

基于净初级生产力的春小麦生产 潜力及估产研究

——以甘肃省白银区为例

赵 军, 王玉纯, 党国锋, 武江民, 付杰文, 师银芳

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 利用 2010 年白银区春小麦生长季(4—7 月)空间分辨率为 250 m 的 MODIS 影像和气象站点的气象数据,通过 CASA 模型建立了基于 MODIS 数据的春小麦净初级生产力遥感估算模型,估算出白银区春小麦生长季的净初级生产力(NPP),通过春小麦 NPP 与干物质转换关系计算出春小麦生产潜力。结果表明:白银区南部春小麦的 NPP 和生产潜力均大于北部地区,其 NPP 最小值为 $42 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,最大值为 $402 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,且春小麦的生产潜力有明显的季节性规律。根据春小麦生产潜力与实际产量的拟合关系建立了产量估测模型,并对该模型做了精度验证与实用性评价,结果显示该估产模型均方根误差 $RMSE$ 为 $76.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,相对均方根误差 $RMSEr$ 为 23.51%。

关键词: 净初级生产力;春小麦生产潜力;估产模型;白银区

中图分类号: Q948;S512.1+2 **文献标志码:** A

Potential productivity and yield estimation of spring wheat based on a Net Primary Production model

——Taking Baiyin district in Gansu province as an example

ZHAO Jun, WANG Yu-chun, DANG Guo-feng, WU Jiang-min, FU Jie-wen, SHI Yin-fang

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on the Carnegie Ames Stanford Approach (CASA), a net primary productivity (NPP) model for spring wheat was established with $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ MODIS remote images and weather station-based meteorological data in the Baiyin District at wheat growing season from April to July 2010. Through calculation on the transform relationship between NPP and dry matter, the potential productivity of spring wheat was estimated. The results showed that the NPP and potential productivity of spring wheat in south area were both greater than those in the north area of Baiyin District. The minimal value of NPP was $42 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and the maximal value was $402 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. In the meantime, it was found that the production potential of spring wheat showed clear correlations with seasons. According to the actual wheat yield of per unit area and the potential productivity of spring wheat, the estimation model by regression analysis was established. Further tests were carried out to evaluate the accuracy and utilization of the model with a root mean square error ($RMSE$) at $76.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and a relative root mean square error ($RMSEr$) at 23.51%.

Keywords: Net Primary Productivity (NPP); spring wheat potential productivity; yield estimate; Baiyin district in Gansu province

粮食安全问题是关系到国计民生的重要问题^[1],随着人口的增加,气候的波动,以及土壤侵蚀等环境问题的出现,农作物生产潜力及估产等问题已引起了广泛关注。黄土丘陵区由于土壤侵蚀严重,地表支离破碎,生态环境脆弱,农业生产基础非

常薄弱,故研究该区域农作物生产潜力与估产的方法,对粮食生产具有十分重要的意义^[2]。

净初级生产力(Net primary productivity, NPP)指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的生物量的净增加量,通常以干物质量来表示。NPP 在研究

全球生物量及作物估产等方面发挥着重要的作用,目前,NPP的估算模型主要有:统计模型、过程模型和光能利用率模型^[3];光能利用率模型是在农作物研究基础上发展起来的,其中 CASA 模型已经广泛应用于陆地 NPP 估测^[4];利用遥感与 GIS 的 CASA 模型能够实现区域 NPP 时空差异性的直观表达,这是其他统计模型和非遥感模型难以做到的^[5]。

区域农作物产量与生长季内净初级生产力关系密切,农作物产量是一定面积上农作物在生长季节内的 NPP 的一部分,他们之间存在一个有效产量转换关系^[6]。实践表明,在进行农作物估产时,通过计算区域内 NPP 来获取区域作物产量具有现实意义^[7]。国外很多学者在农作物生产潜力的预测以及遥感估产方面都做了大量研究^[8-9],国内许多学者在这一领域也做了一些有益的探索,任建强等通过植物净初级生产力模型对黄淮海平原的冬小麦产量进行了估算,冬小麦生物量、产量与实际生物量、产量的相对误差在 -4.5% 以内^[4];赵文亮等基于 MODIS - NDVI 对河南省冬小麦产量进行了遥感估测,通过误差对比后发现,在模型中引入播种面积后,利用区域 NDVI 可以有效、快速、准确地对冬小麦进行估产^[10];李海亮等通过净初级生产力对海南天然橡胶产胶潜力进行了研究,并建立了估产模型^[11]。因此,本文以甘肃省白银区为研究区,利用 MODIS 数据,以 CASA 模型为基础,估算了研究区春小麦的净初级生产力,同时利用春小麦 NPP 与干物质量的转换关系得到白银区春小麦的生产潜力,并建立估产模型。

1 研究区概况

白银区位于甘肃中部,地处北纬 36°15' ~ 36°47',东经 103°52' ~ 104°26' 之间,属祁吕贺山字型构造阿宁盾地中的陇西帚状旋卷构造体系,处于马雅雪山 - 皋兰 - 会宁褶皱带上;地势由西北向东南倾斜,海拔在 1 420 ~ 2 265 m 之间;地貌类型主要有三种:西北部山地、中部丘陵和南部河谷川台盆地;多年平均降水量为 233 mm,年平均气温为 9.6℃;境内自产流水稀少,黄河自西峡口入境,流长 38 000 m;与全国平均水平相比白银区耕地质量等级普遍较低,耕地主要分布在南部和北部,中部为白银区城区所在地,由于南接黄河,故南部多为水浇地且分布较集中,北部多为旱地;白银区主要农作物为一年一熟春小麦;全区土壤主要分为灰钙土、灌淤土、潮土、红土、石质土五个类型,灰钙土是本区内分布范围最广,面积最大的土壤类型。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究主要利用了以下数据:(1) 植被指数产品 MOD13Q1 数据:来自美国航空航天局(NASA)数据中心,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d。本研究选取 2010 年春小麦生长季内,4 月 7 日、5 月 9 日、6 月 10 日、7 月 12 日,覆盖白银区的 4 景 MOD13Q1 - NDVI 数据;(2) 气象数据主要来源于中国气象科学数据共享服务网,包括 2010 年白银区气象台站日平均气温、日降水量和日太阳辐射数据;(3) 其他数据:白银区春小麦产量数据来源于白银区 2010 年统计年鉴。根据白银区 2010 年(4—7 月)各行政村春小麦的实际产量数据,得到春小麦产量的时间序列与空间序列,用于白银区春小麦生长潜力与实际产量的相关分析及春小麦产量估测建模。

2.2 研究方法

2.2.1 春小麦 NPP 遥感估算 CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) 模型^[12]是由 Potter 和 Field 基于 Monteith 提出用观测到的 APAR 和光能利用效率 ϵ 计算植物生产力的方法发展的,是由遥感、气象、植被以及土壤类型数据共同驱动的光能利用率模型。NPP 主要由植被所吸收的光合有效辐射 (APAR) 与光能利用率 (ϵ) 两个变量确定。其估算模型可表示为:

$$NPP = APAR \times \epsilon \quad (1)$$

其中,APAR 是植被吸收的光合有效辐射 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$); ϵ 为最大光能利用率 ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

① 春小麦吸收的光合有效辐射 APAR 的确定

植被所吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射的吸收比例,其公式为:

$$APAR = SOL \times FPAR \times 0.5 \quad (2)$$

其中,SOL 是太阳总辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$);FPAR 是光合有效辐射分量,它是指春小麦光合作用吸收有效辐射的比例;常数 0.5 表示春小麦所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

FPAR 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例,它的大小取决于植被类型和植被覆盖状况。FPAR 与 NDVI 之间也存在较好的线性关系^[13],这一关系可以根据春小麦 NDVI 的最大最小值以及所对应的 FPAR 的最大最小值来确定,其计算公式为:

$$FPAR_{(x,t)} = \frac{(NDVI_{(x,t)} - NDVI_{(i,\min)})}{(NDVI_{(i,\max)} - NDVI_{(i,\min)})} \times (FPAR_{\max} - FPAR_{\min}) + FPAR_{\min} \quad (3)$$

② 光能利用率的确定

利用光能利用率模型模拟植被生产力,关键在于对光能利用率的准确估算^[14],由于光能利用率受到气温、水分、土壤和能量分配等因素影响,必须要经过一系列的修正^[15]。光能利用率的计算公式如下:

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (4)$$

其中, $\epsilon(x, t)$ 表示实际光能利用率;式中 $T_{\epsilon_1}(x, t)$ 和 $T_{\epsilon_2}(x, t)$ 表示温度对光能转化率的影响; T_{ϵ_1} 反应在低温和高温时植物内在的生化作用对光合的限制而降低净第一性生产力, T_{ϵ_2} 表示环境温度从最适宜温度向高温和低温变化时植物的光能转化率逐渐变小的趋势, T_{ϵ_1} 、 T_{ϵ_2} 的算法参见文献^[12]; ϵ_{\max} 为农作物的最大光能利用率($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$), ϵ_{\max} 取值随植被类型的不同而发生变化, 本文所用 ϵ_{\max} 的值为 $0.604 \text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$; $W_{\epsilon}(x, t)$ 是水分胁迫影响系数;水分胁迫系数 $W_{\epsilon}(x, t)$ 反映了植物所能利用的有效水分条件对光能转化率的影响, 随着环境中有效水分的增加, $W_{\epsilon}(x, t)$ 逐渐增大。由下列公式计算:

$$W_{\epsilon}(x, t) = 0.5 + 0.5EET(x, t)/PET(x, t) \quad (5)$$

其中, EET 为区域实际蒸散量(mm), 由周广胜等^[16] 建立的区域实际蒸散量模型求得; PET 为区域潜在蒸散量(mm), 具体计算方法参见文献^[17]。

2.2.2 春小麦生产潜力估算 作物生产潜力是指在理想生产条件下所能达到的最高理论产量。干物质生产量也叫净生产量, 即作物的净初级生产力, 它是指作物光合产量扣除自养呼吸消耗后剩余产量。小麦产量源于光合作用, 通过光合作用合成的有机物质(除部分用于呼吸消耗外)绝大部分用于建成植株躯体(如根、茎、叶和穗等)和形成小麦的经济产量^[18]。一般情况下, 正常生长的小麦群体, 其生物产量和经济产量呈显著正相关, 由于春小麦生物体中碳素含量在 45% 左右, α 值约为 2.22(α 为植物碳素含量与植物干物质质量间的转化系数), 因此, 根据生产潜力与干物质产量之间的关系^[19], 可将春小麦的 NPP 转换为生产潜力。

通过每个像元春小麦的生产潜力, 可计算出全区春小麦的预测生产潜力, 如公式(6):

$$Y_{pm} = Y_p \times S \quad (6)$$

式中, Y_{pm} 表示 m 像元春小麦的生产潜力(g); Y_p 为 m 像元单位面积春小麦的生产潜力($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); S 为像元的面积(m^2)。

3 结果与分析

3.1 白银区春小麦生长季 NPP 及生产潜力

本文利用 CASA 模型, 估算白银区春小麦 NPP, 得到白银区春小麦生长季(4—7月)NPP 空间分布图(图 1a), 如图所示, 白银区春小麦生长季 NPP 分布不均匀, 东南部高于西北部, 表现出区域性空间差异, 其最小值为 $42 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最大值为 $402 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

根据 NPP 与生产潜力的转换关系, 得到白银区春小麦平均生产潜力分布图(图 1b)。从图中可知, 白银区春小麦单位面积的生产潜力也存在明显的空间差异, 南部的生产潜力大于北部。

总体来说, 白银区春小麦平均 NPP 和平均生产潜力均呈现由南向北递减趋势, 这主要是由于区域水热条件存在差异; 水分是干旱半干旱内陆区植被 NPP 的主要制约因子, 白银区南部由于黄河水的灌溉, 耕地多为水浇地, 这使得南部地区春小麦关键生育期的水分、土壤条件对春小麦更为适宜, 是春小麦的主产区和稳产区, 而北部地区由于灌溉水源不足, 耕地多为旱地, 故南部地区春小麦平均 NPP 及生产潜力高于北部。

3.2 生产潜力的时空变化特征

由于农作物生长过程是一个连续过程, 其产量与各个时期的生长状态具有密切关系, 尤其生长关键期的生长状况对作物产量形成有直接的意义, 故进一步研究了春小麦生产潜力的月间变化状况, 分别估算 4—7 月各月春小麦的生产潜力, 得到其空间分布图(图 2)。

从图 2 可以看出, 白银区各月春小麦生产潜力存在明显的差异, 4 月、5 月生产潜力较大, 6 月开始下降, 这与该区主要农作物春小麦的季节性生长规律一致。在春小麦的出苗期(4 月上旬), 干物质开始积累, 生产潜力呈增加趋势; 4—5 月春小麦处于拔节抽穗期, 营养生长和生殖生长的并进阶段, 其对应的 NDVI 迅速增大, 这一时期白银区春小麦生产潜力呈明显的增加趋势; 6 月开始春小麦进入开花灌浆期, 籽粒外形已基本完成, 长度达最大值的 3/4, 厚度增长甚微, 干物质积累减慢, 与 5 月相比, 生产潜力呈下降趋势; 7 月初为春小麦的成熟收获期, 这一时期小麦籽粒内部变硬, 含水率降至 20% 以下, 干物质积累停止, 故 7 月份生产潜力最低。

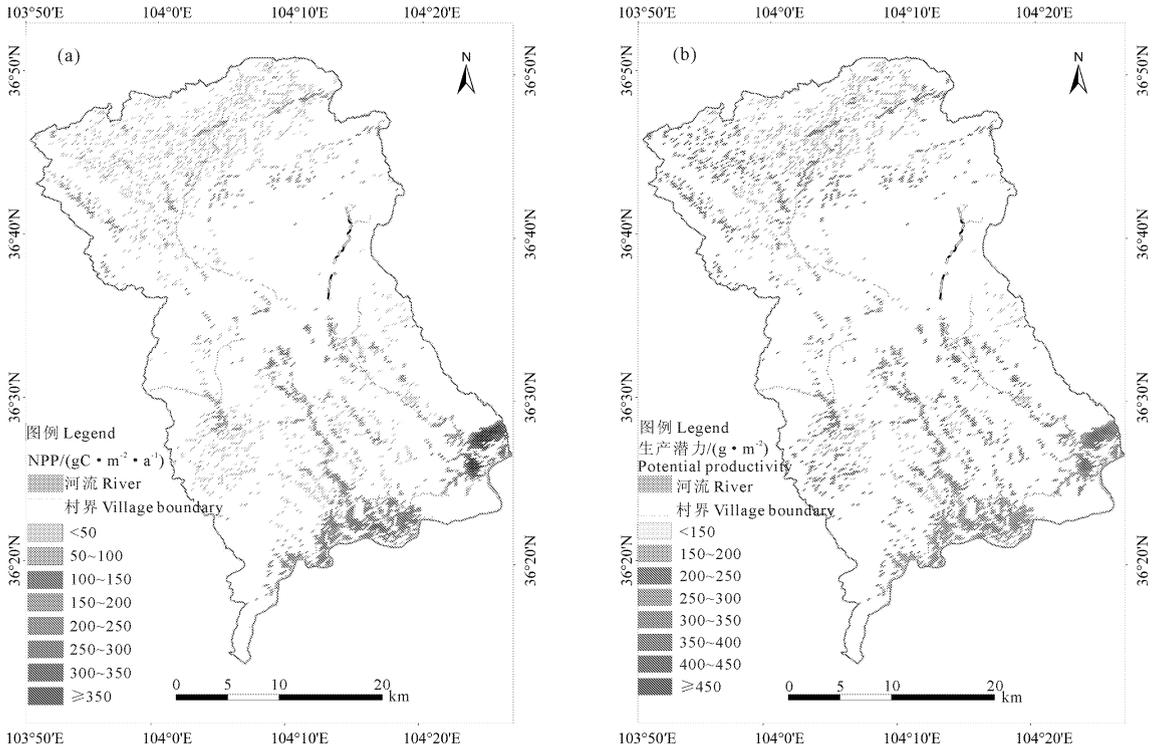


图 1 白银区春小麦平均 NPP(a)和生产潜力(b)空间分布

Fig.1 Distributions of the average NPP, average potential productivity of spring wheat in Baiyin district

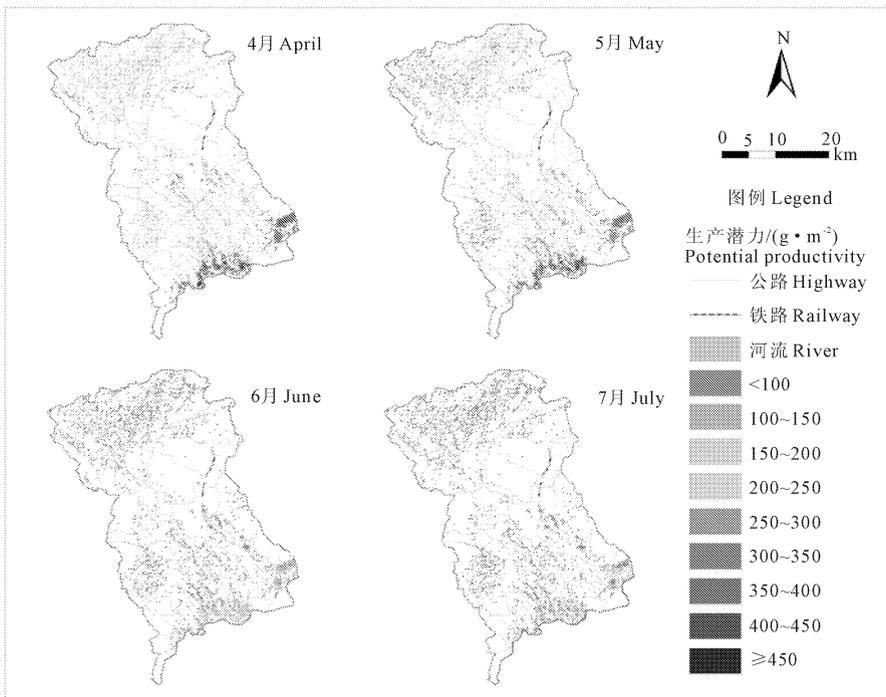


图 2 白银区 2010 年 4—7 月春小麦生产潜力分布

Fig.2 Distributions of the potential productivity of spring wheat(from April to July 2010) in Baiyin district

3.3 白银区春小麦产量的估测

在 ARCGIS 软件中利用栅格计算器,通过公式

(6)计算出每个像元的生产潜力。导出属性表,得到 3 079 个像元的生产潜力数据,将与之对应的实际春

小麦的产量数据进行一元线性回归分析。并由此得到 2010 年的春小麦产量模拟模型,求得春小麦生产潜力与春小麦产量的关系式,如公式(7):

$$y = 0.67x + 57.60 \quad (7)$$

式中, y 为春小麦生产潜力($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); x 为春小麦实际产量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

结果表明 2010 年白银区春小麦生产潜力与单位面积实际产量在空间上呈明显的线性相关(图 3)。

生产潜力与单位面积实际产量的 Pearson 相关系数为 0.871,它的 Sig. 值小于 0.01,通过了 $P = 0.01$ 水平显著性检验,呈强且正的线性相关。 $R^2 = 0.76$,均方根误差 $RMSE$ 为 $76.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,相对均方根误差 $RMSEr$ 为 23.51%。

白银区春小麦单位面积的模拟平均产量为 $279.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,模拟总产量 21 751.7 t,通过 2010 年白银区统计年鉴查得白银区春小麦实际单产为 $324.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,实际总产量为 24 096 t,用模型计算

出的估算数据分别与统计数据相比较,求出与实际统计数据的差值,并计算精度百分比,如表(1)。结果表明,用此模型估算的春小麦单位面积产量的精度为 85.99%,春小麦总产量的估算精度为 90.27%。

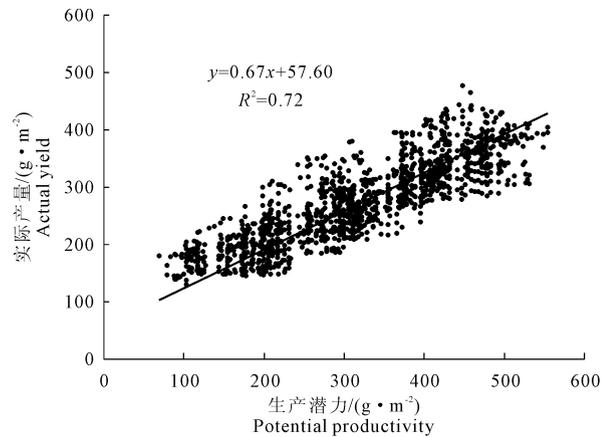


图 3 白银区春小麦生产潜力与单位面积产量关系
Fig.3 Relationship between potential productivity and actual spring wheat yield in Baiyin district

表 1 模拟数据与实测数据比较

Table 1 Comparisons between estimated data and actual data

项目 Item	估算数据 Estimate data	实际数据 Actual data	差值 Different	精度百分数/% Precision
单位面积产量 Yield/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	279.2	324.7	- 45.5	85.99
总产量 Total yield/t	21751.7	24096	- 2344.3	90.27

4 结论与讨论

1) 本文利用 CASA 模型,估算了白银区春小麦生长季的 NPP,并转换为其生产潜力。整体而言,白银区南部春小麦的 NPP 和生产潜力大于北部地区,这与白银区实际的水热条件分布特征一致;同时,春小麦的生产潜力有明显的季节性规律,与春小麦的生长规律、生理特性相一致。

2) 本文建立了研究区 2010 年春小麦关键生产季(4—7 月)的产量估测模型,并对估产模型进行了精度验证与实用性评价,表明研究区 2010 年春小麦模拟预测值与实际产量呈强且正的线性相关;均方根误差 $RMSE$ 为 $76.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,相对均方根误差 $RMSEr$ 为 23.51%。

3) 本研究使用的 MODIS - NDVI 数据空间分辨率为 250 m,空间分辨率相对较低,对于监测结果具有较大影响。对此,在以后的研究中,选择利用更高时空分辨率的遥感数据或采用其它辅助数据进行数据融合,进一步提高农作物产量的估测精度,是研究的重点方向。

对农作物的生产潜力进行研究,一方面可以进一步通过实际产量与生产潜力的拟合关系,建立估产模型,对农作物产量的准确预报具有重要意义;另一方面,可以寻找农作物生产潜力与实际产量存在差距的原因,这样就可以有针对性地改善生产条件,增强栽培技术水平,最大程度地发挥优势,发掘农作物生产潜能,以提高实际的产量。本研究以甘肃省白银区的春小麦为研究对象,利用 2010 年春小麦关键生长季(4—7 月)250 m 分辨率的 MODIS 数据和气象站点的气象数据来估算白银区春小麦关键生长季(4—7 月)的 NPP,再根据春小麦的 NPP 与干物质量的转换关系算出其生产潜力,最后通过春小麦生产潜力与实际产量的拟合关系建立了白银区春小麦的估产模型。结果说明该模型的估产效果较理想,对于区域春小麦的估产具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 贺 振,贺俊平.基于 NOAA - NDVI 的河南省冬小麦遥感估产[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):46-52.
- [2] 李忠武,蔡强国,Scott Mitchell,等.基于 GIS 的黄土丘陵区农作物生产潜力模拟研究[J].生态学报,2002,22(3):311-317.

- [3] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99:5263-5283.
- [4] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3):413-424.
- [5] 杨东辉, 赵军, 张智慧, 等. 近 10 年甘南牧区草地净初级生产力变化研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1):257-263.
- [6] 任建强, 唐华俊. 基于植物净初级生产力模型的区域冬小麦估产研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5):111-117.
- [7] 李海亮, 罗微, 李世池, 等. 基于净初级生产力的海南天然橡胶产胶潜力研究[J]. *资源科学*, 2012, 34(2):337-344.
- [8] Lobell D B, Asner G P, Ortiz - Monasterio J I, et al. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: Estimates and uncertainties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 94:205-220.
- [9] Tao F L, Yokozawa M, Zhang Z, et al. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: Models comparisons, estimates and uncertainties[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 183(4):385-396.
- [10] 赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 基于 MODIS - NDVI 的河南省冬小麦产量遥感估测[J]. *地理研究*, 2012, 31(12):2310-2320.
- [11] 李海亮, 罗微, 李世池, 等. 基于遥感信息和净初级生产力的天然橡胶估产模型[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(9):1610-1621.
- [12] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51:74-88.
- [13] Rasmus Fensholt, Inge Sandholt, Michael, Schultz Rasmussen. Evaluation of Modis LAI and the relation between APAR and NDVI in a semi - arid environment using situ measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91:490-507.
- [14] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. *生态学报*, 2011, 31(7):1855-1866.
- [15] Running S W, Thornton P E, Nemani R. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system[C]//Sala O, Jackson R, Mooney H. *Methods in ecosystem science*. New York: Springer Verlag, 2000.
- [16] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候植被分类研究[J]. *植物学报*, 1996, 38(1):8-17.
- [17] Narongrit C, Yasuoka Y. The use of Terra - MODIS data for estimating evapotranspiration and its change caused by global warming[J]. *Environmental Informatics Archives*, 2003, (1):505-511.
- [18] 任建强, 刘杏认, 陈仲新, 等. 基于作物生物量估计的区域冬小麦单产预测[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4):872-878.
- [19] Schlesinger W H. *Biogeochemistry: an analysis of global change*[M]. San Diego: Academic Press, 1997.

(上接第 122 页)

3) 西峰区多年平均降水量为 545.7 mm, 雨水资源相对丰富, 而且降水在时间上分布比较集中, 其中汛期(5—9 月)降水量占年平均降水量的 76.65%, 有利于雨水的集蓄利用。

参考文献:

- [1] 宋令勇, 宋进喜, 张文静. 西安地区降水时空分布及变化规律分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(1):85-89.
- [2] 张一驰, 吴凯, 于静洁, 等. 华北地区 1951—2009 年气温、降水变化特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11):1930-1941.
- [3] 郝立生, 闵锦忠, 姚学祥. 华北地区夏季降水减少的原因分析[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(4):522-527.
- [4] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. *生态学报*, 2013, 33(2):519-531.
- [5] 张允, 赵景波. 西安市近 55 年来降水的多时间尺度分析[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(4):406—410.
- [6] 张宏利, 陈豫, 任广鑫. 近 50 年来渭河流域降水变化特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4):236-241.
- [7] 康淑媛, 张勃, 柳景峰. 基于 Mann - Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(3):501-508.
- [8] 郭小芹, 刘明春, 钱莉. 从 Mann - Kendall 特征看石羊河流域降水量的演变规律[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4):593-599.
- [9] 徐巧芝, 郭汝军, 丁文荣. 滇中地区降水特征与变化趋势研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5):155-159.
- [10] 李艳春, 李艳芳. 宁夏近百年来气候变化及突变分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(1):100-104.
- [11] 张晓, 李净, 姚晓军, 等. 近 45 年青海省降水时空变化特征及突变分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(5):6-12.
- [12] 李瑞雪, 张明军, 金爽等. 乌鲁木齐市近 47 年气温降水特征与突变分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(10):111-115.
- [13] 魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*[M]. 第二版. 北京:气象出版社, 2007:62-77, 106-113.
- [14] Baliunas S, Frick P, Sokoloff D, et al. Time scales and trends in the central England temperature data(1659—1990): A wavelet analysis[J]. *Geophys Research Letters*, 1997, 24(11):1351-1354.