

基于遥感的中国草地生产力初步计算

陈世荣^{1,2}, 王世新¹, 周 艺¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 民政部国家减灾中心, 北京 100053)

摘 要: 草地生产力研究对于评估草地生态系统食物供给具有重要意义。在基于 MODIS 的 2001 年 1 km 中国陆地生态系统土地覆盖类型产品和植被净初级生产力(NPP)产品, 运用各种草地生产力计算模型, 初步计算了当年中国各草地生产力指标。计算得到: 2001 年, 中国草地生态系统产干草 1.44 亿 t, 理论载畜量为 1.08 亿个羊单位, 潜在食物供给为羊肉 308.92 万 t。结果表明, 基于遥感的草地生产力计算方法机理性较强, 现势性好, 可在较短时间内获取大范围年度草地生产力指标, 其计算结果较为符合中国草地生产力的实际分布情况。

关键词: 遥感; 草地生产力; 净初级生产力(NPP); MODIS 数据

中图分类号: S127; TP751; S283

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-1-0208-05

陈世荣, 王世新, 周 艺. 基于遥感的中国草地生产力初步计算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 208-212.

Chen Shirong, Wang Shixin, Zhou Yi. Estimation of Chinese grassland productivity using remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 208-212. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

草地是指具有一定面积, 以草本植物为主体, 能通过放牧或刈割等形式, 为牲畜提供食物的土地。它是人类取得畜产品的主要场所, 是发展畜牧业的重要基地。草地生态系统的食物供给是人类重要食物来源, 草地生产力的研究具有非常重要的现实意义。

近年来, 许多调查和研究对中国的草地生产力进行了评估, 主要采用的方法可以分为四种类型: 实测产量法^[1-2]、实测产量-生态因子回归法^[3]、潜力模型评估法^[4-5]和遥感评估法^[6-10]。

遥感评估法主要利用遥感数据得到草地生产力, 可细分为两种类型, 第一种基于 NDVI^[8-10], 第二种基于遥感估算的 NPP (Net Primary Production, 净初级生产力)^[6-7]。

国内外具有代表性的草地生产力调查和研究有: 从 1979 年开始的中国草地资源普查对中国草地生产力进行了调查^[2]; Han 等人利用水分胁迫模型, 结合温度等气象数据估算了永久草地牧场重生时的干草产量^[5]; 赵冰茹等人利用地面测产数据和同步 MODIS-NDVI 数据进行内蒙古锡林郭勒草地估产研究^[10]; Seaquist 等人利用 NOAA/NASA 8 km PAL(Pathfinder Land data archive)数

据, 构造了基于 LUE(Light Use Efficiency, 光能利用率)的草地生物量遥感估算模型, 并利用此模型估算了西撒哈拉地区草地 GPP 和 NPP^[6], 但是对具体草地生产力指标如干草产量等没有进行后续计算。

纵观国内外相关研究, 实测产量法较为准确, 但需要消耗大量时间和经费, 一般只能用于草地生产力的采样调查; 实测产量-生态因子回归法结合实测产量和生态因子, 往往对一定范围内的估算有较好效果; 潜力模型评估法耗费较低, 也容易推广到大范围区域, 但是得出的结果是潜在生产力, 一般远大于实际生产力。

本文采取基于 NPP 的草地生产力遥感估算方法, 与非遥感的方法相比, 耗费较低, 数据获取速度快, 范围广; 与基于 NDVI 的草地生产力遥感估算方法相比, 不需要现实草地生产力数据, 从得到 LUE 架构上实现的草地 NPP 到推算后续各种草地生产力指标, 其模型机理性较强, 计算过程相对直接, 适用空间范围更加广泛。

本研究利用基于 NPP 的遥感评估法计算了 2001 年中国草地生产力各指标, 包括干草总量、理论载畜量和草地动物产品; 并分析了各指标的空间分布特征。

1 基于遥感的植被覆盖分类和 NPP 产品计算方法

1.1 基于 MODIS 的草地覆盖分类

本研究中, 基于遥感(MODIS 数据)的草地覆盖分类来源于 1 km 2001 年中国陆地生态系统土地覆盖类型产品^[11], 产品分类结果中, 草地是七大类之一, 可进一步划分为高覆盖度草地、草甸草本沼泽以及低覆盖度草地三类, 具体分布见图 1。

收稿日期: 2006-02-28 修订日期: 2006-10-18

项目基金: 农业科技生产力转换基金项目(03EFN216600356)

作者简介: 陈世荣(1977-), 男, 博士, 助研, 主要从事农业和减灾遥感应用相关研究。北京市宣武区白广路 7 号中民大厦 1410 室, 100053。

Email: alf_123@sina.com

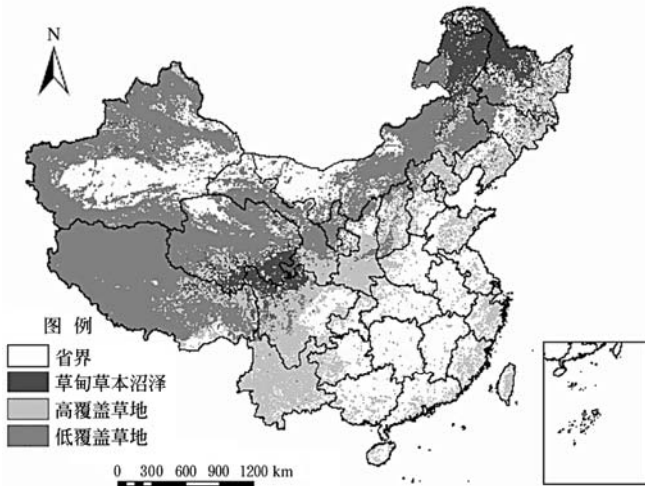


图 1 基于 MODIS 的中国草地覆盖分布

Fig.1 Distribution of Chinese grassland cover using MODIS data

根据基于 MODIS 的植被覆盖分类结果, 中国共有草地面积 224.71 万 km^2 , 是陆地生态系统中面积最大的一类土地类型, 占全国面积的 25.47%, 相当于耕地面积的 1.88 倍, 森林面积的 1.54 倍。在草地类型的各子类型中, 高覆盖度草地面积为 31.60 万 km^2 , 占全国草地面积的 12.91%; 草甸草本沼泽面积为 44.80 万 km^2 , 占全国草地面积的 18.31%; 低覆盖度草地面积为 168.31 万 km^2 , 占全国草地面积的 68.78%。

1.2 利用 MODIS 数据估算的中国植被 NPP

NPP 是指绿色植物在单位面积, 单位时间内所累积的有机物数量, 是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自氧呼吸后的剩余部分。它直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力。

本研究中, 基于遥感的 NPP 估算结果来自 1 km 2001 年中国植被 NPP 产品^[11], 其计算思路为: 利用卫星遥感数据、CASA 模型等以月或更短时间为步长估算陆地 NPP, 即通过植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用效率 ϵ 来计算 NPP^[12]:

APAR 取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射的吸收比例:

$$APAR(x, t) = R_s(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t) \quad (1)$$

式中 $R_s(x, t)$ —— t 月份象元 x 处的太阳总辐射量, MJ/m^2 ; $FPAR(x, t)$ —— 植被层对入射光合有效辐射 (PAR) 的吸收比例; 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

ϵ 是指植被把所吸收的 PAR 转化为有机碳的效率, 在现实条件下, ϵ 主要受温度和水的影响:

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon^* \quad (2)$$

式中 $T_{\epsilon_1}, T_{\epsilon_2}$ —— 温度对光能转化率的影响; W_{ϵ} —— 水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响; ϵ^* —— 理

想条件下的最大光能转化率, gC/MJ , 取值为 0.389^[13]。

NPP 由 APAR 和 ϵ 的乘积得到:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (3)$$

式中 t —— 时间; x —— 空间位置。 x 位置的年总 NPP 即各 t 时间段 $NPP(x, t)$ 的总和。

2 中国草地生产力各指标计算

草地生产的目的是畜产品; 而草地生产力的评价指标主要有 3 种: 干草总量、理论载畜量和动物产品^[14]。

干草总量反映草地初级生产力, 即某地域一段时间内生产的牧草的干物质总产量, 是草地生产力的基本评价指标。

理论载畜量是指在一个长时期的放牧时间内和一定面积草地上, 在不影响草地生产力且保证家畜正常生长发育的情况下能容纳放牧家畜的头数^[15], 反映草地的终极生产力。

动物产品即某地域草地在一段时间内所能提供的动物性产品, 它反映草地的终极生产力。

2.1 中国草地干草产量的计算

首先, 使用基于遥感的 NPP 产品和覆盖类型为草地的植被覆盖产品分类相叠加, 得到遥感估算的中国草地 NPP。

单位面积干草总量可通过草地 NPP 推算得到:

$$B_g = \frac{NPP}{S_{bn}(1 + S_{ug})} \quad (4)$$

式中 B_g —— 年总单位面积干草产量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; NPP —— 草地年总 NPP, $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; S_{bn} —— 草地生物量到 NPP 转换系数, g/gC , 数值为 0.45^[16]; S_{ug} —— 草地地下部分和地上部分生物量比例系数。不同草地植被类型的地下与地上部分生物量比例系数^[17]为: 温性草甸草原类为 5.26; 温性草原类为 4.25; 高寒草甸草原类为 7.91; 高寒草原类为 4.25; 温性荒漠草原类、高寒荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类、高寒荒漠类为 7.89; 热性草丛类、热性灌草丛类、暖性草丛类、暖性灌草丛类为 4.42; 低地草甸类为 6.31; 山地草甸类为 6.23; 高寒草甸类为 7.92; 沼泽类为 15.68。

草地生产力各指标计算中, 整体草地分布范围来自基于 MODIS 的草地覆盖产品; 而分布范围内不同草地植被类型的空间分布源于中国草地资源普查数据^[2]。

2.2 中国草地理论载畜量的计算

中国习惯使用家畜单位法(一定面积草地一年能放养成年家畜头数)表示草地载畜量, 单位一般采用“绵羊单位”, 本文也用羊单位来表述草地载畜量。

国内外有不同的方法计算草地理论载畜量, 从应用的角度, 根据草地牧草产量估算草地理论载畜量显得比较科学、合理, 其计算公式为^[4]:

$$CA = \frac{G \cdot C_{use}}{U_G \cdot DOY} \quad (5)$$

式中 CA ——全年理论载畜量(羊单位); G ——全年干草产量, kg , 由 B_g 乘以像元面积(1 km^2)得到; C_{use} ——牲畜对牧草的利用率, 不同草地的类型有不同的牧草利用率^[4]: 草甸类组为 60%; 草原类组为 50%; 荒漠类组为 40%; (灌)草丛类组和沼泽类组为 55%。 U_G ——每个羊单位每天需要的干草量, kg/d , 数值为 2.0 ^[3]; DOY ——一年的天数, d 。

2.3 中国草地动物产品的计算

动物产品可以根据干草量推算得到:

$$A = \frac{G}{s} \times M \times r \quad (6)$$

式中 A ——草地动物产品, kg ; G ——干草总量, kg ; s ——干草羊单位折换系数, 羊单位/ kg , 数值为 300 ^[3]; M ——每个羊单位的胴体重, kg /羊单位, 数值取 14 ; r ——出肉率, 取值为 46% ; M 和 r 数值来源于中国统计部门所用《主要畜禽胴体重、出肉率及换算参考表》中的参考数值。

3 草地生产力计算结果及其分析

经计算, 得到 2001 年基于遥感的中国草地生产力各项指标。

由图 2 所示, 中国草地分布地域广阔, 自然条件复杂多样, 单位面积干草产量的空间分布高度异质。其中, 单位面积干草产量最高为 370 g/m^2 , 其空间总体分布为东南地区高, 西北地区低。这与水热条件、土壤、地形以及草地类型的分布有关。

从区域分布看, 东南沿海广大地区, 受太平洋东南季风的影响, 湿润多雨, 草地类型以暖性草丛类、暖性灌草丛类、热性草丛类、热性灌草丛类为主, 因此该地区草地单位面积干草产量在 150 g/m^2 以上; 东北地区一般均大于 100 g/m^2 , 这不仅与该地区湿润的气候类型有关, 而且还与该地区主要分布着含有较高有机质的黑土有关; 青海省东南部、四川西部、甘肃南部, 受来自孟加拉湾西南季风的影响, 降水丰沛, 且太阳辐射充足, 土壤肥沃, 因此该地区草地单位面积干草产量比同纬度地区要高, 一般均大于 100 g/m^2 ; 新疆北部的伊犁地区及阿尔泰地区山地虽然处于温带干旱区, 但是, 因受大西洋气流影响, 气候表现得比较湿润, 显著高于周围地区; 而西北其它干旱地区受强大陆性气候控制, 降水稀少, 因此单位干草产量多在 30 g/m^2 以下, 其中, 青藏高原北部, 准噶尔盆地以及内蒙古中部是中国草地单位面积干草产量最小的区域。

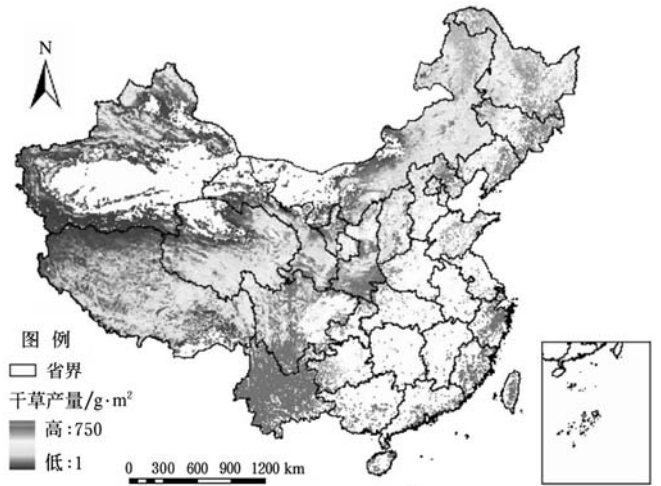


图 2 2001 年中国单位面积干草产量分布图

Fig.2 Distribution of Chinese dry grass yield per unit area in 2001

将各草地生产力指标数据与中国省级行政区划图进行叠加, 可以得到 2001 年中国分省草地生产力状况 (如表 1)。由表 1 可知, 2001 年中国干草总产量为 14390.87 万 t , 其中, 超过 1000 万 t 的共有 5 个省(市/区), 按干草产量由大到小排序分别为内蒙古、西藏、青海、新疆、四川, 分别占全国干草总产量的 20.82% 、 19.79% 、 14.63% 、 12.37% 和 9.43% 。其中, 干草产量密度最高的是四川, 最低的是新疆, 新疆干草产量密度偏低的原因在于该地区分布的草地类型主要是温性荒漠类和温性草原化荒漠类。

表 1 2001 年中国分省市自治区草地生产力状况
Table 1 Chinese grassland productivity for different provinces, municipalities and autonomous regions in 2001

省/市/区	草地面积 / 万 km^2	干草 / 万 t	理论载畜量 / 万羊单位	动物产品 (羊肉) / 万 t	NPP 总和 (碳) / 万 t	地下生物量 / 万 t
北京	0.05	5.69	4.30	0.12	18.31	35.00
天津	0.08	7.60	5.77	0.16	24.99	47.93
河北	1.59	155.59	113.60	3.34	466.73	881.59
山西	1.08	93.20	70.20	2.00	286.31	543.03
内蒙古	41.58	2996.00	2156.40	64.31	8409.41	15691.58
辽宁	0.47	50.17	37.73	1.08	162.23	310.34
吉林	2.61	160.04	117.05	3.44	496.65	943.62
黑龙江	5.54	516.55	393.76	11.09	1698.64	3258.20
上海	0.01	1.12	0.84	0.02	3.83	7.39
江苏	0.05	5.36	4.04	0.12	17.57	33.69
浙江	0.19	30.96	23.33	0.66	100.58	192.56
安徽	0.02	1.98	1.49	0.04	6.33	12.09
福建	0.19	35.83	26.99	0.77	113.89	217.26
江西	0.02	2.55	1.93	0.05	7.90	14.99
山东	0.32	35.67	26.91	0.77	116.50	223.23
河南	0.20	22.70	17.10	0.49	70.70	134.41

续表 1

省/市/区	草地面积 /万 km ²	干草 /万 t	理论载畜量 /万羊单位	动物产品 (羊肉)/万 t	NPP 总和 (碳)/万 t	地下生物量/万 t
湖北	0.09	12.40	9.36	0.27	37.64	71.24
湖南	0.02	4.05	3.05	0.09	11.35	21.19
广东	0.12	18.59	14.00	0.40	61.48	118.03
广西	0.07	10.91	8.22	0.23	34.59	65.96
海南	0.04	8.89	6.70	0.19	28.74	54.97
重庆	0.14	18.92	14.34	0.41	59.49	113.27
四川	12.09	1357.53	1086.67	29.14	4905.78	9544.21
贵州	0.20	26.39	19.91	0.57	85.19	162.93
云南	3.53	626.80	473.46	13.46	1962.95	3735.31
西藏	66.51	2847.35	2115.98	61.12	9132.12	17446.25
陕西	4.85	618.57	465.87	13.28	1976.15	3772.89
甘肃	10.65	761.30	582.15	16.34	2536.46	4875.28
青海	34.92	2105.53	1647.67	45.20	7454.01	14458.92
宁夏	1.31	59.12	42.13	1.27	187.34	357.18
新疆	55.70	1779.60	1277.17	38.20	5695.42	10876.88
台湾	0.09	13.94	10.61	0.30	45.86	87.98
总计	244.33	14390.87	10778.74	308.92	46215.12	88309.40

2001, 中国草地理论载畜量总量为 10778.74 万个羊单位。超过 1000 万个羊单位的共有 5 个省(市/区), 按数量由大到小排序分别为内蒙古、西藏、青海、新疆、四川, 与干草面积比例排序一致, 分别占全国理论载畜量的 20.01%、19.63%、15.29%、11.85%和 10.08%。其比例与干草产量占全国比例相比误差较小。

草地动物产品可较好地解释草地的食物供给能力。经计算, 2001 年中国草地动物产品总量为 308.92 万 t 羊肉, 由于本指标直接根据干草产量计算, 因此其分布类似与干草总产量在各省(市/区)的分布。

4 结论与讨论

本文利用基于遥感的 NPP 和植被覆盖类型数据产品得到中国草地 NPP; 之后结合中国草地资源普查资料和其它相关模型, 计算得到草地生产力各项指标, 并探讨了其空间分布特征。主要结论如下:

1) 计算得出 2001 年中国草地生态系统干草产量、理论载畜量和潜在食物供给以及这些指标的空间分布和行政区划分布, 比较符合中国草地生产力实际分布情况。

2) 基于 NPP 的草地生产力遥感计算方法机理性较强, 所使用数据可以较低成本取得(MODIS 数据和气象数据都可以免费获取); 之后各草地生产力指标计算模型相对简单和直接。此方法耗费少, 速度快, 适用范围较广, 现势性好, 为草地生产力计算提供了一种较新的思路。

3) 基于遥感的 NPP 估算是在 LUE 模型架构上实现的, 其优点有^[11]: 利用遥感数据获得 FPAR, 摆脱了地面站点资料数据的束缚; 利用遥感数据进行现实植被分类, 可及时地反映植被变化; 遥感数据覆盖范围大, 可实现

区域尺度上的 NPP 估测; 模型简单, 所需的输入参数少, 易于掌握和计算。

4) 如表 2 所示, 本文的草地生产力计算结果与其它相关研究比较, 其数值明显偏小。其主要原因有: 草地面积的差异, 本文采用的遥感草地面积为 244 万 km², 和其它研究采用数据(300 km²、393 km²)有较大差距, 这是由基于遥感的植被类型覆盖分类方法所带来的; 指标中实际产量和生产潜力的差异, 本文计算结果为实际草地生产力, 而其它方法中有的计算生产潜力, 结果远大于本文结果; 计算年份的差异, 本文计算的是 2001 年的草地生产力, 其它结果有的是得到之前年份的数值, 而基于生产潜力的方法得到的估算结果都是未来年份的数值。因此, 本文结果依旧具有一定的说服力和借鉴意义, 尤其为后续研究的方法与过程提供参考。

表 2 本文成果与其它相关研究成果对比
Table 2 Comparison of the results between this study and other relative studies

项目	本研究	中国草地资源数据 ^[2]	田永中, 2005 ^[3]	陈百明, 2001 ^[4]
草地面积 /万 km ²	244	393	300	393
干草产量 /亿 t	1.44	2.97	6.69	6.03
理论载畜量 /亿羊单位	1.08	4.49	5.28	缺
食物潜在供给 (羊肉)/万 t	308.92	缺	1797	445
备注	干草产量仅包括地上部分	干草产量仅包括地上部分	草地生产潜力	2010 年气候生产潜力

5) 基于 NPP 的草地生产力遥感计算方法具有重要的现实意义和应用价值。但是, 由于没有进行实地检验, 研究中未能对所采用模型作进一步的检验和修正, 本方法推广应用还有一定限制。因此, 后续研究应结合实测草地产量对所采用模型进行修正; 此外, 多年草地生产力的计算和对应的时间序列分析等也是应该考虑的后续工作。

[参 考 文 献]

- [1] Guillermo E D, Rertiller M B. Comparison of four methods of grassland productivity assessment based on *Festuca pallescens* phytomass data[J]. *Journal of Range Management*, 1991, 44(3): 199-203.
- [2] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 中国农业科学院草原研究所, 中国科学院自然资源综合考察委员会. 中国草地资源数据[Z].北京: 中国农业科技出版社, 1994.
- [3] 田永中. 基于栅格的中国陆地生态系统食物供给功能评估[D].北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [4] 陈百明. 中国农业资源综合生产能力和人口承载能力[M].北京: 气象出版社, 2001.

- [5] Han D, O'Kiely P, Sun D W. Application of water stress models to estimate the herbage dry matter yield of a permanent grassland pasture sward regrowth[J]. *Biosystems Engineering*, 2003,84(1):101-111.
- [6] Seaquist J W, Olsson L, Ardö J. A remote sensing based primary production model for grassland biomass[J]. *Ecological Modeling*, 2003,169:131-155.
- [7] Turner P D, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006,102:282-292.
- [8] 黄敬峰, 王秀珍, 蔡承侠, 等. 利用 NOAA/AVHRR 资料监测北疆天然草地生产力[J]. *草业科学*, 1999, 16(5):62-69.
- [9] 杨英莲, 殷青军. 基于 NOAA/AVHRR 数据的青海省草地生产力变化研究[J]. *青海气象*, 2004, 2:28-33.
- [10] 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[J]. *草业科学*, 2004, 8.
- [11] 中国科学院遥感应用研究所. 21 世纪初中国陆地生态系统定量遥感监测数据产品[Z]. 北京, 2004.
- [12] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [13] Potter C S, Randerson J T, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [14] Hu Z, Zhang D. Country Pasture/Forage Resource Profiles[Z]. 2004, <http://www.fao.org/wajcent/faoinfo/agricult/agp/agpc/doc/counprof/china/china2.htm>.
- [15] 吕世海. 草地载畜量的确定 [Z]. 2004, <http://www.grassland.net.cn/lecture.asp>.
- [16] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义[A]. 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[D]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 129-139.
- [17] 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.
- [18] Running S W. Modis daily photosynthesis(PSN) and annual net primary production(NPP) product(MOD17) algorithm theoretical basis document version 3.0[R] <http://www.nts.gov>.
- [19] mt.edu/modis/ATBD/ATBD_MOD17_v21.pdf, 1999-04-29.

Estimation of Chinese grassland productivity using remote sensing

Chen Shirong^{1,2}, Wang Shixin¹, Zhou Yi¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100053, China)

Abstract: It is important to study grassland productivity for evaluating the food supply of the grassland ecosystem. Based on a 1 km Chinese land cover product and a 1 km Chinese vegetation NPP product of the year 2001 using MODIS data, the authors use several grassland productivity evaluating models to calculate some Chinese grassland productivity indexes of the year 2001. The results indicate that in 2001, Chinese dry grass yield is about 144 million tons, theoretic stock carrying capability is about 108 million sheep units, potential food supply ability is about 3089.2 thousand tons of sheep meat. The method for calculating grassland productivity using remote sensing has good mechanism and timeliness, can achieve yearly grassland productivity indexes of large area in short time, and the results match the actual distribution of Chinese grassland productivity well.

Key words: remote sensing; grassland productivity; NPP; MODIS data