

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0174

李永利, 张存厚, 王英, 张立, 温建伟. 浑善达克沙地地上净初级生产力动态及对气候变化的响应. 草业科学, 2021, 38(1): 1-10.

LI Y L, ZHANG C H, WANG Y, ZHANG L, WEN J W. Dynamics of above-ground net primary production and its response to climate change in the Hunshandake sand. Pratacultural Science, 2021, 38(1): 1-10.



浑善达克沙地地上净初级生产力动态 及对气候变化的响应

李永利¹, 张存厚², 王英¹, 张立¹, 温建伟¹

(1. 内蒙古自治区气象信息中心, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 利用 2004–2018 年多伦县生态气象观测站牧草观测资料, 对 CENTURY 模型进行参数初始化和适用性检验, 模拟了浑善达克沙地 1961–2018 年地上净初级生产力 (above-ground net primary production, ANPP) 动态。模型检验结果显示, 观测值与模拟值的决定系数 $R^2 = 0.78$, 斜率 $b = 1.04$, $P < 0.01$, 误差平方根值为 $25.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均绝对百分比误差为 45.76%。检验结果表明, CENRUTY 模型可以较好地模拟浑善达克沙地地上生物量的动态变化。通过对 1961 年以来研究区气候变化的分析, 发现该地区年平均气温与年极端最高气温均呈增加态势, 且增加趋势显著, 增加速率分别为 0.4 和 $0.3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。年降水量与生长季降水量年际波动较大, 变化趋势均不明显。ANPP 年际间波动明显, 但无明显变化趋势。通过因子分析法发现, 增温是沙地气候变化的主要特征; Pearson 相关分析表明, ANPP 与生长季降水量、年极端最高气温呈极显著相关关系, 牧草主要生长季降水量与年极端最高温度是影响浑善达克沙地 ANPP 的关键气象因子。

关键词: CENTURY 模型; ANPP; 地上生物量; 参数初始化; 模型检验; 因子分析; 相关分析

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2021)01-0001-10

Dynamics of above-ground net primary production and its response to climate change in the Hunshandake sand

LI Yongli¹, ZHANG Cunhou², WANG Ying¹, ZHANG Li¹, WEN Jianwei¹

(1. Meteorological Information Centre, Inner Mongolia Autonomous Region Weather Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;

2. Centre of Ecology and Agricultural Meteorology, Inner Mongolia Weather Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: Using pasture observation data in an ecological meteorological field trial observatory in Duolun County during the period from 2004–2018, model parameters were initialized, model applicability was successfully tested, and the dynamic changes in simulated above-ground net primary production (ANPP), during 1961–2018, were studied in the Hunshandake sand. Model correction and validation results showed that the R^2 for the comparison of observed and simulated above-ground biomass was 0.78, slope b was 1.04, P was less than 0.01, the root mean square error was $25.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and the ratio of the absolute mean error was 45.76%. The model test results indicated that the CENTURY model can simulate dynamic changes in above-ground biomass in the Hunshandake sand. The climatic variations since 1961 in this study area were analyzed in this paper. The results indicated that the annual average temperature and extreme annual maximum temperature had an

收稿日期: 2020-04-07 接受日期: 2020-09-18

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2019MS04006); 内蒙古自治区科技计划重点项目 (201802123)

第一作者: 李永利 (1969-), 女, 内蒙古清水河人, 正高级工程师, 硕士, 主要从事计算机应用的工作。E-mail: 416974009@qq.com

通信作者: 张存厚 (1977-), 男, 内蒙古清水河人, 正高级工程师, 博士, 主要从事应用气象与生态模型研究。E-mail: zhangcunhou2004@163.com

obvious increasing trend; the rates of increase were $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ and $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ respectively. Annual and growing seasonal precipitation and ANPP did not show significant tendency of variation. Factor analyses showed that increasing temperature was the main characteristic of effect of climate change in sand. Pearson correlation analysis indicated that ANPP was highly significantly correlated with the main growing season precipitation and extreme annual maximum temperature, which were critical meteorological factors affecting ANPP in the Hunshandake sand.

Keywords: CENTURY model; ANPP; above-ground biomass; parameter initialization; model verification; factorial analysis; correlation analysis

Corresponding author: ZHANG Cunhou E-mail: zhangcunhou2004@163.com

内蒙古草地是中国北方重要的绿色生态屏障,对保障我国生态文明建设具有重要的生态与战略意义。浑善达克沙地作为内蒙古草地的重要组成部分,其特殊的地理位置决定了其固有的气候特征,即土壤贫瘠、植被稀疏、生态系统不稳定,对气候变化和人类扰动非常敏感^[1]。该区域是影响京津地区北路沙尘暴的主要沙尘源之一^[2],也是京津风沙源治理工程的重点区域,其生态环境状况不仅关系到当地农牧民收入的稳定、生产生活条件的改善,而且关系到京津地区社会经济生态的可持续发展。

多伦县位于浑善达克沙地最南端,距北京直线距离为 180 km,是京津地区重要绿色生态屏障的组成部分,也是我国北方典型的农牧交错地带,地形地貌、气候土壤、土地利用结构均表现出明显的过渡性与波动性^[3]。国家先后出台了“三北防护林工程”、“退耕还林还草工程”、“京津风沙源治理工程”等多项生态恢复政策,对该区域的生态环境改善起到积极作用。

地上净初级生产力 (aboveground net primary production, ANPP) 是表征生态系统功能的一个重要指标^[4],在植被生产、恢复与评估中发挥着指示性作用。各国学者基于各自的理论建立了几十种植被净初级生产力估算模型,诸如以 Miami、Memorial 和 Thomthwaite 模型等为代表的气候相关模型,以 Monteith、Heimann、Prince 和 Ruimy 等为代表的光能利用率模型,以 Daisy、NCSOIL、RothC、SOMM、AVIM 和 SiB2 等为代表的过程模型。过程模型包含了复杂的生理、生态过程^[5],由于数据可获取性较差、检验条件苛刻,难以推广应用^[6]。基于生态系统水平的 CENTURY 模型由于具有模型参数易于获取、代码开源等优势,已经在国内外多种生态系统中被检验并得到广泛应用^[7-9],成功地用于评估气候变化对植

被生产力、土壤有机碳的影响。近年来, CENTURY 模型在内蒙古草原^[10-11]、川西北高原^[12]、新疆天山山区^[13]等多种生态系统进行了适用性评价,均取得较好结果,然而对于浑善达克沙地植被生产力进行长序列模拟研究相对较少,不利于量化评估沙地植被对区域气候变化的响应。因此,本研究在借鉴已有基于 CENTURY 模型对内蒙古草原地上、地下生物量研究的基础上^[7-10, 14-16],利用研究区大量气象、植被、土壤资料,对模型参数进行初始化、本地化修订,基于生态气象观测站较长时间序列定点观测资料,对 CENTURY 模型在浑善达克沙地进行适用性检验,筛选影响 ANPP 的关键气象因子及不同时段降水量对 ANPP 的贡献,模拟过去 58 年浑善达克沙地 ANPP 对气候变化的响应过程,为量化评估浑善达克沙地植被生产力提供科学参考,为气候变化背景下中国北方沙地植被动态响应模型的建立提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

多伦县生态气象观测站位于内蒙古中部,浑善达克沙地南端,地理位置 $42^{\circ}11' \text{ N}$, $116^{\circ}28' \text{ E}$,海拔 1 245.4 m。研究区气候类型属于中温带半干旱-半湿润过渡的典型大陆性气候,年均温为 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 376.0 mm,年平均风速为 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,年平均大风日数 50~70 d,主风向为西北风,昼夜温差较大。光照资源丰富,年均日照时数为 3 035.7 h。研究区植物以羊草 (*Leymus chinensis*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 和扁蓿豆 (*Melilotoides ruthenica*) 等为主^[3]。通常牧草 4 月中旬返青,9 月中下旬停止生长,生长期为 150~160 d。土壤类型主要以栗钙土、风沙土、草甸土为主, pH 为 6.2。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

根据多伦县气象局生态气象观测站 2004–2018 年 4 月–8 月沙地植被生长季样方数据对模型模拟结果进行检验。驱动模型与相关分析所需要的降水量、温度、相对湿度、日照百分率、平均风速等 26 个逐月气象数据均来自于多伦县气象局自动气象观测站。土壤参数来源于 2018 年 8 月野外调查取样和《中国内蒙古土种志》^[17], 外界营养输入参数参考内蒙古草原研究结果^[10], 其他参数来源于模型操作手册^[18] 和相关文献^[8, 14, 19-20]。植被参数通过模型手册给定的参考区间, 通过“试错法”将模拟结果与实际观测值进行回归来确定。

研究区地势平坦, 样地设围栏封育, 从 2004 年开始进行草地生态观测, 观测内容主要包括草地活体生物量、立枯生物量、草层高度以及牧草发育期等, 观测频次为生长季每旬观测 1 次, 指定牧草高度与草层高度每旬观测 1 次, 牧草地上生物量每月 28 日进行测定。草本样方面积为 1 m², 4 次重复。草本样方内植物齐地面刈割后, 将地上部分装入布袋中, 带回实验室 65 °C 烘干 24 h 后, 测定牧草生物量。观测的地上部分生物量用于模型检验, 牧草发育期观测用于模型参数本地化设置。

1.2.2 模型参数的初始化

首先通过编程实现格式转化, 生成 site.wth 气象数据文件, 为下一步模型运行提供基础数据; 利用研究区本地化资料, 完成模型中 site.sch 时间表文件的设定, 包括植物的返青、黄枯、停止生长时间与放牧强度及管理措施等; 然后运行 file100.exe 计算出研究区气候平均态, 运行模型 4000 年使土壤有机质达到均衡态; 最后以均衡态气候背景再次作为初始条件, 以实际气象数据驱动模型, 得到 1961–2018 年逐月地上生物量模拟数据。由于本研究区设有围栏, 无放牧, 故模型管理措施设为无放牧干扰状态。模型参数本地化、初始化信息如表 1、表 2 所列。

1.2.3 CENTURY 模型检验方法

采用线性回归、误差平方根值 (RMSE) 和平均绝对百分比误差 (MAPD) 3 种传统的评价方法。具体公式如下:

(1) 线性回归:

$$Y = aX + b。$$

式中: Y 为模拟值, X 为观测值, a 为斜率, b 为截距; 模型模拟理想效果为 $a = 1, b = 0$, 换言之, 线性回归方程中 a 越接近于 1, b 越接近于 0, 模拟效果越好。

(2) RMSE:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2 \right]^{0.5};$$

表 1 内蒙古浑善达克沙地气象参数

Table 1 Meteorological parameters of the Hunshandake sand in Inner Mongolia

月份 Month	降水量 Monthly precipitation/cm	降水偏度 Skewness of precipitation/cm	降水量标准差 Standard deviations for monthly precipitation/cm	平均最低气温 Average monthly min temperature/°C	平均最高气温 Average monthly max temperature/°C
1月 Jan.	0.184 2	2.117 8	0.235 0	-22.792 0	-10.106 0
2月 Feb.	0.278 0	1.275 9	0.288 8	-19.710 0	-5.524 0
3月 Mar.	0.782 8	3.939 7	0.963 4	-11.450 0	2.384 0
4月 Apr.	1.524 0	2.197 3	1.400 9	-2.406 0	12.174 0
5月 May	2.953 0	0.926 6	1.701 4	4.074 0	19.526 0
6月 Jun.	6.037 2	0.872 3	2.759 0	9.302 0	23.510 0
7月 Jul.	10.381 4	0.166 9	4.379 9	13.074 0	25.426 0
8月 Aug.	8.798 2	1.212 4	4.772 1	11.142 0	23.900 0
9月 Sep.	4.328 8	0.766 9	2.296 0	4.350 0	18.962 0
10月 Oct.	1.672 0	1.142 2	1.191 3	-2.932 0	11.450 0
11月 Nov.	0.505 0	1.611 8	0.478 8	-11.812 0	0.912 0
12月 Dec.	0.152 0	1.678 1	0.131 7	-19.436 0	-7.498 0

表 2 CENTURY 模型的初始化参数
Table 2 Initial parameters of CENTURY model

名称 Parameter	值 Value	解释说明 Explanation
研究站点参数 Parameters of site		
sitlat	42.183	纬度 Latitude
sitlng	116.427	经度 Longitude
sand	0.614	砂粒含量 Fraction of sand
silt	0.238	粉砂含量 Fraction of silt
clay	0.148	粘粒含量 Fraction of clay
rock	0	粘粒含量 Fraction of clay
bulkd	1.42	土壤容重 Bulk density of soil
nlayer	4	土层厚度 Number of soil layers
nlaypg	3	植物根区厚度 Number of soil layers for plant root
pH	6.2	土壤 pH pH of soil
营养输入参数 Input nutrition parametes		
epnfa(1)	0.051	决定年降水量对大气固氮影响的截距值 Intercept value for determining the effect of annual precipitation on atmospheric N fixation
epnfa(2)	0.069	斜率 Slope value
epnfs(1)	30.12	最小 AET值 Minimum AET value
epnfs(2)	0.012	决定年蒸散量对非生物土壤固氮影响的截距值 Intercept value for determining the effect of annual evapotranspiration on non-symbiotic soil N fixation
控制植物生长的重要温度参数 Temperature parameters controlling plant growth		
prdx(1)	0.35	潜在地上植被生产力系数 Coefficient for calculating potential above-ground monthly production/(g·m ⁻²)
ppdf(1)	26.10	最适生长温度 Optimum temperature for production/°C
ppdf(2)	36.00	最高生长温度 Maximum temperature for production/°C
ppdf(3)	1.10	模拟植物生长温度响应的左侧弧线参数 Left curve shape for parameterization to simulate temperature effect on growth/°C
ppdf(4)	2.80	模拟植物生长温度响应的右侧弧线参数 Right curve shape for parameterization to simulate temperature effect on growth/°C

(3) MAPD:

$$MAPD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - Q_i|}{\bar{Q}}$$

式中: P 为模拟值, Q 为观测值; i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为 1961–2018 年中月份的序号。

1.2.4 数据统计方法

利用 SPSS 13.0 统计分析软件, 采用因子分析法, 对影响浑善达克沙地气候变化的各观测变量进行分类, 将相关性较高的分在同一类中, 每一类变量代表一个基本结构, 即公共因子, 通过寻找众多变量的公共因子来简化变量中存在的复杂关系, 再现原始变量与公共因子之间的相关关系。对选取的

样本容量为 58, 变量数为 ANPP、年降水量、年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温、年极端最低气温、年极端最高气温、年平均相对湿度、年平均风速、年平均日照百分率与年平均地面温度 11 个变量进行因子分析。为了进一步了解不同时段降水对 ANPP 的贡献率, 将降水量进行分段统计, 将 26 个气象因子与 ANPP 进行相关分析, 试图筛选出影响 ANPP 的关键气象因子。

2 结果与分析

2.1 模型检验

利用 2004–2018 年多伦县生态气象观测站牧草

主要生长季地上生物量连续定点观测数据, 与模型输出的地上生物量模拟数据进行线性回归, 最终得到研究区地上生物量观测值 (x) 与模拟值 (y) 的线性回归方程为: $y = 1.04x - 23.60$ ($R^2 = 0.78, n = 56, P < 0.01$) (图 1)。结果显示, 地上生物量的模拟值与观测值之间的 RMSE 为 $25.23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, MAPD 为 45.76%。模型检验结果表明, 模型在浑善达克沙地具有较好的模拟能力, 特别是牧草主要生长季动态, 对于月步长的 CENTURY 模型而言, 模拟结果是可以接受的。

通过 2004–2018 年地上生物量的逐月动态变化可以看出, 2012 年 7 月与 8 月观测值明显大于模拟值, 这是由于 2012 年 3 月–5 月研究区累计降水量为 34.6 mm, 降水明显偏少, 7 月超过 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 极端高温持续, 导致大部地区干旱胁迫作用强烈, CENTURY 模型较好模拟了这一过程。个别时段观测值偏高主要是由于降水的局地性导致, 由于野外牧草观测站距离驱动模型的自动气象观测值相距 30 km。对于地广站疏的浑善达克沙地而言, 56 个样方观测值

78.6% 落在模拟线上, 反映出 CENTURY 模型对区域水热条件耦合作用具有一定的模拟能力 (图 2)。

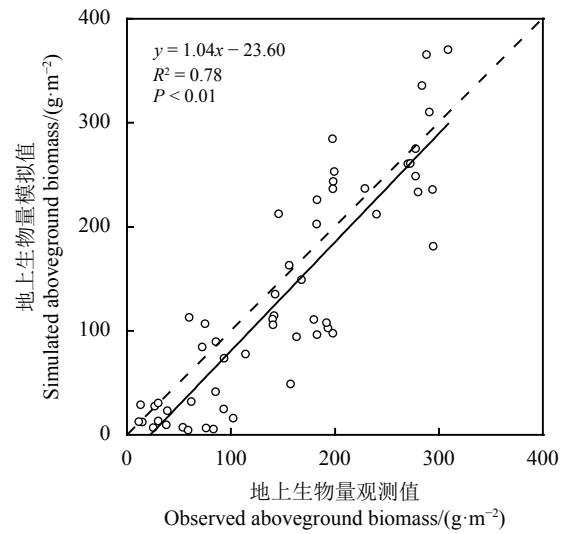


图 1 浑善达克沙地地上生物量模拟值与观测值的关系
Figure 1 Comparison of simulated and observed biomass values in the Hunshandake sand

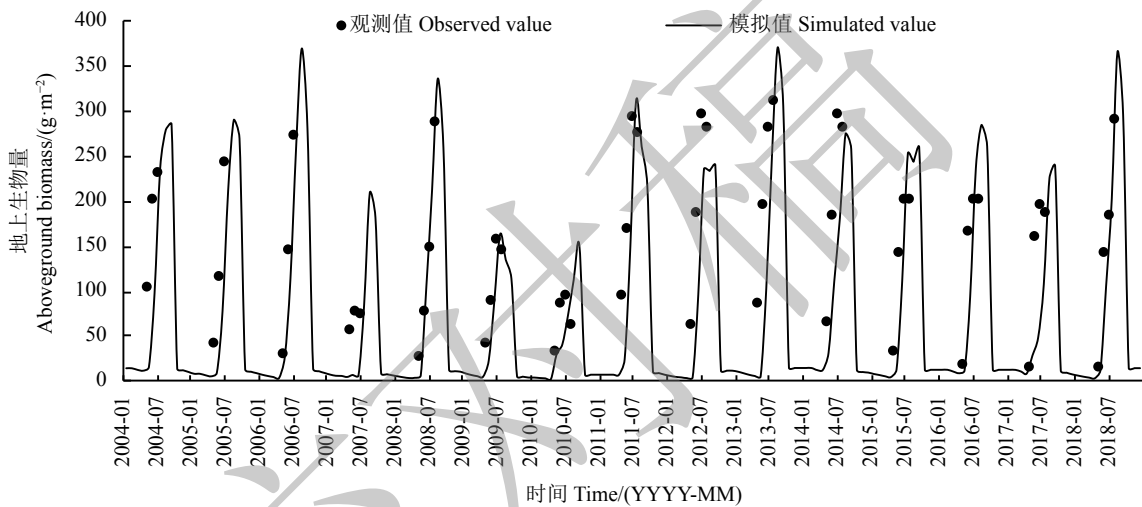


图 2 2004–2018 年浑善达克沙地地上生物量的动态变化
Figure 2 Dynamic changes in aboveground biomass in the Hunshandake sand from 2004 to 2018

2.2 气候变化特征

研究区年平均气温呈现出增加态势, 且增加趋势非常显著 ($P < 0.01$), 增加速率为 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$, 最大值出现在 1998 年, 为 $4.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 较小值出现在 1967 年、1969 年和 1985 年, 均为 $0.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 显著增温主要发生在 20 世纪 90 年代; 年降水量年际间波动较大, 其中 20 世纪 90 年代降水量最大, 高出平均值 45.3 mm , 2011–2018 年降水量较小, 低于平均值 68.6 mm 。过

去 58 年研究区年降水量变化趋势不显著, 最大值出现在 1973 年, 为 511.7 mm , 最小值出现在 2001 年, 为 255.2 mm 。在 58 年中, 46.6% 年份降水量低于平均值, 其中 1999–2012 年间, 年降水量偏少明显; 主要生长季降水量年际波动明显, 其中 20 世纪 90 年代降水量较大, 高出平均值 42.1 mm , 2001–2010 年降水量较小, 低于平均值 33.8 mm 。58 年间主要生长季降水量亦无明显变化趋势, 最大值出现在 1983

年, 为 434.0 mm, 最小值出现在 1972 年, 为 172.9 mm; 年极端最高气温增加趋势显著 ($P < 0.05$), 增加速率

为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 最大值出现在 2010 年, 为 $36.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最小值出现在 1970 年, 为 $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 3)。

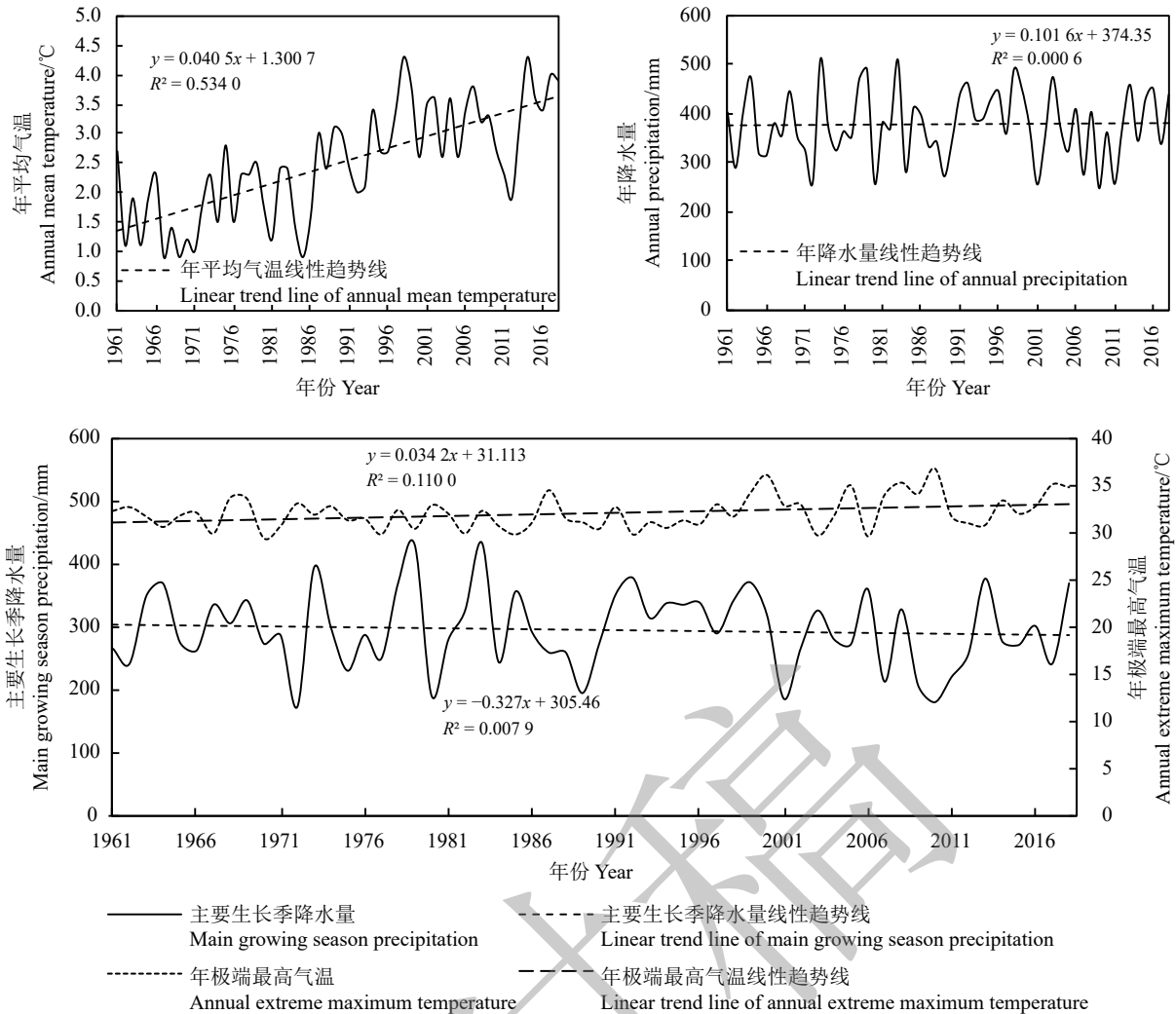


图 3 1961–2018 年浑善达克沙地年平均温度、年降水量、年极端最高温度与主要生长季降水量的变化趋势
Figure 3 Variation trends in mean temperature, annual precipitation, annual extreme maximum temperature, and main growing season precipitation in the Hunshandake sand from 1961 to 2018

2.3 ANPP 变化趋势

利用年内最大累积地上部分生物量值代表 ANPP, 分析 58 年沙地 ANPP 的变化趋势。研究发现, 沙地 ANPP 年际间存在明显波动, 特别是 1989–2000 年和 2008–2013 年期间波动较大。ANPP 年际变化明显, 波动曲线与主要生长季降水量非常相似, 其中 20 世纪 90 年代 ANPP 最大, 高出平均值 $33.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 2001–2010 年 ANPP 最小, 低于平均值 $18.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。58 年间 ANPP 无明显变化趋势, 最大值出现在 1992 年, 为 $330.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 最小值出现在 2009 年, 为 $114.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 4)。

2.4 统计分析

2.4.1 因子分析

在进行因子分析时, 需要对变量之间的相关性进行判断, 变量之间的相关性检验结果显示, KMO 检验的测度值为 $0.693 (> 0.6)$, $P < 0.05$ (Sig. = 0.000), 通过检验, 说明可以使用因子分析法。按照特征根 > 1 的原则, 提取了前 3 个公共因子, 其累计方差贡献率为 78.01%, 因此选前 3 个公共因子可以较好地描述研究区气候变化对沙地植被生产力的影响。

为了使因子载荷矩阵中系数更加显著, 对初始因子载荷矩阵进行转换, 使因子和原始变量间的关

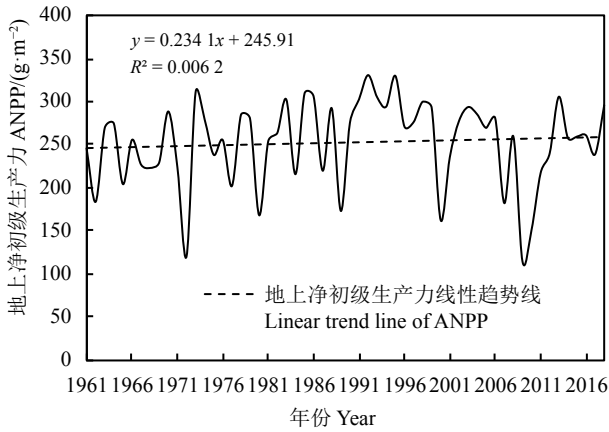


图 4 1961–2018 年浑善达克沙地 ANPP 的变化趋势
Figure 4 Variation trends of ANPP in the Hunshandake sand from 1961 to 2018

系进行重新分配, 相关系数向 0–1 分化, 便于更容易解释。本文采用方差最大正交旋转法进行因子旋转, 旋转后的因子累计方差贡献率作为参照权重(表 3)。结果表明, 第一公因子贡献最大, 达到 41.811%, 主要从年平均气温、年平均地面温度、年平均最低温度与年平均最高温度反映沙地植被对热量条件的利用情况, 体现的是增温对植被生产力的影响状况; 第二公因子次之, 为 21.685%, 主要从 ANPP 与年降水量反映沙地植被对水分条件的利用情况, 体

现的是水分胁迫对植被生产力的影响状况; 第三公因子贡献最小, 为 14.516%, 主要从年极端最低温度反映沙地土壤解冻冻结的情况, 体现的是沙地土壤相态对气候变化的响应状况。以上指标可以很好地覆盖选取的 11 个变量。

2.4.2 相关分析

Pearson 相关分析显示, 牧草主要生长季降水量 ($r=0.723$)、年降水量 ($r=0.711$)、7 月降水量 ($r=0.499$)、6 月降水量 ($r=0.340$) 与 ANPP 存在极显著正相关关系, 年极端最高气温 ($r=-0.409$) 与 ANPP 呈极显著负相关关系, 年相对湿度 ($r=0.309$)、年平均最低气温 ($r=0.259$) 与 ANPP 呈极显著正相关关系, ANPP 与上一年 9 月–12 月降水、当年 1 月–3 月降水、8 月–9 月降水、年平均气温、年平均最高气温、年极端最低气温、年平均地面温度、年日照百分率以及年平均风速均不存在显著的相关关系(表 4)。

分析表明, 年极端最高温度对牧草生长具有明显的抑制作用, 高温使水分胁迫加剧, 最终导致 ANPP 下降, 特别发生是牧草主要生长季时的高温, 上述现象在内蒙古沙地表现尤为突出。生长季降水量与年极端最高气温是影响 ANPP 年际波动的主要气象因子。

表 3 旋转成分矩阵^a
Table 3 Rotated component matrix^a

变量 Variable	成分 Component		
	1	2	3
年平均气温 Annual mean temperature	0.900	-0.086	0.369
年平均地面温度 Annual mean surface temperature	0.879	-0.178	0.219
年平均最低气温 Annual mean min temperature	0.860	0.127	0.346
年平均最高气温 Annual mean max temperature	0.806	-0.241	0.394
年平均风速 Annual average wind speed	-0.803	-0.004	0.218
年日照百分率 Annual average sunshine duration	-0.782	-0.195	0.202
地上净初级生产力 ANPP	0.110	0.861	0.242
年降水量 Annual precipitation	0.171	0.848	-0.073
年相对湿度 Annual relative humidity	-0.364	0.664	-0.428
年极端最高气温 Annual extreme max temperature	0.434	-0.563	-0.184
年极端最低气温 Annual extreme min temperature	-0.089	0.124	0.876

提取方法: 主成分; 旋转法: 具有 Kaiser 标准化的正交旋转法; a, 旋转在 4 次迭代后收敛。

Extraction method: principal component analysis; Rotation method: varimax with Kaiser normalization; a, Rotation converged in 4 iterations.

表4 浑善达克沙地 ANPP 与气象因子间的相关分析
Table 4 Correlation analysis of ANPP and meteorological factors in Hunshandake sand

气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient	气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient	气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient
1月降水量 Jan. precipitation	-0.221	10月降水量 Oct. precipitation	-0.038	年平均气温 Annual mean temperature	0.098
2月降水量 Feb. precipitation	0.013	11月降水量 Nov. precipitation	0.038	年平均最高气温 Annual mean max temperature	-0.020
3月降水量 Mar. precipitation	-0.202	12月降水量 Dec. precipitation	0.061	年平均最低气温 Annual mean min temperature	0.259*
4月降水量 Apr. precipitation	0.065	1月-3月降水量 Jan. to Mar. precipitation	-0.231	年极端最高气温 Annual extreme max temperature	-0.409**
5月降水量 May precipitation	0.154	上一年9月-12月降水量 Sep. to Dec. precipitation year-ago	-0.150	年极端最低气温 Annual extreme min temperature	0.239
6月降水量 Jun. precipitation	0.340**	上一年11月-12月降水量 Nov. to Dec. precipitation year-ago	0.025	年平均地面温度 Annual mean surface temperature	-0.012
7月降水量 Jul. precipitation	0.499**	4月-8月降水量 Apr. to Aug. precipitation	0.723**	年相对湿度 Annual relative humidity	0.309*
8月降水量 Aug. precipitation	0.219	年降水量 Annual precipitation	0.711**	年日照百分率 Annual sunshine duration	-0.148
9月降水量 Sep. precipitation	0.274			年平均风速 Annual average wind speed	-0.044

*和**分别表示在0.05水平和0.01水平上显著相关。

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

CENTURY 模型源于长期的草原生态系统野外试验数据,已经成功应用于欧洲、亚洲、非洲和北美洲等地区的草地、农田、森林、湿地等多种生态系统^[7-9, 21-22],特别是在定量化研究草地生产力和土壤有机质方面优势明显^[23]。在沙地生态系统中,模型适用性相关研究较少,本研究通过对 CENTURY 模型在浑善达克沙地的适用性进行检验发现,改进的 CENTURY 模型在浑善达克沙地也具有较强的模拟能力,成功地模拟了地上生物量的季节动态和年际变化。模拟结果表明,沙地地上生物量对降水和极端高温非常敏感,模型模拟的浑善达克沙地 ANPP 随年降水量呈现出明显的变化规律。

全球气候变化下温度和降水的波动,显著地影响植被上生物量的年内年际变化^[7],内蒙古草原的植被地上生物量的季节变化和年际变化对气候变化响应强烈^[14, 16],CENTURY 模型能够较好地模拟气候变化对内蒙古草原的影响^[8, 10, 15, 20]。内蒙古沙地分布面积较大,沙地内部观测站点相对稀少、植被观测数据零散,卫星遥感监测虽然可以有效地补充空间上数据的不足,但是其在反演植被地上生物量中依然存在较大的不确定性。经过参数本地化、

通过检验 CENTURY 模型,可以定量化模拟浑善达克沙地植被地上生物量的动态变化,有效地弥补地面观测数据的不足。

大量试验数据和模型研究也表明,降水和极端高温是内蒙古草原 ANPP 的重要控制因素^[24-25],其中降水量的年内时空分布对 ANPP 影响尤为突出,特别是生长季降水量与降水频次。浑善达克沙地干旱少雨、极端高温频发、降水时空分布极不均匀,牧草主要生长季的降水对 ANPP 的贡献最大,反映出在年降水量稳定的情况下,降水的年内分布对 ANPP 产生显著影响。其他时段降水对 ANPP 贡献并不明显,包括上一年度冬季降水,这与张存厚等^[10]在内蒙古荒漠草原得出的结论一致。

温度也是影响植物生长发育的重要气象因子^[26],适宜的温度可促进植物的快速生长发育,温度过高会导致干旱胁迫,导致植物正常发育受阻。本研究结果表明,冬季低温提升,利于春季牧草返青提前;夏季高温降低,利于抑制干旱发生,对 ANPP 均有一定的促进作用。在研究区主要牧草生长季,年极端最高气温呈现出显著增加的态势,对 ANPP 的负面影响强烈。高温不仅直接灼伤植物表皮,而且使植物与土壤水分散失加快,产生干旱胁迫,抑制植物积极生长,最终导致 ANPP 下降。在内蒙古浑善

达克沙地, 6月-7月是牧草积极生长关键期, 也是干旱、极端高温频发时期, 此时土壤水分、植物蒸腾强烈, 地下水补给能力非常有限, 降水成为草原土壤和植物水分补给的唯一途径。上述现象在内蒙古干旱半干旱草原区具有普遍性, ANPP 年际间的波动性、变异性与降水、高温等引起的水分胁迫作用密切相关^[27-28]。

本研究模拟的地上生物量未考虑历史上土地利用现状改变而导致的植被分布发生的变化, 也未考虑放牧强度、刈割频次等人类活动的影响。实际上, 受人类扰动的植被地上生物量明显比短期围封状态下的值偏低^[29]。今后的研究需要补充人类活动影响下的野外试验, 在模型模拟中设置人类活动的影响, 模拟结果更具有实际参考价值。

参考文献 References:

- [1] 元志辉, 池勇峰, 雷军, 包刚, 包玉梅, 萨楚拉, 咏梅. 2000-2013 年浑善达克沙地植被净初级生产力变化研究. 冰川冻土, 2017, 39(1): 185-199.
YUAN Z H, CHI Y F, LEI J, BAO G, BAO Y M, SA C L, YONG M. Variation of vegetation net primary productivity in Hunshandak Sandyland during 2000-2013. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 185-199.
- [2] 元志辉, 包刚, 银山, 雷军, 包玉梅, 萨楚拉. 2000-2014 年浑善达克沙地植被覆盖变化研究. 草业学报, 2016, 25(1): 33-46.
YUAN Z H, BAO G, YIN S, LEI J, BAO Y M, SA C L. Vegetation changes in Otindag sand country during 2000-2014. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 33-46.
- [3] 秦富仓, 周佳宁, 刘佳, 张连根, 高岭. 内蒙古多伦县土地利用动态变化及驱动力. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 31-37.
QIN F C, ZHOU J N, LIU J, ZHANG L G, GAO L. Land use change dynamics and driving forces in Duolun County, Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(6): 31-37.
- [4] 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: 181-184.
- [5] HUNT H W, TRILICA M J, REDENTE E F, MOORE F C, DETLING J K, KITTEL T G F, WALTER D E, FOWLER M C, KLEIN D A, ELLIOTT E T. Simulation model for the effect of climate change on temperate grassland ecosystems. Ecological Modelling, 1991, 53: 205-246.
- [6] MACNEIL M D, SKILES J W, HANSON J D. Sensitivity analysis of a general rangeland model. Ecological Modelling, 1985, 29: 57-76.
- [7] 张存厚, 王明玖, 乌兰巴特尔, 姜新华. 内蒙古典型草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟. 西北植物学报, 2012, 32(6): 1229-1237.
ZHANG C H, WANG M J, Wulanbater, JIANG X H. Responses of ANPP to climate change in Inner Mongolia typical steppe: A simulation study. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(6): 1229-1237.
- [8] 袁飞, 韩兴国, 葛剑平, 邬建国. 内蒙古锡林河流域羊草草原净初级生产力及其对全球气候变化的响应. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2168-2176.
YUAN F, HAN X G, GE J P, WU J G. Net primary productivity of *Leymus chinensis* steppe in Xilin River basin of Inner Mongolia and its responses to global climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2168-2176.
- [9] FENG X M, ZHAO Y S. Grazing intensity monitoring in northern China steppe: Integrating CENTURY model and MODIS data. Ecological Indicator, 2011, 11(1): 175-182.
- [10] 张存厚, 王明玖, 赵杏花, 孙小龙, 陈海军, 武荣盛. 基于 CENTURY 模型的荒漠草原 ANPP 对气候变化响应的模拟. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2849-2857.
ZHANG C H, WANG M J, ZHAO X H, SUN X L, CHEN H J, WU R S. Simulation of ANPP in response to climate change in China's desert steppe based on CENTURY model. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2849-2857.
- [11] 陈辰, 王靖, 潘学标, 魏玉蓉, 冯利平. CENTURY 模型在内蒙古草地生态系统的适用性评价. 草地学报, 2012, 20(6): 1011-1019.
CHEN C, WANG J, PAN X B, WEI Y R, FENG L P. Validation and adaptability evaluation of grass ecosystem model CENTURY in Inner Mongolia. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1011-1019.
- [12] 陈超, 李秋月, 郭斌, 庞艳梅. CENTURY 模型在川西北高原草原的适用性研究. 草地学报, 2019, 27(3): 712-718.
CHEN C, LI Q Y, GUO B, PANG Y M. Validation and adaptability evaluation of grassland ecosystem model CENTURY in the northwest plateau of Sichuan Province. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(3): 712-718.

- [13] 郭燕云, 刘艳, 李秋月, 陈辰, 王森. CENTURY 模型在新疆天山山区的适用性分析. *草地学报*, 2020, 28(1): 252-258.
GUO Y Y, LIU Y, LI Q Y, CHEN C, WANG S. Validation and adaptability evaluation of grassland ecosystem model CENTURY in Tianshan mountain area. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 252-258.
- [14] 赵文龙. 中国北方草原物候、生产力和土壤碳储量对气候变化的响应. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2012.
ZHAO W L. Response of phenology, productivity and soil carbon stocks to climate change in northern Chinese steppes. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [15] 祁晓婷. 内蒙古草原生产力与气候变化关系及公元 1-2000 年 ANPP 的重建. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2017.
QI X T. Relationship between productivity and climate change in Inner Mongolia steppe and reconstruction of ANPP from A. D. 1-2000. Master Thesis. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
- [16] 孙小龙, 李平, 张存厚, 李丹. 镶黄旗典型草原地上净初级生产力对气候变化的模拟. *中国草地学报*, 2015, 37(5): 103-107.
SUN X L, LI P, ZHANG C H, LI D. Responses of aboveground net primary productivity in typical steppe to climate change in Xianghuang Banner. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(5): 103-107.
- [17] 赵俊寿. 中国内蒙古土种志. 北京: 中国农业出版社, 1994.
ZHAO J S. Soil Species of Inner Mongolia, China. Beijing: Agricultural Press of China, 1994.
- [18] METHERELL A K, HARDING L K, COLE C V, PARTON W J. CENTURY Soil Organic Matter Model Environment. Version 4.0. Colorado: Colorado State University, 1993, 5: 109-131.
- [19] 张存厚. 内蒙古草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2013.
ZHANG C H. Responses of ANPP to climate change in Inner Mongolia grassland: A simulation based on CENTURY model. PhD Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [20] 黄珏. 中国陆地植被 NPP 对气候变化响应及其敏感性分析. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2011.
HUANG Y. Response of vegetation net primary productivity to climate change in China and sensitivity experiments. Master Thesis. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.
- [21] PARTON W J, SCURLOCK J M O, OJIMA D S, GILMANOV T G, SCHOLLES R J, SCHIMEL D S, KIRCHNER T, MENAUT J C, SEASTEDT T, MOYA E G, KAMNLRUT A, KINYAMARIO J I. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycle*, 1993, 7(4): 785-809.
- [22] PARTON W J, OJIMA D S, SCHIMEL D S. Models to Evaluate Soil Organic Matter Storage and Dynamics. //Carter M R, Stewart B A, (Editors). *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Lewis Publishers, New York: Advances in Soil Science. Chemical Rubber Company Press, 1996: 421-448.
- [23] OUYANG W, SHAN Y S, HAO F H, LIN C Y. Differences in soil organic carbon dynamics in paddy fields and drylands in northeast China using the CENTURY model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 194: 38-47.
- [24] XIAO X M, WANG Y F, JIANG S, OJIMA D S, BONHAM C D. Interannual variation in the climate and above-ground biomass of *Leymus chinense* steppe and *Stipa grandis* steppe in Xilin river basin, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 1995, 31: 1-17.
- [25] 王瑞利, 张存厚, 陈海军, 杨勇, 李元恒, 王明玖. 基于 CENTURY 模型的乌审召滩地草场 ANPP 及对气候变化的响应. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 1955-1961.
WANG R L, ZHANG C H, CHEN H J, YANG Y, LI Y H, WANG M J. Observations and modeling of ANPP dynamics for Wushengzhao Town In Inner Mongolia grassland and its responses to global climate change based on CENTURY model. *Ecology and Environment Sciences*, 2015, 24(12): 1955-1961.
- [26] BURKE I C, LAUENROTH W K, PARTON W J. Regional and temporal variation in net primary production and nitrogen mineralization in grasslands. *Ecology*, 1997, 78: 1330-1340.
- [27] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 于贵瑞. 中国温带草地地上生产力沿降水梯度的时空变异性. *中国科学D辑*, 2006, 36(12): 1154-1162.
HU Z M, FAN J W, ZHONG H P, YU G R. Spatial and temporal variability of productivity along precipitation gradient in temperate grassland of China. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(12): 1154-1162.
- [28] 卫智军, 韩国栋, 赵钢, 李德新. 中国荒漠草原生态系统研究. 北京: 科学出版社, 2013.
WEI Z J, HAN G D, ZHAO G, LI D X. *China Desert Grassland Ecosystem Research*. Beijing: Science Press, 2013.
- [29] 艳燕, 胡云锋, 刘越, 毕立格吉夫. 内蒙古草地样带地上生物量变化. *草业科学*, 2012, 29(10): 1497-1502.
YAN Y, HU Y F, LIU Y, Biligejifu. Changes in aboveground biomass of grassland transect on Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Pratacultural Science*, 2012, 29(10): 1497-1502.

(责任编辑 张瑾)