

内蒙古农牧交错带草地生产力对气候要素的响应 ——以多伦县为例

何玉斐¹, 赵明旭², 王金祥², 张宏升^{1,3}

(1. 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871; 2. 内蒙古多伦县草原工作站, 内蒙古 多伦 027300; 3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 利用内蒙古农牧交错带多伦县 50 余 a 的气候资料, 基于 Miam i 和 Thomthwaite Memorial 气候模型, 分析了该地区草地生产潜力对气候要素的响应。结果表明, Thomthwaite Memorial 模型更能反映草地生产潜力随气候要素的变化规律。温度升高和降水增加均对当地草地生产潜力起正作用。其中, 相对温度而言, 降水对草地生产潜力的限制作用更为明显。另外, 利用多伦县 1999 ~ 2002 年的畜牧业统计资料, 对天然草地和人工草地的有效生产潜力和实际产量作了对比, 其中天然草地的草地生产潜力开发度很低, 仅为 26%, 具有很大的开发空间。人工草地的实际产量和草地生产潜力开发度相对更高, 显示了它作为提高该地区牧草产量有效途径的可能性。最后通过对比多伦县 2000 ~ 2002 年的理论和实际载畜量, 提出该地区草原处于高超载状态, 平均超载率高达 79.3%。

关键词: 农牧交错带; 草地生产力; 气候要素

中图分类号: S162.5

文献标识码: A

引言

农耕区与畜牧区是依人类经济生活方式而划分的基本区域, 介于两者之间的则为农牧交错地带。中国北方农牧交错带的范围很广, 大致走向为从大兴安岭东麓经辽河中、上游, 循阴山山脉、鄂尔多斯高原东缘至祁连山, 直抵青藏高原东缘^[1]。该地带覆盖了内蒙、冀、晋、陕等 8 省(区)所辖 110 个旗、县, 是我国水土流失、荒漠化等环境问题最为严重的地区之一。北方农牧交错带对气候变化极为敏感, 生态平衡功能脆弱, 农牧业生产不稳定, 一些学者从生态角度给予农牧交错带诸多特殊称呼, 如“生态危急带”、“生态环境脆弱带(ecotone)”及“生态环境敏感带”等^[2-3]。内蒙古自治区多伦县作为一个典型的半农半牧地区, 研究该复合生态系统的气候变化对它的气候变化响应特殊规律, 关系到对其治理、开发方针和政策的制定。草地是农牧交错带的重要组成部分, 其生产力变化不仅直接影响到该生态系统的功能, 而且进一步影响该地区的农牧业生产和

经济发展水平。因此, 本文在区域尺度上以多伦县为例, 应用气候模型研究当地草地生产潜力和气候要素的关系。同时, 对草地生产潜力和该县草地实际产量及载畜现状进行了比较研究, 以期通过该结果为当地农牧业可持续发展和生态环境建设提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

多伦县位于内蒙古锡林郭勒盟南部, 地处内蒙古波状高平原南缘、阴山山脉的北坡和浑善达克沙地尾缘的交错地带, 东部与大兴安岭向西南延伸的余脉衔接, 地理位置 115°51' ~ 116°54' E, 41°46' ~ 42°36' N。多伦县草原属于草甸草原和典型草原相间类型, 有 6 个草场类、14 个草场组、22 个草场型。土壤类型主要是栗钙土、风沙土、草甸土, 成土母质多以风积、冲积沙为主。气候属我国东部季风和温带半干旱向半湿润过渡地区的典型大陆性气候,

收稿日期: 2008 - 01 - 31; 改回日期: 2008 - 04 - 14

基金项目: 国家自然科学基金(40775013)、教育部博士点专项基金和国家科技部项目(2006AA06A306)资助

作者简介: 何玉斐(1984 -), 女, 四川人, 硕士研究生, 主要从事大气边界层和大气环境研究。

年平均降水量 386.4 mm,年平均蒸发量约为降水量的 4 倍。年平均降水量的年变率与季节性变率较大,最高年降水量(511.7 mm,1973年)为最低年降水量(255.2 mm,2001年)的 2 倍;累年平均气温 2.3℃,昼夜温差较大;光资源丰富,年日照时数 3 000 h 以上。

多伦县的农牧业是其经济的主体产业,产值占全县国民生产总值的 80%。总土地面积为 37.73 万 hm^2 ,其中草地面积 16.2 万 hm^2 ,耕地面积 12.5 万 hm^2 ,林地 1.1 万 hm^2 ,是一个典型的半农半牧地区。

1.2 研究方法

用 1953~2006 年多伦县逐年的降水量及气温资料,利用 Miami 和 Thornthwaite Memorial 气候模型估算当地的草地生产潜力,分析其对当地气候要素的响应特征,并与 1999~2002 年草地实际产量做比较研究。多伦县境内的草地类型主要为天然草地、人工草地、高产饲料地 3 种。其中高产饲料地种植的作物主要是青贮玉米和饲料玉米,不适合用来和基于气候模型估算的草地生产潜力相比较。而人工草地虽然是运用综合农业技术,通过人为播种建植的新的人工草本群落,但利用的主要还是当地自然水热条件,因而在气候影响方面和天然草地没有本质区别,所以在本研究中主要关注该地区天然草地和人工草地生产力对气候要素的响应。

目前,有关草地生产潜力的气候模型很多,应用较广泛的有 Miami 模型^[4]、Thornthwaite Memorial 模型(又称 Montreal 模型)^[4]、Chikugo 模型^[5]等。这些模型均采用气温、降水、辐射、湿度、气压、 CO_2 浓度等气象资料对草地生产潜力进行估算。由于 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型属于经验统计模型,考虑的气候要素较为简单,且与草地生产力直接相关的植被光合作用有一定联系,具有较强的普适性^[4],本文采用这 2 种模型对草地生产潜力进行估算。

1.2.1 Miami 模型

Lieih 根据全球约 50 个自然植被生产力实测资料 and 与之匹配的年平均气温、年降水量资料,用最小二乘法建立了 Miami 模型,利用某地区年降水量和年平均气温分别计算草地生产潜力^[4],即:

$$Y_t = 30000 / (1 + \exp(1.315 - 0.119t)) \quad (1)$$

$$Y_r = 30000 \times (1 - \exp(-0.000664r)) \quad (2)$$

式中, Y_t 和 Y_r 表示根据温度和降水量计算的草地生产潜力,这里分别称为温度生产潜力和降水生产潜力,单位是 $\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$, t 是年平均气温(°C), r 是年降水量(mm)。

1.2.2 Thornthwaite Memorial 模型

考虑气温和降水共同作用,通过计算区域年平均蒸散量估计草地生产潜力。即:

$$Y_v = 30000 \times (1 - \exp(-0.0009695(v - 20))) \quad (3)$$

式中 Y_v 表示利用蒸散量计算的草地生产潜力,这里称为温湿生产潜力,单位是 $\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$, v 表示当地实际年平均蒸散量:

$$v = 1.05r / \sqrt{1 + (1.05r/L)^2} \quad (4)$$

式中 r 为年降水量(mm), L 为不考虑降水时当地年平均蒸散量,其中 t 为当地年平均气温。

1.2.3 草地有效生产潜力

用 Miami 和 Thornthwaite Memorial 模型估算的生产力均为植被的净第一性生产力,为植被地上部分和地下部分的总和。而对于本文要研究的草地生产潜力,地上部分是所需要关注的,因而首先要除去地下部分^[6]。这里假设牧草产量的地上部分占总产量的百分比 R_1 为 50%^[7]。此外,由于牧草的可食性的影响,最终可供食用的牧草产量也只是牧草总产量的一部分,即牧草存在一定的荒弃率^[6]。这个比值对不同地区的各种草地类型变化幅度很大,根据很多实测的例子,约在 50%~90%之间^[8]。根据研究区草地结构的实际情况,对天然草地而言,这个可食性因子 R_2 约为 60%,对专门种植高效适宜牧草的人工草地而言, R_2 约为 90%。这样我们可以定义草地有效生产潜力:

$$Y_{\text{eff}} = Y_{t,r,v} \times R_1 \times R_2 \quad (5)$$

其中 $Y_{t,r,v}$ 为用 2 种气候模型分别估算的草地温度、降水及温湿生产潜力。

2 结果与分析

2.1 多伦县 50 余 a 年均温度与年降水的变化

图 1 和图 2 分别为多伦县 1953~2006 年均温

度和年降水量的逐年变化。其中的趋势线均为二项式拟合的结果。从图中可以看出,多伦县 50 余 a 来年均气温和年降水量年变率都较为明显,其中年均气温呈现快速增加的趋势,从 1953 年的 1.1 增长到 2006 年的 3.5 左右,平均增温率为 0.045 / a,远高于中国近 40 a 来的平均增温率 0.004 / a^[9]。相比之下,年降水量略有减少,但很不明显。

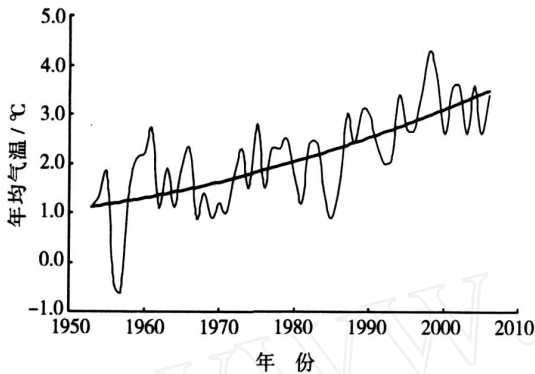


图 1 多伦县 1953 ~ 2006 年年平均温度变化
Fig. 1 The annual average temperature change of Duolun County during 1953 - 2006

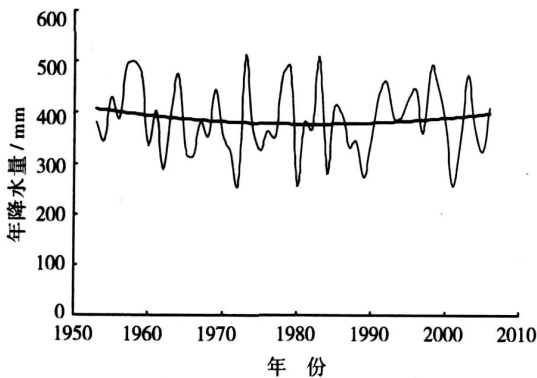


图 2 多伦县 1953 ~ 2006 年降水量变化
Fig. 2 The annual mean precipitation change of Duolun County during 1953 - 2006

2.2 草地有效生产潜力对气候要素的响应

2.2.1 草地有效生产潜力的逐年变化

图 3 给出了由 Miami 和 Thornthwaite Memorial 模型估算的有效温度、降水以及温湿生产潜力 $Y_{L_{eff}}$, $Y_{P_{eff}}$ 和 $Y_{V_{eff}}$ 。其中,有效温度生产潜力的平均值为 1930 kg/hm² · a,而有效降水生产潜力的平均值为 1690 kg/hm² · a,相当于前者的 87.6%,说明大部分年份的气候条件中植物生长所要求的水分供应相对于热量供应稍显不足。因此,降水量对草地生产力

的限制作用相对更为明显。这个结论和在其他一些在干旱或半干旱地区进行的相关研究结果相一致^[7,10-12]。根据 Liebig 最小因子定律,最小因子控制着生产力水平。这个规律从利用 Thornthwaite Memorial 模型估算的有效温湿生产潜力 $Y_{V_{eff}}$ 的年变化中得到了体现。从图 3 中可以看出, $Y_{V_{eff}}$ 总是和温度、降水有效生产潜力中相对较小的一项变化趋势相一致。这是由于 Thornthwaite Memorial 模型同时考虑了气温和降水影响的结果。张宪洲^[13]也曾指出 Thornthwaite Memorial 模型包含的环境因子较全面,计算的结果优于 Miami 模型。因此接下来有关草地有效生产潜力均指由 Thornthwaite Memorial 模型估算的有效温湿生产潜力。

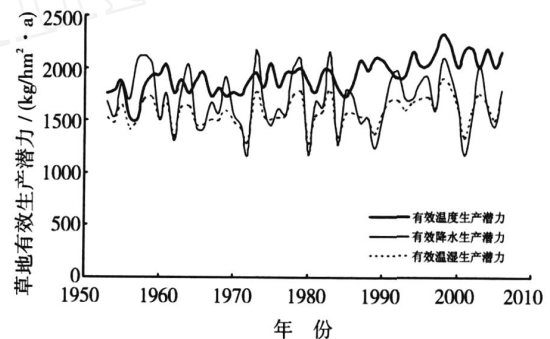


图 3 多伦县 1953 ~ 2006 年的草地有效生产潜力对气候变化的响应 (以天然草地为例)
Fig. 3 Response of the natural grassland effective potential productivity to climate change of Duolun County during 1953 - 2006

2.2.2 温度和降水变化对草地有效生产潜力的影响

图 4 给出了在降水量水平为累年平均值 386.4 mm 时基于 Thornthwaite Memorial 模型估计的天然草地有效生产潜力随温度的变化规律。图 5 为在温度为累年平均值 2.3 时天然草地有效生产潜力随降水量的变化规律。我们可以看到,温度和降水量对天然草地有效生产潜力的影响均为正作用。温度每升高 1、降水每增加 10 mm 时,天然草地有效生产潜力分别约增加 57.93 kg/hm² · a 和 32.46 kg/hm² · a。这种变化趋势和其他学者关于草地生态系统对气候要素响应的结论相一致^[7,11]。结合研究区的气候状况,这个结果不难理解。首先,该地区降水贫乏,降水量的增加将有利于牧草的生长。其次,该地区属于冷凉地区,气温的升高也将对牧草的生长有利。

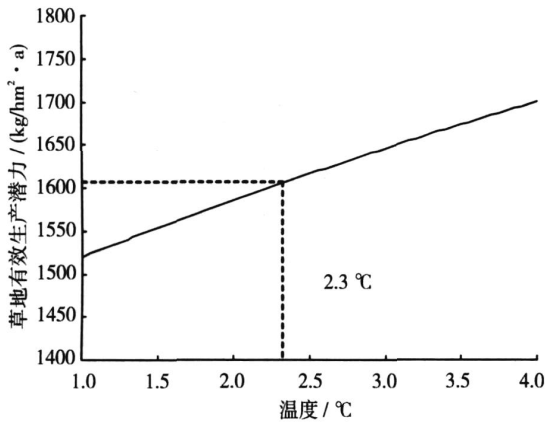


图 4 降水量水平为 386.4 mm 时天然草地有效生产潜力随温度的变化

Fig 4 The effective potential productivity of natural grassland changes with temperature when the annual precipitation is 386.4 mm

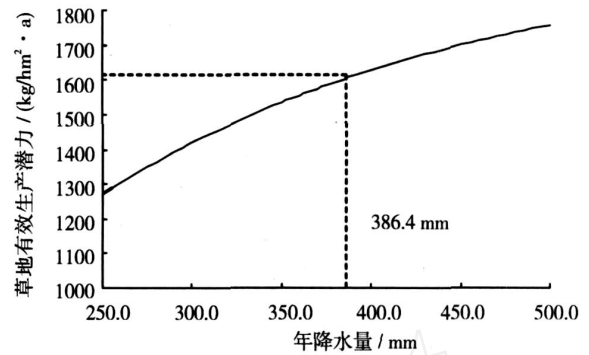


图 5 温度为 2.3 时天然草地有效生产潜力随降水量的变化

Fig 5 The effective potential productivity of natural grassland changes with annual precipitation when the annual average temperature is 2.3

2.3 草地有效生产潜力与草地实际产量

表 1 给出了多伦县 1999 ~ 2002 年的草地实际产量和有效生产潜力的对比。其中草地实际产量为单位面积上的平均可食干草产量,来源于多伦县草原工作站。天然草地和人工草地的有效生产潜力均由公式 (5) 计算得出,根据研究区的实际情况,天然草地和人工草地的可食性因子 R_2 各取为 60% 和 90%。草地生产潜力开发度定义为草地实际产量占有效生产潜力的百分比^[12]。

从表 1 可以看出,天然草地的平均实际产量仅为 412 kg/hm² · a,而人工草地的平均实际产量为 1

550 kg/hm² · a,约为前者的 3.8 倍,生产效率远大于前者。另外,天然草地的实际产量远远小于草地有效生产潜力,平均草地生产潜力开发度仅为 26%,具有很大的开发空间。相比之下人工草地的平均草地生产潜力开发度 (54.4%) 更高,并且在 2002 年达到了 78.1%,说明人工草地由于引入了高产草种和科学管理方法,生产效率得到了显著提高。此外还可以看到,天然草地和人工草地的实际产量和有效生产潜力的逐年走势基本一致。这也从某种程度上验证了模型的适用性以及气候要素对草地产量影响的重要性。

表 1 1999 ~ 2002 年多伦县天然草地、人工草地的实际产量与有效生产潜力

Tab 1 The effective potential and actual productivities of Duolun County's natural and artificial grassland during 1999 - 2002

	天然草地			面积 /hm ²	人工草地		
	实际产量 / (kg/hm ² · a)	有效生产潜力 / (kg/hm ² · a)	草地生产潜力开发度 /%		实际产量 / (kg/hm ² · a)	有效生产潜力 / (kg/hm ² · a)	草地生产潜力开发度 /%
1999	540	1 804	29.9	11 047	1 950	3 247	60.1
2000	237	1 600	14.8	16 986	938	2 879	32.6
2001	375	1 325	28.3	20 048	1 058	2 385	44.4
2002	494	1 601	30.9	19 267	2 252	2 882	78.1
平均	412	1 583	26.0	16 837	1 550	2 848	54.4

2.4 理论载畜量和现实载畜量

草地载畜量主要由牧草产量和利用率及草地放牧天数所决定。另外,由于在农牧交错带农业副产

品也会对载畜量有贡献,所以必须对农业副产品载畜量进行计算。本文仅对农业副产品的主要品种——作物秸秆载畜量进行估算。理论载畜量的计

算公式如下^[14]:

$$\text{理论载畜量 (个羊单位)} = \frac{\text{牧草产量 (kg/hm}^2 \cdot \text{a)} \times \text{利用率 (\%)} \times \text{草地面积 (hm}^2\text{)}}{\text{个羊单位日食量 (kg/d)} \times 365} \quad (6)$$

若假定天然草地、人工草地和高产饲料地的平均牧草利用率为 70%,作物秸秆利用率为 50%。据多伦县草原工作站多年统计结果,每个羊单位的干草年食量为 430 kg/a。载畜量的计算结果如表 2 所示。

将目前的理论载畜量与现实载畜量相比较,可

知多伦县草地 2000~2002 年均处于严重超载状况,其中 2001 年超载率高达 135.9%。实际生产中,这种长期的超载状态不仅会使草原退化和沙化,也可能使得可食牧草比率减少,从而导致草地生产力的进一步降低,给当地草地生态环境和畜牧业的可持续发展带来巨大影响。

表 2 1999~2002 年多伦县理论载畜量和现实载畜量

Tab 2 The theoretical and actual stocking rate of Duolun during 1999 - 2002

	理论载畜量 /个羊单位					现实载畜量	超载率
	天然草地	人工草地	高产饲料地	作物秸秆	合计	/个羊单位	/%
1999	150 214	35 067	195 349	28 046	408 676	—	—
2000	65 927	25 924	217 931	915	310 697	650 246	109.3
2001	104 190	34 513	69 888	27 779	236 370	557 522	135.9
2002	137 302	70 617	100 156	54 160	362 235	564 551	55.9
平均	114 409	41 530	145 831	27 725	329 495	590 773	79.3

3 结论与讨论

草地植被的生产力决定着草地的牧草生产水平,是草场载畜能力的基础。我国北方农牧交错带地区生态平衡功能脆弱,气候变化对该地区的农牧业生产影响很大。本文基于 Miami 模型和 Thomthwaite Memorial 模型对多伦县 1953~2006 年的逐年草地有效生产潜力作了估算,并分析了其变化规律。结果显示, Thomthwaite Memorial 模型由于同时考虑了气温和降水的影响,其随气候变化的规律相对更接近于实际情况,优于 Miami 模型的估算结果。在降水和温度这 2 个主要气候要素中,降水对草地生产潜力的限制作用更为明显。另外,由 Thomthwaite Memorial 模型估算结果可以看出,在多伦县的典型气候条件下,降水增加和温度升高均会对草地有效生产潜力有正面的影响。

多伦县 1999~2002 年天然草地的平均实际产量仅为 412 kg/hm²·a,远远小于草地平均有效生产潜力 (1 583 kg/hm²·a),平均草地生产潜力开发度仅为 26%,具有很大的开发空间。这从一个侧面说明了该地区天然草地由于过度放牧、水土流失等原因已经处于退化状态。相比之下,人工草场由于牧草品种优良和管理适当,不仅实际产量 (1 550 kg/

hm²·a)和有效生产潜力 (2 848 kg/hm²·a)远远高于前者,而且平均草地生产潜力开发度也更高 (54.4%)。因此,改变草地布局,增加人工草地的面积是提高该地区牧草产量的有效途径。

通过对 1999~2002 年多伦县天然草地、人工草地、高产饲料地以及作物秸秆的产量统计,可以估算出该地区的平均理论载畜量为 329 495 个羊单位,而平均实际载畜量为 590 773 个羊单位,平均超载率达 79.3%,长期处于高超载状态。这种状态的持续将造成草地植被的破坏,引起土地多孔状结构下降,不利于水分渗入地下以维持土壤湿度,进而造成水土流失和降低土壤生物生产力^[15],最终将会制约该地区畜牧业生产的可持续发展。另外,人工草场和高产饲料地的理论载畜量已经占了总理论载畜量的很大部分,因此,单靠天然草原植被的自然生长已不能满足畜牧业生产的需要。在载畜总量较难降低的情况下,退耕还林,增加人工草场的培育和加强高产饲料的生产是切实可行的途径,以此来缓解家畜对草场的压力。

参考文献:

- [1] 中国科学院地理研究所经济地理室. 中国农业地理总论 [M]. 北京:科学出版社,1980. 286

- [2] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定 [J]. 生态学报, 1989, 9(2): 97 - 105.
- [3] 韩茂莉. 辽金农业地理 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 1999. 10 - 17.
- [4] Lieth H, Whittaker R. 王业谨译. 生物圈的第一性生产力 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 217 - 236.
- [5] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of nature vegetation [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985(40): 343 - 353.
- [6] 姜恕等. 草地生态研究方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1988. 234.
- [7] 李广, 黄高宝. 北方农牧交错带气候变化及草地生产力的响应——以甘肃省定西县为例 [J]. 中国草地, 2005, 27(1): 7 - 11.
- [8] 沼田真. 姜恕等译. 草地调查手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 169 - 173.
- [9] 徐小玲, 延军平. 毛乌素沙地的气候对全球气候变化的响应研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 135 - 139.
- [10] 安华银, 李栋梁. 甘南高原近 40 年气候变化及其对农牧业影响的研究 [J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 23 - 26.
- [11] 苏战胜, 陈晓光, 黄峰, 等. 宁夏农牧交错区 (盐池) 草地生产力对气候变化的响应 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 430 - 435.
- [12] 杨正礼, 杨改河. 中国高寒草地生产潜力与载畜量研究 [J]. 资源科学, 2000, 22(4): 72 - 77.
- [13] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布 [J]. 自然资源, 1992(1): 15 - 21.
- [14] 闫丽娟, 张恩和. 北方农牧交错带理论载畜量对气候变化的响应 [J]. 草业科学, 2005, 22(3): 8 - 10.
- [15] 李祥余, 李帅, 何清. 沙漠化问题研究综述 [J]. 干旱气象, 2005, 23(4): 73 - 82.

Response of Grassland Productivity to Climate Change in the Farming - Pasturing Interlocked Area of Inner Mongolia: Case Study of Duolun County

HE Yufei¹, ZHAO Mingxu², WANG Jinxiang², ZHANG Hongsheng^{1,3}

(1 Department of Atmospheric Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2 The Grassland Research Station of Duolun, Duolun 027300, China; 3 Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: According to the climate data (1953 - 2006) in the farming - pasturing interlocked area of Inner Mongolia (Duolun), the response of local grassland productivity to the climate change is analyzed. Climate models (Miami and Thomthwaite Memorial) are introduced to evaluate the grassland potential productivity. It is showed that Thomthwaite Memorial model could better describe the main features of the grassland potential productivity change with climate factors in Duolun County, and both temperature and precipitation increase could enhance the potential productivity, but precipitation is the key climatic factor limiting the potential productivity. The grassland actual productivity observed in Duolun County is then compared with the effective potential productivity. The results show that the productivity level of natural grassland is very low ($412 \text{ kg/hm}^2 \cdot \text{a}$), which is only 26% of its effective potential productivity, and there is a large room for improving. Both of the potential and actual productivities of the artificial grassland are much higher than those of the natural grassland, which indicates that the development of artificial grassland could be highly efficient for improving the local grassland productivity. The actual stocking rate in 2000 - 2002 is also compared with the estimated theoretical one, and an average overloading rate up to 79.3% exists in this period.

Key words: farming - pasturing interlocked area; grassland productivity; climate change