

不同气象插值方法精度评估及对草地 NPP 估算的影响

朱玉果^{1,2}, 杜灵通^{1,2}, 谢应忠^{1,2,3}, 刘可^{1,2}, 官菲^{1,2}, 丹杨^{1,2}, 王乐^{1,2}

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021;

2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 3. 宁夏大学 农学院, 银川 750021)

摘要:以 2000—2015 年宁夏境内及周边 14 个气象站点的年均气温及年总降水量为数据基础, 分别利用反距离权重法(IDW)、样条函数法、Anusplin 插值法对气象数据进行了空间插值并交叉检验, 将不同方法插值获取的气象要素空间栅格数据作为模型驱动参数输入 CASA 模型, 研究了气象要素不同插值方法对草地 NPP 估算精度的影响。结果表明: (1) 3 种插值法中 Anusplin 插值法在宁夏区域内气象要素插值的误差最小, 精度最高, 反距离权重法误差最大, 在气温插值中表现最为明显; (2) 通过实测数据的检验, CASA 模型在宁夏草地 NPP 估算当中适用性强, 模拟的年总 NPP 空间分布格局与实际情况相符, 模拟数据可靠; (3) 在不同草地类型的 NPP 估算中, 引用 MOD17A3 NPP 数据作为验证数据对比发现基于 Anusplin 的气象要素插值数据及 CASA 模型模拟的 NPP 一定程度上提高了 NPP 估算精度, 其在干草原、灌丛草原、干荒漠类草原及荒漠草原的估算中精度较高, 而在沼泽类和山地草甸的估算效果欠佳, 其估算精度有待提高。

关键词:CASA 模型; 空间插值; 草地净初级生产力

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0160-08

Evaluation on Accuracy of Three Meteorological Interpolation Methods and Their Impacts on Grassland NPP Estimation

ZHU Yuguang^{1,2}, DU Lingtong^{1,2}, XIE Yingzhong^{1,2,3},
LIU Ke^{1,2}, GONG Fei^{1,2}, DAN Yang^{1,2}, WANG Le^{1,2}

(1. *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*; 2. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of Education, Ningxia*

University, Yinchuan 750021, China; 3. *School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*)

Abstract: Based on the mean annual temperature and mean annual precipitation from 14 meteorological observation sites during 2000—2015 in Ningxia Province and its adjacent areas, three spatial interpolation methods including the inverse distance weighted interpolation (IDW), spline interpolation and Anusplin were used to interpolate the climate factors respectively. The cross checking method was used to verify the results of interpolation. Based on those results, we had been analyzed the feasibility of CASA model in estimating grassland NPP and the effects of improving interpolate precision on NPP estimation in Ningxia. The main conclusions are as follows. (1) Anusplin method had minimum error and the highest accuracy of interpolating meteorological factors in Ningxia area. IDW method's interpolating error was the maximum, especially in air temperature interpolation. (2) The CASA model has shown the strong applicability grassland NPP estimating by comparing with the measured data and the spatial distribution pattern of NPP is consistent with the actual situation in Ningxia, therefore, the simulation data are reliable. (3) In NPP estimation of different grassland types, CASA model based on Anusplin interpolation that enhances interpolation accuracy has the little estimating error and

收稿日期: 2017-11-21

修回日期: 2017-12-21

资助项目: 国家自然科学基金(41661003); 宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(XAB2017AW01)

第一作者: 朱玉果(1994—), 女, 陕西安康人, 硕士研究生, 研究方向为草地生态遥感。E-mail: yuguo_zhu@163.com

通信作者: 杜灵通(1980—), 男, 宁夏同心人, 博士, 副研究员, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: dult80@qq.com

improves the precision of NPP estimation by referencing to MOD17A3 NPP data as a verified data. The results indicate that CASA model has more accurate in estimation of NPP of semi-arid grassland, shrub grassland, shrub grassland, desert grassland and desert steppe, and the estimation accuracies of NPP of wetland grassland and mountain meadow are poor, and these estimation accuracies should be further improved.

Keywords: CASA model; spatial interpolation; grassland NPP

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是单位面积、单位时间内绿色植物通过光合作用所获取的有机物质总量中扣除自养呼吸后的干物质总量^[1]。其反映了在自然环境条件下植被对 CO₂ 的固定能力,不仅是植被活动的重要表征,而且是调节生态过程的重要依据,在生态系统的质量状况、生产能力评估等方面发挥着重要作用^[2],自 19 世纪植被净初级生产力被提出之后便受到了全球学者的广泛关注^[3-5]。草地生态系统是全球分布最广的生态系统,准确估算其 NPP 对分析草地植被在全球气候变化中的生态价值及全球碳循环收支平衡具有重要意义^[6]。遥感技术是从空间上估算 NPP 的有效手段^[7],其中 CASA 模型应用最为广泛,它是一种充分考虑环境条件和植被本身特征的光能利用率模型,可从不同空间尺度估算 NPP^[8-10]。CASA 模型在估算 NPP 时需要输入遥感、气象、辐射和土地利用类型等数据,而气象数据则需经过空间插值才可与遥感空间数据匹配,但不同插值方法获取的气象要素空间数据精度不一,这对 CASA 模型的运算产生一定的影响,进而影响到 NPP 的估算精度。

气象要素的空间插值以尽可能建立接近实际空间分布特征的数学模拟方程为核心,根据区域内可得的气象要素样本值以一定的插值函数模型进行模拟,获取气象要素空间栅格数据^[11]。目前应用较多的插值方法有反距离权重(IDW)、克里金、最近邻、样条函数和 Anusplin 等插值法,现有研究表明,不同的插值方法存在着各自的优劣^[12-16]。也有学者对不同气象插值方法在草地 NPP 估算中的可靠性进行了评价,但不同类型草地 NPP 的估算精度可能对不同气象插值方法的敏感度存在差异,特别是在草地类型多样化的农牧交错带,因此需进一步研究气象数据插值方法对不同类型草地 NPP 估算的影响。

位于农牧交错带的宁夏有天然草地 3.01 万 km²,依靠草地发展的草畜产业是宁夏今后打造国家级生态草牧业试验示范区的基础,而准确估算草地 NPP 及草地载畜能力对制定生态草牧业发展战略具有重要的指导意义。为此,本研究根据宁夏境内及周边 14 个气象站点 2000—2015 年的气象数据,对利用反距离权重(IDW)、样条函数及 Anusplin 这 3 种主

流插值法获取的宁夏气象要素空间插值数据进行对比,利用交叉检验法对插值精度进行验证,并探讨气象要素不同插值方法对不同类型草地 NPP 估算精度的影响,采用实测数据及 MOD17A3 NPP 数据进行对比验证,以期优选出最适宜于宁夏地区 NPP 估算的气象要素空间插值方法。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与数据

宁夏位于 104°17'—107°39'E, 35°14'—39°23'N, 全区属典型温带大陆性气候,年降水量 183~677 mm,主要降水集中于 7 月、8 月,全区总面积 5.18 万 km²,南北狭长,地势南高北低。宁夏草原面积广阔,以干草原、荒漠草原为主,主要分布在中部风沙干旱区的盐池、灵武、同心等县,另外,还有贺兰山、南华山、西华山、月亮山、六盘山和云雾山等地的山地草原,天然草原是宁夏生态系统的重要组成部分,对构建黄河中游上段的生态保护屏障意义重大。

气象数据包括全区及周边省区在内 14 个气象站点(图 1)2000—2015 年的月平均气温、月总降水量以及太阳总辐射数据,这些数据均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。遥感影像数据包括 MOD13A3 NDVI 月值数据及 MOD17A3 NPP 年值数据,其空间分辨率均为 1 km,均来自于 NASA 数据分发网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),采用 MRT 软件进行格式转换及投影坐标系的转换。数字高程模型(DEM)为地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)发布的 90 m 分辨率的 SRTM 数据。草地类型图由 1:1 200 000 的纸质草地分类图矢量化所得,宁夏草地共分为 10 种类型。以上所有数据均转换成横轴莫卡托投影,空间分辨率均重采样为 1 km。草地初级生产力实测数据为宁夏 15 个市县 1981—2010 年监测到的所属市县各类型草地净初级生产力的加权平均值,数据来自文献^[17]。

MOD17A3 NPP 数据是基于 BIOME-BGC 模型的覆盖全球的 NPP 数据。该模型属于生态过程模型,通过模拟生态系统内的光合、呼吸等生理活动及植物组织的营养物质的传递与循环等生理生态过程估算植被总初级生产力。在 BIOME-BGC 模型中植

被 NPP 是植被总初级生产力与植被呼吸消耗之差。模型输入参数分为初始化文件、气象数据及生态生理指标,与 CASA 模型相比,其中加入了土壤有效深度、土壤颗粒组成、大气 CO₂ 浓度年际变化及冠层消光系数、叶氮在羧化酶中的百分比含量等众多植被生理指标,但由于部分模型参数获取困难,因此在中小尺度区域的 NPP 估算中实现较困难^[18-19]。而该模型在国内外认可度高,MOD17A3 NPP 数据在全球范围内广泛应用于不同生态系统的碳循环研究,因此本文以全球 MOD17A3 NPP 数据为基准,对比不同插值算法下的 CASA 模型的估算精度^[20-24]。

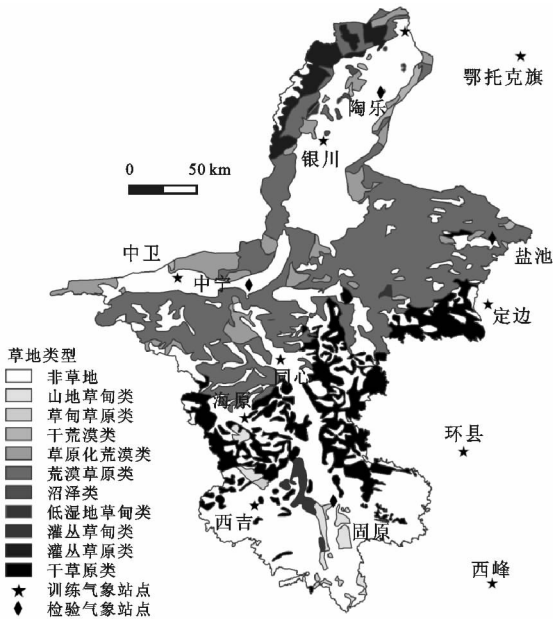


图 1 宁夏气象站点及草地类型分布

1.2 插值方法

1.2.1 反距离权重法(IDW) 反距离权重法(Inverse Distance Weighted, IDW)认为插值点的权重与样点的距离成反比,即以插值站点和样点之间的距离作为权重进一步加权平均,样点与插值点的距离越近,其实测值对插值点的影响越大。反距离权重是对距离进行加权平均,因此样点越密集,其模拟效果越好,插值效果最佳,算法如下^[25]:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

式中: Z 为待模拟的插值点的栅格值; $Z(x_i)$ 为第 i ($i=1,2,3,\dots,n$)个气象站的实测值; n 为样点数; d_i 为插值点到第 i 个站点的距离。

1.2.2 样条函数法(Spline) 样条函数法采用最小化表面总曲率的数学函数来模拟未知点,即通过实测样点生成恰好经过输入点的平滑表面,通常有规则样条函数和张力样条函数两种方法。本研究采用规则

样条函数方法(Regularized)进行气象数据插值,采用此方法权重越大,拟合表面越光滑,算法如下^[26]:

$$Z = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\gamma_i) + T(x, y) \quad (2)$$

$$R(\gamma_i) = \frac{\gamma_i^2/4}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{\gamma_i}{2\pi}\right) + c - 1 \right] + \tau^2 \left[k_0\left(\frac{\gamma_i}{\tau}\right) + c + \ln\left(\frac{\gamma_i}{2\pi}\right) \right] \quad (3)$$

$$T(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y \quad (4)$$

式中: Z 为待模拟的插值点的栅格值; n 为样点数; λ_i 为线性方程确定的系数; γ_i 为模拟插值点到第 i 点的距离; τ^2 为权重系数; k_0 为修正贝塞尔函数; $c=0.577215$; a 为线性方程系数。以上两种插值方法均在 ArcMap 软件中进行模拟。

1.2.3 Anusplin 插值法 Anusplin 插值法基于普通薄盘及局部薄盘样条函数插值理论,利用集成 Anusplin 软件包进行空间插值,该插值法可以将海拔等协变量引入模型以提高插值精度,算法如下^[27]:

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i \rho + e_i \quad (i=1, \dots, N) \quad (5)$$

式中: Z_i 表示空间 i 点的因变量; x_i 为 d 维样条独立变量; $f(x_i)$ 是模拟 x_i 的未知光滑函数; y_i 为 ρ 维独立协变量; b 是 y_i 的 ρ 维系数; e_i 是自变量随机误差,其期望值为 0。式中的函数 $f(x_i)$ 及 b 系数通过最小二乘法估计得出:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{Z_i - f(x_i) - b^T y_i}{\tau w_i} \right)^2 + \rho J_m(f) \quad (6)$$

式中: $J_m(f)$ 是测度函数,用来监测函数 $f(x_i)$ 的粗糙度,其定义为函数 $f(x_i)$ 的 m 阶偏导,在 Anusplin 插值法中的应用为样条次数,在本研究中经过试验选择 2 次样条进行插值; ρ 为正的光滑参数,作为数据保真与曲面粗糙度之间的平衡^[28]。

1.3 误差检验

采用交叉检验进行插值精度误差检验,即选取总样本中 30%的站点为检验样点,剩余的作为训练样点进行空间插值,本研究选取宁夏境内的陶乐、中宁、盐池及固原 4 个站点作为检验样点(图 1)。假设检验站点的值未知,先通过插值算法获取其模拟值,再通过计算检验站点实测值与模拟值之间的平均误差(MAE)、相对平均误差(MRE)和均方根误差(RMSE)等指标来评估插值效果,具体公式如下:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_{ai} - Z_{\lambda i}|}{n} \quad (7)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z_{ai} - Z_{\lambda i}}{Z_{ai}} \right| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{ai} - Z_{\lambda i})^2}{n}} \quad (9)$$

式中: n 为检验样本站点的个数; Z_{ai} 为第 i 个站点的实测值; $Z_{\hat{a}i}$ 为估测值。

1.4 NPP 估算模型

CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型建立在植物光合作用过程和光能利用率的概念上,是一个充分考虑环境条件和植被特征的 NPP 估算模型,计算公式如下^[5]:

$$NPP=APAR\times\epsilon\tag{10}$$

式中:APAR 为光合有效辐射, ϵ 为光能转化率。植被吸收的光合有效辐射 APAR 由太阳总辐射(SOL)及光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算所得;FPAR 由以归一化植被指数(NDVI)为基础的 $FPAR_{NDVI}$ 和以比值植被指数(SR)为基础的 $FPAR_{SR}$ 加权平均获得;光能转化率 ϵ 由温度胁迫因子、水分胁迫因子及最大光能利用率估算获得,本研究参考朱文泉等^[8]的研究结果,即草地的光能转化率 ϵ 取值为 0.542。

2 结果与分析

2.1 气象要素空间插值结果与检验

2.1.1 气象要素空间插值结果 采用 3 种不同的插值方法空间化的宁夏年均温为 $-3\sim13^{\circ}\text{C}$,气温北高南低,高值均出现在宁夏中北部地区,而西南部为低

值区(图 2—3)。3 种插值方法都能模拟出宁夏气温的基本空间分布特征,均表现出由北向南降水量递增的趋势。由于 Anusplin 插值法将高程作为协变量,根据气温直减率和 2 次样条函数进行气温空间插值,故其插值结果在局部特征上比样条函数和 IDW 插值法的结果更为细腻,即地温随海拔起伏而变化明显,特别是南部六盘山、南华山、中部罗山以及北部贺兰山的高海拔区,其年均温较低;而在海拔较低的北部引黄灌区、清水河河谷等地,年均气温形成高值区,这与宁夏的实际情况较为相符。而样条函数及 IDW 插值法插值结果只反映出了宁夏年均气温自南至北的梯度变化特征,将贺兰山山区插值成与引黄灌区相近的温度特征,这与实际情况不符。此外,IDW 插值法获取的气温空间分布还在银川、同心、海原等气象站点附近出现了“牛眼效应”,即以气象站为中心出现区域高值或低值中心。

3 种不同的插值方法获取的年总降水量空间变化特征基本相近,均表现出由北向南降水量递增的趋势,Anusplin 插值法及样条函数插值法获取的降水量空间上由北向南递增梯度基本一致,形成了有规律的降水递增梯度线,而 IDW 插值法仍然出现了较为明显的“牛眼效应”。

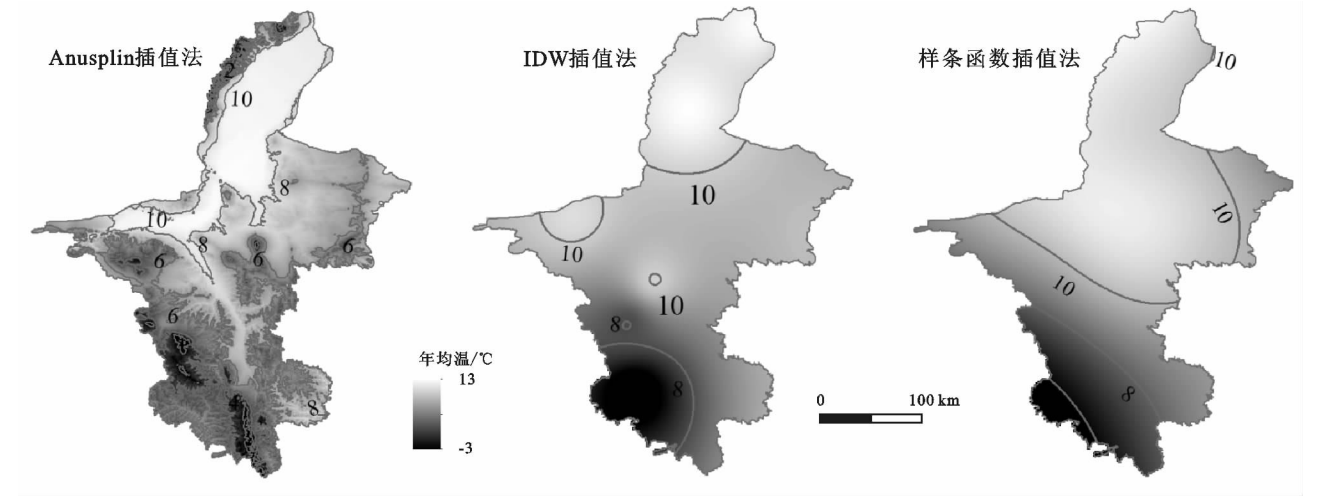


图 2 年均温在不同插值法下的空间分布

2.1.2 插值精度检验 为评估 3 种插值方法的精度,研究选择 10 个气象站数据进行插值,选择 4 个气象站的数据进行验证。通过不同插值算法空间气象要素估算,在 ArcGIS 中提取 4 个验证站点的插值结果,通过平均误差(MAE)、相对平均误差(MRE)和均方根误差(RMSE)等误差分析指标来对比其插值精度(表 1)。从拟合度来看,Anusplin 和样条函数的插值结果明显优于反距离权重插值结果,而 Anusplin 的插值精度又略高于样条函数插值结果。3 种插值法的空间插值效果及插值精度交叉检验结果显示,Anusplin 插值法在气温

与降水的空间模拟值的相对平均误差(MRE)、平均误差(MAE)及均方根误差(RMSE)均小于其他两种插值方法,其模拟精度较高。

2.2 CASA 模型估算结果及验证

2.2.1 草地 NPP 估算结果 在利用 CASA 模型估算区域 NPP 时,需要输入空间气象要素作为模型驱动变量,然而前文已述及不同插值方法获取的气象要素空间插值结果精度不同,每种插值方法对 NPP 的估算结果有何影响,需要进一步深入研究。为此,本节选择以插值误差最小的 Anusplin 插值法获取的空间气象要素和

以 IDW 插值法获取的空间气象要素分别来驱动 CASA 模型,并进行 NPP 估算,并将二者估算的 NPP 结果与美国航空航天局(NASA)发布的全球 MOD17A3 NPP 数据进行对比分析,评估不同气象插值方法对草地 NPP 估算的影响。宁夏草地 NPP 估算结果如图 4 所示,两种不同气象插值数据驱动下的 NPP 估算值与 MOD17A3 NPP 数据在空间趋势上基本一致,均表现出南部山区 NPP 较高,北部 NPP 较低,而中部干旱带的 NPP 最低,这与宁夏草地的分布格局相符合。宁夏南部的六盘山、南华山地区主要以山地草原为主,黄土丘陵区主要以典型草原为主,加之南部山区降水较北部丰沛,故草地 NPP 为全区最高,而中部干旱带则以干草原、荒漠草

原为主,其 NPP 也自然最低。基于 Anusplin 插值法的 CASA 模型与基于 IDW 插值法的 CASA 模型草地 NPP 估算值在量级上较为接近,草地均值分别为 149. 42 gC/(m² · a) 与 150. 45 gC/(m² · a),而 MOD17A3 NPP 数据的草地 NPP 均值为 147. 65 gC/(m² · a),略低于 CASA 模型估算值。在草地 NPP 值域范围上,基于 Anusplin 插值气象要素估算的 NPP 值为 45. 06~807. 83 gC/(m² · a),而基于 IDW 插值气象要素估算的 NPP 的值介于 47. 16~733. 63 gC/(m² · a),二者的值域范围均大于 MOD17A3 NPP 数据的值域范围 47. 28~586. 66 gC/(m² · a),特别是 NPP 像元最大值相差较大。

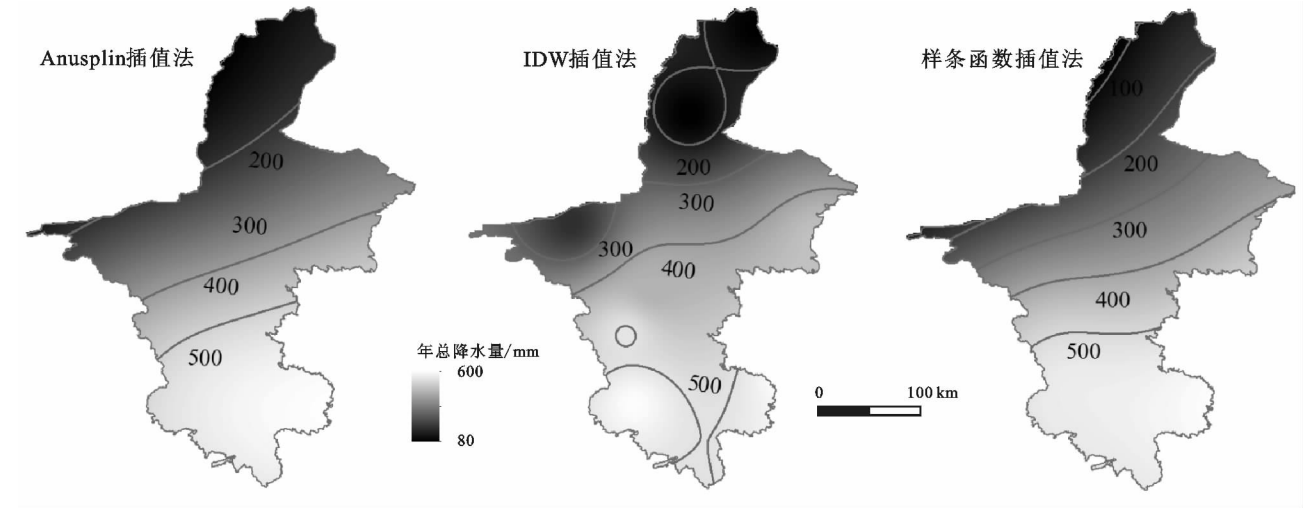


图 3 年降水量在不同插值法下的空间分布

表 1 气温降水量插值误差对比

插值算法	年总降水量/mm			年均温/℃		
	Anusplin 插值	反距离权重插值	样条函数插值	Anusplin 插值	反距离权重插值	样条函数插值
拟合优度(R ²)	0.98	0.86	0.97	0.87	0.48	0.84
相对平均误差(MRE)	0.06	0.16	0.07	0.04	0.06	0.04
平均误差(MAE)	20.08	62.10	26.58	0.37	0.59	0.38
均方根误差(RMSE)	4.48	7.88	5.16	0.61	0.77	0.62

为对比不同气象插值方法在不同类型草地 NPP 估算中的应用效果,本研究分别计算不同插值方法驱动下的宁夏全区各草地类型的平均 NPP(图 5)。从 3 种模型估算的 NPP 平均值来看,两种基于 CASA 模型估算的 NPP 结果相近,与 MOD17A3 NPP 数据存在较大差异。在灌丛草原、低湿地草甸和山地草甸中,MOD17A3 NPP 数据明显比 CASA 模型估算的 NPP 偏低;在荒漠草原、荒漠化类草原、干荒漠类、草甸草原、灌丛草原和沼泽类草地中,MOD17A3 NPP 数据明显比 CASA 模型估算的 NPP 偏高;而 3 种模型对干草原的 NPP 估算中非常接近。从 NPP 值来看,荒漠草原类的草地 NPP 最低,而山地草甸类的草地 NPP 最高。

2.2.2 与全区实测数据对比 基于两种不同气象插

值方法和 CASA 模型估算了近 16 a 宁夏草地年平均 NPP,并用宁夏境内 15 个县市多年 NPP 实测均值进行对比。草地实测值为地上草地产草量干重,而 CASA 模型的估算值 NPP 是地上和地下生物量的总和,因此在验证中参照前人文献中有关干物质产量到 NPP 的转换关系及不同草地类型地下与地上生物量的比例系数的研究^[29-30],将 CASA 模型估算的草地上 NPP 值求出,并将其与草地实测地上生物量进行对比(图 6)。基于不同气象插值方法驱动 CASA 模型估算的 NPP 值均与实测 NPP 存在良好的线性关系,且其相关系数 R² 均在 0.82 以上,说明 CASA 模型在宁夏草地 NPP 估算中效果较为理想,实用性较强。基于 Anusplin 插值法估算的草地 NPP 值与

实测值相关性达 0.86, 优于 IDW 插值法估算的草地 NPP 值, 说明 Anusplin 气象插值法更适宜于驱动 CASA 模型。此外, 对比两种插值方法在 NPP 估算中的误差发现, 基于 Anusplin 插值法估算的草地 NPP 其相对平均误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE)

分别为 0.23, 2.35, 小于基于反距离权重插值法估算的草地 NPP 的误差 ($MRE=0.23, RMSE=2.37$), 这说明基于 Anusplin 插值获取的气象要素驱动的 CASA 模型所估算 NPP 的精度略高, 更接近实测数据, 能够反映宁夏实际的草地 NPP 分布状况。

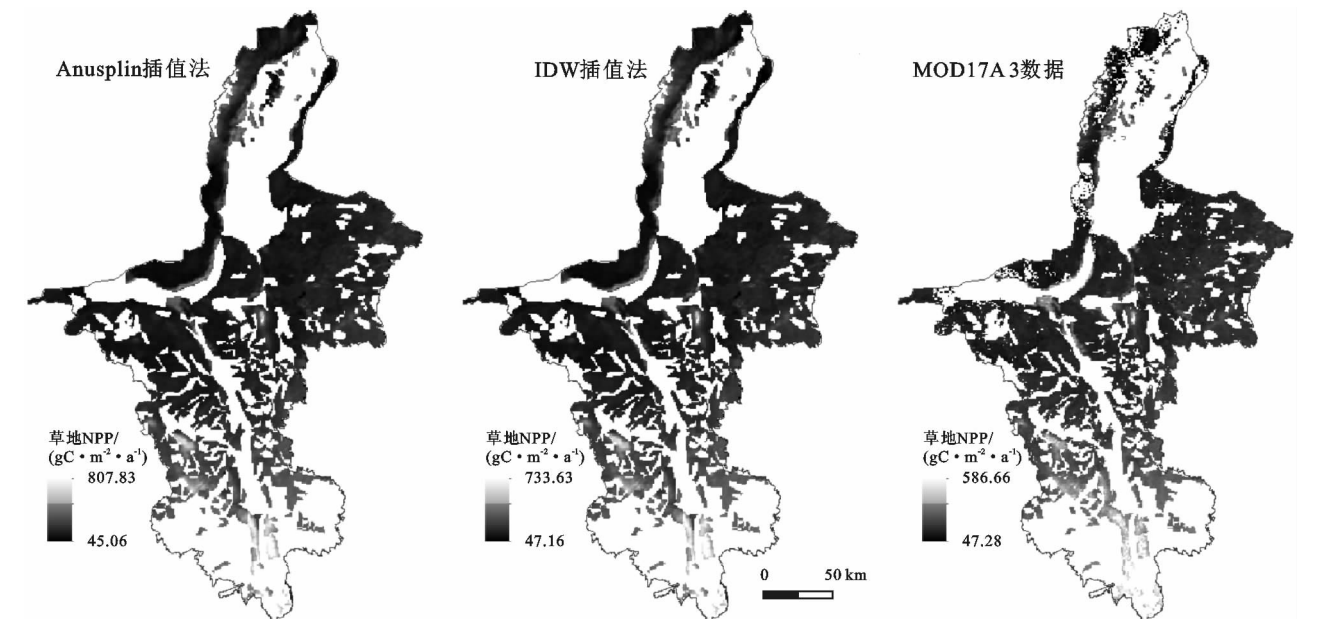


图 4 宁夏草地 NPP 空间分布

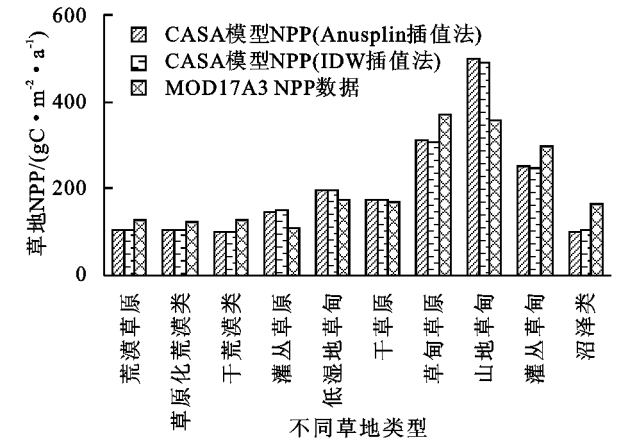


图 5 不同模型模拟的宁夏各草地类型平均 NPP 对比

2.2.3 不同草地类型 NPP 估算结果对比 以全球 MOD17A3 NPP 数据为基准, 对比分析 CASA 模型的估算误差, 对 CASA 模型在宁夏草地 NPP 估算中的可靠性做进一步的研究。通过提取不同 NPP 图像中的对应像元值, 逐像元制作散点图 (图 7), 对比发现基于 Anusplin 和 IDW 插值法获取的气象要素空间数据驱动 CASA 模型而估算的草地 NPP 值均高于 MOD17A3 NPP 数据值, 线性拟合斜率分别为 1.34, 1.30, 与 MOD17A3 NPP 数据的拟合优度 (R^2) 分别为 0.83, 0.82, 即基于两种气象插值方法驱动 CASA 模型在宁夏草地 NPP 估算中的结果相近。二者的拟合优度 (R^2) 仅仅相差不到 0.01, 尽管优势微

弱, 但结果仍然显示基于 Anusplin 插值法获取的气象要素空间数据驱动 CASA 模型的效果要好于基于 IDW 插值的气象要素空间数据。由此可以看出, 在宁夏草地 NPP 估算中, 选择精度较高的 Anusplin 气象要素插值法, 能够提高草地 NPP 的估算精度。

基于以上研究, 选择估算精度整体较高的基于 Anusplin 插值的 CASA 模型与基于 BIOME-BGC 模型在不同草地类型的 NPP 估算中进行深入对比研究。研究分析了 2000—2014 年基于 CASA 模型的 NPP 估算结果与 MOD17A3 NPP 数据间的误差 (表 2)。总体来看, 10 类草地的总体相关性分析结果显示, 基于 Anusplin 插值气象要素估算的 NPP 与 MOD17A3 NPP 数据的相关系数为 0.88 ($p<0.01, n=150$)。从不同草地类型上来看, 在干草原、灌丛草原、干荒漠类草原及荒漠草原的估算中 CASA 模型与 MOD17A3 产品值相关系数最高, 在沼泽类草原估算中效果欠佳, 相关系数未通过显著性检验, 其他类型草地相关性整体在 0.7 以上, 均通过了 $p<0.01$ 的显著性检验。从估算误差分析来看, CASA 模型在干草原的估算误差最小, 荒漠草原估算误差次之, 这两类草原总面积接近宁夏草原面积的 80%, 代表了宁夏大部分的草地生产力; 在沼泽类和山地草甸的估算误差最大, 这两类草地在宁夏面积较小, 在区域尺度的模型估算中产生较大误差属正常情况。

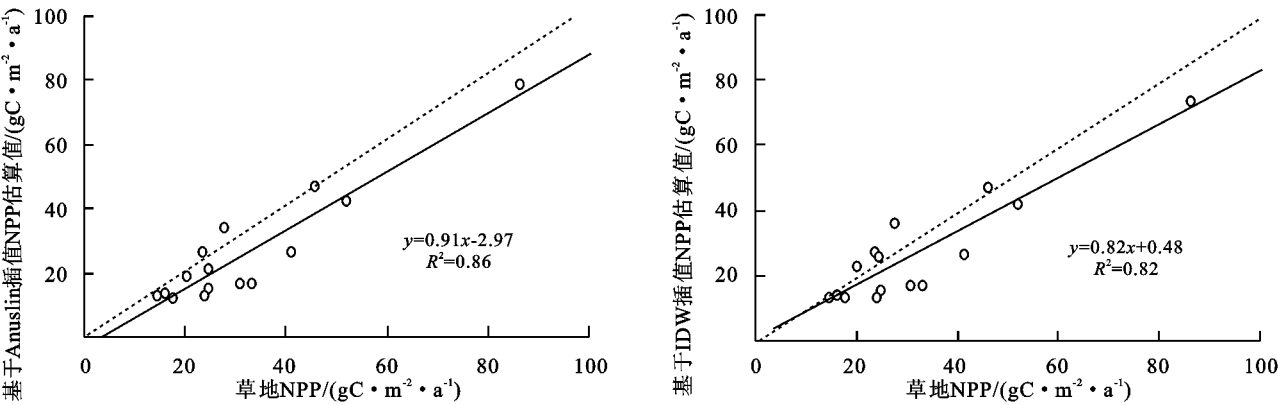


图 6 宁夏草地多年年均 NPP 模拟值与实测值相关性

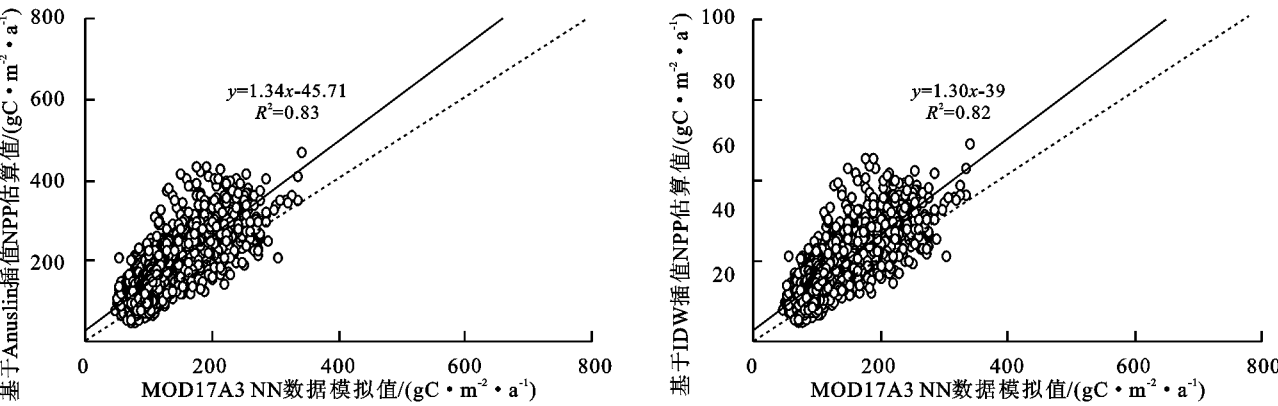


图 7 不同插值算法 NPP 模拟逐像元值散点图

表 2 不同类型草地 CASA 模型估算 NPP 与 MOD17A3 NPP 数据的误差对比

草地类型	R	RMSE	MRE	草地面积占比/%
荒漠草原	0.93**	5.35	0.36	57.0
草原化荒漠类	0.87**	5.24	0.30	9.5
干荒漠类	0.94**	6.10	0.40	1.2
灌丛草原	0.78**	7.48	0.36	4.7
低湿地草甸	0.73**	6.40	0.20	0.4
干草原	0.97**	4.45	0.11	22.9
草甸草原	0.82**	9.12	0.28	0.5
山地草甸	0.85**	14.64	0.42	2.3
灌丛草甸	0.95**	7.97	0.27	1.3
沼泽类	0.33	9.63	0.92	0.3

注：**为 $p<0.01$ ，*为 $p<0.05$ ， $n=15$ 。

3 结论

(1) 在宁夏这样的气象站点稀疏地区,除反距离权重插值法出现了“牛眼效应”之外,其他插值法均能较好模拟宁夏自南向北的空间分布特征;交叉检验显示,Anusplin 气象要素插值相比于传统插值算法明显提高了气象数据插值精度,其中气温插值表现最为明显。

(2) 采用基于不同气象要素插值方法的 CASA 模型对宁夏草地 NPP 进行估算,其估算结果均能反

映宁夏草地 NPP 的空间分布格局;在与多年草地 NPP 实测值及 MOD17A3 NPP 数据草地估算值的对比验证中发现,在全区草地 NPP 估算中,基于 Anusplin 插值的 CASA 模型的模拟值与实测值相关性较高,其模拟值可靠,具有一定的科学性。

(3) 对模型与 MOD17A3 NPP 数据对比研究显示,插值精度较高的 Anusplin 插值法驱动 CASA 模型估算的 NPP 与 MOD17A3 NPP 数据的相关性高,因此,提高气象要素的插值精度在一定程度上能提高 CASA 模型 NPP 的估算精度。

(4) 以 MOD17A3 NPP 数据为真值检验 CASA 模型在宁夏不同草地 NPP 估算的估算精度分析表明,CASA 模型在干草原、灌丛草原、干荒漠类草原及荒漠草原的估算中精度较高,而在沼泽类和山地草甸的估算效果欠佳,其估算精度有待提高。

在 CASA 模型估算精度的对比中,由于实测数据为各个市区的多年草地 NPP 均值的限制,无法从草地类型上进一步对比验证,此为本研究的一大遗憾。但为补充验证数据源在研究中引入了 MOD17A3 NPP 数据进行对比验证,前提假设 MOD17A3 NPP 数据不存在误差,这是一个有限条件假设。因此在模型验证上需注重实测数据的收集,以在后期研究中丰富模型的可行性分析。此外,宁夏草地的时空格局变迁及人

类活动、自然因素与 NPP 波动之间的内在联系需进一步做重点探讨。

参考文献:

- [1] 方精云,柯金虎,唐志尧,等.生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J].植物生态学报,2001,25(4):414-419.
- [2] 蒋高明.陆地生态系统净第一性生产力对全球变化的响应[J].植物资源与环境学报,1995,4(4):53-59.
- [3] Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems[J]. Human Ecology, 1973,1(4):303-332.
- [4] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1995,51(1):74-88.
- [5] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972,9(3):747-766.
- [6] 施新民,黄峰,陈晓光,等.气候变化对宁夏草地生态系统的影响分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):65-69.
- [7] 孙成明,刘涛,田婷,等.基于 MODIS 的南方草地 NPP 遥感估算与应用[J].草业学报,2013,22(5):11-17.
- [8] 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.
- [9] 周广胜,张新时.全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J].植物生态学报,1996,20(1):11-19.
- [10] 潘竟虎,黄克军,李真.2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J].生态学报,2017,37(6):1-12.
- [11] 刘劲松,陈辉,杨彬云,等.河北省年均降水量插值方法比较[J].生态学报,2009,29(7):3493-3500.
- [12] 李军,游松财,黄敬峰.中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J].生态环境学报,2006,15(1):109-114.
- [13] 林忠辉,莫兴国,李宏轩,等.中国陆地区域气象要素的空间插值[J].地理学报,2002,57(1):47-56.
- [14] 关宏强,蔡福,王阳,等.短时间序列气温要素空间插值方法精度的比较研究[J].气象与环境学报,2007,23(5):13-16.
- [15] 许民,王雁,周兆叶,等.长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):327-334.
- [16] 李艳,朱军,胡亚,等.不同插值方法模拟四川省逐月降水量的对比分析[J].水土保持研究,2017,24(1):151-154.
- [17] 伏兵哲,兰剑,李小伟.宁夏天然草地气象因子与草地初级生产力关系研究[J].草地学报,2012,20(3):407-412.
- [18] Kimball J S, White M A, Running S W. BIOME-BGC simulations of stand hydrologic processes for BOREAS [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997,102(D24):29043-29051.
- [19] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls [J]. Earth Interactions, 2000,4(3):1-85.
- [20] 曾慧卿,刘琪璟,冯宗炜,等.基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松(Pinus elliottii)人工林 GPP 和 NPP [J].生态学报,2008,28(11):5314-5321.
- [21] 何丽鸿,王海燕,雷相东.基于 BIOME-BGC 模型的长白落叶松林净初级生产力模拟参数敏感性[J].应用生态学报,2016,27(2):412-420.
- [22] 胡波,孙睿,陈永俊,等.遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区生态系统生产力[J].自然资源学报,2011,26(12):2061-2071.
- [23] 王娟,卓静,何慧娟,等.2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].西北林学院学报,2016,31(5):238-245.
- [24] 王轶虹,史学正,王美艳,等.2001—2010 年中国农田生态系统 NPP 的时空演变特征[J].土壤学报,2017,54(2):319-330.
- [25] 牟乃夏,刘文宝,王海银,等. ArcGIS 地理信息系统教程[M],北京:测绘出版社,2012.
- [26] Franke R. Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1982,8(4):273-281.
- [27] 刘志红, LI Lingtao, Tim R, 等.专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J].气象,2008,34(2):92-100.
- [28] 刘志红, Tim R, McVicar, 等.基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(10):227-234.
- [29] 张美玲,蒋文兰,陈全功,等.基于 CSCS 改进 CASA 模型的中国草地净初级生产力模拟[J].中国沙漠,2014,34(4):1150-1160.
- [30] 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.