

高寒矮嵩草草甸地上生物量和叶面积指数的季节动态模拟*

孙建文^{1,2}, 李英年^{1,3**}, 宋成刚^{1,2}, 王建雷^{1,2}, 张法伟^{1,3}, 王勤学⁴

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001; 4. 日本国立环境研究所, 日本筑波 3050053)

摘要: 基于 2007 年中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站植被和气象观测资料, 探讨了高寒矮嵩草草甸群落叶面积指数、地上生物量的季节动态变化及其数学模型, 分析了叶面积指数与地上生物量的相互关系, 以及气象条件对叶面积指数和地上生物量的影响。结果表明, 高寒矮嵩草草甸群落植被生长期地上生物量的季节动态变化可以用 Logistic 回归模型拟合; 植被叶面积指数的季节动态变化可以用三次函数曲线拟合, 叶面积指数受温度和降水量的影响明显, 与植物生长期日平均气温 > 3 的积温和降水累积量分别有三次函数的拟合关系, 而考虑与积温和降水累积量的综合关系可用二元二次函数拟合; 同时, 叶面积指数与地上生物量之间有二次函数的拟合关系。
关键词: 高寒矮嵩草草甸; 叶面积指数; 地上生物量; 季节动态

Seasonal Dynamics Model of Aboveground Biomass and Leaf Area Index on

Alpine Kobresia humilis Meadow in Qinghai-Tibet Plateau

SUN Jian-wen^{1,2}, LI Ying-nian^{1,3}, SONG Cheng-gang^{1,2}, WANG Jian-lei^{1,2},
ZHANG Fa-wei^{1,3}, WANG Qin-xue⁴

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001; 4. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki 3050053, Japan)

Abstract: Based on the alpine *Kobresia humilis* meadow vegetation and weather data obtained at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, CAS in 2007, we discussed the seasonal dynamic changes of the Leaf Area Index (LAI) and Aboveground Biomass (AB), analyzed and simulated the correlation between LAI and AB, as well as the influence of climate on the process of LAI and AB. The results showed that during the plant growing season, the seasonal dynamic variation of AB could be fitted by the Logistic Regression model, and the seasonal dynamic variation of LAI could be fitted perfectly by cubic function. LAI showed significant correlation with temperature and precipitation and they could be modeled by a binary quadratic function. The relationship of LAI and AB could be stated with a quadratic function.

Key words: Alpine *Kobresia humilis* meadow; Leaf area index (LAI); Aboveground biomass (AB); Seasonal dynamic variation

草地生态系统是陆地生态系统中最重要、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具有重要的作用^[1-5]。高海拔、高纬度地带的草地生态系统对全球气候变化的反应最为敏感, 被认为是气候变化的敏感区^[6]。青藏高原位于欧亚大陆中部, 平均海拔在 4000m 以上, 被称为地球第三极。海北高寒草甸位于青藏高原东北缘, 高寒和远离海洋的高原大

陆性气候, 造就了特殊的草甸生态系统。监测海北高寒草甸生态系统对了解全球气候变化及其影响具有十分重要的意义^[7-10]。

净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是绿色植物在单位时间单位面积上所能生产的有机干物质质量, 与 LAI (leaf area index, LAI) 密切相关^[11-13]。生物量 (Biomass, B) 是研究植被初级生产力的基础,

* 收稿日期: 2009-07-03 ** 通讯作者。E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-06-01); 中日合作项目“温暖化影响的早期监测网络系统建设”

作者简介: 孙建文 (1984 -), 山东人, 硕士生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: sunjianwen07@gucas.ac.cn

是评价陆地生态系统结构与功能的重要指标^[4, 14]。地上生物量 (Aboveground Biomass, AB) 是草地生态学的一个重要指标, 可以直接反应牧场的经济利用价值和理论载畜量^[10, 15]。LAI 是植物叶的表面积与土地表面积的比率^[16], 其动态变化可较好地反映群落结构的变化及群落植被和气候的相互作用^[17]。LAI 控制着草地生态系统的许多特征, 如植被的光合、呼吸、蒸腾、系统的碳循环、光水分布与利用、生产力的形成等, 可作为群落动态变化的敏感性指标^[18-20]。

本文拟利用 2007 年祁连山山脉东段冷龙岭南麓海北高寒矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸植物群落的 LAI 地上生物量和气象要素等监测数据, 系统地分析高寒矮嵩草草甸群落植被 LAI 和地上生物量的季节动态变化特征, 以及 LAI 与环境因素之间的关系, 并建立 LAI 和地上生物量季节动态过程的模拟模型, 旨在找出高寒草甸生态系统中各种生物参数的特点及其与环境因素之间的关系, 以监测高寒草甸生态系统的演化和退化情况, 为高寒草甸生态系统的可持续发展的规划和管理及其对全球气候变化的响应和影响提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站 (简称海北站) 进行。海北站位于青藏高原东北隅的青海海北藏族自治州门源回族自治县, 祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段, 地理位置为 37°29' - 37°45' N, 101°12' - 101°23' E, 平均海拔 3250m。该区具有明显的高原大陆性气候, 东南季风及西南季风微弱。高海拔条件制约, 气温极低, 无明显四季之分, 仅有冷暖季之别, 冷季漫长, 暖季短暂, 干湿季分明; 地区年平均气温 -1.7℃; 年平均降水量 560mm^[21], 主要降水量集中在夏半年, 约占降水量的 80%^[22]。

海北地区植被类型较为丰富, 主要有金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛, 高寒矮嵩草草甸, 草原化小嵩草 (*kobresia parva*) 草甸, 沼泽化藏嵩草 (*Kobresia tibetica*) 草甸等^[22]。本文的研究对象为海拔 3200m 处的高寒矮嵩草草甸群落, 主要优势种为矮嵩草、异针茅 (*Stipa aliena*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、早熟禾 (*Poa annua*) 等。土壤为草毡寒冻锥形土^[21-23]。

1.2 数据观测

2007 年 5 - 9 月每月 15 日和 30 日前后, 在高寒矮嵩草草甸研究样地随机选取 5 个 50cm × 50cm 的

小样方。利用收割法测定地上生物量和地表残落物, 装入塑料样品袋中, 并编号带回实验室。在室内, 将每个样方中的地上生物量分为植株活体和枯落物 (立枯物和凋落物) 两部分, 65℃ 烘至恒重, 称重, 得到生物量, 单位 g/m²。在每月 1、8、14、21 日左右采用收割法收集 25cm × 25cm 样方绿草, 编号装袋, 带回实验室用 Li-3000A 便携式叶面积仪测定植物绿色叶片的面积, 计算 LAI。气象数据依照海北气象站同期自动气象站观测资料。

1.3 数据分析

利用相关数学统计和建模软件 (SPSS16.0, Analyst Application of SAS V8 和 OriginPro 8 SRO v8.0) 对观测数据进行统计分析, 建立回归模型, 并解释模型行为的生态学含义。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸植被生物量季节动态

高寒草甸地上生物量积累过程表现有缓慢积累—快速增加—相对稳定—折损减少 4 个阶段^[13, 24-25]。对 2007 年海北站高寒矮嵩草草甸地上生物量观测表明, 高寒矮嵩草草甸植被地上生物量的季节变化明显。5 月 30 日之前地上生物量有积累, 但积累缓慢。5 月底 - 7 月末地上生物量迅速积累, 为高寒植物的快速生长阶段。8 月以后地上生物量达年内最高, 积累缓慢, 并相对稳定, 8 月末达最大。9 月以后逐渐下降。地上生物量积累的这种过程和自然界生物种群消长规律一样, 变化趋势呈 S 型, 可以用 Logistic 回归模型进行拟合^[26-27]。

Logistic 曲线方程的积分形式为

$$N = \frac{K}{1 + e^{-a \cdot t}} \quad (1)$$

式 (1) 中, N 为地上生物量 (单位: g/m²); t 为时间序列 (为从 1 月 1 日起的日序); r 是常数, 称为内禀自然增长率或瞬时增长率; K 也是常数, 称为环境承载力或容纳量 (单位: g/m²); e 为自然对数底; a 为积分常数。

用四点法估计 K 值, 即用实测序列中的 4 个数据点估计^[28], 有

$$K = \frac{N_1 N_4 (N_2 + N_3) - N_2 N_3 (N_1 + N_4)}{N_1 N_4 - N_2 N_3} \quad (2)$$

式 (2) 中, (t_1, N_1) 、 (t_4, N_4) 分别为实测数据序列的始点、终点, (t_2, N_2) 、 (t_3, N_3) 则为中间两点, $t_2 + t_3 = t_1 + t_4$ 。

a 、 r 值用线性回归估算。由于 Logistic 模型是一种内线性模型, 或称为可直线化的非线性模型^[28]。

故先将 Logistic 模型积分式 (1) 化为线性函数, 即

$$\ln\left(\frac{K-N}{N}\right) = a - rt \quad (3)$$

令 $y = \ln\left(\frac{K-N}{N}\right)$, 即可变换为线性式: $y = a - rt$,

然后用最小二乘法直线回归求出参数 a 和 r 的估计值。

利用参数 K, a, r 值便可得到所求的 Logistic 回归曲线。而回归方程拟合精度的高低可用决定系数 (R^2) 的大小来判定。

2007 年 5 - 8 月海北高寒矮嵩草草甸地上生物量累积增长模型为

$$N = \frac{349.72026}{1 + e^{5.318 + 0.03t}} \quad (R^2 = 0.946, p < 0.001) \quad (4)$$

模型曲线见图 1。

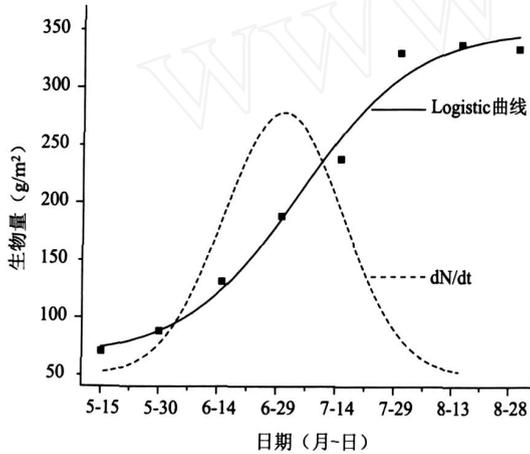


图 1 高寒矮嵩草草甸植被地上生物量季节变化和模拟

对式 (1) 求一阶导数, 可得群落地上生物量的增长速率函数, 即

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Kre^{-rt}}{(1 + e^{-rt})^2} \quad (5)$$

dN/dt 的意义是地上生物量随时间变化的相对增长率 (CGR, 图 1), 可用来描述植被地上生物量的增长速度特征。图 1 显示, dN/dt 为单峰曲线, 说明高寒矮嵩草草甸植被地上生物量的增长过程表现为缓慢 - 快速 - 减缓生长模式。 dN/dt 的极大值为地上生物量极大相对增长率 (CGR_0)。对上式求导, 即对 Logistic 方程二次求导, 有

$$\frac{d^2N}{dt^2} = \frac{Kr^2e^{-rt}(e^{-rt} - 1)}{(1 + e^{-rt})^3} \quad (6)$$

令 $d^2N/d^2t = 0$, 求得地上生物量极大相对增长率出现的时间为

$$t_b = \frac{a}{r} \quad (7)$$

地上生物量极大相对增长率 (CGR_0) 为

$$CGR_0 = \frac{rK}{4} \quad (8)$$

进一步对 Logistic 方程求导

$$\frac{d^3N}{dt^3} = \frac{Kr^3e^{-rt}(1 - 4e^{-rt} + e^{2a-2rt})}{(1 + e^{-rt})^4} \quad (9)$$

令 $d^3N/d^3t = 0$, 解之得

$$t_1 = \frac{a - 1.317}{r}, t_2 = \frac{a + 1.317}{r} \quad (10)$$

t_1, t_2 是地上生物量增长速率函数的两个拐点, 联系 t_b 可将生物量增长过程划为 3 个时期: 渐增期 (生长初期 - t_1)、快增期 ($t_1 - t_b$)、缓增期 ($t_b -$ 生长末期)。据此计算, 海北高寒矮嵩草草甸植被地上生物量 5 月 13 日前后进入快速增长期, 6 月 26 日左右为相对增长率最大时期, 为 2.6229g/d, 8 月 9 日进入缓慢增长期。

2.2 草甸植被群落叶面积指数季节动态

海北高寒矮嵩草草甸植被群落 LAI 在植物生长季的变化过程具有明显的季节变化。高寒矮嵩草草甸植被群落在 4 月份植被开始萌动发芽, 此时嫩芽矮小, 植株未形成, 叶面积较小。从植被返青开始植物群落 LAI 持续增大, 一直到植被叶片完全展开达到一最大值, 随后开始减小。利用 SPSS16.0 的 Curve Estimation 模块对 2007 年海北高寒矮嵩草草甸植被生长季的群落 LAI 进行拟合回归, 三次函数具有最优的拟合度, 即

$$LAI = 305.296 - 4.951t + 0.0266t^2 - 4.689 \times 10^{-5}t^3 \quad (R^2 = 0.9923, p = 0.0358 < 0.05) \quad (11)$$

其中, t 为日序。曲线见图 2。由图 2 可以看出, 高寒矮嵩草草甸植被 LAI 有明显的季节变化特点。6 月 1 日开始植物 LAI 迅速增加, 到 7 月底 8 月初达到最高, 之后逐渐降低。

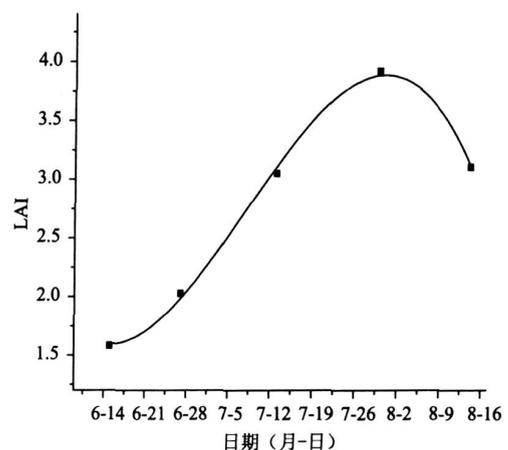


图 2 高寒矮嵩草草甸植被群落叶面积指数的季节变化和模拟

2.3 植被叶面积指数与温度和降水的关系

植被 LAI 与环境因素是相联系的,高海拔地区植物叶片的生长和凋零受水热条件影响明显。高寒植被在 4 月以前处于休眠状态, LAI 为零; 4 月下旬,日平均气温稳定 0, 植物开始萌动发芽,但叶面积小; 5 月中旬,日平均气温稳定 3, 且降水增多,植被开始返青,植物叶面积逐渐形成; 6 月中下旬,日平均气温稳定 5, 植被叶面积和生物量迅速增加; 7 月末到 8 月初 LAI 达到最高。之后, 植被成熟繁殖,受植物体物质能量分配转向生殖系统和强紫外线光照影响,植物叶片生长受到抑制, LAI 轻微下降。到生长季节末期,气温下降,降水减少,叶片基本停止生长并大量凋落, LAI 迅速下降。2007 年海北高寒草甸植被生长季节,植物 LAI 增长与日平均气温 3 的积温 (AT, 单位 °C · d) 和降水累积量 (AP, 单位 mm) 均表现出极显著的三次曲线关系,即

$$LAI = 1.055 + 0.019AT - 5.09 \times 10^{-5}AT^2 + 3.451 \times 10^{-8}AT^3 \quad (R^2 = 0.963, p < 0.001) \quad (12)$$

$$LAI = 1.13 + 0.04AP + 2.49 \times 10^{-4}AP^2 + 3.75 \times 10^{-7}AP^3 \quad (R^2 = 0.934, p < 0.001) \quad (13)$$

其综合模拟式为

$$LAI = 1.88 + 0.031AT + 0.00025AT^2 - 0.0012AT \cdot AP + 0.0013AP^2 - 0.014AP \quad (R^2 = 0.9412, p = 0.0043) \quad (14)$$

2.4 地上生物量与叶面积指数的关系

LAI 反映植被利用光能的能力,而光合作用是植被地上生物量增加的根本原因,两者之间有着密切的关系。高寒草甸地区暖季短暂的特殊气候条件,使得高寒植物与其他地区相比具有生长发育迅速、成熟早的特点。LAI 在 7 月底 8 月初即达最高值,以后植被茎秆花果组织的生物量比例也迅速增大,叶片组织易受骤冷骤热异常天气和强紫外线日光伤害, LAI 开始逐渐减小。利用 SPSS16.0 的 Curve Estimation 模块对 LAI 与地上生物量拟合发现,用二次多项式逐步回归分析方法建立植被 LAI 与地上生物量 (AB) 之间的标准化回归方程,具有良好的拟合度,即

$$LAI = 0.54 + 0.027AB - 7.05 \times 10^{-5}AB^2 \quad (R^2 = 0.921, p < 0.001) \quad (15)$$

函数式 (15) 为一开口向下的二次曲线,说明 LAI 季节动态呈现随植物地上生物量的不断增加而增大,到最大值后又随地上生物量的增加而下降的趋势。应用二次函数模型来描述 LAI 与生物量的关系,效果较好,并能反应高寒矮嵩草草甸植被 LAI 随地上生物量增长的单峰趋势。

3 讨论与结论

(1) 利用实测资料分析得到,海北高寒矮嵩草草甸植被群落地上生物量的 Logistic 季节动态回归模型为 $N = \frac{349.72026}{1 + e^{5.318 + 0.03t}}$ ($p < 0.01$)、LAI 季节动态回归模型为 $LAI = 305.296 - 4.951t + 0.0266t^2 - 4.689 \times 10^{-5}t^3$ ($p < 0.05$)、LAI 与地上生物量 (AB) 间也存在着密切的关系,可用二次多项式模型表达,即 $LAI = 0.54 + 0.027AB - 7.05 \times 10^{-5}AB^2$ ($p < 0.01$)。这些模型可定量表达群落地上生物量和 LAI 的季节动态特征及两者之间的关系。植被 LAI 受环境水热因子的影响,它与生长期日平均气温 3 的积温 (AT, °C · d) 和降水累积量 (AP, mm) 间的回归模型为 $LAI = 1.88 + 0.031AT + 0.00025AT^2 - 0.0012AT \cdot AP + 0.0013AP^2 - 0.014AP$ ($p < 0.01$)。

(2) 模拟结果显示,海北高寒矮嵩草草甸植被地上生物量 5 月 13 日开始进入快速增长阶段,6 月 26 日左右相对增长速率达最大值 (2.6229g/d),8 月 9 日后减缓,9 月中下旬地上生物量不再积累并开始下降。而叶面积指数的季节动态呈一单峰曲线,进入生长期后不断增大,在 8 月 3 日达最高值,与地上生物量进入生长末期的起始时间 (8 月 9 日) 基本一致。此后随植被开花繁殖,营养物质向生殖组织转移和强紫外线照射叶面积指数开始减小,9 月以后随天气转冷,植物叶片枯黄明显,叶面积指数急剧降低。青藏高原海北高寒矮嵩草草甸地上生物量和叶面积指数具有特殊的季节动态特点,与青藏高原独特的地理和气候条件相适应。

(3) 群落 LAI 的大小与其群落的结构组成、演化程度密切相关^[19,30],是植物收获量差异的主要原因^[20]。LAI 与温度和降水密切相关^[17],本文的回归方程证明了这点,且通过了 0.01 水平的显著性检验。利用本文建立的模型,可以计算不同温度和降水条件下该植被群落的 LAI 值。在一定的温度和降水条件下,不同植被群落有着特定的 LAI 动态变化规律,通过比较不同年份的 LAI 值和变化动态,即可反应出群落的结构变化,监测高寒草甸演化过程,了解草场的退化程度及估算草场实际生产力。

(4) 在气象与牧业等相关研究领域,有关生物量的研究报道较多^[31-33],而叶面积指数的研究相对较少。而叶面积指数在反映生态系统健康程度,监测草场演化退化等方面具有重要意义。根据植被 LAI 与地上生物量 (AB) 关系式计算得出,2007 年海北高寒矮嵩草草甸植被地上生物量达最大时, LAI 为 1.3101,

而在植被地上生物量达 191.4890g/m^2 时, LAI 为最大 (3.1251)。可见, LAI 的增长与地上生物量相对增长速率有一定关系。当 LAI > 3.0 期间 (7月中旬 - 8月中旬), 植被具有较大的地上生物量生成效率。此时海北高寒草甸地区光照充足, 水热条件为年内最佳, 植被具有最高效的光合作用和同化作用, 是植被地上生物量相对增长速率最大时期。LAI 和地上生物量增长率的关系, 与植被利用叶片吸收太阳光能合成有机物质从而形成净初级生产力并固定碳素的原理相一致。

参考文献:

- [1] 赵慧颖. 气候变化对典型草原区牧草气候生产潜力的影响 [J]. 中国农业气象, 2007, 28 (3): 281-284.
- [2] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄, 等. 中国陆地生态系统的碳库 [A]. 温室气体浓度和排放监测及相关过程 [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 128.
- [3] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements [J]. Global Change Biology, 2002, 8 (8): 736-753.
- [4] 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 [J]. 植物生态学报, 2004, 28 (4): 491-498.
- [5] Eric A, Davidson D C N, Carls K, et al. Pasture soils as carbon sink [J]. Nature, Scientific Correspondence, 1995, 376: 472-473.
- [6] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势 [J]. 地理学报, 2005, 60 (1): 3-11.
- [7] 姚玉璧, 张秀云, 朱国庆, 等. 青藏高原东北部天然草场植物气候生产力评估 [J]. 中国农业气象, 2004, 25 (1): 32-34.
- [8] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟 [J]. 地理学报, 2003, 58 (3): 372-380.
- [9] Ni J. Carbon storage in grasslands of China [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50 (2): 205-218.
- [10] 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), 2008, 38 (1): 84-92.
- [11] Luo T X, Pan Y D, Ouyang H, et al. Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau [J]. Global Ecology and Biogeography, 2004, 13 (4): 345-358.
- [12] 刘速, 刘晓云. 人工草地叶面积系数与地上生物量关系的初步研究 [J]. 干旱区研究, 1989, 6 (3): 48-53.
- [13] 杨贵, 贾慎修. 草地地上生物量、叶面积指数、叶绿素季节动态的研究 [J]. 家畜生态, 1997, 18 (3): 6-11.
- [14] Fang J Y, Piao S, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999 [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1 (6): 293-297.
- [15] 李永宏, 杨持. 内蒙古主要草原植物群落地上生物量和理论载畜量及其与气候的关系 [J]. 干旱区资源与环境, 1994, 8 (4): 43-50.
- [16] 于强, 姚克敏. 水稻叶面积指数的普适增长模型 [J]. 中国农业气象, 1995, 16 (2): 6-8.
- [17] 张佳华, 符淙斌. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. 地球物理学报, 2002, 45 (5): 631-637.
- [18] 惠凤鸣, 田庆久, 金震宇, 等. 植被指数与叶面积指数关系研究及定量化分析 [J]. 遥感信息, 2003, (2): 10-13.
- [19] 杜占池, 杨宗贵. 内蒙古典型草原地区 5 类植物群落叶面积指数的比较研究 [J]. 中国草地, 2001, 23 (5): 13-18.
- [20] 汪希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24 (5): 537-541.
- [21] 周兴民, 李建华. 海北高寒草甸生态系统定位站的主要植被类型及地理分布规律 [A]. 高寒草甸生态系统 [C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 18.
- [22] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析 [J]. 高原气象, 2004, 23 (4): 558-567.
- [23] 李英年, 王启基. 高寒草甸植物群落的环境特征分析 [J]. 干旱区研究, 1998, 15 (1): 54-58.
- [24] 赵新全, 曹广民, 李英年. 高寒草甸生态系统与全球变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [25] 周兴民. 中国高草草甸 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [26] 吴承祯, 洪伟. 运用改进单纯形法拟合 Logistic 曲线的研究 [J]. 生物数学学报, 1999, 14 (1): 117-121.
- [27] 李英年. 高寒草甸植物地上生物量生长过程的某些特征 [J]. 中国农业气象, 1998, 19 (6): 44-47.
- [28] 殷祚云. Logistic 曲线拟合方法研究 [J]. 数理统计与管理, 2002, 21 (1): 41-46.
- [29] 杜占池, 杨宗贵. 不同密度的羊草种群结构及其光照分布的研究 [J]. 草地学报, 1999, 7 (3): 236-244.
- [30] 薛晓娟, 李英年, 杜明远, 等. 祁连山坡地垂直带三种牧草的生长试验 [J]. 中国农业气象, 2008, 29 (3): 312-315.
- [31] 云文丽, 侯琼, 乌兰巴特尔. 近 50 年气候变化对内蒙古典型草原净第一性生产力的影响 [J]. 中国农业气象, 2008, 29 (3): 294-297.
- [32] 张法伟, 刘安花, 李英年, 等. 高寒矮高草草甸地面热源强度及与生物量关系的初步研究 [J]. 中国农业气象, 2007, 28 (2): 144-148.