



论文

内蒙古锡林郭勒盟草原产草量动态遥感估算

金云翔, 徐斌*, 杨秀春, 李金亚, 王道龙, 马海龙

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: xubin@mail.caas.net.cn

收稿日期: 2011-10-12; 接受日期: 2011-11-07

国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA10Z242, 2008AA121805)、国家自然科学基金(批准号: 40701055)、农业部草原资源状况遥感监测以及草原资源与生态监测项目资助

doi: 10.1360/052011-228

摘要 草原产草量的监测是草地资源空间动态研究的重要衡量指标, 是草地资源合理利用和载畜平衡监测的重要依据. 基于 371 个样地调查数据和 2005~2009 年的 MODIS-NDVI 遥感数据, 建立地面样方的产草量与遥感数据的关系模型, 模拟分析了内蒙古锡林郭勒盟草原产草量的时空分布. 结果表明: (1) 建立各模型方程均有较好的相关关系, 其中幂函数的相关关系最优, 通过预留样方数据的验证, 模型精度为 78%, 幂函数模型作为遥感估测应用可行; (2) 锡林郭勒盟草原的产草量 5 年平均为 3455 万吨, 折合干草总量为 1112 万吨, 平均单产为 567.23 kg/hm², 草原产草量的空间分布呈东高西低的格局; (3) 2005~2009 年, 锡林郭勒盟草原产草量有明显的波动, 干草变化范围为 800~1400 万吨, 变异系数为 20.42%; (4) 不同草地类型的产草量及其年际间变化存在较大的差异, 荒漠类草原产草量低, 年际间变化较大; 草甸类草原产草量高, 年际间变化相对较小. 草原产草量的时空变化还与降水量、气温等主要气候因素关系密切, 特别是受降水量的时空变化影响显著. 研究结果可以为中国草地资源的保护及合理利用提供参考依据.

关键词
草原
产草量
遥感
动态变化

草原生态系统是中国最大的陆地生态系统^[1], 草原最主要的变化是草原生产力的变化^[2,3], 其中草原产草量是维护草原生态系统的物质基础, 是反映草原状况最直接的指标, 对草原生态系统功能的强弱具有决定性的作用, 草原植被生物量动态研究一直是陆地生态学的热点问题^[4,5]. 因此, 及时准确地了解草原产草量的时空分布状况, 掌握草原年际间变化动态规律, 对于草原可持续利用和管理具有重要意义.

遥感技术的迅速发展, 为草原产草量的监测提供了新的方法和手段. 与常规方法相比, 利用遥感方

法监测草原产草量的优势主要表现在宏观、快速、省时、省力, 可为草原管理与决策提供快速、及时的草原信息^[6]. 植被指数是遥感监测草原产草量的重要指标之一, 其中 MODIS-NDVI 是应用最广泛、反映植被信息敏感且比较稳定的植被指数, 其时空分辨率可以较好地满足宏观尺度草原植被的时空变化特征. 赵冰茹等人^[7]利用 MODIS-NDVI 数据和地面实测数据, 分别建立了锡林郭勒盟草原 4 种草地类型的估产模型, 初步探讨了使用均一化植被指数(NDVI)进行草地估产研究的可行性. 张连义等人^[8]利用土壤调整植被指数(SAVI)、NDVI、增强植被指数(EVI), 分别

建立了内蒙古锡林郭勒典型草原区草地牧草估产模型. 结果表明, 选用 NDVI 植被指数建立估产模型有一定的优势. Kawamura 等人^[9]研究了 MODIS-NDVI 与内蒙古草地生物量之间的关系, 发现二者具有显著的相关性. Butterfield 与 Malmström^[10]分析了草原地上生物量与 NDVI、植物吸收性光合有效辐射分量 (fPAR)、叶面积指数(LAI)之间的相关关系, 估算了不同时期草原地上生物量. 国外学者通过长期的研究, 建立了多种遥感过程模型(Miami 模型^[11]、Century 模型^[12]、CASA 模型^[13]、GLO-PEM 模型^[14]等)用于估算草原生产力, 并得到了广泛的应用. 然而不少研究中^[15-20]地面样地的建模和验证数据较少, 模型的可靠性和精度难以保障; 同一生长季的数据建模受到当时气候(气温、降水等)的影响较大, 虽然可以应用于当年的产草量估算, 但对于一个区域的多年草原产草量的估算, 模型缺乏普适性; 多数的研究是针对某一年或某些年份的草原产草量估算, 对草原产草量进行年际变化的研究相对缺乏. 本文利用锡林郭勒盟草原多年的地面调查数据, 并结合同期的 MODIS 遥感影像, 建立了基于遥感数据的 NDVI 与草原产草量之间的关系模型, 同时利用模型研究了锡林郭勒盟草原产草量的时空分布格局, 从宏观上及时、动态地揭示了草原生长状况, 反映出草原的动态变化.

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒盟位于内蒙古中部偏东(图 1), 地处北纬 41°35′~46°46′, 东经 111°09′~119°58′. 土地总面积 202580 km², 草原总面积 192512 km², 占土地总面积的 95.03%. 草原总面积中以天然草原为主, 占全部草原面积的 97.2%. 锡林郭勒盟具有典型的温带大陆性半干旱气候特征, 冬季寒冷、夏季较热, 年平均气温 1.3~4.8℃, 年降水量 150~400 mm, 雨量自西向东递增, 年内降雨分布不均, 70%的年降雨量集中在 6~8 月, 年际间变化较大.

1.2 地面样方数据

本研究使用的地面样方数据来源于本课题组采集的数据和农业部草原监理中心每年组织地方草原部门采集的地面样方数据, 采样时间为 2005~2009 年

的 7~8 月, 通常为植被生长盛期. 草本及矮小灌木植物样方大小为 1 m×1 m, 灌木和高大草本植物样方为 10 m×10 m, 主要测定了经纬度、海拔高度、产草量、群落覆盖度、群落高度等信息. 主要植物种包括: 羊草 (*Leymus chinensis* Trin.)、针茅 (*Stipa capillata* Linn.)、苔草 (*Carex tristachya*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum* Pall. Moq.)、红砂 (*Reaumuria soongorica*) 等草本及灌木植物. 对草本及矮小灌木植物样方产草量, 采用样方内全部植物齐地面刈割的方法称重测定; 对灌木和高大草本植物样方产草量, 采用测量样方内各种灌丛植物标准株(丛)产量和面积的方法进行, 分别剪取样方内某一灌木及高大草本大、中、小标准株丛的当年枝条并称重, 将大、中、小株丛标准重量分别乘以各自的株丛数, 再相加即为该灌木及高大草本的产草量.

由于地面样方数据的质量会明显影响模型估算的准确性^[21], 因此, 在建模前对地面样方数据进行了严格的检验和标准化. 根据草地类型、多年样方平均状况等, 对样方数据中表现异常的个别数据进行了剔除, 最终选择了建模和检验的样方数据共 371 个(图 1), 其中选择具有代表性的 300 个地面样方点产草量数据用于模型建立, 71 个用于精度验证, 建模样方和精度验证样方的数量和地点基本代表了该区域的主要草地类型和多年的产草量状况.

锡林郭勒盟有 9 大草原类型(图 2), 本研究中地面样方的设置和采集尽可能地反映整个区域的植被生长状况, 样点尽可能设置在不同的草地类型上, 同时考虑样点能否反映不同地形特征下的植被生长状况以及交通便利性条件等.

1.3 遥感数据及处理

本研究使用的遥感数据来源于美国国家航空航天局(NASA)官方网站下载的 MODIS-NDVI 16 天合成产品数据(MOD13), 时间为 2005~2009 年每年 7 月中旬~8 月下旬, 空间分辨率为 250 m. 通过对 3 个时间段的 16 天合成的 MODIS-NDVI 产品数据进行最大值合成、几何校正、拼接得到研究区 2005~2009 年的 NDVI 分布图. 在植被覆盖率低的地区, NDVI 值受下垫面的影响较大, 因此只考虑 NDVI 平均值大于或等于 0.1 的像元^[22]. 根据地面样方数据的采集时间和地理坐标信息, 利用地理信息系统(GIS)技术从对应时间段的 NDVI 分布图中提取每个样方点 1 km 范围内

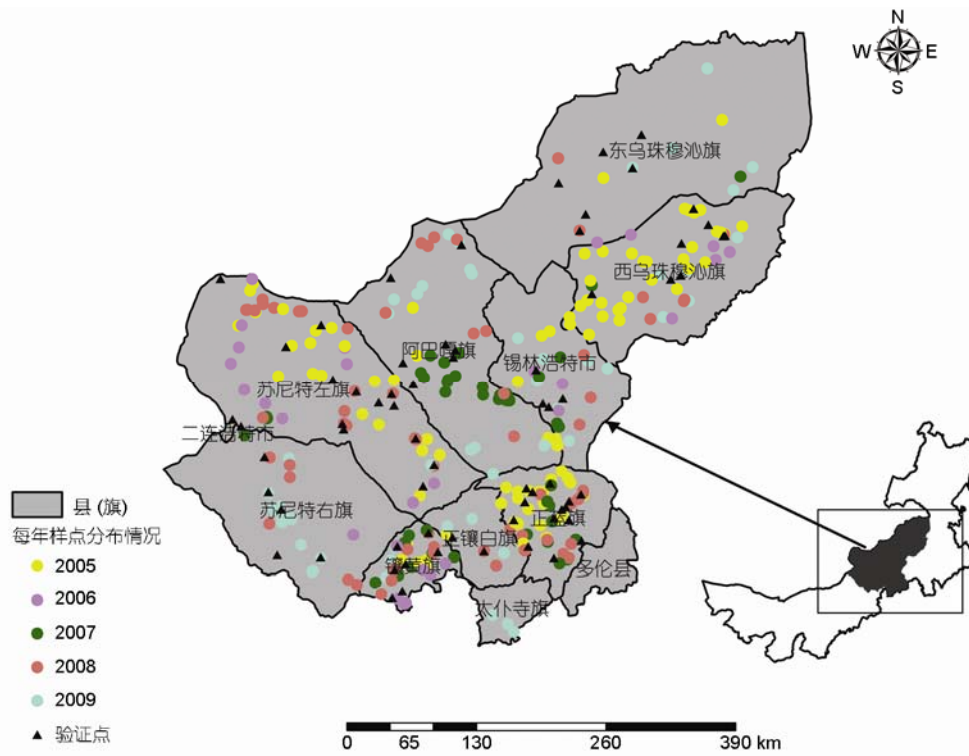


图1 研究区地面样方分布示意图

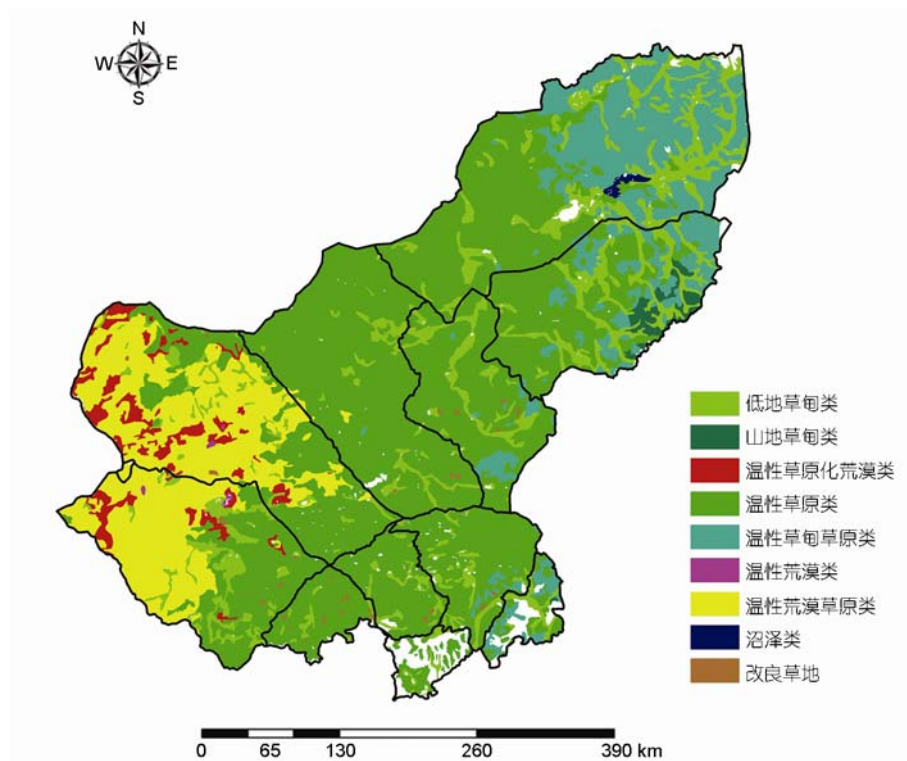


图2 研究区草原类型示意图

的 NDVI 均值, 建立 NDVI 与对应草原样方鲜草重量数据库.

1.4 模型的建立及验证

根据 2005~2009 年调查的地面样方数据整理筛选出 300 个产草量数据, 用 GIS 方法提取与地面样方相对应年份(2005~2009 年)地上植被生长旺盛期(7 月中旬~8 月下旬)的 NDVI 最大值合成数据, 建立鲜草产量-NDVI 数据库并构建地面——遥感相结合的估产模型. 在分析内蒙古锡林郭勒盟草原区样方鲜草产量和 NDVI 散点关系的基础上, 运用回归分析构建了一元线性、对数函数、幂函数、指数函数等回归模型(表 1). 经过 F 检验和 T 检验之后, 根据方程的决定系数(R^2 , 相关系数的平方)来选取最优模型. 结果表明, 各模型方程均有较好的相关关系, 建模的决定系数均在 0.7 以上, 达到了 0.01 的显著水平, 其中幂函数的相关关系最优, 其决定系数为 0.745, 方程显著性检验 F 值最大. 通过综合比较选用幂函数作为产草量的遥感估算模型.

采用预留的 71 个地面样方数据点对优选模型进行精度验证. 采用均方根误差(RMSE)和平均相对误差(REE)2 个指标检验模型精度. 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - Y'_i)^2}{N}}, \quad (1)$$

$$REE = \sqrt{\frac{\sum[(Y_i - Y'_i) / Y'_i]^2}{N}}, \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, Y_i 为样点实际鲜草产量, Y'_i 为模型计

算所得的产草量, N 为样点数.

验证结果表明(图 3), 基于 NDVI 的幂函数模型预测的产草量与实测样方产量值间有较好的对应关系, 图中各点总体分布在 1:1 线周围^[23], RMSE 为 459.9 kg/hm², REE 为 0.22, 模型精度为 78%, 基本可以进行实际应用.

1.5 产草量干重的折算

由于该模型建立在鲜草产量的基础上, 所以需要遥感估算得到的草原产草量进行折算, 以便得到草原产草量的风干重数据. 折算系数参考了《中国草地资源》中相关的规定(表 2)^[24].

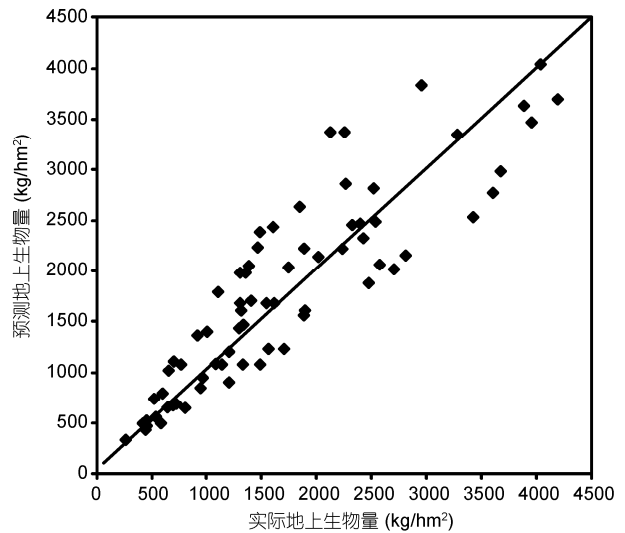


图 3 实测值与预测值的散点关系图

表 1 植被指数与单位面积产草量的拟合关系

函数	公式 ^{a)}	拟合优度系数 R^2	方差齐性检验 F
线性函数	$y=73.88x-990.7$	0.744	869.1902
对数函数	$y=2657\ln x-7671$	0.705	712.8815
幂函数	$y=3.546x^{1.682}$	0.745	872.7213
指数函数	$y=262.8e^{0.044x}$	0.723	779.2579

a) 方程均通过 0.01 水平下的统计检验. x : NDVI 值; y : 产草量(kg/hm²)

表 2 各类草地类型折算干草的系数

草地类型	折算系数	草地类型	折算系数
低地草甸类	1/3.5	温性草原类	1/3.0
改良草地	1/3.2	温性荒漠草原类	1/2.7
山地草甸类	1/3.5	温性荒漠类	1/2.5
温性草甸草原类	1/3.2	沼泽类	1/4.0
温性草原化荒漠类	1/2.5		

1.6 气候数据

气候数据来源于中国气象局国家气象信息中心提供的2005~2009年锡林郭勒盟共8个台站的降水和温度资料,其中多伦县、西乌珠穆沁旗、锡林浩特市、苏尼特左旗、阿巴嘎旗和二连浩特市的气象资料来自中国地面气候资料月值数据集,太仆寺旗和镶黄旗的气象资料来自中国农业基本气象资料月值数据集.利用该气象资料计算得到各气象台站的年降水量和年均温,分析气候因素与锡林郭勒盟产草量的时空变化关系.

2 结果

2.1 草原产草量的空间分布

通过使用优选的幂函数模型估算锡林郭勒盟2005~2009年5年间的产草量,可以看出锡林郭勒盟草原产草量分布具有明显的空间分布差异(图4),东北部地区草原产草量单产通常较高,单产干重大于 1000 kg/hm^2 ,由东向西草原产草量单产逐渐降低;西部处于浑善达克沙地腹地,草原产草量单产处于较低水平,草原单产干重小于 200 kg/hm^2 .总体上,锡林郭勒盟草原产草量的空间分布呈东高西低的空

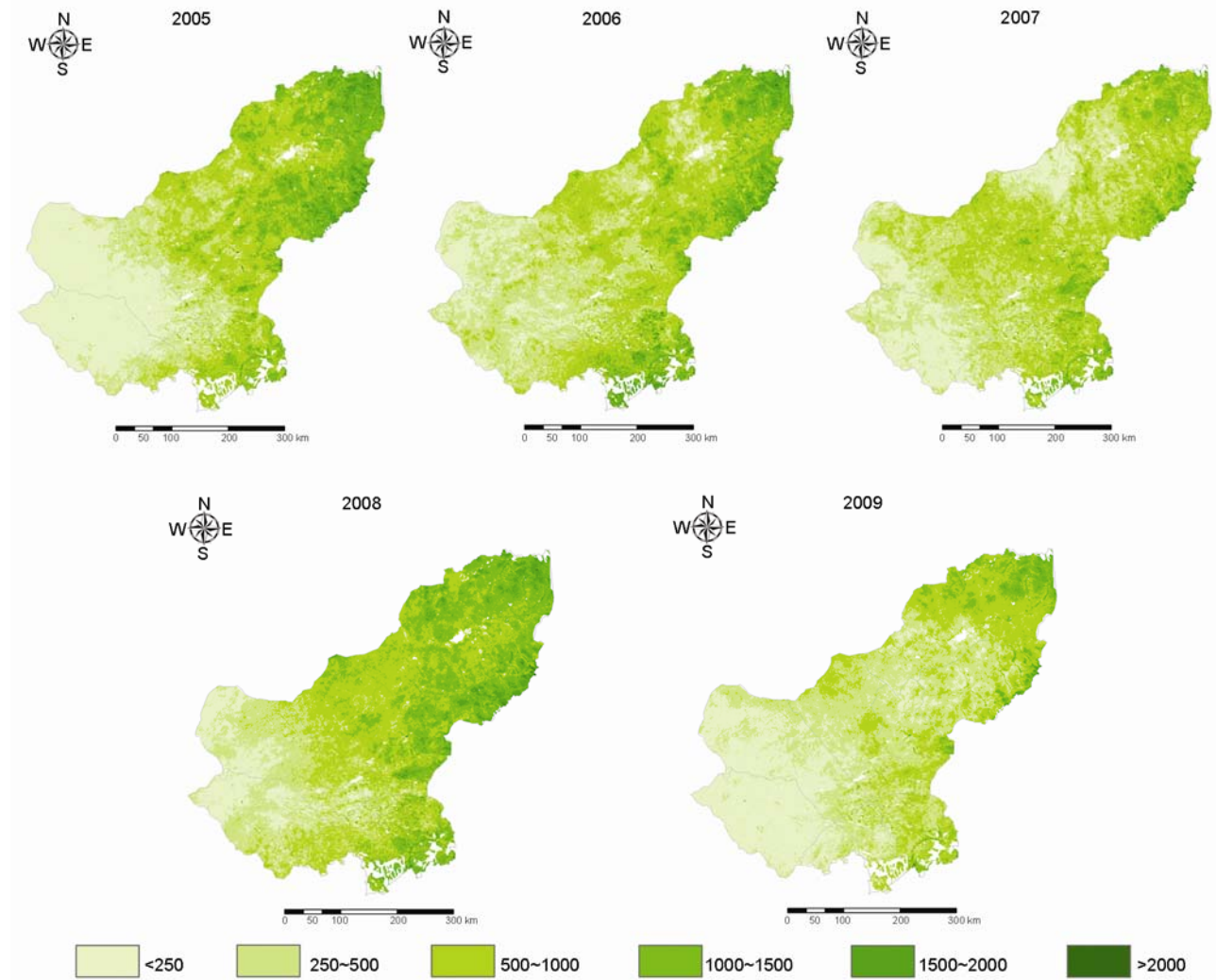


图4 2005~2009年锡林郭勒盟草原干草空间分布图(kg/hm^2)

间分布格局。

2005~2009 年锡林郭勒盟草原产草量估算结果(表 3)显示, 5 年平均鲜草量为 3455.43 万吨, 按照不同草地类型各自的干鲜比折合干草总量为 1112.82 万吨(以下均为干重), 平均单产为 567.23 kg/hm²。其中, 东乌珠穆沁旗年均产草量最高为 349.4 万吨, 占锡林郭勒盟草原总产量的 31.39%, 其次为西乌珠穆沁旗 206.5 万吨, 占锡林郭勒盟草原总产量的 18.55%, 其他 10 个县年均产草量仅占锡林郭勒盟草原总产量的 50.05%。年均单产大于 800 kg/hm² 的县(旗)包括: 西乌珠穆沁旗、多伦县、太仆寺旗, 这些区域的草原生长状况相对较好。

通过数据分析, 不同草地类型的产草量差异较大(表 4), 5 年平均单产超过 1000 kg/hm² 的草地类型为山地草甸类; 单产低于 500 kg/hm² 的草地类型为温性荒漠类、温性草原化荒漠类、温性荒漠草原类和改良草地; 单产介于 500~1000 kg/hm² 之间的草地类型为低地草甸类、温性草原类、温性草甸草原类和沼泽

类等。温性草原类的草原面积最大, 占锡林郭勒盟总草原面积的 55.24%, 其年平均产草量为 603.84 万吨, 平均单产为 557.20 kg/hm²; 温性草甸草原类和低地草甸类的产草量分别为 243.02 万吨和 163.67 万吨, 这 3 种草地类型的年均产草量之和占锡林郭勒盟草原总产量的 90.8%。

2.2 草原产草量的动态变化

草原产草量年际间变化明显(图 4 和 5), 2005~2009 年 5 年间锡林郭勒盟草原产草量有明显的波动变化, 多年平均产草量为 1112 万吨。从 2005~2009 年, 其中 2 年草原产草量大于平均值, 产量峰值出现在 2008 年; 3 年草原产草量小于平均值; 5 年草原产草量平均变化范围介于 800~1400 万吨之间, 变异系数为 20.42%。图 5 中虚线为锡林郭勒盟草原产草量年际变化的线性拟合曲线, 多年平均产草量为 1112.8 万吨, 5 年间该区域产草量总体呈下降趋势。2005~2007 年产草量与多年平均产草量较为接近, 2005 年

表 3 研究区各县(旗)2005~2009 年草原年均产草量

县(旗)	草地面积(km ²)	鲜草量(t)	干草量(t)	干草单产(kg/hm ²)
东乌珠穆沁旗	43861	11181584	3493579	796.51
阿巴嘎旗	27325	4296749	1419735	519.57
西乌珠穆沁旗	23587	6600771	2064668	875.34
苏尼特左旗	34618	2531635	893535	258.11
锡林浩特市	15713	3178070	1031851	656.69
二连浩特市	174	7728	2862	164.50
苏尼特右旗	25148	1527866	528777	210.27
正蓝旗	10142	2218170	721188	711.09
正镶白旗	6084	952429	310968	511.12
镶黄旗	4885	592947	195293	399.78
多伦县	2996	969293	304583	1016.63
太仆寺旗	1652	497075	161113	975.26
总计	196185	34554317	11128152	567.23

表 4 2005~2009 年不同草地类型的产草量单产(kg/hm²)

草原类型	面积(km ²)	年份					平均	变异系数
		2005	2006	2007	2008	2009		
低地草甸类	25955	695.87	673.42	536.83	773.57	473.23	630.58	0.19
改良草地	473	418.39	564.48	500.74	649.47	312.58	489.13	0.27
山地草甸类	1593	1395.91	1400.50	1042.22	1409.34	820.04	1213.60	0.22
温性草甸草原类	24658	1141.80	1020.07	800.97	1169.37	795.71	985.58	0.18
温性草原化荒漠类	5082	94.36	235.50	252.96	213.59	173.45	193.97	0.33
温性草原类	108370	567.05	594.55	504.89	745.13	374.38	557.20	0.24
温性荒漠草原类	29576	121.42	281.41	304.26	272.26	178.10	231.49	0.34
温性荒漠类	140	109.26	243.20	291.20	205.26	166.40	203.06	0.34
沼泽类	338	672.90	543.79	511.48	715.74	557.16	600.21	0.15

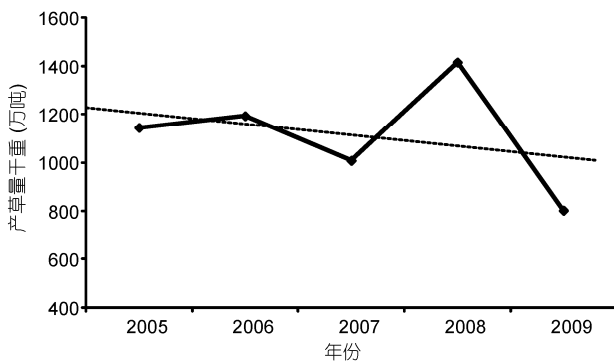


图5 2005~2009年草原产草量变化图

草原产草量为1144万吨,2006年草原产草量为1192万吨,2007年草原产草量为1007万吨;而2008~2009年草原产草量变化波动较大,其中2008年最高达到1416.2万吨,2009年由于降水比正常年份偏少,草原产草量大幅下降,总量仅为802.9万吨,2008~2009年间产草量的最大变化幅度约为76%。

不同草地类型的产草量对降水等因素的响应不同,其单产也具有明显的年际波动性和不均匀性(表4)。其中,山地草甸类和温性草甸草原类的单产远高于其他的草地类型,2005~2009年的单产波动性较大,其中2007和2009年单产处于波谷期,2008年单产处于波峰,变异系数在20%左右。低地草甸类、温性草原类、改良草地、沼泽类等4类草地的单产处于中等水平,低地草甸类的单产年际变化较小,平均单产分别为630 kg/hm²;温性草原类的单产变化与整个锡林郭勒盟产草量的年际变化趋势相吻合,变异系数为24%,产草量年际间具有较大的波动,该草地类型可以在一定程度上反映整个研究区的草原植被生长状况;沼泽类单产年际变化不大,通常单产介于500~720 kg/hm²之间,2008年单产最高达716 kg/hm²;改良草地类单产年际有明显的波动性,2005和2009年单产处于波谷,2008年单产处于波峰。温性草原化荒漠类、温性荒漠草原类、温性荒漠类的单产最低,3种草原类型的年际变化趋势基本一致,2005~2009年单产呈先增加后减小的趋势。

2.3 草原产草量的时空变化分析

不同的草地类型对草原产草量的时空变化具有一定的影响。锡林郭勒盟东部低地草甸类、山地草甸类、温性草甸草原类和沼泽类等草地类型的变异系数在15%~22%之间(表4),因为4种草地类型属于隐域

性植被,该类型的草原生境及水分条件较好,气候对草甸类植被影响较小,特别在气候干旱的情况下,草甸类草原区植被的生长好于其他草地类型,其年际间变化较小,产草量保持能力强。西部温性荒漠类、温性草原化荒漠类和温性荒漠草原类的变异系数在30%以上,尽管在绝对量上变化不大,但变异系数相对较高,因为荒漠类草原多以旱生、强旱生的小灌木、灌木或多年生的小禾草植被为主,抗干扰能力弱,处于干旱环境条件下,受到水分条件的制约较大,产草量年际间变化较大,产草量保持能力弱。

通过对草原产草量空间分布与年降水量和年均温(图6(A))空间分布的分析,发现研究区的草原产草量与年降水量具有显著的正相关关系($r^2=0.86$, $P<0.01$),与年均温具有较显著的负相关关系($r^2=0.69$, $P<0.05$)。锡林郭勒盟不同地区的年降水量在100~350 mm之间,具有明显的空间分布差异,东部多伦县、太仆寺旗和西乌珠穆沁旗年降水量在250 mm以上,西部苏尼特左旗和二连浩特市的年降水量在200 mm以下,年降水量呈现由东向西逐渐递减的趋势,与草原产草量的空间分布格局基本一致。锡林郭勒盟的年均温在2~6℃之间,由于气温受地形、地理位置等诸多因素的影响,由东向西年均温变化存在一定的波动。空间上各站多年平均产草量与各站点年均温的显著负相关关系可能是各站年均温与年降水量呈显著负相关的一种反映,高温地区的降水量较少,由于蒸发旺盛,水分成为影响产草量高低的限制因素,使得产草量较低;低温的地区降水量较多,水分不构成限制因素,使得产草量较高。可见,气温对产草量空间差异的影响是间接的。

图6(B)为草原产草量与年降水量和年均温的年际变化趋势。结果显示,产草量与年降水量存在明显的年际波动,2006和2008年降水量明显多于其他年份,其中,2008年降水量达281 mm。与之相对应,2006和2008年产草量也高于其他年份,其中,2008年的产草量达到最高1416万吨。以上结果说明,研究区的草原产草量与年降水量具有一定的正相关关系。然而,研究区草原产草量的年际变化与年均温的年际变化的相关关系略差。锡林郭勒盟2005~2009年年均温在3~4.5℃之间,其中2007年气温最高,同期降水量偏少,产草量也较低;2006和2008年年均温保持在多年平均水平上,而同期草原产草量明显高于其他年份。

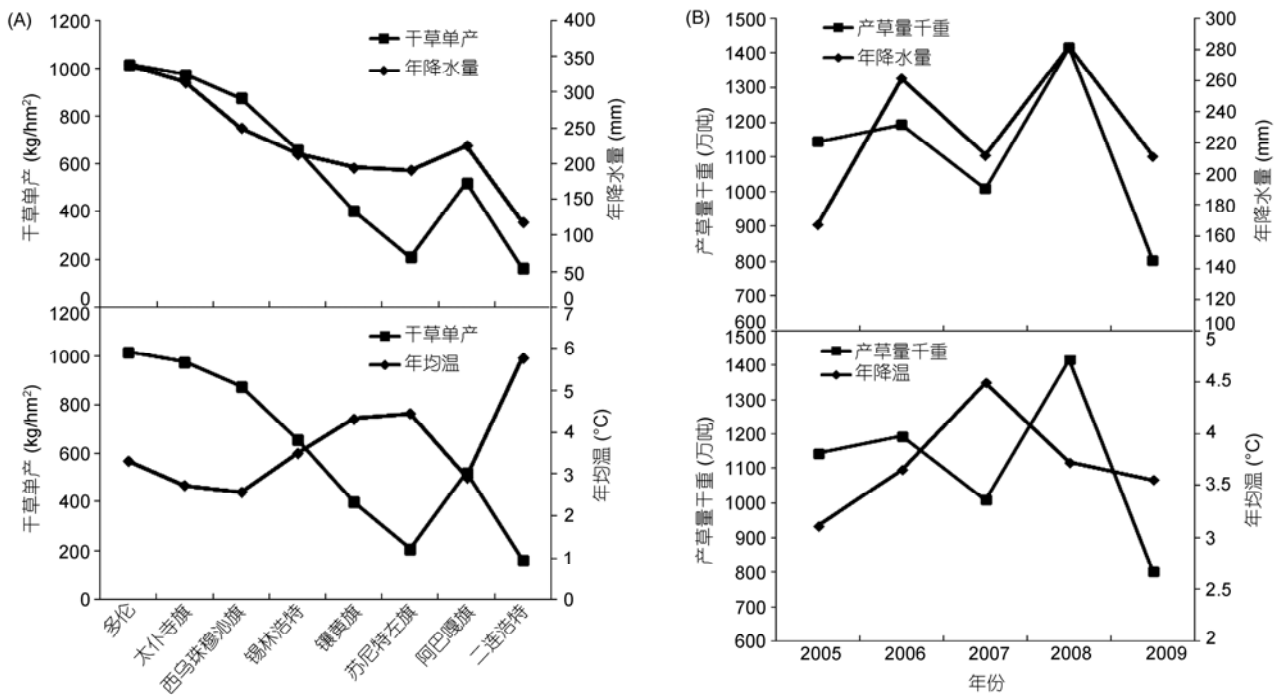


图 6 草原产草量与年降水量和年均温的关系

(A) 草原产草量与年降水量和年均温的区域空间关系; (B) 草原产草量与年降水量和年均温的年度变化关系

由此可见, 水热条件的匹配对草原产草量的时空变化有着重要的影响, 尤其是降水量的变化对产草量的变化起着关键性的作用。

3 讨论

基于多年的地面样方数据和同期的 MODIS-NDVI 建立的幂函数关系模型, 可以较好地模拟锡林郭勒盟草原的产草量与 NDVI 之间的相关关系, 构建的模型精度可达 78%。与以往的研究(通常采用草地资源清查数据或已经发表的生物量数据)相比, 本研究采取统一的调查方法获取了多年样方产草量数据, 丰富的地面样方调查数据为草原产草量遥感估算模型和估算精度奠定了基础。

锡林郭勒盟 2005~2009 年的草原产草量空间分布总体上呈东高西低的格局, 总产草量年际间波动较大, 年平均产草量干重为 1112.82 万吨, 干草平均单产 567.23 kg/hm²。近年来, 国内外学者运用多种方法估算了中国不同草地类型的地上生物量, 但结果存在一定的差异。例如, 马文红等人^[25]基于 2002~2005 年内蒙古 113 个样地调查数据得到了荒漠草原、

典型草原和草甸草原的平均地上生物量分别为 566, 1334 和 1967 kg/hm²; Ni^[26]基于 20 世纪 80 年代的草地清查资料估算的中国温性荒漠草原、温性草原、温性草甸草原的平均地上生物量分别为 456, 889 和 1465 kg/hm²; 方精云等人^[27]依据《中国草地资源数据》记载的不同草地类型产草量数据估算的中国荒漠草原、典型草原和草甸草原的地上生物量分别为 342, 1351 和 1224 kg/hm²。与已有结果相比, 本研究估算的 3 种草地类型地上生物量偏低(荒漠草原 231.5 kg/hm², 温性草原 557.2 kg/hm², 温性草甸草原 985.6 kg/hm²)。产生上述差异的可能原因包括: 采用的数据源不同, 估算方法不同; 地面样方数据的采集数量和时间不同。以往研究样方数较少, 采集年代较早, 本研究基于近几年大量野外调查实测数据资料, 翔实的地面调查资料和遥感数据为生物量估算提供了可靠的基础; 研究的尺度范围不同。以往研究包括中国其他地区的温性草原, 本研究只涉及内蒙古锡林郭勒盟草原地区。

锡林郭勒盟草原产草量的时空分布格局受到非生物因素和生物因素的共同影响^[28]。草原产草量的时空变化与主要气候因素(气温、降水)关系密切, 特

别是受降水量的时空变化影响显著。同时,土壤湿度和养分的改变^[29]、牲畜啃食植物种等因素,也影响着产草量的时空变化格局。不同的草地类型对草原产草量的时空变化也具有一定的影响,如荒漠类草地类型产草量相对自身的生态环境承载力差,易引起草原退化、沙化等。另外,草地管理方式对产草量的时空格局也具有较大的影响^[30]。例如,自21世纪初以来该地区草原得到了国家京津风沙源治理、草原舍饲禁牧等^[31]草原生态补偿政策项目的扶持,草场利用方式分为放牧、刈割、围封等,从而影响区域的草原产草量。不同草地类型的群落组成、植被种类、优势种等生物因素,具有各自的组织结构和生物量,通过种间竞争和物种分布影响了产草量的时空分布格局。根据变异系数的定量描述,表明随着时间的推移和气候条件的波动,不同草地类型产草量年际变化

也具有一定差异。

本研究运用地面和遥感相结合的方法估产可以较好地反映锡林郭勒盟草原植被多年生长变化过程,揭示了锡林郭勒盟草原产草量的空间分布差异性、连续性和过渡性,也体现了不同草地类型产草量分布的实际特征和年际间的变化差异。这些结论可以为有效地保护和利用草地资源、合理配置载畜量、分区域分类进行科学管理和利用草地资源提供参考依据,为建立合理的草原生态补偿机制、巩固草原生态建设成果和恢复草原生态环境提供有效的技术支持和保障。

然而,遥感估产过程中还存在一些不确定的因素,如草原产草量的年际变化受到草原区的土壤、地形等环境因素及放牧、人口等各种人文因素的影响较大^[32-36],这些因素需要进一步的研究。

参考文献

- 1 谢高地,张懿铨,鲁春霞,等. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16: 47-53
- 2 张连义,王刚,宝路如,等. 锡林郭勒盟草地 MODIS-NDVI 植被指数和估产牧草产量季节变化特征. 草业科学, 2008, 25: 6-11
- 3 Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Glob Change Biol*, 1998, 4: 229-233
- 4 Ni J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecol*, 2004, 174: 217-234
- 5 Fan J W, Zhong H P, Harris W, et al. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Clim Change*, 2008, 86: 375-396
- 6 Xu B, Yang X C, Tao W G, et al. MODIS-based remote sensing monitoring of grass production in China. *Int J Remote Sens*, 2008, 29: 5313-5327
- 7 赵冰茹,刘闯,刘爱军,等. 利用 MODIS-NDVI 进行草地估产研究——以内蒙古锡林郭勒草地为例. 草业科学, 2004, 21: 12-15
- 8 张连义,张静祥,赛音吉亚,等. 典型草原植被生物量遥感监测模型——以锡林郭勒盟为例. 草业科学, 2008, 25: 31-36
- 9 Kawamura K, Akiyama T, Yokota H, et al. Quantifying grazing intensities using geographic information systems and satellite remote sensing in the Xilingol steppe region, Inner Mongolia, China. *Agr Ecosyst Environ*, 2005, 107: 83-93
- 10 Butterfield H S, Malmström C M. The effects of phenology on indirect measures of aboveground biomass in annual grasses. *Int J Remote Sens*, 2009, 30: 3133-3146
- 11 Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975. 7-16
- 12 Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51: 1173-1179
- 13 Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem Cy*, 1993, 7: 811-841
- 14 Prince S D, Goward S N. Global net primary production: a remote sensing approach. *J Biogeogr*, 1995, 22: 815-835
- 15 Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biol*, 2002, 8: 736-753
- 16 Lu D. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *Int J Remote Sens*, 2005, 26: 2509-2525
- 17 Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, et al. Aboveground biomass in Tibetan grasslands. *J Arid Environ*, 2009, 73: 91-95
- 18 Kogan F, Stark R, Gitelson A, et al. Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *Int J Remote Sens*, 2004, 25: 2889-2896
- 19 Wessels K J, Prince S D, Zambatis N, et al. Relationship between herbaceous biomass and 1-km² advanced very high resolution radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park South Africa. *Int J Remote Sens*, 2006, 27: 951-973

- 20 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 等. 基于 CASA 模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局. 应用生态学报, 2007, 18: 2526-2532
- 21 杨秀春, 徐斌, 朱晓华, 等. 北方农牧交错带草原产草量遥感监测模型. 地理研究, 2007, 26: 213-221
- 22 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2003, 33: 554-565
- 23 陈鹏飞, 王卷乐, 廖秀英, 等. 基于环境减灾卫星遥感数据的呼伦贝尔草地地上生物量反演研究. 自然资源学报, 2010, 25: 1122-1131
- 24 中华人民共和国农业部畜牧兽医司和全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 353-358
- 25 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. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2008, 38: 84-92
- 26 Ni J. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China. *Clim Change*, 2004, 67: 237-246
- 27 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞, 编著. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 81-149
- 28 Augustine D J. Spatial heterogeneity in the herbaceous layer of a semiarid savanna ecosystem. *Plant Ecol*, 2003, 167: 319-332
- 29 Baer S G, Blair J M, Collins S L, et al. Soil resources regulate productivity and diversity in newly established tallgrass prairie. *Ecology*, 2003, 84: 724-735
- 30 王猛, 李贵才, 王军邦. 典型草原通量塔通量贡献区地上生物量和叶面积指数的时空变异. 应用生态学报, 2011, 22: 637-643
- 31 田艳丽. 建立草原生态补偿机制的探讨-以内蒙古锡林郭勒盟为例. 农业现代化研究, 2010, 31: 171-174
- 32 崔霞, 梁天刚, 刘勇. 基于 MOD09GA 产品的草地生物量遥感估算模型. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45: 79-87
- 33 Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of North-American shortgrass steppe. *Ecol Appl*, 1992, 2: 397-403
- 34 马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系. 中国科学: 生命科学, 2010, 40: 632-641
- 35 Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431: 181-184
- 36 辛晓平, 张保辉, 李刚, 等. 1982-2003 年中国草地生物量时空格局变化研究. 自然资源学报, 2009, 24: 1582-1592

Remote Sensing Dynamic Estimation of Grass Production in Xilinguole, Inner Mongolia

JIN YunXiang, XU Bin, YANG XiuChun, LI JinYa, Wang DaoLong & Ma HaiLong

Key Laboratory of Agri-informatics of Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China

The monitoring of grass production is not only an important measurement index for researching the spatial dynamic patterns of grassland resources, but also an important basis for the optimal use of grassland resources and for monitoring the balance between grassland forage supply and livestock demand. A total of 371 grassland investigation and remote sensing (RS) data of MODIS-NDVI from 2005–2009 were used to establish a relational model between grass production and RS data. The temporal and spatial distributions of grass production in Xilinguole, Inner Mongolia were simulated and analyzed. The main conclusions are as follows: (1) Each model equation had good relativity, among which the power function model was the most appropriate for the calculation of grass production. Through reservation quadrat data, the accuracy of the production estimation model was 78%. It was feasible for the power function model to be applied for RS monitoring. (2) Grass production in the Xilinguole grassland amounted to an average of 34550000 tons over five years, equivalent to 11120000 tons of hay, and the dry weight per unit area was 567.23 kg/hm². The spatial distribution of grass production showed a “high east and low west” pattern. (3) An obvious fluctuation in grass production appeared during 2005–2009. The range of hay was 8000000–14000000 tons, and the coefficient of variation was 20.42%. (4) There were greater differences in the single grass yield and the annual variation of different grass types. There were lower grass yields and greater annual variation in desert grassland, and higher grass yields and relatively lesser annual variation in meadow grassland. The spatial and temporal variation of grass yields also had the close relation with the major climate factors (precipitation, temperature, etc.), especially with the influence of precipitation. This research provides a reference for the protection and utilization of grassland resources.

grassland, grass production, remote sensing, dynamic variation

doi: 10.1360/052011-228