

高寒草原对气候生产力模型的适用性分析

公延明^{1,2}, 胡玉昆^{1*}, 阿德力·麦地¹, 李凯辉¹, 尹伟^{1,2}, 张伟^{1,2}, 王吉云³

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 新疆昌吉市草原站, 新疆 昌吉 831100)

摘要:本研究利用中国科学院巴音布鲁克草原生态研究站 1984—1990 年、2004—2008 年 2 个时间序列植物营养生长期的气候指标及净第一性生产力(NPP)实测值, 结合北京模型、综合植被模型和林慧龙等建立的模型模拟研究区的 NPP; 根据 3 个模型 NPP 的模拟值与实测值对其进行了一元线性回归与相关分析, 并基于 NPP 的模拟值探讨了研究区草地载畜量。结果表明, 北京模型($R=0.857^{**}$)、综合植被模型($R=0.894^{**}$)和林慧龙建立的模型($R=0.894^{**}$)的 NPP 模拟值与实测值相关性及相关一元线性回归方程拟合较好, 同时从线性回归的拟合度也揭示了降水是研究区 NPP 的主要限制因子, 而温度对 NPP 的影响程度相对较小。在年均气温增加 2 和 4℃, 年降水量增加 20% 时, 草地理论载畜量分别由目前的 0.94 个羊单位/hm² 增加到 1.49 和 1.62 个羊单位/hm²。

关键词:高寒草原; 净第一性生产力(NPP); 气候指标; 气候生产力模型; 载畜量

中图分类号:S812.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2010)02-0007-07

* 植被净第一性生产力(net primary productivity, NPP)指单位时间单位面积绿色植物所能累积的有机干物质数量^[1]。近年来, 植被 NPP 的研究倍受重视^[2-11], 国际地圈—生物圈计划、全球变化与陆地生态系统和京都协定等把植被的 NPP 研究确定为核心内容之一^[12, 13]。目前, 有关 NPP 研究的模型大致分为 3 种类型^[14-18]: 气候生产力模型、过程模型和光合利用率模型。气候生产力模型因其参数因子形式简单, 模型中的气象数据比较容易获得, 而且模型计算的结果能够真实地反映植物 NPP 的地带性分布规律, 被广泛应用于潜在 NPP 的估算^[19-23]。在气候生产力模型中, 朱志辉^[24]弥补了 Chikugo 模型对于草地及荒漠考虑的不足, 建立了北京模型(简称 NPP_b); 周广胜和张新时^[25]考虑到 Chikugo 模型对于干旱和半干旱地区水分不足, 建立综合植被模型(简称 NPP_z); 林慧龙等^[26, 27]基于综合植被模型的推导过程, 利用 >0℃ 年积温($\Sigma\theta$)和湿润度(K)指标, 建立植被 NPP 模型(简称 NPP_v)。北京模型、综合植被模型和林慧龙建立的模型在模拟草地 NPP 方面具有一定优势, 故研究采用这 3 个模型来模拟研究区的 NPP, 同时预测了在降水与温度改变下 NPP 的动态变化, 以及草地理论载畜量的改变趋势。

载畜量(carrying capacity)是评定草场承载牲畜能力的重要指标, 反映了草地生产力的潜在水平。目前, 估算载畜量的方法有很多, 中国一般采用家畜单位法^[28], 即在一定时间内, 一定面积草地可以放牧的家畜单位数, 并且采用羊单位。张新时等^[29]利用若干大气环流模型(GCM)得到 CO₂ 浓度倍增后中国大陆气温和降水变化的 2 种预测结果, 即年均气温增加 2 或 4℃, 年降水量增加 20%, 本研究在此条件下, 以回归拟合后的 NPP 模拟值为基础, 对研究区理论载畜量进行了估算, 分析高寒草原生产力在全球气候变暖的影响下的发展动向。

巴音布鲁克高寒草原是新疆重点牧区之一, 其牧草种类优良, 草场资源潜力大。近年来, 由于自然条件因素和经营管理问题, 草地退化较严重^[10], 通过探讨气候生产力模型在该区的适用性, 为合理开发及可持续利用草地资源, 估算草地牲畜承载能力, 动态监测草地植被生产力的变化提供理论依据和研究方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巴音布鲁克高寒草地位于天山南坡中部, 地处 42°18'~43°34' N, 83°27'~86°17' E, 海拔为 2 340~2 760 m,

* 收稿日期: 2009-04-10; 改回日期: 2009-05-15

基金项目: 全球环境基金(GEF)新疆草地项目(095F021)和新疆少数民族科技人才特殊培养计划科研项目(200823121)资助。

作者简介: 公延明(1982-), 男, 山东临朐人, 在读硕士。E-mail: gongyanming07@mails.gucas.ac.cn

* 通讯作者。E-mail: huyk@ms.xjb.ac.cn

面积为 $2.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占天山高寒草地的 80%, 年平均气温 -4.8°C , 1 月最低气温为 -48°C , 7 月最高气温可达 30.5°C , 年降水量 276~500 mm, 年蒸发量高达 1 022.9~1 247.5 mm, 全年积雪日为 150~180 d, 无绝对无霜期, 其群落物种组成主要是禾本科, 包括紫花针茅 (*Stipa purpurea*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、冰草 (*Agropyron cristatum*) 和洽草 (*Koeleria cristata*) 等。由于海拔较高, 草地除西北部的巩乃斯沟能够受到伊犁河谷地湿润气流的影响外, 其余三面基本封闭, 形成了独特的高寒山区气候。

1.2 气候生产力模型的 NPP 计算公式

研究采用 Holdridge 生命地带系统的气候指标^[29,30]: 生物温度(BT)、年降水量(P), 以及任继周等^[31,32] 提出的草地综合顺序分类法的气候指标: $>0^\circ\text{C}$ 年积温($\sum\theta$)、湿润度(K)和年净辐射(R_n)来计算 3 种模型的 NPP。模型公式表述如下:

朱志辉^[24] 建立的北京模型:

$$NPP_b = \begin{cases} 6.93 \exp[-0.224(RDI)^{1.82}] \times R_n, & \text{当 } RDI \leq 2.1 \\ 8.26 \exp(-0.498RDI) \times R_n, & \text{当 } RDI > 2.1 \end{cases} \quad (1)$$

周广胜和张新时^[25] 建立的综合植被模型:

$$NPP_z = RDI \times \frac{P \times R_n (P^2 + R_n^2 + P \times R_n)}{(P + R_n) \times (P^2 + R_n^2)} \times \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25RDI}) \quad (2)$$

林慧龙等^[26,27] 基于综合植被模型推导过程建立的 NPP 模型:

$$NPP_l = L^2(K) \times \frac{0.1 \times \sum\theta \times [K^6 + L(K)K^3 + L^2(K)]}{[K^6 + L^2(K)] \times [K^5 + L(K)K^2]} \times e^{-\sqrt{13.55 + 3.17K^{-1} - 0.16K^{-2} + 0.0032K^{-3}}} \quad (3)$$

式中, NPP_b 为北京模型, NPP_z 为综合植被模型, NPP_l 为林慧龙等建立的 NPP 模型, RDI 为辐射干燥度(张新时对中国各植被地带的 PER 与 RDI 进行分析得到的回归方程, 见公式(8)); R_n 为年净辐射(mm); P 为降水量(mm); K 为湿润度; $\sum\theta$ 为 $>0^\circ\text{C}$ 年积温; $L(K)$ 为林慧龙等以湿润度(K)为参数建立的方程(公式 9)。各模型中涉及的气候指标及计算公式:

$$BT = \frac{\sum t}{365} \text{ 或 } BT = \frac{\sum T}{12} \quad (4)$$

$$PET^{[19]} = BT \times 58.93, \quad PER = \frac{PET}{P} = \frac{BT \times 58.93}{P} \quad (5)$$

$$R_n = (PET \times P)^{\frac{1}{2}} \times [0.369 + 0.598 \times (\frac{PET}{P})^{\frac{1}{2}}] \quad (6)$$

$$K^{[32]} = \frac{P}{0.1 \sum\theta} \quad (7)$$

$$RDI^{[30]} = 0.55802 + 0.31401PER - 0.0098624PER^2 + 0.0001227PER^3 \quad (8)$$

$$L(K)^{[26]} = 0.58802K^3 + 0.50698K^2 - 0.257081K + 0.0005163874 \quad (9)$$

式中, BT 为年平均生物温度($^\circ\text{C}$), t 为 $<30^\circ\text{C}$ 且 $>0^\circ\text{C}$ 的日均温, T 为 $<30^\circ\text{C}$ 且 $>0^\circ\text{C}$ 的月均温; $\sum\theta$ 为 $>0^\circ\text{C}$ 年积温; P 为降水量(mm); K 为湿润度; R_n 为年净辐射(mm); PET 为可能蒸散, PER 为可能蒸散率; RDI 为辐射干燥度; $L(K)$ 为 $>0^\circ\text{C}$ 年积温($\sum\theta$)代替生物温度(BT), 计算公式 $BT = \sum t / 365$ 中 $\sum t$, 并对公式(8)转换得到。

1.3 数据资料来源及分析

利用中国科学院巴音布鲁克高寒草原生态研究站 1984—1990、2004—2008 年 2 个时间序列共 12 年的植物营养生长时期的气象观测和地上生物量监测资料。采用收获法测定地上生物量, 具体试验方法为在研究区($42^\circ 52' \text{ N}, 83^\circ 42' \text{ E}$, 海拔 2 577 m)随机设置 10 m \times 10 m 的样地 3 个, 每个样地内沿 2 条对角线设置 1 m \times 1 m 样方 5 个, 齐地收割样方内地上生物量, 实验室内自然风干后称干重。试验在每年的 8 月下旬进行。其中, 1984—1990 年地上生物量采用叶尔道来提等^[33] 监测结果。气象站地理位置为 $42^\circ 53' \text{ N}, 83^\circ 42' \text{ E}$, 海拔 2 470 m。

采用 Excel 和 SPSS 13.0 进行数据整理、制图、一元线性回归及相关分析。

2 结果与分析

2.1 生物气候指标及 NPP 年度变化

根据中国科学院巴音布鲁克草地生态研究站在 1984—1990、2004—2008 年 2 个阶段的年降水量(P)、年净辐射(R_n)、 $>0^\circ\text{C}$ 年积温($\sum\theta$)、生物温度(BT)、湿润度(K)等 5 种气候指标得到了其年际变化趋势(图 1)。

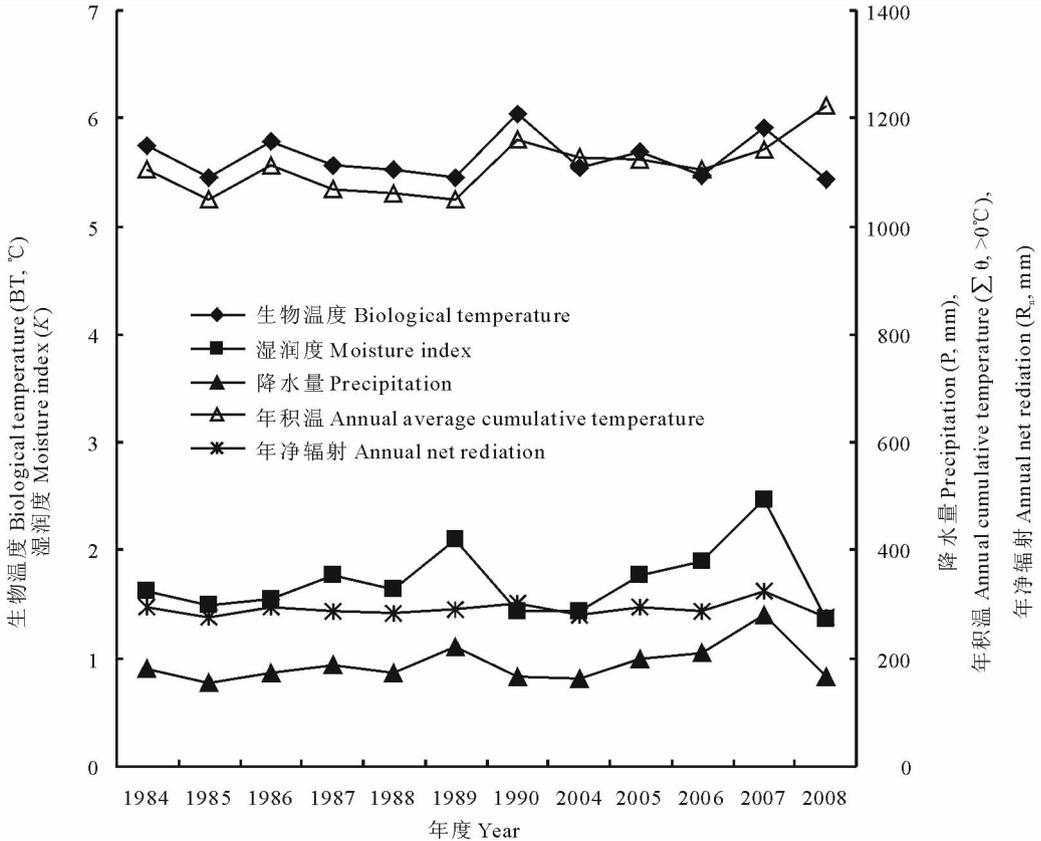


图 1 1984—1990、2004—2008 年高寒草地降水量、 $>0^\circ\text{C}$ 年积温、年净辐射、生物温度及湿润度

Fig. 1 Annual precipitation, $>0^\circ\text{C}$ annual average cumulative temperature, annual net radiation, biological temperature, moisture index of alpine grassland during 1984—1990 and 2004—2008 years, respectively

P、 $\sum\theta$ 、K 均表现出不同程度的增加趋势， $\sum\theta$ 最为明显；BT、 R_n 年际间虽有小幅波动，总体变化趋势平稳。12 年内，P、 R_n 、 $\sum\theta$ 、K 的最大值均出现在 2007 年，依次为：280.7 mm, 323.5 mm, 1 222.7 $^\circ\text{C}$, 2.461；2007 年的 BT 为 5.906 $^\circ\text{C}$ 仅次于最大值 6.049 $^\circ\text{C}$ (1990 年)。P、 R_n 、 $\sum\theta$ 、K、BT 5 种气候指标的最小值分别为：156.4 mm (1985 年), 275.2 mm (1985 年), 1 048.4 $^\circ\text{C}$ (1985 和 1989 年), 1.432 (1990 和 2004 年 K 为 1.435), 5.460 $^\circ\text{C}$ (1985 和 1989 年)。1985、1989、1990 和 2007 年气候突变较大，表现为 1985 和 1990 年低温、干旱，1989 和 2007 年高温、湿润。

研究区的净第一性生产力(NPP, t DM/hm² · a)实测值(NPP_s)与北京模型(NPP_b)、综合植被模型(NPP_z)、林慧龙等建立的模型(NPP_l)的 NPP 模拟值总体波动趋势一致(图 2)。

NPP_z 模拟值变化趋势较平稳，与 NPP_s 变化趋势最为接近，而 NPP_b 模拟值波动趋势明显，与 NPP_s 相比偏差较大。3 种模型 NPP 模拟值与实测值的均值比较为：NPP_z (3.054 ± 0.108) > NPP_l (1.850 ± 0.092) > NPP_b (1.532 ± 0.032) > NPP_s (0.603 ± 0.046)。12 年中，NPP_b、NPP_z、NPP_l 模拟值与 NPP_s 最大值均出现在 2007 年，其值分别为 1.819, 4.018, 2.668, 0.932。在 1985 年，NPP 模拟值与实测值均为 12 年中的最小值，分别为 1.400, 2.648, 1.536, 0.314。3 种模型 NPP 模拟值异常年份与气候突变较大年份相吻合，其中，降水与实测值和 3 种模型模拟结果在时间序列上的波动趋势具有较强一致性，说明降水是研究区 NPP 的主要限制性因子。

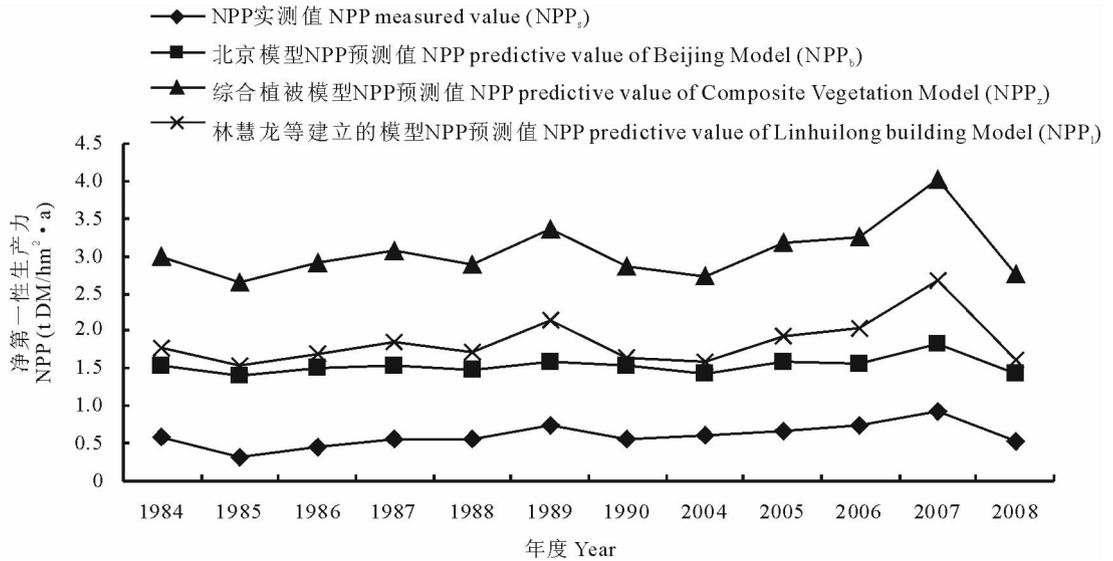


图2 1984—1990、2004—2008年高寒草地NPP实测值,北京模型、综合植被模型、林慧龙等建立的模型NPP模拟值

Fig. 2 NPP measured value, NPP predictive value of Beijing Model, NPP predictive value of Composite Vegetation Model, NPP predictive value of Linhuilong building Model of alpine grassland during 1984—1990 and 2004—2008 years, respectively

2.2 NPP实测值与模型模拟值的统计分析

NPP实测值(NPP_s)与3种模型(NPP_b 、 NPP_z 、 NPP_l)模拟值的Pearson检验在0.01水平下呈极显著相关(表1)。NPP_s分别和NPP_b、NPP_z、NPP_l的模拟值进行一元线性回归(回归方程分别用A、B、C表示),其决定系数(R^2)依次为0.735,0.800,0.799,回归拟合很好,说明3种模型对研究区具有较强的适用性。其中,综合植被模型与林慧龙等建立的模型的NPP模拟值与NPP_s相关性尤为显著,这2种模型的回归方程可较好对研究区的NPP进行估算,以便于对该区草地载畜潜力估算提供科学的理论依据。

表1 净第一性生产力(NPP)实测值与模型模拟值的一元线性回归及相关性分析
Table 1 Net primary productivity (NPP) measured values and model predictive values of the simple linear regression and correlation analysis

一元线性回归方程 Simple linear regression equation	相关系数 Pearson correlation (R)	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	样本数 Sample number (n)
A: $NPP_s = -1.296 + 1.240 NPP_b$	0.857 **	0.735	12
B: $NPP_s = -0.548 + 0.377 NPP_z$	0.894 **	0.800	12
C: $NPP_s = -0.220 + 0.445 NPP_l$	0.894 **	0.799	12

注: NPP_s为净第一性生产力(NPP)实测值, NPP_b为北京模型NPP模拟值, NPP_z为综合植被模型NPP模拟值, NPP_l为林慧龙等建立的模型NPP模拟值, **为0.01水平上显著相关。

Note: NPP_s for the net primary productivity (NPP) measured values, NPP_b for NPP predictive value of the Beijing Model, NPP_z for NPP prediction value of the Composite Vegetation Model, NPP_l for NPP predictive value of the Linhuilong building Model, ** Correlation is significant at the 0.01 level.

2.3 气候生产力模型的NPP预测及草地载畜量分析

研究依据年均气温升高2或4℃,年降水量增加20%,利用3种模型与实测值的回归方程A、B、C对研究区NPP进行了模拟。

表 2 模型拟合后的 NPP 模拟值和载畜量

Table 2 NPP predictive value and carrying capacity of model fitting results

项目 Item	20%+2℃			20%+4℃		
	NPP _b	NPP _z	NPP ₁	NPP _b	NPP _z	NPP ₁
NPP 模拟值 NPP predictive value (t DM/hm ² ·a)	1.27	0.96	0.91	1.64	1.04	0.91
载畜量 Carrying capacity (羊单位 Sheep units/hm ²)	1.97	1.49	1.42	2.55	1.62	1.42

注:20%+2℃为年降水量增加 20%,温度升高 2℃;20%+4℃为年降水量增加 20%,温度升高 4℃。

Note: 20%+2℃ for annual precipitation increased 20% and temperature increased 2℃; 20%+4℃ for annual precipitation increased 20% and temperature increased 4℃.

当年均温度与降水量皆升高时,模拟值均有所增加(表 2)。当年气温升高 2℃,降水量增加 20%,回归方程 A 的模拟值增加了 110.04%;气温升高 4℃,降水量增加 20%,NPP 由目前的 0.603 升高到 2.55,增幅达 171.97%。2 种气候状况下,方程 B 的模拟值与目前相比,增幅分别为 59.20%和 72.47%。方程 C 的模拟值维持在 0.91,在年气温升高 2℃,降水量增加 20%的基础上再升高 2℃,模型预测结果没有变化。降水保持不变,温度升高 2℃时,A 的模拟值会增加 29.44%,而 C 的模拟值没有变化,B 的模拟值增幅为 8.02%,由于 B 的拟合度 ($R^2=0.800$) 最优,故其模拟值较为准确。根据全球变化的 2 种预测结果,研究区草地生产力将呈现增长趋势。

在年均气温升高 2 或 4℃,年降水量增加 20%条件下,通过回归拟合后的 NPP 模拟值来预测研究区草地载畜量。估测方法^[11]为:理论载畜量 = $\frac{\text{草地地上年产量} \times \text{家畜对牧草的利用率}}{\text{家畜}(1 \text{ 个羊单位}) \text{日食量} \times 160}$ 。

经过取样统计,巴音布鲁克高寒草地杂草率约为 25%,地下根茎占总生物量的 35%左右,牲畜践踏、无法采食的残渣、凋落物等生物量损失大约为 10%,则最终利用牧草部分占总生物量的 40%~50%,这里取 45%,研究区家畜日食量采用 1.81 kg/d^[14],暖季放牧时间约为 160 d。

通过计算,目前理论载畜量为 0.94 个羊单位/hm²,草地理论载畜量的估算结果见表 2,3 种模型估算的理论载畜量均呈增大趋势。以 NPP_b ($R^2=0.800$) 的预测结果为例,当温度升高 2 或 4℃,降水增加 20%时,理论载畜量与目前相比,分别增加了 0.55 和 0.68 个羊单位/hm²。近年来,西北干旱区气候向暖湿化转变^[35],这在一定的程度上将有利于该区畜牧业的发展。

3 讨论

在年际植物营养生长期,研究区年际温度与净辐射波动不大,而降水量波动明显。降水对 NPP 的影响在 3 个模型中得到了很好的反映,在降水波动较大年份(如 1985,1989,1990,2007 年)NPP 的模拟值与实测值偏差较大,这是由于模型仅考虑了降水、温度等气候因子,而在实际情况下,土壤理化性质,植物自身的生理机制以及植物对环境的反馈作用也会对植物生长产生影响。

3 种模型模拟值与实测值的相关性均极显著,研究区 NPP 增长潜力较大,对高寒草地 NPP 的估算结果较准确。综合植被模型与林慧龙等建立的模型的推导过程基本相同,这 2 种模型的 NPP 模拟值与实测值的相关性及回归拟合度都要优于北京模型。综合植被模型对研究区的 NPP 模拟值为 2.648~4.018 t DM/(hm²·a),与周广胜等^[34]利用此模型对草地地带 NPP 估测得到的 2.6~4.9 t DM/(hm²·a) 范围差别不大。对于林慧龙等^[26,27]考虑到 >0℃ 年积温 ($\sum\theta$) 中 >30℃ 的积温所占比重很小,采用生物温度的计算公式为: $BT = \sum\theta/365$,代替了综合植被模型计算过程中的公式(4),即在其模型中组合草原湿润度(K)指标和 >0℃ 年积温 ($\sum\theta$) 2 个气候指标。由此可知,林慧龙模型既可表示水分平衡,又可表示热量因素和由此衍生的多项生境因子,而热量状况和水分条件的组合是草原现象和过程本质的因素,因此用草原湿润度(K)指标和 >0℃ 年积温的组合来表示草地净第一性生产力,更能揭示草原类型与其净第一性生产力的内在联系,为进一步研究地带性草地类型的生产潜力、草地净第一性生产力的区域分布和全球分布提供了可能。从本质上讲,想改变过去草地 NPP 模型与草地类型脱节的传统,即知道某草地在综合顺序分类法中的位置或类型,也就通过林慧龙模型对应出与之相当的草地 NPP。

在未来气候变暖(年均气温增加 2 或 4℃,年降水量增加 20%)条件下,3 种回归方程对研究区理论载畜量的估测均有所增加,与目前载畜量相比较,增幅为 0.48~1.61 个羊单位/hm²,降水增加会使研究区牧草生物量显著提高,温度对草地载畜量的影响不明显。在全球气候变暖背景下,不同区域因其地形分布各异,降水量及温度也会呈不同的变化趋势和幅度,因此,对研究区的气候因子变化动向有待于进一步研究,以便于为该区净第一性生产力的预测和草地生态恢复提供科学依据,同时对该区草场合理利用以及畜牧业管理也有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Leith H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1975.
- [2] 韩天虎, 赵忠, 王安禄, 等. 青藏高原东缘异针茅草地群落组成及生产力研究[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 62-66.
- [3] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 34-39.
- [4] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 336-378.
- [5] 赵慧颖, 王广生, 魏学占. GIS 支持下的天然牧草产草量区域预报模型研究[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 100-106.
- [6] 仁青吉, 崔现亮, 赵彬彬. 放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(6): 134-140.
- [7] 张铜会, 赵哈林, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地灌溉与施肥对退化草地生产力的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 36-42.
- [8] 孙飞达, 龙瑞军, 蒋文兰, 等. 三江源区不同鼠洞密度下高寒草甸植物群落生物量和土壤容重特性研究[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 111-116.
- [9] 刘艺杉, 刘自学, 李晓光, 等. 北京地区 3 种冷季型禾本科草坪草生物量及养分吸收动态的研究[J]. 草业科学, 2008, 25(4): 88-94.
- [10] 范永刚, 胡玉昆, 李凯辉, 等. 不同干扰对高寒草地群落物种多样性和生物量的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 531-536.
- [11] 李永宏, 莫文红, 杨持. 内蒙古主要草地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.
- [12] International Geosphere-Biosphere Program. A study of Global Change[R]. The International Geosphere-Biosphere Programme: The initial core projects. Report 12, Stockholm, 1990.
- [13] International Geosphere-Biosphere Program. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol[J]. Science, 1998, 280: 1393-1394.
- [14] 皮南林. 高寒草甸生态系统绵羊种群能量动态的研究[A]. 高寒草甸生态系统[C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 67-84.
- [15] Wang Z M, Liang Y L. Progress in vegetation NPP model research[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 17(2): 22-25.
- [16] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [17] 林慧龙, 常生华, 李飞, 等. 草地净初级生产力模型研究进展[J]. 草业科学, 2007, 24(12): 26-29.
- [18] 赵俊芳, 延晓冬, 朱玉洁. 陆地植被净初级生产力研究进展[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 780-786.
- [19] 李镇清, 刘振国, 陈佐忠, 等. 中国典型草地区气候变化及其对生产力的影响[J]. 草业学报, 2003, 12(1): 4-10.
- [20] Li Z Q, Liu Z G, Chen Z Z, *et al.* The effects of climate changes on the productivity in the Inner Mongolia steppe of China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2003, (2): 4-10.
- [21] 云文丽, 王永利, 侯琼, 等. 净第一性生产力模型在内蒙古典型草地区的应用分析[J]. 中国草地学报, 2008, 30(2): 1-4.
- [22] 张宏, 樊自立. 塔里木盆地北部盐化草甸植被净第一性生产力模型研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 13-17.
- [23] 杨允菲, 邢福. 松嫩平原杂类草草甸宽叶蒿无性系种群构件年龄结构及其生产力[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 19-24.
- [24] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [25] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [26] 林慧龙, 王军, 徐震. 草地净第一性生产力与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年积温、湿润度指标间的关系[J]. 草业科学, 2005, 22(6): 8-10.
- [27] Lin H L. A New Model of Grassland Net Primary Productivity (NPP) Based on the Integrated Orderly Classification System of Grassland[C]. Proceedings of 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD, 2009.
- [28] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.

- [29] 张新时, 杨莫安, 倪文革. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(三): 几种主要方法与 PEP 程序介绍[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(2): 97-109.
- [30] 张新时. 研究全球气候变化的植被—气候分类系统[J]. 第四纪研究, 1993, 13(2): 157-169.
- [31] 任继周. 草地农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [32] Ren J Z, Hu Z Z, Zhao J, *et al.* A Grassland classification system and its application in China[J]. The Rangeland Journal, 2008, 30: 199-209.
- [33] 叶尔道来提, 麦尔·斯拉木, 阿得勒, 等. 天山南坡高山草地生产量的季节和年度动态[J]. 干旱区研究, 1991, (增刊): 1-6.
- [34] 周广胜, 郑元润, 陈四清, 等. 自然植被净第一性生产力模型及其应用[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 2-11.
- [35] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 350-361.

Analysis of adaptation of a climate productivity model on alpine grassland

GONG Yan-ming^{1,2}, HU Yu-kun¹, ADELI Mai-dil¹, LI Kai-hui¹,

YIN Wei^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Ji-yun³

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changji Station of Prairie, Changji 831100, China)

Abstract: The Bayanbulak ecological station has records of the representative plant vegetative stages between 1984—1990 and 2004—2008 periods. Based on the climate index and net primary productivity (NPP) of the station this paper analyzes the NPP by the Beijing Model, the integrated vegetation model, and the Linghuilong building model. The modeling and measured values were fitted by linear regression and the carrying capacity of Bayanbulak grassland was estimated. 1) the modeling values calculated from the Beijing model ($R=0.857^{**}$), integrated vegetation model ($R=0.894^{**}$), and Linghuilong building model ($R=0.894^{**}$) all fit well with the observational values; 2) precipitation rather than temperature is the determinant factor influencing the NPP of Bayanbulak grassland; 3) as the annual temperature increases 2 and 4°C and precipitation increases 20%, the carrying capacity will increase from 0.94 sheep units per hectare (Beijing model) to 1.94 sheep units per hectare (integrated vegetation model) and 1.62 sheep units per hectare (Linghuilong building model).

Key words: alpine grassland; net primary productivity; climate index; climate productivity model; carrying capacity