

文章编号: 1007-0435(2004)01-0066-05

# 海北高寒草甸辐射能量的收支 及植物生物量季节变化

赵亮<sup>1</sup>, 古松<sup>2</sup>, 杜明远<sup>3</sup>, 加藤知道<sup>4</sup>, 唐艳鸿<sup>2</sup>, 李英年<sup>1</sup>, 赵新全<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2 日本国立环境研究所, 日本 筑波 3050053;  
3 日本农业环境技术研究所; 4 日本筑波大学, 日本 筑波 3050053)

**摘要:** 高寒草甸植物生长, 可用 Logistic 方程描述。生物量的瞬时增长率过程是一个先缓慢增大, 后快速增大, 逐渐达到最大值, 然后快速降低, 最后缓慢下降, 逐渐逼近零; 生物量达到最大时需累积 78 d 左右; 根据生物量的变化, 将生长过程划分为返青期、茂盛期和枯黄期。枯黄期的反射率明显高于返青期和茂盛期, 而返青期与茂盛期的反射率之间没有差异; 返青期与茂盛期的日均辐射能量差异不显著(日均总辐射:  $Z = 0.64, P = 0.81 = 0.05$ ; 日均辐射净:  $Z = 0.87, P = 0.44 = 0.05$ ; 日均有效辐射:  $Z = 0.92, P = 0.37 = 0.05$ ); 返青期和茂盛期的日均辐射能量均显著地高于枯黄期(日均总辐射:  $H = 45.36, df = 2, P < 0.01$ ; 日均辐射净:  $H = 32.41, df = 2, P < 0.01$ ; 日均有效辐射:  $H = 12.69, df = 2, P < 0.01$ )。有效辐射和反射辐射是影响地上生物量最重要的两个变量, 但两个变量对地上生物量的作用效应各异, 有效辐射是正效应, 而反射辐射则是负效应。

**关键词:** 高寒草甸; 生长期; 辐射能量收支

**中图分类号:** S812 **文献标识码:** A

## The Seasonal Variations of Radiation Budget and of Community Biomass in the Haibei Alpine Meadows

ZHAO Liang<sup>1</sup>, GU Song<sup>2</sup>, DU Ming-yuan<sup>3</sup>, Tomomichi Kato<sup>4</sup>,  
TANG Yan-hong<sup>2</sup>, LI Ying-nian<sup>1</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>1</sup>

(1. Institute of Biology of the Northwest Plateau, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810001, China;  
2 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 3050053, Japan; 3 National Institute of Agro-environmental Science, Tsukuba 3050053, Japan; 4 Doctoral Program of Biological Sciences, University of Tsukuba 3058577, Japan)

**Abstract:** The growth of plants in the alpine meadows, similar to the process of growth of all plants of other different areas, could be described by logistic equations the variable process of instantaneous growth rate of above-biomass starts to rise gradually, then rapidly until reaching the maximum point and then begins to decline rapidly and gradually down to zero point. It takes approximately 78 days for the instantaneous growth rate of above-biomass to hit the maximum point, generally around the 14th of July. Based on the variations of biomass and the instantaneous growth rate, the process of development could be divided into burgeoning-turning green period (BGP), vigorous-growth period (VGP), and scorching period (SP). The albedo of SP is much more powerful than both the albedo of BGP and of VGP, though there is scant difference between the albedo of the last two. There is neither much difference between the diurnal mean radiant energy of BGP and VGP (daily mean global radiation:  $Z = 0.64, P = 0.81 = 0.05$ ; daily mean net global radiation:  $Z = 0.87, P = 0.44 = 0.05$ ; daily mean effective radiation:  $Z = 0.92, P = 0.37 = 0.05$ ), whereas, the diurnal mean radiant energy of SP is much less than that of BGP and VGP (daily global radiation:  $H = 45.36, df = 2, P < 0.01$ ; daily net global radiation:  $H = 32.41, df = 2, P < 0.01$ ; daily mean effective radiation:  $H = 12.69, df = 2, P < 0.05$ ). Effective radiation and reflective radiation are two highly important variables affecting the above ground biomass, though the former is positive, while the latter negative.

**Key words:** Alpine meadow; Growth period; Radiation budget

收稿日期: 2003-04-10; 修回日期: 2003-07-08

基金项目: 中国科学院知识创新项目资助(KZCX1-SW-01-01A5)

作者简介: 赵亮(1974-), 男, 助理研究员, 从事生态学

地球表面部分物理过程的能量源自太阳辐射, 近地层辐射平衡的分配, 表征了大气与地面间的湍流交换强弱, 在土壤—植被—大气连续体的能量转换过程中有重要的作用, 是决定小气候形成的最基本的因素。辐射能量的分布既决定地—气环流的不同, 也决定某地的气候状况, 因而也影响该地区植被、土壤类型, 以及各种自然景观的分布差异。

青藏高原作为地球第三极, 是地球陆地最年轻、最高大、地形最复杂的高原, 它不仅直接影响我国气候的变化形成和演变, 并且影响着全球的气候变化, 尤其是高原大地形的热源或热汇作用, 对高原及东亚的天气和气候有着极其重要的影响。近年来, 我国学者虽然对青藏高原地区的辐射净及其各分量进行了观测, 并做了理论分析研究<sup>[1-4]</sup>, 但是只是涉及植物生长的某几天零星观察或考察数据来讨论植物生长期的辐射能量收支状况<sup>[5,6]</sup>, 而对整个植物生长期辐射能量收支状况未作详细的讨论。因为高寒草甸的植物生长是一个逐步积累的过程, 在这个过程中辐射能量收支制约着草甸的蒸散和牧草耗水量, 并决定土壤温度和植物体温度, 直接影响植物的光能利用, 能量流动乃至生长发育。因此, 通过对青海海北高寒草甸地区整个植物生长期的辐射净各分量的观测, 搞清高寒草甸地区辐射能量收支与植物生长量之间的关系, 为深入研究高寒草甸生态系统物质流动和能量流动提供依据, 对揭示高寒草甸地区牧草的生长机理有着重要的意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 自然概况

本研究于 2002 年 4 月~ 10 月在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行。地处青海海北藏族自治州门源回族自治县境内, 大通河河谷西段, 位于 37°29' ~ 37°45' N, 101°12' ~ 101°23' E, 海拔 3200 ~ 3600 m, 具明显的高原大陆性气候, 气温极低, 干湿季分明; 空气稀薄, 大气透明度高, 年均空气密度为 0.8496 kg/m<sup>3</sup>; 无绝对无霜期, 相对无霜期约为 20 d, 在 7 月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等冬季天气现象。

特殊的自然环境, 造就了适应寒冷湿中生的多年生草本植物群落, 形成了以矮高草(*Kobresia tibetica*)草甸、金露梅灌丛(*Fomation Dasiphora fruticosa*)草甸、小高草(*Kobresia pygmaea*)草甸、藏蒿草(*Kobresia tibetica*)沼泽草甸为建群种的植被类型, 生长低矮, 初级生产力低。土壤以洪积—冲积物、坡积—残积及古冰水沉积母质, 阳坡为草毡寒冻维形土(*Mat-Cryic Cambisols*)、阴坡为暗沃寒冻维形土(*Mol-Cryic Cambisols*)、沼泽地为有机寒冻潜育土(*Organic Cryic Gleysols*), 具有发育年轻, 土层浅薄, 有机质含量丰富等特征<sup>[8,9]</sup>。

观测站方圆 600 m 内, 地势平坦, 地形开阔, 具有一定尺度的“风浪区”。观测项目为辐射净的各分量, 即太阳总辐射、反射辐射、大气逆辐射和长波辐射, 以及生物量。观测仪器采用 Kipp & Zonen 的总辐射表, 数据由 Campbell Scientific 制造的 CR 23X 采集。

### 1.2 辐射能量资料与分析方法

辐射净由太阳总辐射、草甸反射辐射、大气逆辐射和草甸长波辐射计算得到, 代表了草甸的辐射能量收支状况, 辐射净计算方程为:

$$E^* = E_g - E_r - E_L^* = E_g (1 - \alpha) - E_L^* \quad (1)$$

$$E_L^* = E_L - E_L \quad (2)$$

式中:  $E_g$ : 总辐射;  $E_r$ : 反射辐射;  $\alpha$ : 反射率;  $E_L$ : 草甸长波辐射;  $E_L$ : 大气逆辐射;  $E_L^*$ : 草甸有效辐射;  $E^*$ : 辐射净。

### 1.3 生物量测定

生物量从植物返青(4 月 27 日)开始, 每月的 15 日和 30 日前后 3 d 内测定, 随机选择 6 个 50 cm × 50 cm 的样方, 用剪刀齐地面剪下装入纸袋; 尔后在烘温控制在 65 °C 烘干箱, 连续烘干至恒重后称重, 精确度 0.01 g, 单位取 g/m<sup>2</sup>。

生物量的积累是一个“慢—快—慢”的过程, 该过程符合 Logistic 生长函数, 因此用 Logistic 方程(1)来拟合生物量积累过程。

$$w(t) = \frac{W}{1 + e^{-a-kt}} \quad (1)$$

式中:  $w(t)$ : 表示第  $t$  天的生物量;  $t$ : 表示生长的累积天数;  $W$ : 最大累积生物量;  $a, k$  是常数。

对(1)式求关于天数  $t$  的二阶和三阶导数, 分别得到生物量的瞬时增长率达到最大时的天数(2)式和(1)式的两个突变点(3)式:

$$T_{\max} = \frac{a}{k} \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{\ln(2 + \sqrt{3}) - a}{-k} \quad T_2 = \frac{\ln(2 - \sqrt{3}) - a}{-k} \quad (3)$$

式中:  $\ln$ : 常用对数。

按照(3)式把植物生长期划分为三个阶段, 即[萌

发— $T_1$ ], [ $T_1$ — $T_2$ ]和[ $T_2$ —枯黄]。

### 1.4 数据分析

所有数据在 Spss10.0 软件包上分析。各生长期的辐射净、太阳总辐射、反射辐射、大气逆辐射和长波辐射的数据都是平均值。用非参数检验的 Kruskal-Wallis 或 Kolmogorov-Smirnov 方法来检验三个生长阶段的辐射净、太阳总辐射、反射辐射、大气逆辐射和长波辐射之间的差异;用逐步线型回归方法检验辐射净、太阳总辐射、反射辐射、大气逆辐射和长波辐射对生物量的影响。所有的检验都是双尾的。

## 2 结果与分析

### 2.1 高寒草甸植被地上生物量增长阶段

从返青期开始,地上生长量随着日期的积累缓慢增长,尔后进入快速增长阶段,逐渐达到生物量最大,最后进入平衡阶段(图 1)。用(1)式拟合该生长过程,得到(4)式,该方程很好地反映了生物量积累过程( $F_{(1,11)} = 18.19, P = 0.002 < 0.01$ ,图 1)。地上生物量的瞬时增长率变化过程是一个先缓慢增大,尔后快速增大,逐渐达到最大值,然后快速降低,最后缓慢下降,逐渐逼近零(图 1)。生物量的瞬时增长率达到最大时的累积天数 78 d,即,7 月 14 日前后。

由(3)式和(4)式,得到生物量三个增长阶段,即[返青期—5 月 29 日]、[5 月 29 日—8 月 29 日]和[8 月 29 日—枯黄期]。通过对各个阶段中植被变化情况观察,笔者发现,在[萌发期—5 月 29 日]阶段,植物萌动发芽,植被由黄逐渐变青;在[5 月 29 日—8 月 29 日]阶段,植物进入开花,结果,生长茂盛,生长加快,盖

度增加,有的植物进入成熟期;在[8 月 29 日—枯黄期]阶段,植物由成熟期进入枯黄期,植被由绿色变为黄色。根据各个阶段的植物和植被的特性变化,把这三个阶段分别定义为返青期、茂盛期和枯黄期。

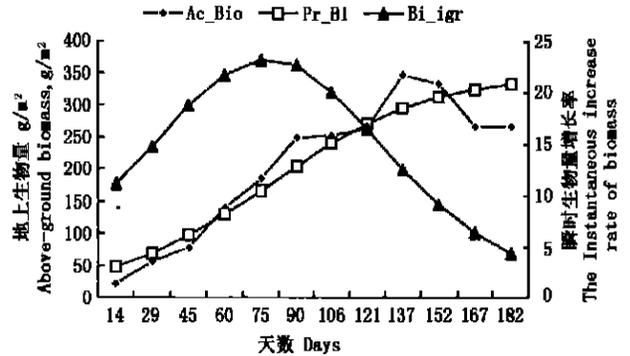


图 1 生物量日变化

Fig. 1 the daily variable of the above-ground biomass  
Ac\_Bio: 观察值 (observe value); Pr\_Bio: 预测值 (forecast value);  
Bi\_igr: 瞬时增长率 (instantaneous increase rate)

### 2.2 生长阶段的辐射能量的收支

#### 2.2.1 不同生长阶段的反射率日变化

白天的反射率在三个生长阶段所表现的变化趋势一致,中午前后低,早晚高,但在早晚出现一个低峰期。萌发返青期与植物茂盛生长期的反射率大小没有明显的差异(Kolmogorov-Smirnov,  $Z = 1.313, P = 0.065 > 0.05$ ),但这两个生长阶段的反射率大小与枯黄期的反射率存在显著的差异(Kruskal-Wallis,  $H = 52.51, df = 2, P < 0.01$ )。返青期的反射率为:  $0.13 \pm 0.04$ ,茂盛期为:  $0.14 \pm 0.04$ ,枯黄期为  $0.18 \pm 0.05$ 。由此看出,枯黄期的反射率明显高于返青期的和茂盛期,而返青期的反射率与盛长期的反射率之间没有差异。

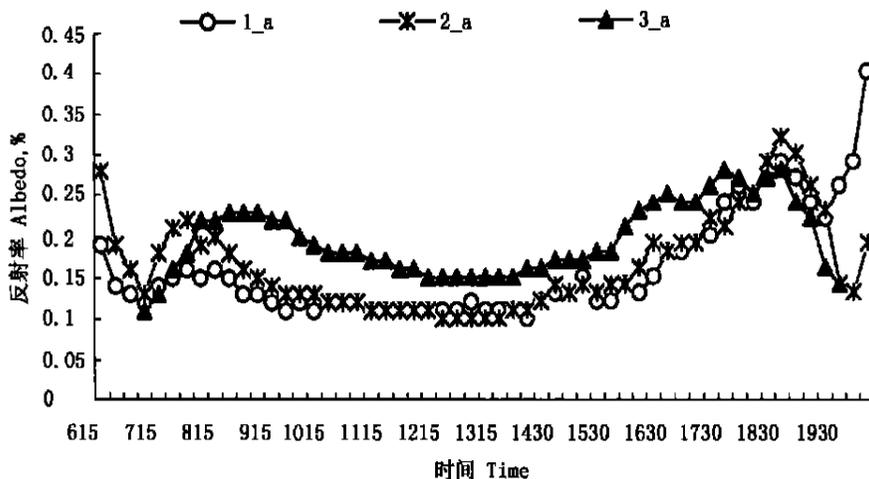


图 2 生长期反射率日变化

Fig. 2 the daily variable of albedo for different growth periods

1\_a: 萌发返青期 (bourgeoning-returning green period); 2\_a: 茂盛期 (vigorous-growth period); 3\_a: 枯黄期 (scorching period)

表 1 地上生物量与辐射能量变量之间的逐步线性回归分析

Table 1 The step line regression analysis between the ground biomass and the variable of radiation budget

方法模型 Model	变量 Variable	非标准化系数 Unsatandardized coefficients	标准化系数 satandardized coefficients(Beta )	F 值 F-value	显著性 Sig
1	常数 Constant	- 0.07336		F(1,11)= 49.461	P< 0.01
	X <sub>6</sub>	0.342	0.912		
2	常数 Constant	- 161.557		F(2,11)= 116.376	P< 0.01
	X <sub>6</sub>	1.946	5.192		
	X <sub>3</sub>	- 1.665	- 4.295		

### 2.2.2 生长阶段反射率日变化

在这三个生长阶段中,返青期的日均辐射能量与茂盛期差异显著(日均总辐射:  $Z = 0.64, P = 0.81 > 0.05$ ; 日均辐射净:  $Z = 0.87, P = 0.44 > 0.05$ ; 日均有效辐射:  $Z = 0.92, P = 0.37 > 0.05$ , 图 3)。而返青期和茂盛期的日均辐射能量均显著地高于枯黄期(图 3, 日均总辐射:  $H = 45.36, df = 2, P < 0.01$ ; 日均辐射净:  $H = 32.41, df = 2, P < 0.01$ ; 日均有效辐射:  $H = 12.69, df = 2, P < 0.01$ )。

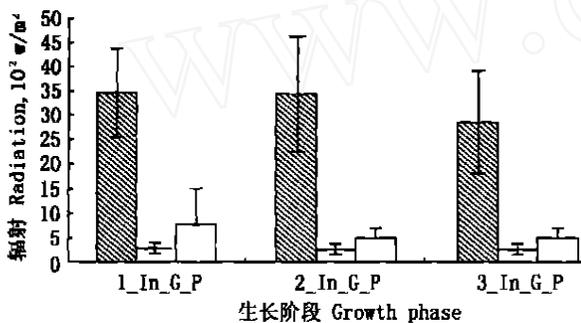


图 3 生长阶段日均辐射、日均净辐射和日均有效辐射

Fig. 3 Daily mean global radiation and net global radiation effective radiation in different growth periods

D — R — R: 日均辐射(daily mean global radiation); D — N — G — R: 日均净辐射(daily mean net global radiation);

D — E — R: 日均有效辐射(daily mean effective radiation)

### 2.3 地上生物量与辐射能量之间的关系

为了探明生物量(Y)与总辐射( $X_1$ )、大逆辐射( $X_2$ )、反射辐射( $X_3$ )、长波辐射( $X_4$ )、辐射净( $X_5$ )和有效辐射( $X_6$ )之间的关系,对上述 5 个变量与生物量做逐步线性回归分析,结果如表 1 所示。

在回归过程中,第一个进入的变量是有效辐射,第二个是反射辐射,其他的变量没有进入,这说明有效辐射和反射辐射是影响生物量两个重要变量。根据这两个变量的标准系数(Beta)正负关系,笔者发现这两个变量对生物量的作用效应各异,有效辐射是正效应,而反射辐射是负效应。

## 3 结论

3.1 通过对高寒草甸牧草地上生物量分析和模拟,将高寒草甸牧草地上生物量积累过程划分为返青期[萌发日期—5月29日]、茂盛期[5月29日—8月29日]和枯黄期[8月29日—枯黄日期]三个生长期。返青期阶段,生物量积累缓慢,生长速度变化小,进入茂盛期阶段,生物量积累快,生长速度变化大,最后进入枯黄期,部分牧草出现枯黄,生物量积累缓慢,逐渐达到最大值,生长速度逐渐逼近零(图 1)。再从每个生长期的气候变化来看,返青期期间气温低,冷空气活动频繁,降水较小,日均气温在 0~5 之间;茂盛期期间太阳辐射强烈,气温高,降水丰富,日均气温 5 ,有利于植物快速生长;枯黄期气温开始下降,降水减少,地表有时出现短时冻结现象,日均气温稳定<5 。另外,每个生长阶段的生物量积累占全生长阶段比例是不一样的,其中,茂盛期阶段最大,占全生长阶段的 60% 左右,但该生长期天数只占整个生长期天数 50% 左右,因此,茂盛期是牧草产量积累的关键,该结论与李英年等<sup>[7,10]</sup>的研究结果一致。总之,各阶段生物量的积累和实际的天气变化是一致的,完全刻画了生物量和高寒草甸植被的变化过程和规律,进一步说明笔者的划分方法是可取的,并且是可行的。

3.2 生态系统的一切能量源自太阳辐射,地表能量转换分配过程从太阳辐射开始,并向外部空间以长波辐射而结束。地表反射辐射表征了地表对太阳总辐射反射辐射状况的大小,反射辐射及反射率是能量平衡另一个非常重要的因子。虽然反射辐射的量值较小,但它是影响地表能量收支和陆面的重要组成部分。绿色植被具有强烈反射近红外辐射的能力,植被演替变化,气候变暖等过程无一不反映在反射辐射及发射率的变化。青海海北高寒草甸地区在植物各生长期的反射辐射和反射率的日变化规律是一样的,一般在中午反射辐射高,反射率低,这与以往的研究<sup>[5]</sup>是一致的。

3.3 投射到植被上的太阳辐射,一部分为植物冠层反射掉,另一部分太阳能透过冠层达到地面,其余部分被

(下转第 74 页)

优势,进行“南秸北饲”的畜牧业生产<sup>[8]</sup>,将是一个“双赢”的生产系统,通过区域间耦合生产释放系统潜力<sup>[9]</sup>,具有巨大的经济效益和生态效益。

#### 4.2.3 建立社会性的调控机制

随着开放型现代农业的发展,区域农业将完全融入社会生产之中。农业不仅生产了物质产品供人消费,也相应生产出了新的生态环境与人共享。因此,区域农业系统的生态恢复与经济互依关系,一定要体现社会的意志,同时社会也对此负有责任,承担义务。在促进华北农牧交错带生态——经济协调发展方面,政府的政策与经济调控具有关键作用(表1):对于经济高效型的生产,制定土地适度开发制度以限定资源承载力不超阈值<sup>[10]</sup>;对于区域生态建设,制定经济补偿制度以保障资源更新的外源动力则至为重要。

#### 参考文献

[1] 李博 生态学与草地管理[J]. 中国草地, 1994, (1): 1~ 8

- [2] Odum E P. 生态学基础 孙儒泳, 钱国桢, 林浩然, 等译[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. 158~ 227
- [3] 蔡晓明 生态系统生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 22~ 27
- [4] 张立峰, 徐长金 北方高寒半干旱农牧交错带资源环境障碍与农牧生产力开发[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 52~ 65
- [5] 孙新章, 张立峰, 成升魁 北方高寒半干旱农牧交错带畜牧业地位问题研究- 以河北坝上高原为例[J]. 干旱地区农业研究, 2002, (3): 104~ 108
- [6] 任继周 藏粮于草施行草地农业系统- 西部农业结构改革的一种设想[J]. 草业学报, 2000, (3): 1~ 3
- [7] 刘学录, 任继周 河西走廊山地- 绿洲- 荒漠复合系统耦合的景观生态学机制[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 979~ 984
- [8] 张立峰 坝上地区生态与经济建设的策略[J]. 河北经济, 2002, 4: 24~ 25
- [9] 任继周, 李向林, 侯扶江 草地农业生态学研究进展与趋势[J]. 应用生态学报, 2002, (8): 1017~ 1021
- [10] 李博 中国北方草地退化极其防治对策[J]. 中国农业科学, 1997, (6): 2~ 9

(上接第 69 页)

植物吸收并用于光合作用。植物群落的光合生产力在很大程度上决定于同化器官对光合有效辐射能吸收的能量。本文的分析结果证明, 枯黄期的反射率明显高于返青期的和茂盛期的反射率, 而返青期的反射率与茂盛期之间没有差异。这个差异说明返青期和茂盛期这两个阶段反射率低, 植被对辐射能的吸收较大。

3.4 李英年等<sup>[10]</sup>认为高寒草甸植物群落产量很大程度上取决于的气象因子制约。本文通过生物量与辐射能量之间的关系研究表明, 有效辐射和反射辐射对生物量有显著地作用, 并且二者的作用效应相反, 有效辐射是正效应, 而反射辐射是负效应。

#### 参考文献

[1] 陈有虞 青藏高原那曲地区的辐射及其年变化特征[J]. 高原气象, 1985, 4(4): 50~ 66

- [2] 江灏, 季国良 五道梁地区的辐射特征[J]. 高原气象, 1988, (2): 145~ 155
- [3] 沈志宝, 左洪超 青藏高原地区反射率变化的研究[J]. 高原气象, 1993, 12(3): 294~ 301
- [4] 沈志宝, 成天涛, 王可丽 青藏高原地面-对流层系统的能量收支[J]. 高原气象, 2002, 21(6): 547~ 551
- [5] 李英年, 赵新全, 曹广民, 师生波 海北高寒草甸地区太阳总辐射、植被反射辐射的有关特征[J]. 草地学报, 2002, 10(1): 33~ 39
- [6] 张宪洲, 王辉民, 张谊光 青藏高原冬小麦田辐射能量收支的初步研究[J]. 应用气象学报, 1997, 8(2): 236~ 241
- [7] 李英年, 王启基, 周兴民, 曹广民 高寒草甸植物群落的环境特征分析[J]. 干旱区研究, 1988, 15(1): 54~ 58
- [8] 李英年 海北高寒草甸生态系统定位站气候概述[J]. 资源生态环境网络研究动态, 1998, 9: 30~ 33
- [9] 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[A]. 见: 高寒草甸生态系统[C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983. 9~ 10
- [10] 李英年, 周华坤, 沈振西 高寒草甸牧草产量形成过程及与气象因子的关联分析[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 232~ 238