zhai Yujuan, Zhang Yanhong, Jiang Qigang, et al. Spatial-Temporal Evolution Pattern of “Production-Living-Ecological Space” in Agro-Pastoral Ecotone of Western Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(3):1016-1026.
- [36] 张艳红,苏生,刘兆礼,等.生态保护红线区生境风险评估:以吉林省镇赉县为例[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2023,53(1):241-250.
- Zhang Yanhong, Su Sheng, Liu Zhaoli, et al. Habitat Risk Assessment of Ecological Conservation Redline Area: Taking Zhenlai County, Jilin Province as an Example [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1):241-250.
- [37] 王明常,刘鹏,陈学业,等.基于GEE的东北三省城市建设用地扩张研究[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2022,52(1):292-304.
- Wang Mingchang, Liu Peng, Chen Xueye, et al. Land Expansion of Urban Construction in the Three Provinces of Northeast China Based on Google Earth Engine [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1):292-304.
- [38] 吴红宝,水宏伟,胡国铮,等.海拔对藏北高寒草地物种多样性和生物量的影响[J].*生态环境学报*,2019,28(6):1071-1079.
- Wu Hongbao, Shui Hongwei, Hu Guozheng, et al. Species Diversity and Biomass Distribution Patterns of Alpine Grassland Along an Elevation Gradient in the Northern Tibetan Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(6):1071-1079.